

Сучасні підходи у створенні високоентропійних та середньоентропійних ливарних алюмінієвих сплавів

Роботу присвячено огляду основ створення високоентропійних та середньоентропійних сплавів (ВЕС та СЕС відповідно) та чинників, які впливають на їх структурно-фазові характеристики. Показано переваги даного типу матеріалів перед конструкційними сплавами, що виражається у вищих питомих значеннях механічних властивостей, жароміцності та інших характеристиках, важливих для роботи в екстремальних умовах. Незважаючи на переваги та перспективність високоентропійних сплавів, їх промислове виробництво не має широкого комерційного впровадження через складність процесів виробництва. Така ситуація спонукає до розробки ВЕС і СЕС, які могли б вироблятися в промислових масштабах. Показано, що найвищий потенціал для цього мають ливарні високоентропійні сплави на основі алюмінію, як найбільш придатні для ливарних технологій одержання готових виробів з них.

Аналіз сучасних досліджень показав, що для створення ливарних високоентропійних та середньоентропійних сплавів на основі алюмінію потрібно використовувати головним чином компоненти, які мають з алюмінієм та між собою евтектичне перетворення або не утворюють високотемпературні інтерметаліди при низьких концентраціях до 5 % ат. Найбільш підходять для цього Si, Mg, Zn, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Ti та V. Це дасть змогу одержати сплави з відносно низькою температурою плавлення та високими ливарними властивостями. Приготування розплавів ВЕС на основі алюмінію потребуватиме застосування концентрованих і багатоконпонентних лігатур.

Ключові слова: ливарні алюмінієві сплави, високоентропійні сплави, середньоентропійні сплави, дизайн матеріалів, нові матеріали.

Вступ. Розвиток сучасних технологій неможливо уявити без створення нових матеріалів та способів їх одержання. Особливо гостро стоїть питання по відношенню до тих із них, які володіють унікальним поєднанням високих фізико-механічних характеристик та здатні працювати в екстремальних умовах. Високоентропійні сплави є найбільш вдалим прикладом таких матеріалів [1]. Їх дослідження розпочалося у 80-х роках минулого століття, проте активність проведення робіт у даному напрямі постійно зростає в усьому світі протягом останніх десяти років [2–5]. Розвиток даного напрямку вимагає великої кількості експериментальних досліджень та широкого промислового впровадження, що означає також створення ефективних технологій одержання готових виробів та напівфабрикатів з даного роду матеріалів.

Принципи створення високоентропійних сплавів. Високоентропійними сплавами (ВЕС) називають композиції, які містять п'ять або більше елементів, концентрація яких коливається в межах 5–35 ат. %. Середньоентропійні сплави мають не

більше п'яти компонентів та значення ентропії змішування до 13,5 Дж/моль·К. Відповідно, середньоентропійні містять від п'яти компонентів та мають більші значення ентальпії змішування [1, 2]. Завдяки цьому, структуро- та фазоутворення, а також дифузійна рухливість атомів, термічна стабільність та механізми формування механічних властивостей в таких сплавах суттєво відрізняються від класичних. Відзначається, що високоентропійні сплави характеризуються кращими показниками питомої міцності, тріщиностійкості, жароміцності та корозійної стійкості в порівнянні зі сплавами, які створено за класичними принципами легування [4, 5].

При кристалізації ВЕСів утворюються лише тверді розчини заміщення на основі градецентричних та об'ємноцентричних (ГЦК та ОЦК) ґраток без інтерметалідних фаз. На прикладі сплавів системи Al-Cr-Fe-Ni-Cu з високою ентропією змішування в роботі [6] показано, що енергія Гіббса (ΔG) є нижчою ніж потрібно для утворення інтерметалідів. Таким чином, зі збільшенням ентропії підвищується можливість утворення

стабільних неупорядкованих твердих розчинів. В роботах [2, 7] показано, що інтерметаліди також можуть утворюватися в структурі ВЕС, якщо різниця атомних радіусів більше 8,5–12 %.

Завдяки особливостям будови високоентропійних сплавів вдається досягти сильної дисторсії кристалічної ґратки, що обумовлює високі показники міцності. Особливості будови твердого розчину також знижують дифузію елементів, що підвищує високотемпературну стабільність механічних властивостей таких матеріалів. При цьому, за високих температур можна спостерігати утворення наноструктур, що не має негативного впливу на механічні властивості [8–11].

Для одержання високоентропійних сплавів застосовують методи механічного легування, порошкової металургії, електролізу, епітаксialного просочування, нанесення покриттів, СВС-методи та методи лиття. Останні наразі є найбільш вживаними та економічно доцільними. Для одержання розплавів ВЕС найчастіше застосовують багатократний переплав вакуумно-дуговим методом і рідше – вакуумно-індукційний метод. Дані способи є досить затратними і не володіють значним промисловим потенціалом з точки зору одержання готових виробів за коротким технологічним алгоритмом, тому виникає потреба у створенні або відповідних технологічних рішень, або у розробці технологічних композицій, придатних для одержання готових виробів литтям, як найбільш доцільним способом.

