

Машиностроение. Металлургия



DOI 10.52209/1609-1825_2024_3_3

УДК 669.11

Информационный анализ развития и проблем высокоэнтروпийных сплавов

¹КВОН Светлана Сергеевна, к.т.н., профессор, svetlana.1311@mail.ru,
¹ИСАГУЛОВ Аристотель Зейнуллинович, д.т.н., профессор, aristotel@kstu.kz,
¹*АРИНОВА Сания Каскатаевна, PhD, преподаватель, sanya_kazah@mail.ru,
¹АУБАКИРОВ Дастан Рахметтолаевич, PhD, зав. кафедрой, dastan_kstu@mail.ru@mail.ru,
¹НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»,
пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан,
*автор-корреспондент.

Аннотация. Проведен информационный анализ развития и проблем высокоэнтропийных и квазивысокоэнтропийных сплавов. Проанализировано 30 источников, являющихся фундаментальными работами или новейшими разработками в этой области. Показано, что, в отличие от первых представлений, структура ВЭС может быть также многофазной, включая фазы внедрения. Анализ показал, что развитие ВЭС на базе систем d-переходных металлов, по сути, является следующим шагом развития высоколегированных сталей и сплавов аустенитного, мартенситно-старееющего классов или ДН-сталей. Основная проблема производства ВЭС – использование высокочистых металлов, что обуславливает высокую стоимость ВЭС. Предлагается решение этой проблемы частичной заменой чистых металлов соответствующими ферросплавами, что значительно упрощает технологию выплавки и снижает стоимость.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, структура, фаза, интерметаллидные соединения, свойства, сплав Кантора.

Введение

В настоящее время возможности получения и улучшения свойств сталей и сплавов традиционными методами практически ис-

черпаны, введение дополнительных видов обработки требует значительных как временных, так и материальных инвестиций.

В связи с этим современным трендом

получения уникальных эксплуатационных свойств деталей является разработка нового класса сплавов материалов – высокоэнтروпийных сплавов (ВЭС).

При создании ВЭС, в отличие от традиционных способов, используется совершенно иной принцип создания сплава. Состав сплава содержит минимум 5 компонентов, предпочтительно в эквиатомной концентрации или при содержании каждого из элементов от 35 до 5%. Идея создания ВЭС основана на термодинамическом принципе повышения энтропии при смешении различных компонентов. Этот процесс сопровождается уменьшением свободной энергии, что повышает вероятность образования простых структур типа твердых растворов замещения повышенной стабильности. На сегодняшний день множество исследований [1-7] посвящено исследованию основных принципов создания ВЭС, их структуре и свойствам.

Исследовательская часть и обсуждение результатов

Работа [1] посвящена масштабному обзору ВЭС, начиная с истории возникновения ВЭС, вопросов термодинамики, классификации структуры ВЭС и заканчивая обзором механических свойств ВЭС. Согласно [2], уникальность свойств ВЭС объясняется наличием 4 «эффектов»: эффект высокой энтропии, эффект искажения решетки; эффект медленной диффузии и эффект «коктейля».

Эффект высокой энтропии – это гипотеза, объясняющая повышение свойств ВЭС образованием повышенного значения энтропии в многокомпонентной системе с эквиатомной концентрацией или в системе минимум с 5 компонентами. Предполагается, что энтропия смешения в таких системах намного выше, чем в обычных твердых растворах или при образовании интерметаллидных фаз.

Теория эффекта искажения решетки основана на том факте, что при формировании структуры ВЭС участвуют атомы разной природы, не подчиняющихся классическим правилам формирования твердых растворов (правила Юм-Розери). На рисунке 1 приведена схема, иллюстрирующая расположение атомов и вызванные искажения кристаллической решетки в классическом сплаве и ВЭС.

Рисунок наглядно иллюстрирует тот факт, что в «классическом» сплаве атомы других элементов окружены атомами элемента-растворителя. В структуре ВЭС доминирующий элемент отсутствует вовсе, атомы всех компонентов занимают равноценные позиции, что и приводит к повышению энтропии.

