

Геннадий Алексеевич Салищев^{1*}

¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

*Salishchev_g@bsu.edu.ru

СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ

В докладе представлены данные о новой стратегии легирования сплавов - высокоэнтропийных сплавах (ВЭС), заключающейся в создании комбинации из нескольких базовых элементов в эквиатомной или близкой к ней концентрации. Дана классификация ВЭСов по химическому и фазовому составу. Анализируется структурно-фазовое состояние и физико-механические свойства сплавов. Показана возможность разработки на основе ВЭС высокопрочных сплавов, сплавов со специальными свойствами: хладо-, коррозионно-, износо- и радиационностойких, жаропрочных, магнитных и каталитических. Приведены примеры сплавов, представляющих практический интерес.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, структура, свойства, прочность, пластичность, жаропрочность, износостойкость, коррозия, магнитные свойства, радиационная стойкость

Gennady A. Salishchev

STRUCTURE, PROPERTIES AND PRACTICAL APPLICATION OF HIGH- ENTROPY ALLOYS

The report presents data on a new alloying strategy - high-entropy alloys (HEA), which consists in creating a combination of several basic elements in equiatomic or close-to-equiatomic concentrations. A classification of HEAs by chemical and phase composition is given. The structural-phase state and physical-mechanical properties of alloys are analyzed. The possibility of developing high-strength alloys, alloys with special properties based on HEA is shown: cold-, corrosion-, wear- and radiation-resistant, heat-resistant, magnetic and catalytic. Examples of alloys of practical interest are given.

Key words: high-entropy alloys, structure, properties, strength, ductility, heat resistance, wear resistance, corrosion, magnetic properties, radiation resistance

Согласно исходному определению, высокоэнтропийные сплавы (ВЭСы) – это многокомпонентные сплавы, состоящие из 5 или более компонентов взятых в приблизительно эквиатомных пропорциях (5-35 ат.%) [1]. Термин “высокоэнтропийные”, согласно этому определению, исходит из предполагаемого высокого уровня конфигурационной энтропии. Однако, последующие исследования выявили отсутствие ярко выраженного влияния

величины конфигурационной энтропии на структуру ВЭСов. Малое влияние конфигурационной энтропии, очевидно, может быть связано с большими на порядок величинами энтальпии образования интерметаллидных фаз.

Интерес к ВЭСам связан с освоением сплавов, находящихся в слабоизученных центральных областях многокомпонентных фазовых диаграмм, которые могут обладать неожиданными структурами и свойствами. Так, например, известны ВЭСы с относительно стабильной однофазной структурой на основе твердого раствора. Важнейшая особенность твердого раствора в ВЭСах в том, что каждый атом какого-либо элемента окружен чужеродными атомами других элементов. Возникающая из-за этого дисторсия кристаллической решетки влияет как на механические, так и электрические, оптические и химические свойства. С другой стороны, созданное искажениями поле упругих напряжений воздействует на развитие диффузионно-контролируемых фазовых превращений, тормозя диффузию, и влияя на зарождение, рост, распределение и морфологию фаз, повышая их стабильность при высоких температурах [2]. И еще одно качество, характерное для ВЭСов, получившее название «коктейль» эффект [3], проявляющееся в том, что взаимодействие компонентов в образующемся неупорядоченном твердом растворе может оказывать более сильное влияние на макроскопические свойства, чем только их сумма.

Вместе с тем, многие ВЭСы имеют значительно более сложную структуру, включая одну или несколько упорядоченных (интерметаллидных) фаз. Авторами была предложена классификация ВЭСов по химическому и фазовому составу, кратко представленная на рисунке. В соответствии с [4] по химическому составу были выделены основные группы сплавов – на основе 3d переходных (Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Ti, V) и тугоплавких (Cr, Hf, Mo, Nb, Ta, Ti, V, W, Zr) металлов. Среди подобных сплавов можно выделить две наиболее изученные композиции, а именно CoCrFeMnNi и HfNbTaTiZr с однофазной структурой на основе ГЦК и ОЦК твердых растворов, соответственно. Редкоземельные элементы Dy, Gd, Ho, Tb, Y и другие образуют еще одну группу с однофазной ГПУ структурой. По фазовому составу были выделены сплавы со структурой твердого раствора замещения, дисперсно- и дисперсионноупрочненные сплавы, сплавы с мартенситным превращением, многофазные сплавы, одно- и двухфазные сплавы на интерметаллидной основе. Подобный подход позволяет вписать ВЭСы в существующую классификацию металлических материалов.

