

УДК 669.018.44

Н.Н. Трофименко¹, И.Ю. Ефимочкин¹, А.Н. Большакова¹**ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8

Анализ работ по высокоэнтропийным сплавам (ВЭС) показал, что исследования в данной области знаний представляют широкий интерес и являются перспективным направлением для материаловедения будущего. В отличие от обычных сплавов ВЭС состоит из пяти и более элементов, взятых в эквимолярных или эквимольярных концентрациях. Такая компоновка позволяет получать сплавы с высокой энтропией смешения, понижающей образование интерметаллических фаз и способствующей образованию стабильного однофазного раствора замещения с ОЦК- или ГЦК-структурой. Композиции сплавов с высокой энтропией смешения получают методом вакуумно-дугового плавления и механическим легированием. Для создания жаропрочных сплавов из тугоплавких элементов практически значимыми представляются методы порошковой металлургии. Существует большое количество возможных комбинаций составов ВЭС, поэтому огромное значение имеет разработка стратегий получения подходящих композиций, отвечающих требованиям как академических исследований, так и промышленного применения. В статье акцентировано внимание на четырех эффектах, возникающих вследствие структурных особенностей данного типа сплавов. Представлены основные исследования свойств жаропрочных высокоэнтропийных сплавов.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, жаропрочные сплавы, ОЦК- или ГЦК-структура, однофазный твердый раствор, нанокристаллитная структура, фазовый состав, механическое легирование.

N.N. Trofimenko¹, I.Yu. Efimochkin¹, A.N. Bolshakova¹**PROBLEMS OF CREATION AND PROSPECTS FOR THE USE OF HEAT-RESISTANT HIGH-ENTROPY ALLOYS**

The analysis of works on high-entropy alloys shows that research in this field of knowledge is of wide interest and is a promising direction for materials science of the future. In contrast to conventional alloys, the high-entropy alloy consists of five or more elements taken in equiatomic or equimolar concentrations. Such an arrangement makes it possible to obtain alloys with a high entropy of mixing, which reduces the formation of intermetallic phases, and which promotes the formation of a stable single-phase substitution solution with a BCC or FCC arrangements. The preparation of compositions of alloys with high entropy of mixing occurs by the method of vacuum-arc melting and mechanical alloying. The methods of powder metallurgy are practically significant to create high-temperature alloys from refractory elements. There is a huge number of possible combinations of high-entropy alloys. Therefore, it is of great importance to develop strategies for obtaining suitable compositions that meet the requirements of both academic research and industrial applications. The article underlines four effects that arise as a result of structural features in a given type of alloys. Basic investigations of the properties of high-temperature high-entropy alloys are presented.

Keywords: high-entropy alloys, heat-resistant alloys, BCC or FCC arrangement, single-phase solid solution, nanocrystallite structure, phase composition, mechanical alloying.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) в последнее десятилетие привлекли широкое внимание специалистов в связи с демонстрацией их необычных свойств, проявляемых из-за сложного конфигурационного состояния. Поскольку развитие высокотемпературной техники происходит в направлении увеличения рабочих температур, то применение в данной области жаропрочных нике-

левых сплавов не способно обеспечить достижение необходимых технологических параметров [1, 2]. Перспективными с точки зрения свойств являются жаропрочные высокоэнтропийные сплавы. В отличие от традиционно создаваемых сплавов путем легирования одного компонента малыми долями других, в ВЭС основой служат сразу несколько элементов, взятых в количестве не менее пяти с эквимолярной концентрацией каждого

от 5 до 35% (атомн.). Такое соотношение позволяет получать конфигурацию сплава с высокой энтропией смешения, за счет которой происходит подавление образования интерметаллических соединений и которая способствует формированию структур на основе твердых растворов [3]. Количество элементов, их содержание, а также методы их сплавления определяют характеристики и возможности применения разрабатываемых ВЭС. Исследования свойств, проявляемых ВЭС, показывают, что данный тип сплавов может рассматриваться в качестве альтернативы другим перспективным материалам для работы в узлах разрабатываемой высокотемпературной техники [4].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 12. «Металломатричные и полиматричные композиционные материалы («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1, 2].