Предполагается, что диффузия в ВЭС протекает медленно [3]. Это предположение

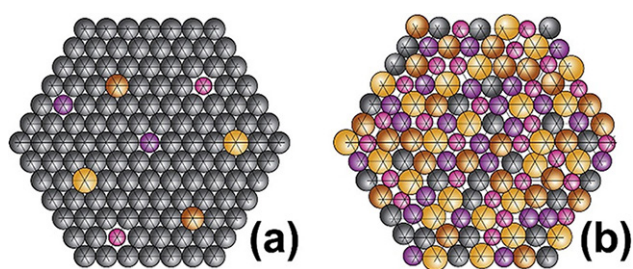


Рисунок 1 – Иллюстрация к расположению атомов в «классическом» сплаве (а) и ВЭС (б) [1]

основано на наблюдении, что при кристаллизации ВЭС формируются нанокристаллические и аморфные фазы, которые являются достаточно стабильными.

Термин «эффект коктейля» был впервые использован в работе [4]. Он был использован для описания свойств различных материалов, таких как аморфные металлические стекла и ВЭС. Смысл заключается в том, что смешивании нескольких компонентов имеет место синергический эффект, в результате действия которого свойства конечного продукта значительно превосходят свойства каждого компонента, взятого в отдельности. Именно эффектом «коктейля» объясняются одновременное повышение прочности и пластичности в ВЭС.

На рисунке 2 показана разница с точки зрения изменения термодинамических параметров, таких как энергия Гиббса и энтальпия при образовании регулярных и субрегулярных твердых растворов.

Из рисунка видно, что минимум свободной энергии приходится именно на эквиатомный состав в регулярных растворах; в субрегулярных растворах минимум свободной энергии (наиболее стабильная фаза) приходится на составы, смещенные от эквиатомной концентрации. Именно этим фактом объясняется то обстоятельство, что в субрегулярных растворах эквиатомная концентрация встречается редко.

При термодинамическом анализе ВЭС достаточно часто встречается мнение [4], что при формировании ВЭС нарушается одно из основных правил термодинамики – правило Гиббса. Однако автор работы [1] однозначно показывает, что правило Гиббса дает представление о максимальном количестве фаз, находящихся в равновесии на данный момент. При анализе бинарных систем равновесие в микроструктуре наблюдается при комнатной температуре. Однофазные области твердых растворов по площади значительно больше, чем, например, интерметал-

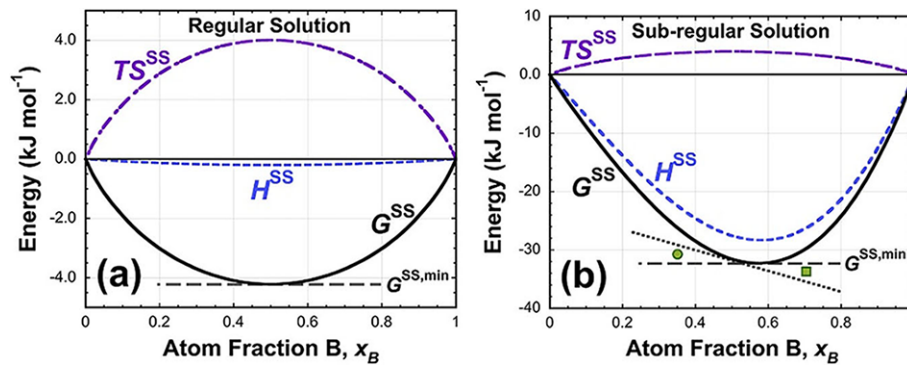


Рисунок 2 – Иллюстрация к изменению термодинамических характеристик при образовании регулярных (а) и субрегулярных растворов [1]

лидные включения, что и приводит к выводу о существовании одной-двух фаз в сплаве. В более сложных системах, как ВЭС, получить максимальное количество фаз согласно правилу Гиббса представляется практически маловероятным, поэтому при формировании фазовой структуры ВЭС следует ожидать числа фаз, меньшего, чем согласно правилу Гиббса.