Одной из главных особенностей ВЭСов являются их выдающиеся механические свойства, которые зачастую превышают характеристики промышленных сплавов, что делает их привлекательными материалами для потенциальных конструкционных применений, как для повышенных, так и для пониженных (криогенных) температур [5]. Для криогенных применений обычно рассматриваются ВЭСы на основе 3d переходных металлов, которые имеют преимущественно однофазную ГЦК структуру. Данные сплавы обладают высокой прочностью, пластичностью и выдающейся вязкостью разрушения, K_{IC} , при криогенных температурах.

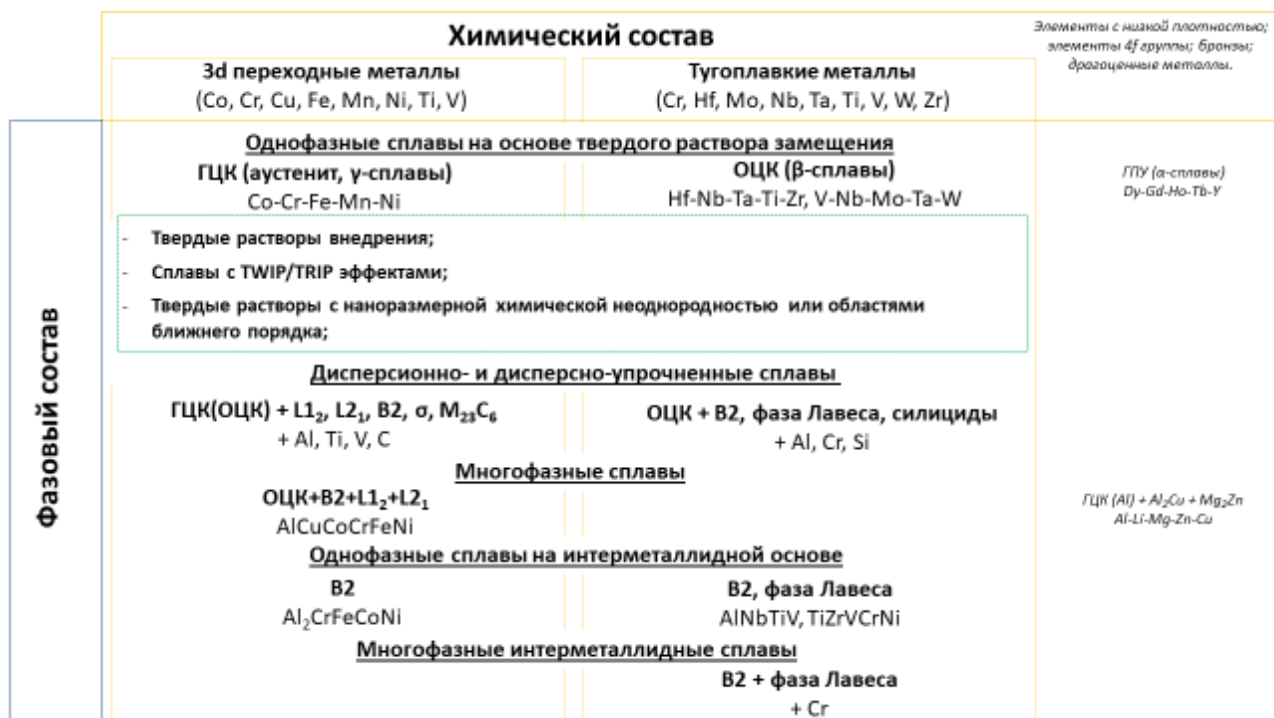


Рис. Классификация высокоэнтропийных сплавов по химическому и фазовому составу.