Материалы и методы

В настоящее время авиационная промышленность является одной из высокотехнологичных отраслей. Анализ направлений развития материалов показывает необходимость исследований в области наукоемких производств для решения важнейших задач по созданию новых авиационных двигателей, способных работать при более высоких температурах, чем имеющиеся на сегодняшний день [1, 5].

Основными промышленно применяемыми материалами в данном направлении являются жаропрочные никелевые сплавы, которые традиционно оптимизируются за счет легирующего комплекса, включающего вольфрам, молибден, хром, кобальт, гафний, титан и ниобий [3–7].

Перспективными также считаются материалы на основе двойных диаграмм Nb–Si и Nb–Mo с дисперсионным упрочнением интерметаллидами [1, 8].

В работе [9] показано, что компоненты, изготовленные из сплавов на основе Ni, в реактивных турбинах, ввиду относительно низкой температуры плавления (~1400°C), требуют постоянного охлаждения, что усложняет не только их конструкцию, но и не позволяет повысить технологические характеристики авиационной техники. Требуемое охлаждение снижает эффективность и создает разрыв между идеальными характеристиками перспективных двигателей и характеристиками существующих в настоящее время двигателей. Материал, способный работать при более высокой температуре, чем жаропрочные никелевые сплавы, будет более эффективным, так как охлаждение можно уменьшить или вообще не применять.

В попытках достижения необходимых свойств исследователи ведут разработки по получению новых композиций сплавов. Одним из таких подходов является концепция повышения термодинамической энтропии путем увеличения количества

компонентов, взятых в определенных пропорциях. Поэтому данные сплавы носят название высокоэнтропийных. Следуя данному подходу, создаются и исследуются жаропрочные варианты ВЭС, которые демонстрируют требуемые механические свойства при высоких рабочих температурах.

Данный тип сплава исследован в работе [10], в которой показано, что высокая энтропия смешения оказывает основное влияние на образование однофазных твердых растворов. Согласно теории, изменение энергии Гиббса можно представить в виде $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$, где G – энергия Гиббса; H – энтальпия; T – абсолютная температура; S – энтропия [11–13]. Термодинамическая энтропия, именуемая еще энтропией смешения, является одним из основных факторов, определяющих состояние равновесия системы. Энтропия в случае чистых элементов зависит от колебательного движения атомов, в сплавах же энтропия смешения складывается из конфигурационной, колебательной, магнитной и электронной составляющих. При этом наибольший вклад, согласно работам [10, 11], для ВЭС, состоящих из пяти и более элементов, вносит конфигурационная энтропия. Согласно уравнению Больцмана $\Delta S_{\text{mix}} = R \ln n$, где R – газовая постоянная; n – число химических элементов в сплаве; энтропия смешения ΔS_{mix} для эквимольных сплавов из 3, 5, 7 и 9 элементов составляет 1,1R; 1,61R; 1,95R и 2,2R Дж/(моль·К) соответственно. Увеличение элементов в сплаве снижает энергию Гиббса из-за роста энтропии смешения. Минимум энергии характеризует переход системы из нестабильного состояния в стабильное.

В работе [14] рассчитана величина потенциала ΔG для ВЭС в сравнении со значениями для интерметаллических соединений. Из исследования следует, что для мультикомпонентной системы Al–Cr–Fe–Ni–Cu с высокой энтропией смешения значения энергии Гиббса (ΔG) ниже, чем у интерметаллидов. Таким образом, с увеличением энтропии смешения возможность образования стабильных неупорядоченных твердых растворов выше, чем для упорядоченных или интерметаллических соединений.

Существуют также исследования, в которых показано, что в ВЭС могут формироваться и интерметаллидные фазы. Это свидетельствует о том, что кроме высокой энтропии существуют другие факторы, влияющие на формирование структуры сплава.

Например, в работах [10, 15] авторы показали, что атомные радиусы элементов (δ), составляющих сплав, должны незначительно отличаться. Необходимой разницей в размерах предполагается интервал $\delta < 8,5\text{--}12\%$.