Розробка ливарних високоентропійних та середньоентропійних сплавів у даний час викликає жвавий інтерес великої кількості дослідників [3]. Одержання і дослідження цих сплавів та технології їх виробництва є актуальним завданням, і протягом останніх десяти років темпи їх дослідження значно прискорились наряду з розвитком технологій одержання [3, 12, 13].

Одним з найбільш перспективних напрямів одержання комерційних високоентропійних та середньоентропійних сплавів є створення композицій на основі алюмінію. Цей метал утворює велику кількість евтектичних діаграм стану з багатьма елементами періодичної системи та має в рідкому стані достатню розчинність тугоплавких компонентів до температур

800–900 °С. Це вказує на перспективність саме промислового масового виробництва таких сплавів та виробів з них.

Хоча алюміній є сам по собі пластичним елементом, збільшення його вмісту може фактично зміцнити ВЕС. На рис. 1 зображено, що сплав AlxCoCrCuFeNi значно твердне з додаванням алюмінію. Частково це пов'язано з утворенням твердої ОЦК-фази, а частково через сильніший когезійний зв'язок між алюмінієм та іншими елементами.

Ливарні методи дають можливість контролювати швидкість кристалізації розплаву в широких межах. Це дає змогу чинити вплив на структуро- та фазоутворення. У літературі фази в складі високоентропійних сплавів зазвичай класифікуються як: випадковий твердий розчин (наприклад, ГЦК, ОЦК), упорядкований твердий розчин (наприклад, B2 і L1₂) та інтерметалідні фази типу фаз Лавеса. Ця класифікація може призвести до певної плутанини, оскільки за визначенням інтерметалідні фази також можна класифікувати як упорядковані тверді розчини – вони мають діапазони складу та зазвичай упорядковані. З огляду на це запропоновано класифікувати фази за їх будовою (прості/складні) та впорядкованістю (впорядковані/неупорядковані) [3]. Фаза називається простою, якщо її структура ідентична ГЦК, ОЦК структурам або походить від них. Структури cI2-W, cF4-Cu та hP2-Mg та їх упорядковані версії (надґратки), такі як структури cP2-CsCl (B2) та cP4-AuCu₃ (L1₂), є простими [14, 15]. Якщо утворюється фаза інтерметалідного типу (наприклад, фази Лавеса), вона називається складною. Таким чином, наведені вище три типи тепер стають: проста неупорядкована фаза, проста впорядкована фаза і складна впорядкована фаза. Прості структури (проста неупорядкована фаза, проста впорядкована фаза) найчастіше зустрічаються в готових ВЕС, навіть в складних композиціях, як показано на рис. 2.

Принципи створення ВЕС на основі алюмінію.

Ідея створення високоентропійних алюмінієвих сплавів базується головним чином на додаванні елементів, які сприятимуть утворенню упорядкованих або частково упорядкованих інтерметалідів всередині алюмінієвої матриці [16–18]. Зазвичай мають на

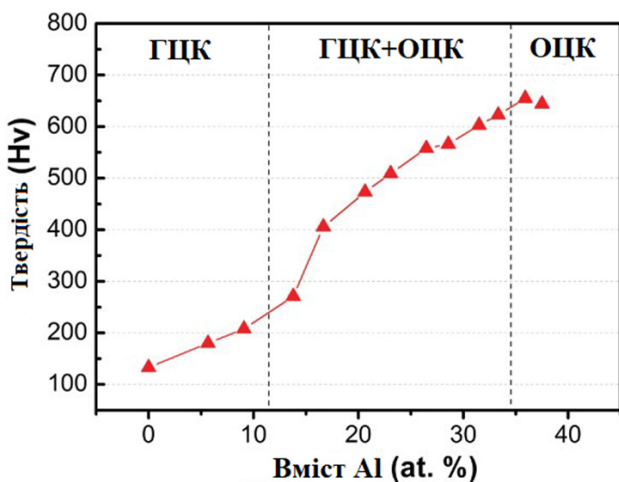


Рис. 1. Твердість сплавів AlxCoCrCuFeNi залежно від вмісту алюмінію [3]