Наиболее перспективными для высокотемпературных применений являются ВЭСы на основе тугоплавких металлов (ТВЭСы), которые для снижения плотности легируют алюминием [6]. Структура ТВЭСов представлена ОЦК или В2 однофазным твердым раствором с возможным присутствием интерметаллидных фаз, среди которых фаза Лавеса, В2 фаза и/или различные алюминиды.

Очевидно, что широкие возможности по управлению химическим составом и структурой ВЭСов могут позволить разработать материалы с улучшенными характеристиками коэффициента трения и износа.

В последние годы все большее внимание уделяется возможности их использования для функциональных применений. Одним из таких применений может быть запасание водорода для энергетики. Так, в работе [7] для ОЦК сплава TiVZrNbHf было обнаружено высокое соотношение Н/М (соотношение числа атомов металла и водорода в гидриде MH_x) – 2,5, значительно превышающее типичные значения для гидридов на основе переходных металлов.

Показана возможность создания магнитомягких сплавов на основе системы CoFeNi, сочетающих низкую коэрцитивность (менее 1 Ое) с высокими значениями прочности и пластичности (предел текучести – 1336 МПа, относительное удлинение – 54%) [8]. Уникальные свойства сплавов связаны с выделением в ГЦК матрице когерентных L₁₂ наночастиц, способствующих упрочнению, но не препятствующих движению стенок магнитных доменов. Такие материалы могут найти применение в электротранспорте. Также известны и магнитотвердые ВЭСы с отличными

свойствами, например, сплав $\text{Fe}_2\text{CoNiAlCu}_{0.4}\text{Ti}_{0.4}$ (коэрцитивность около 900 Ое).

Многие ВЭСы показывают высокую радиационную стойкость [8]. При этом она существенно зависит от состава и кристаллической структуры. Ряд ОЦК сплавов ожидаемо показывают радиационную стойкость заметно большую, чем ГЦК сплавы.

Рассматривается применение ВЭСов и для катализа [9]. Они эффективны в реакциях выделения водорода и кислорода, реакциях восстановления кислорода и углекислого газа, разложения аммиака.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (Соглашение № 19-79-30066) с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Технологии и Материалы НИУ "БелГУ".

REFERENCES

1. Yeh J. W. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes / J. W. Yeh [et al.] // Advanced Engineering Materials. 2004. V. 6, P. 299-303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>.
2. Yan X. Functional properties and promising applications of high entropy alloys / X. Yan, Y. Zhang // Scripta Materialia. 2020. V. 187. P. 188-193. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.06.017>.
3. Ranganathan S. Alloyed pleasures: Multimetalllic cocktails / Current Science. 2003. V. 85. P. 1404-1406.
4. Miracle D. B. A critical review of high entropy alloys and related concepts / D. B. Miracle, O. N. Senkov // Acta Materialia. 2017. V. 122. P. 448-511. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>.
5. Gludovatz B. Exceptional damage-tolerance of a medium-entropy alloy CrCoNi at cryogenic temperatures / B. Gludovatz [et al.] // Nature communications. 2016. V. 7. 10602. <https://doi.org/10.1038/ncomms10602>.
6. Senkov O. N. Development and exploration of refractory high entropy alloys—A review / Senkov O. N. [et al.] // Journal of Materials Research. 2018. V. 33. P. 3092-3128. <http://dx.doi.org/10.1557/jmr.2018.153>.
7. Sahlberg M. Superior hydrogen storage in high entropy alloys / M. Sahlberg [et al.] // Scientific Reports. 2016. V. 6. № 36770. <http://dx.doi.org/10.1038/srep36770>.
8. Cheng Z. Irradiation effects in high-entropy alloys and their applications / Z. Cheng [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. 2023. V. 930. № 166768. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166768>.
9. Li K. Recent progress in high-entropy alloys for catalysts: synthesis, applications, and prospects / K. Li., W. Chen // Materials Today Energy. 2021. V. 20. № 100638. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100638>.