По причине большого количества элементов, задающих состав матрицы, кроме энтропии следует рассматривать такие факторы влияния на микроструктуру и свойства сплавов, как медленная диффузия, искажение кристаллической решетки и «эффект коктейля».

Медленно протекающая диффузия вносит основной вклад в высокотемпературную прочность, термо- и химическую стабильность при высоких температурах и образование наноструктур сплавов [16–19].

Из-за различия размеров атомов происходит сильное искажение кристаллической решетки сплава, что затрудняет перемещение дислокаций и приводит к упрочнению. В работе [20] выбранные системы ВЭС имеют диапазон напряжений 900–1350 МПа. Теоретический расчет твердости сплава системы Mo–Nb–Ta–V–W по правилу смеси показал результат 1596 МПа, тогда как реальные образцы 5260 МПа. Такая разница объяснена искажениями решетки.

Компоненты, составляющие матрицу ВЭС, оказывают комбинированный эффект на микроструктуру сплава. Он складывается из основных физико-химических свойств элементов и взаимодействий между собой [21]. Таким образом, если требуется получить ВЭС с низкой плотностью, то необходимо использовать элементы с низкой плотностью. Однако вследствие искажения решетки возникает «эффект коктейля», когда увеличение/уменьшение содержания одного элемента приводит к изменению свойств материала [22]. Так, для сплава состава $Al_xCoCrCuFeNi$ с увеличением содержания Al меняется структура и происходит упрочнение. При содержании 0–15% Al происходит формирование ГЦК-решетки, при 15–35% Al – решетки ГЦК+ОЦК [23].

Жаропрочные ВЭС все еще находятся на начальной стадии исследования. К свойствам, которых требуется достичь при разработке, относятся твердость, предел текучести, прочность при разрыве, пластичность и плотность.

Несмотря на такие положительные характеристики, как высокий предел текучести при температурах $>1000^\circ\text{C}$, жаропрочные ВЭС имеют высокую плотность, что ограничивает их применение в некоторых областях. Вследствие того, что такие сплавы в основном состоят из тугоплавких элементов, получают их в основном методами механохимического синтеза, а именно механическим легированием. В исследовании [24] показано, что такой подход позволяет синтезировать металлические порошки состава MoNbTaVW из однофазного ОЦК твердого раствора с нанокристаллической структурой.

Кроме тугоплавких элементов в состав жаропрочных ВЭС могут также входить компоненты с невысокими температурами плавления, если при этом сплав будет сохранять высокую термостойкость.

Результаты и обсуждение

В работе [25] исследовали два жаропрочных ВЭС – составов $Nb_{25}Mo_{25}Ta_{25}W_{25}$ и $V_{20}Nb_{20}Mo_{20}Ta_{20}W_{20}$, полученных вакуумно-дуговым плавлением. Несмотря на то что первый сплав состоит из четы-

рех компонентов, он обладает высокой энтропией смешения. Сплавы показали высокую твердость по Виккерсу: 4,46 и 5,42 ГПа соответственно, плотность составила 13,75 и 12,36 г/см³ соответственно. При испытаниях на сжатие оба сплава демонстрируют высокий предел текучести и умеренную пластичность при температурах 600–1600°C. При этом сплав состава $V_{20}Nb_{20}Mo_{20}Ta_{20}W_{20}$ имеет более низкую деформацию разрушения. В сравнении с промышленно применяемыми сплавами Inconel 718 и Haynes 230 жаропрочные ВЭС при температурах $>600^\circ\text{C}$ демонстрируют более высокие механические свойства. Устойчивость к высокотемпературному размягчению по сравнению с суперсплавами, вероятно, обусловлена медленной диффузией элементов в ВЭС при температурах до 1600°C, что непосредственно связано с высокими температурами плавления компонентов. При этом данные ВЭС при комнатной температуре показали высокую хрупкость.