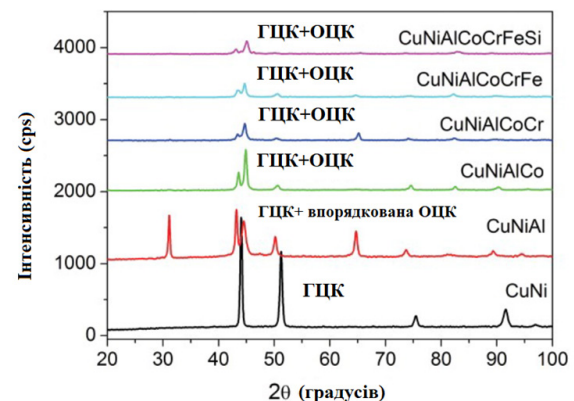


Рис. 2. Рентгенограми серії сплавів, розроблених послідовним додаванням одного додаткового елемента до попереднього. Усі сплави мають одну або дві основні фази, які мають просту структуру [3]

увазі наступні елементи: Cu, Co, Cr, Fe, Ni, Ti, Zr, Mo, V, а також, нечасто і в малих кількостях – деякі рідкісноземельні метали (РЗМ) [16–22]. Алюмінієві сплави з такими компонентами характеризуються утворенням широкого ряду сполук та структурно-фазових елементів, які здатні утворювати когерентні суміші з ОЦК або ГЦК структурою, або з надструктурою типу В2 (ОЦК). Така надструктура, в даному випадку, може бути представлена попарно взаємопроникаючими ґратками типу DO_3 та $L1_2$ або DO_{22} та $L1_2$ [23–25]. Саме формування таких надструктур може забезпечити поєднання вкрай високих механічних та експлуатаційних характеристик високоентропійних алюмінієвих сплавів.

Поєднання механізмів формування структури та властивостей ВЕС з модифікуванням інтерметалідних фаз для одержання кубічних і тетрагональних структур знайшло реалізацію у розробці алюмінієвих сплавів на основі евтектичних систем з перехідними металами. Так, наприклад, сплави системи Al-Fe-Ni з вмістом нікелю та заліза на рівні кількох масових відсотків використовуються в багатьох технічних напрямках, зокрема – в якості жароміцних матеріалів. Нікель та залізо утворюють з алюмінієм дрібнодисперсні термічно стабільні сполуки з дуже низькою дифузійною активністю, що обумовлює їх високу жароміцність [26–28].

Евтектичний вміст заліза та нікелю в подвійних сплавах дорівнює 1,8 та 6,1 %мас. відповідно. Для сплаву з потрібною евтектикою їх вміст менший та становить 1,75 %мас. для заліза та 1,25 %мас. для нікелю. При цьому нікелева та залізна подвійні евтектики включають в себе нанорозмірні волокнисті інтерметаліди, розміри та розподіл яких менш сприятливі для формування високого рівня механічних властивостей, ніж у випадку з потрібною евтектикою, коли до складу евтектики входять інтерметаліди τ -Al₉FeNi. При цьому міцність сплаву, що відповідає за хімічним складом потрібній евтектиці, може складати 125–183 МПа за кімнатної температури та 71 ± 10 МПа за температури 350 °С, залежно від дисперсності структури та наявності первинних фаз [26–29].

В роботі [30] відзначається, що, залежно від способу одержання евтектичних сплавів Al-Fe-Ni та їх структури, може відбуватися деградація механічних властивостей за температур вище 250 °С через зміну механізму деформації. Нижче цієї температури руйнування відбувається через об'єднання дефектів біля меж зерен, а вище 250 °С зростання тріщини більш різко і може мати транскристалітний характер. Для забезпечення вищих показників високотемпературної міцності таких сплавів намагаються збільшити дисперсність їх структури та стабілізувати її додатковим легуванням, наближуючи такі сплави до високоентропійних та середньоентропійних.

В роботі [31] представлені дослідження евтектичних та біля евтектичних сплавів (Al-4-6Ni-0,4-0,7Cr) схожої системи Al-Ni-Cr. Для них характерною є більш складна ієрархічна структура, яка забезпечує міцність сплавів на рівні 350 МПа за кімнатної температури та ~190–230 МПа за 250 °С. Показано, що хром здатен

змінювати морфологію евтектики, а також подрібнювати структуру при невеликих концентраціях (до 0,6 % ат.) та навпаки робити структуру більш грубою при перевищенні такого вмісту. Також показано, що незначна розчинність хрому у волокнах інтерметаліду Al₃Ni призводить до підвищення еластичності останнього, що позитивно впливає на міцність і тріщинозміцність сплавів.

Іншою системою, яка заслуговує уваги, є система Al-Fe-Mn. Подібно до розглянутих аналогів, вона має в своєму складі компоненти, що утворюють алюмініди з орторомбічною (Al₆Mn) та моноклінною (Al₃Fe) ґратками. В потрібному сплаві до складу евтектики входить сполука Al₆(Mn,Fe) сприятливих розмірів та морфології, яка має орторомбічну ґратку [32]. На прикладі сплаву Al-1,4Fe-0,7Mn показано схожість у будові евтектики зі сплавами Al-Ni-Cr, яка полягає у зміні морфології інтерметалідів з волокнистої або голчастої на більш пластівцеву. Також відмічається, що додавання магнію до таких сплавів впливає на їх структуру, укрупнюючи інтерметалідну складову евтектики, що може негативно впливати на показники міцності.