Однако этот факт не нарушает его, а, скорее, подтверждает возможность образования других фаз в ВЭС помимо твердых растворов. В первых исследованиях по ВЭС предполагалось, что уникальные свойства ВЭС обусловлены существованием твердого раствора со значительным искажением решетки, но при этом обладающим термодинамической стабильностью.

На сегодняшний день наиболее распространенной классификацией ВЭС является классификация по элементам [1,3]. Первая группа включает сплавы на основе d-переходных металлов. По крайней мере, 4 элемента из таких элементов, как Al, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Ti и V, входят в состав ВЭС этой группы. Классическим является сплав Кантора [5], основанный на системе CoNiCrFeMn.

Надо отметить, что по распространенности элементов, входящих в состав ВЭС, первым является железо, а затем марганец. В более поздних работах [6] исследуются сплавы на основе сплава Кантора с введением дополнительных элементов, таких как V, Mo, B, Cu и другие. Сплавы этой системы можно рассматривать как следующий шаг развития высоколегированных сталей, таких как аустенитные, мартенситные, стали с ДН-упрочнением и другие. Очевидно, что сплавы этой группы вызывают наибольший интерес исследователей, т.к. эти сплавы при определенных условиях уже могут иметь коммерческую привлекательность и конкретные области применения.

Вторая группа ВЭС основана на тугоплавких металлах, таких как Cr, Hf, Mo, Ti, V, Ta, W, Zr. Надо отметить, что сплавы этой системы встречаются в литературе значительно реже, согласно оценке [1] они составляют примерно 7% от всего объема исследованных ВЭС. Это обстоятельство можно объяснить: во-первых, повышенной сложностью изготовления, обусловленной высокой температурой плавления компонентов; во-вторых, меньшей доступностью исходных элементов.

Группа ВЭС, основанная на системе легких элементов, таких как Al, Be, Mg, Ti, Zn и др., связана с необходимостью получения новых материалов с низкой плотностью. Исследованию свойств и разработке сплавов этой группы посвящены такие работы, как [7], в которой рассматриваются ВЭС на основе системы AlFeMgTiZn. Как показали авторы этого исследования, ВЭС на основе данной системы, полученные из порошковых материалов методом механического легирования, демонстрируют высокую твердость и прочность при низкой плотности.

Авторы [8] исследовали структуру ВЭС на основе системы AlMgLiZnCu/Sn и показали, что структура является многофазной и содержит не только большую долю неупорядоченного твердого раствора, но и значительное количество интерметаллидных соединений, что приближает эти сплавы к структуре классических сплавов.

Сплавы следующей группы основаны на системе AlCuMnNiSnZn и представляют собой легированные бронзы и латуни. Принцип их создания – создание твердых растворов с учетом эквивалентной концентрации, поэтому их состав можно выразить общей формулой $Al x Sn y Zn z [CuMnNi] (1-xyz)$ [9].

В работе [8] было отмечено, что увеличение содержания бора в сплавах группы Mo-V привело к снижению термической ста-

бильности аморфной матрицы. Кроме того, наблюдалась четкая зависимость между микротвердостью и содержанием бора: в сплавах системы Mo-B наблюдалось снижение твердости на 30 HV, а у сплавов системы V-B – увеличение твердости с 815 до 960 HV с увеличением содержания бора.

Последняя группа ВЭС согласно классификации, предложенной в [1], основана на металлах Ag, Au, Co, Cr, Cu, Ni, Pd, Pt, Rh и Ru. Сплавы этой системы предназначены, в основном, для катализа. Эти сплавы исследованы довольно мало, из последних работ можно упомянуть исследование [10], посвященное созданию сплава состава $Cu_{30}Au_{23}Pt_{22}Pd_{25}$, причем исследование направлено на создание пористой структуры, что связано с предполагаемым применением как катализатора.

Важнейшим вопросом при исследовании ВЭС и их структуры является вопрос о возможных фазах, формирующихся в ВЭС. Начальное представление о структуре ВЭС основывалось на мнении, что в большинстве ВЭС формируется однофазная структура твердого раствора замещения с простой решеткой типа ГЦК или ОЦК. Однако последние исследования [1, 8] показали, что в структуре ВЭС могут присутствовать и другие фазы, такие как интерметаллидные соединения, электронные соединения, причем, чем больше в составе элементов, тем выше количество фаз, что согласуется с правилом Гиббса.