В работе [26] исследован жаропрочный ВЭС эквиатомного состава MoNbHfZrTi. При испытании на сжатие при комнатной температуре сплав показал высокий предел текучести $\sigma_{0,2}=1719$ МПа и хорошие показатели $\sigma_{0,2}$ при повышенных температурах. Сплав представляет собой однофазный неупорядоченный твердый раствор ОЦК-структуры с плотностью 8,64 г/см³.

В работе [27] исследовали четыре жаропрочных сплава с низкой плотностью составов: NbTiVZr, NbTiV2Zr, CrNbTiZr и CrNbTiVZr с плотностью 6,52; 6,34; 6,67 и 6,57 г/см³ соответственно. Сплавы продемонстрировали падение значений предела текучести при температуре $>600^\circ\text{C}$ – например, с максимального значения 1298 МПа при 25°C до 259 МПа при 1000°C у сплава состава CrNbTiVZr. Остальные сплавы по показателям $\sigma_{0,2}$ не достигли и половины указанных значений при максимальной температуре. При этом сплав состава CrNbTiVZr оказался более хрупким по сравнению с остальными исследуемыми ВЭС – его пластичность увеличивалась с повышением температуры. Исследование микроструктуры показало, что сплав состоит из ОЦК-структуры и фазы Лавеса. Для повышения пластичности при комнатной температуре в работе [27] рекомендовано контролировать количество фазы Лавеса.

В исследовании [28] сплав состава HfNbTaTiZr при комнатной температуре показал предел текучести 928 МПа, продольную деформацию – более 50%; плотность составила 9,94 г/см³; твердость по Виккерсу: 3826 МПа. Микроструктура сплава представляет собой однофазный твердый раствор с ОЦК-решеткой.

Исследуя пластичные жаропрочные ВЭС, авторы работы [29] модифицировали сплав состава HfNbTaTiZr, создав на его основе соединения HfMoTaTiZr и HfMoNbTaTiZr. Оба сплава имеют ОЦК-структуру с присутствием вторичных фаз. Плотность сплавов составила 10,24 и 9,97 г/см³

соответственно. Оба сплава демонстрируют высокую текучесть при комнатной и повышенных температурах. При температуре 1200°C предел текучести сплава состава HfMoNbTaTiZr равен 556 МПа, что в 6 раз выше значений эталонного соединения HfNbTaTiZr [28–30].

В работе [31] исследовали эквивалентный состав NbMoCrTiAl, предел текучести которого при температуре 1200°C составил 105 МПа, максимальная прочность 116 МПа, деформация разрушения >24%. Плотность сплава составила 6,17 г/см³, что ниже, чем у других жаропрочных ВЭС.

В работе [32] синтезирован сплав состава HfNbTiVSi_{0,5} – значения предела текучести и деформации разрушения при испытании на сжатие при комнатной температуре составили 1399 МПа и 10,9% соответственно. При температурах 800 и 1000°C предел текучести равен 875 и 240 МПа соответственно, а удлинение >50% в обоих случаях. Плотность сплава составила 8,60 г/см³. Повышенная прочность при высоких температурах объяснена добавлением кремния, что привело к образованию силицида.

В работе [33] исследовано влияние высокофлюентного ионного облучения наноструктурированного покрытия на базе жаропрочного высокоэнтропийного соединения (Ti, Hf, Zr, V, Nb)N. Предполагая, что ионизирующее облучение будет слабо сказываться на структуре и свойствах данного ВЭС, созданное покрытие подвергали бомбардировке ионами гелия, смоделировав тем самым поведение среды в ядерном реакторе. В результате установлена высокая радиационная стойкость созданного покрытия. После облучения не выявлено существенных структурных и фазовых изменений, все также сохранялся твердый раствор азота в металлической ГЦК-решетке типа NaCl. Наблюдалось также сильное измельчение кристаллитов покрытия до величины 10 нм.