Наиболее распространенными и, соответственно, наиболее исследованными фазами являются: твердые растворы (SS), твердые растворы и интерметаллиды (SS+IM) и только интерметаллиды (IM) (рисунок 3).

Как видно из рисунка 3 наиболее распространенными фазами в ВЭС являются неупорядоченные твердые растворы с ГЦК- или

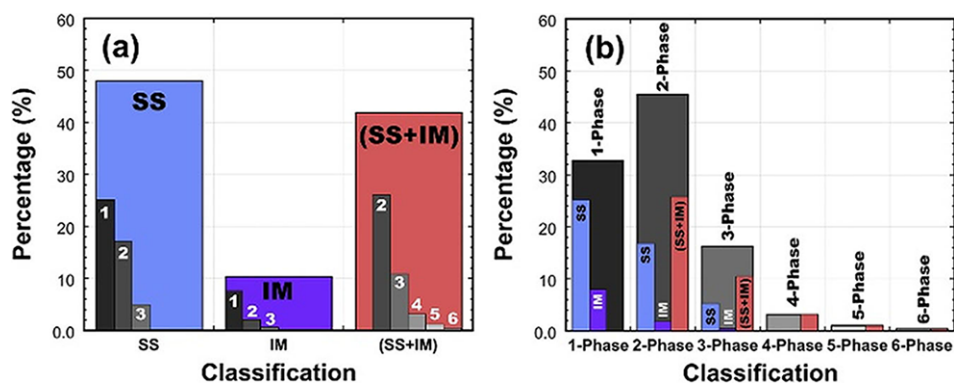
ОЦК-решеткой, интерметаллидные фазы типа фаз Лавеса и упорядоченные IM-фазы B2. Интерметаллидные соединения типа ГПУ встречается очень редко, как и другие электронные соединения.

Надо отметить, что анализ распространения фаз в ВЭС, проведенный в работе [1], показал, что распространенное мнение об однофазности структуры ВЭС является заблуждением. Действительно, структура многих ВЭС представлена одной фазой, но еще больше встречаются ВЭС с двухфазной структурой, также имеют место и более многофазные структуры.

Типичными однофазными структурами с ГЦК-решеткой являются сплавы Кантора, т.е. ВЭС, основанные на системе d-переходных металлов. Последующие исследования [3, 6, 7] показали, что легирование такими элементами, как V, Cu, Ti, дают новые возможности для благоприятных фазовых трансформаций и, следовательно, возможности управления структурой и свойствами сплавов.

В связи с тем, что для многих ВЭС используются тугоплавкие металлы, то в качестве способа получения сплава часто используется механическое сплавление в шаровых планетарных мельницах. Процесс заключается в измельчении чистых порошковых металлов до состояния наночастиц. Таким способом получают, например, сплавы системы FeCoNiX_Y, где в качестве XY выступают такие металлы, как Cr, V, Hf, Ti.

Достаточно распространенным методом получения ВЭС является плазменное спекание. Такой метод позволяет избежать проблем, связанных с явлением слипания при механическом легировании порошковых материалов. Такой метод получения ВЭС использовался в работах [11, 12] с использованием порошков металлов.



а – по типу фаз; б – по количеству фаз [1]

Рисунок 3 – Классификация структур ВЭС

Другим высокотехнологичным способом получения ВЭС является метод магнетронного распыления [13, 14]. Такой метод позволяет получать ВЭС в виде тонких пленок или покрытий на подложках.