Заключения

Основными недостатками ВЭС из тугоплавких элементов являются высокая плотность и хрупкость. Существующие жаропрочные ВЭС с низкой плотностью не обладают высокой прочностью при высоких температурах, за исключением соединения NbMoCrTiAl, продемонстрировавшего предел текучести 600 МПа при температуре 1000°C, но этот сплав оказался очень хрупким при комнатной температуре. При этом добиться низкой плотности, как, например, у алюминия,

невозможно по причине используемых в композиции сплава элементов с уже высокой плотностью. Необходимо также отметить, что тугоплавкие элементы имеют высокую температуру плавления благодаря сильной ковалентной связи, удерживающей атомы вместе. Поскольку данный тип связи является самым сильным, ковалентная связь способствует высоким прочности и твердости, что делает тугоплавкие элементы хрупкими. С повышением температуры, как правило, повышается и пластичность материалов, так как увеличивается количество металлических связей, а ковалентные – разрушаются тепловыми колебаниями.

Одним из направлений повышения свойств ВЭС могло бы стать легирование их редкоземельными элементами, которые хорошо зарекомендовали себя в используемых в настоящее время традиционных сплавах [34].

Практически не представлены также исследования по упрочнению ВЭС тугоплавкими оксидами иттрия, гафния, циркония и алюминия. В работе [35] авторы экспериментально подтвердили возможность создания дисперсноупрочненных ВЭС, вводя в сплав эквивалентного состава MoNbTaVW оксид иттрия Y₂O₃ в количествах 0,5; 1 и 1,5% (атомн.). Использование оксидов в качестве армирующих элементов позволило бы облегчить формирование дислокационной субструктуры с дальнейшей ее стабилизацией в условиях эксплуатации. Активное влияние на морфологию, дисперсность и характер распределения упрочняющей фазы позволяет получить в дисперсноупрочненных сплавах сочетание свойств, недостижимое в обычных сплавах.

Данные, представленные в работе [33], позволяют прогнозировать использование ВЭС в качестве радиационностойких покрытий на оболочках ТВЭЛ ядерных реакторов, что увеличивает область их применения в высокотехнологичных отраслях.

Использование высокоэнтропийных сплавов в целом представляется перспективным и требует дополнительных исследований как в направлении поиска стратегий создания практически значимых композиций, так и в направлении повышения свойств сплавов для их дальнейшей эксплуатации при повышенных температурах в агрессивных средах. Подводя итог, следует также отметить, что есть достаточные основания для улучшения пластичности жаропрочных ВЭС и существуют возможности для реального применения данных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

3. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 19–36.
4. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 36–52.
5. Чабина Е.Б., Ломберг Б.С., Филонова Е.В., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Изменение структурно-фазового состояния жаропрочного деформируемого никелевого сплава при легировании танталом и рением // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №9. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.03.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-3-3.
6. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г., Пучков Ю.А. Влияние лантана на качество и эксплуатационные свойства монокристаллического жаропрочного никелевого сплава ЖС36-ВИ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №12. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.03.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-2-2.
7. Шеин Е.А. Тенденции в области легирования и микролегирования жаропрочных монокристаллических сплавов на основе никеля (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №3. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.03.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-2-2.
8. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Ефимочкин И.Ю. Высокотемпературные Nb–Si-композиты // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2011. №SP2. С. 164–173.
9. Perepezko J.H. The Hotter the Engine, the Better // *Science*. 2009. Vol. 326. P. 1068–1069.
10. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J. et al. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes // *Advanced Engineering Materials*. 2004. Vol. 6. P. 299–303.
11. Oates W.A. Configurational Entropies of Mixing in Solid Alloys // *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2007. Vol. 28. P. 79–89.
12. Волькенштейн М.В. Энтропия и информации. М.: Наука, 1986. 192 с.
13. Шульце Г. Металлофизика. М.: Мир, 1971. 477 с.
14. Li A., Zhang X. Thermodynamic analysis of the simple microstructure of AlCrFeNiCu high-entropy alloy with multi-principal elements // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2009. Vol. 22. P. 219–224.
15. Yang X., Zhang Y., Liaw P.K. Alloy Design and Properties Optimization of High-Entropy Alloys // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 64. P. 830–838.
16. Hsu C.-Y., Juan C.-C., Wang W.-R. et al. On the superior hot hardness and softening resistance of AlCoCrFeMo0.5Ni high-entropy alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528. P. 3581–3588.
17. Tsai M.-H., Wang C.-W., Tsai C.-W. et al. Thermal Stability and Performance of NbSiTaTiZr High-Entropy Alloy Barrier for Copper Metallization // *Journal of The Electrochemical Society*. 2011. Vol. 158. P. H1161–H1165.
18. Tsai M.-H., Yeh J.-W., Gan J.-Y. Diffusion barrier properties of AlMoNbSiTaTiVZr high-entropy alloy layer between copper and silicon // *Thin Solid Films*. 2008. Vol. 516. P. 5527–5530.
19. 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.
20. Tsai M.-H., Yeh J.-W. High-Entropy Alloys: A Critical Review // *Materials Research Letters*. 2014. Vol. 2. P. 107–123.
21. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys // *Annales de Chimie Science des Materiaux*. 2006. Vol. 31. P. 633–648.
22. Salishchev G.A., Tikhonovsky M.A., Shaysultanov D.G. Effect of Mn and V on structure and mechanical properties of high-entropy alloys based on CoCrFeNi system / *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. Vol. 591. P. 11–21.
23. Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S. High Entropy Alloys. Elsevier, 2014. 218 p.
24. Юркова А.И., Чернявский В.В., Кравченко А.И. Получение нанокристаллических тугоплавких Nb–Mo–Ta–W–V и Nb–Mo–Ta–W–Hf высокоэнтропийных сплавов методом механического легирования // *Кафедра высокотемпературных материалов и порошковой металлургии: [официальный сайт]*. URL: http://compnano.kpi.ua/pdf_files/sams-2014n/sams-2014-nat-p-150.pdf (дата обращения: 12.03.2018).
25. 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. 19. P. 698–706.
26. Guo N.N., Wang L., Luo L.S. et al. Microstructure and mechanical properties of refractory MoNbHfZrTi high-entropy alloy // *Materials & Design*. 2015. Vol. 81. P. 87–94.
27. Senkov O.N., Senkova S.V., Miracle D.B., Woodward C. Mechanical properties of low-density, refractory multi-principal element alloys of the Cr–Nb–Ti–V–Zr system // *Materials Science and Engineering: A*. 2013. Vol. 565. P. 51–62.
28. Senkov O.N., Scott J.M., Senkova S.V. et al. Microstructure and room temperature properties of a high-entropy TaNbHfZrTi alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2011. Vol. 509. P. 6043–6048.

29. Juan C.-C., Tsai M.-H., Tsai C.-W. et al. Enhanced mechanical properties of HfMoTaTiZr and HfMoNbTaTiZr refractory high-entropy alloys // *Intermetallics*. 2015. Vol. 62. P. 76–83.
30. Senkov O.N., Scott J.M., Senkova S.V. et al. Microstructure and elevated temperature properties of a refractory TaNbHfZrTi alloy // *Journal of Materials Science*. 2012. Vol. 47. P. 4062–4074.
31. Chen H., Kauffmann A., Gorr B. et al. 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. P. 206–215.
32. Zhang Y., Liu Y., Li Y. et al. Microstructure and mechanical properties of a refractory HfNbTiVSi0.5 high-entropy alloy composite // *Materials Letters*. 2016. Vol. 174. P. 82–85.
33. Комаров Ф.Ф., Погребняк А.Д., Константинов С.В. Радиационная стойкость высокоэнтروпийных наноструктурированных покрытий (Ti, Hf, Zr, V, Nb)N // *Журнал технической физики*. 2015. Т. 85. Вып. 10. С. 105–110.
34. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.03.2018).
35. Yang S., Khosravi E. An Integrated Study on a Novel High Temperature High Entropy Alloy. Pittsburgh: Southern University and A&M College. 2016. 41 p. Pittsburgh, PA URL: https://www.netl.doe.gov/File%20Library/Events/2016/crosscutting-ree/track-a-041816/Presentation_20160418_1100A_FE0011550_SU.pdf (дата обращения: 12.03.2018).