Проведенный краткий анализ получения ВЭС и основных направлений развития составов и свойств позволяет сформулировать следующие выводы:

- в большинстве случаев для получения ВЭС используются порошки чистых металлов;

- для получения ВЭС используются достаточно сложные технологии, такие как плазменное спекание, магнетронное распыление и пр.;

- наибольший интерес с точки зрения коммерческой привлекательности и промышленного использования представляют ВЭС на основе систем d-переходных металлов;

- развитие ВЭС на базе систем d-переходных металлов, по сути, является следующим шагом развития высоколегированных сталей и сплавов аустенитного, мартенситно-старееющего классов или ДН-сталей;

- структура ВЭС может быть представлена различными фазами, такими, как твердые растворы с ГЦК- или ОЦК-решеткой, интерметаллидными фазами, включая фазы Лавеса и электронные соединения;

- термодинамика ВЭС подчиняется правилу Гиббса, но при этом в структуре чаще присутствует минимальное количество возможных фаз или меньше, чем максимальное согласно правилу Гиббса.

Надо отметить, что общим недостатком всех перечисленных ВЭС является их высокая стоимость по сравнению с традиционными материалами. Это связано как с шихтой, т.к. ВЭС выплавляются из чистых металлов, так и особенностями выплавки, которая

включает обязательный переплав, ускоренную кристаллизацию и другие методы повышения гомогенности структуры.

Одним из возможных путей решения этих проблем может быть создание квазивысокоэнтропийных сплавов (КВЭС), принцип создания которых основан на энтропийном подходе, но с менее жесткими требованиями по шихте и составу. Такой термин, например, используется в работах [15].

Авторами данной работы были проведены начальные исследования по созданию КВЭС путем частичной замены чистых металлов в шихте на соответствующие ферросплавы. В лабораторных условиях был выплавлен аналог сплава Кантора с использованием следующей шихты: ферромарганец марки FeMn80C05 (ГОСТ4755-91), феррохром марки ФХ001А ГОСТ 4757-91, металлический никель марки Н-1у (ГОСТ 849-97) и металлический кобальт марки К1Ау (ГОСТ 123-2008). В результате был получен опытный сплав, состав которого приведен в таблице 1.

Далее на образцах были изучены микротвердость и предел прочности, результаты приведены в таблице 2.

Сравнение составов и исследованных свойств показывает принципиальную возможность получения сплава, близкого к КВЭС, с использованием не только чистых металлов, но и ферросплавов.

Очевидно, что частичное использование ферросплавов в качестве компонентов шихты позволяет снизить температуру выплавки и повысить коммерческую привлекательность сплава за счет более низкой стоимости шихтовых материалов.

Заключение

Информационный анализ работ по созданию ВЭС показал перспективность иссле-

Таблица 1 – Химический состав опытного сплава и сплава сравнения

№	Элемент, %	Fe	Cr	Mn	Co	Ni	Si+ ост
1	Опытный	15,3	23,3	22,4	19,1	19,2	0,70
2	Сплав Кантора	20,06	20,64	19,46	19,87	19,97	-

Таблица 2 – Результаты исследования микротвердости и предела прочности

№	Образец	Микротвердость, НВ	Предел прочности, МПа
1	Опытный	130	430
2	Сплав Кантора	136	443

дований ВЭС на базе переходных металлов. Создание ВЭС на данных системах можно рассматривать как следующий шаг развития высоколегированных сталей и сплавов аустенитного, мартенситно-старееющего классов или ДН-сталей. Одним из путей решения основной проблемы ВЭС может быть создание квазивысокоэнтропийных сплавов (КВЭС), т.е. сплавов, созданных на основе энтропийного подхода, но с менее жесткими требованиями по составу. Проведенные исследования показали, что частичная за-

мена чистых металлов в шихте на соответствующие ферросплавы позволяет получить сплав, близкий по составу и свойствам к сплву Кантора.

Данные исследования проведены в рамках реализации программы Комитета науки МОН РК BR21882240 «Создание квазивысокоэнтропийного сплава с использованием казахстанского сырья и технологии производства прецизионных деталей на его основе».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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
2. J.-W. Yeh // Recent Progress in High Entropy Alloys // Ann. Chim. Sci. Mat., 31 (2006), pp. 633-648.
3. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J., Gan J.-Y., Chin Ts.-Sh., Shun T.-Ts., Tsau Ch.-H., Chang Sh.-Y. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principle Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes // Advanced Engineering Materials, 2004, 6 no. 8, 299-303.
4. Y. Zhang, T.T. Zuo, Z. Tang, M.C. Gao, K.A. Dahmen, P.K. Liaw, Z.P. Lu // Microstructures and properties of high-entropy alloys // Prog. Mat. Sci., 61 (2014), pp. 1-93.
5. Обзор исследований сплавов, разработанных на основе энтропийного подхода / Z.B. Bataeva, A.A. Ruktuev, I.V. Ivanov, A.B. Jurgin, I.A. Bataev // Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty). – 2021. – T. 23, no. 2. – Pp. 116-146. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146.
6. 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.
7. 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.2013.03.018.7
8. J.-W. Yeh // Recent Progress in High Entropy Alloys // Ann. Chim. Sci. Mat., 31 (2006), pp. 633-648.
9. C.-J. Tong, M.-R. Chen, S.-K. Chen, J.-W. Yeh, T.-T. Shun, S.-J. Lin, S.-Y. Chang
10. 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.
11. Kochetov N.A., Rogachev A.S., Shhukin A.S., Vadchenko A.S. i dr. // Mehanicheskoe splavlenie mnogokoponentnoj poroshkovej smesi Fe-Cr-Co-Ni-Mn i ee jelektroiskrovoe plazmennoe spekanie dlja polchenija kompaktnogo vysokojentropijnogo materiala // Izvestija VUZov. Poroshkovaja metallurgija i funkcional'nye pokrytija.
12. 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.
13. N.N. Trofimenko, I.Ju. Efimochkin, A.N. Bol'shakova // Problemy sozdaniya i perspektivy ispol'zovanija zharoprochnyh vysokojentropijnyh spлавov // Aviacionnye materialy i tehnologii, 2018, no. 2 (51), pp. 3-8.
14. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys // Entropy. – 2014. – Vol. 16 (9). – Pp. 4749-4768. – DOI: 10.3390/e16094749
15. Yang, L.; Li, Y.; Wang, Z.; Zhao, W.; Qin, C. // Nanoporous Quasi-High-Entropy Alloy Microspheres // Metals 2019, 9, 345. <https://doi.org/10.3390/met9030345>

Жоғары энтропиялық қорытпалардың дамуы мен проблемарына ақпараттық талдау

¹КВОН Светлана Сергеевна, т.ғ.к., профессор, svetlana.1311@mail.ru,

¹ИСАГУЛОВ Аристотель Зейнуллинович, т.ғ.д., профессор, aristotel@kstu.kz,

^{1*}АРИНОВА Сания Қасқатайқызы, PhD, оқытушы, sanya_kazah@mail.ru,

¹АУБАКИРОВ Дастан Рахметтолаевич, PhD, кафедра меңгерушісі, dastan_kstu@mail.ru@mail.ru,

¹«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Н. Назарбаев даңғылы, 56, Қарағанды, Қазақстан,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Жоғары энтропиялық және квази-жоғары энтропиялық қорытпалардың дамуы мен проблемаларына ақпараттық талдау жүргізілді. Осы саладағы іргелі жұмыстар немесе соңғы әзірлемелер болып табылатын 30 дереккөз талданды. Алғашқы көріністерден айырмашылығы, ЖЭҚ құрылымы енгізу фазаларын қоса алғанда, көп фазалы болуы мүмкін екендігі көрсетілген. Талдау көрсеткендей, d-өтпелі металл жүйелеріне негізделген ЖЭҚ-ті дамыту, шын мәнінде, аустениттік, мартенситтік-қартаю кластары немесе DH-болаттардың жоғары легіріленген болаттары мен қорытпаларын дамытудың келесі қадамы болып табылады. ЖЭҚ өндірісінің негізгі проблемасы-жоғары таза металдарды пайдалану, бұл ЖЭС-тің жоғары құнын анықтайды. Бұл мәселені шешу таза металдарды тиісті ферроқорытпалармен ішінара ауыстыру арқылы ұсынылады, бұл балқыту технологиясын едәуір жеңілдетеді және құнын төмендетеді.

Кілт сөздер: жоғары энтропиялық қорытпалар, құрылымы, фазасы, металлді қосылыстар, қасиеттері, Кантор қорытпасы.

Information Analysis of the Development and Problems of High-entropy Alloys

¹KVON Svetlana, Cand. of Tech. Sci., Professor, svetlana.1311@mail.ru,

¹ISAGULOV Aristotle, Dr. of Tech. Sci., Professor, aristotel@kstu.kz,

^{1*}ARINOVA Sania, PhD, Lecturer, sanya_kazah@mail.ru,

¹AUBAKIROV Dastan, PhD, Head of Department, dastan_kstu@mail.ru@mail.ru,

¹NPJSC «Abylqas Saginov Karaganda Technical University», N. Nazarbayev Avenue, 56, Karaganda, Kazakhstan,

*corresponding author.

Abstract. An information analysis of the development and problems of high-entropy and quasi-high-entropy alloys is carried out. 30 sources have been analyzed, which are fundamental works or the latest developments in this field. It is shown that, unlike the first representations, the structure of the wind farm can also be multiphase, including the phases of implementation. The analysis showed that the development of wind farms based on d-transition metal systems is, in fact, the next step in the development of high-alloy steels and alloys of austenitic, martensitic-aging classes or DH-steels. The main problem of WPP production is the use of high-purity metals, which causes the high cost of WPP. A solution to this problem is proposed by partially replacing pure metals with appropriate ferroalloys, which will significantly simplify the smelting technology and reduce the cost.

Keywords: high-entropy alloys, structure, phase, intermetallic compounds, properties, Cantor alloy.

REFERENCES

1. 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
2. J.-W. Yeh // *Recent Progress in High Entropy Alloys* // *Ann. Chim. Sci. Mat.*, 31 (2006), pp. 633-648.
3. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J., Gan J.-Y., Chin Ts.-Sh., Shun T.-Ts., Tsau Ch.-H., Chang Sh.-Y. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principle Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes // *Advanced Engineering Materials*, 2004, 6 no. 8, 299-303.
4. Y. Zhang, T.T. Zuo, Z. Tang, M.C. Gao, K.A. Dahmen, P.K. Liaw, Z.P. Lu // *Microstructures and properties of high-entropy alloys* // *Prog. Mat. Sci.*, 61 (2014), pp. 1-93.
5. Обзор исследований сплавов, разработанных на основе энтропийного подхода / Z.B. Bataeva, A.A. Ruktuev, I.V. Ivanov, A.B. Jurgin, I.A. Bataev // *Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty)*. – 2021. – Т. 23, no. 2. – Pp. 116-146. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146.
6. 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.
7. 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.2013.03.018.7
8. J.-W. Yeh // *Recent Progress in High Entropy Alloys* // *Ann. Chim. Sci. Mat.*, 31 (2006), pp. 633-648.
9. C.-J. Tong, M.-R. Chen, S.-K. Chen, J.-W. Yeh, T.-T. Shun, S.-J. Lin, S.-Y. Chang
10. 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.
11. Kochetov N.A., Rogachev A.S., Shhukin A.S., Vadchenko A.S. i dr. // *Mehanicheskoe splavlenie mnogokoponentnoj poroshkovej smesi Fe-Cr-Co-Ni-Mn i ee jelektroiskrovoe plazmennoe spekanie dlja polchenija kompaktnogo vysokojentropijnogo materiala* // *Izvestija VUZov. Poroshkovaja metallurgija i funkcional'nye pokrytija*.
12. 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.
13. N.N. Trofimenko, I.Ju. Efimochkin, A.N. Bol'shakova // *Problemy sozdaniya i perspektivy ispol'zovanija zharoprochnyh vysokojentropijnyh splavov* // *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 3-8.
14. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys // *Entropy*. – 2014. – Vol. 16 (9). – Pp. 4749-4768. – DOI: 10.3390/e16094749
15. Yang, L.; Li, Y.; Wang, Z.; Zhao, W.; Qin, C. // *Nanoporous Quasi-High-Entropy Alloy Microspheres* // *Metals* 2019, 9, 345. <https://doi.org/10.3390/met9030345>