Описані особливості формування структури та властивостей багатокомпонентних сплавів Al-Cr-Fe-Ni з іншими елементами все частіше спонукають вчених та розробників експериментувати зі створенням сплавів на межі ідей ВЕС та класичних евтектичних композицій. Так, наприклад, в ряді робіт [32–36] повідомляється про необхідність розвитку концептуальних підходів до створення сплавів, які будуть максимально реалізовувати принципи ВЕС, проте належатимуть до так званих «середньоентропійних» або класичних сплавів за принципами розробки та легування.

Однією з головних ідей при цьому є багатокомпонентне легування компонентами, які зможуть так взаємодіяти один з одним, що буде реалізовуватись принцип утворення надструктур та максимальної стабілізації фаз кубічної або тетрагональної будови з мінімальними розбіжностями кристалографічних параметрів [35]. Також важливою задачею в таких сплавах є забезпечення мінімальних розмірів та рівномірного розподілу зміцнюючих фаз сприятливої морфології.

З точки зору технології одержання таких сплавів важливо створити композиції, що давали б змогу застосовувати звичайні методи масового виробництва алюмінієвого литва без застосування концентрованих джерел нагріву, вакууму та інших складних технологічних складових на останньому етапі виробництва. Для досягнення цієї мети потрібно керуватися принципами введення компонентів, які мають з алюмінієм евтектичні або перитектичні перетворення при високих концентраціях та за не надто високих температур. До них відносяться Si, Mg, Zn, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Ti та V. Також корисним може стати використання концентрованих лігатур, у тому числі – комплексних.

Висновки

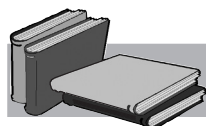
На сьогоднішній день існує дуже мало практичних досліджень, які стосуються багатокомпонентних ливарних алюмінієвих сплавів, створених з урахуванням принципів формування структурно-фазових параметрів ВЕС. В той же час, актуальність таких розробок зростає завдяки підвищенню інтересу до створення новітніх матеріалів, які здатні поєднувати в собі високі показники міцнісних та спеціальних властивостей. При цьому, важливим питанням є розробка одночасно як самих сплавів, так і ефективних технологій їх одержання, які б передбачали широке промислове впровадження. Для реалізації цього повною мірою підходить застосування ливарних сплавів та відповідних технологічних способів одержання готових виробів з них.

Принципами створення ливарних високоентропійних та середньоентропійних сплавів на основі алюмінію є розробка композицій, що містять головним чи-

ном компоненти, які мають з алюмінієм та між собою евтектичне перетворення або не утворюють високо-температурні інтерметаліди при низьких концентраціях до 5 % ат. До них відносяться Si, Mg, Zn, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Ti та V.

Очікуваним є те, що ці сплави, окрім складного твердого розчину, можуть містити евтектику, представлену комплексними інтерметалідами. В такому випадку необхідно оптимізувати хімічний склад сплавів, що вимагає великої кількості експериментальних досліджень. Іншим, набагато більш простим, способом запобігання утворенню шкідливих структурно-фазових складових є збільшення швидкості кристалізації матеріалу, що легко реалізується при литті.

З точки зору технологічності виробництва, необхідно звертати увагу на систему легування і використання найбільш зручних способів введення компонентів сплаву, особливо – через використання концентрованих лігатур.



REFERENCES

1. Cantor, B., Chang, I.T.H., Knight, P., Vincent, A.J.B. (2004). Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering A*, vols. 375–377, pp. 213–218, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
2. Yeh, J.-W., Chen, S.-K., Lin, S.-J. et al. (2004). Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. *Advanced Engineering Materials*, vol. 6, iss. 5, pp. 299–303, doi: <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
3. Wang, S. (2013). Atomic Structure Modeling of Multi-Principal-Element Alloys by the Principle of Maximum Entropy. *Entropy*, vol. 15, pp. 5536–5548, doi: <https://doi.org/10.3390/e15125536>
4. Tsai, Ming-Hung, Yeh, Jien-Wei (2014). High-Entropy Alloys: A Critical Review. *Materials Research Letters*, vol. 2, iss. 3, pp. 107–123, doi: <https://doi.org/10.1080/21663831.2014.912690>
5. Youssef, K.M., Zaddach, A.J., Niu, Ch., Irving, D.L., Koch, C.C. (2014). A Novel Low-Density, High-Hardness, High-entropy Alloy with Close-packed Single-phase Nanocrystalline Structures. *Materials Research Letters*, pp. 95–99, doi: <https://doi.org/10.1080/21663831.2014.985855>
6. Li, A., Zhang, X. (2009). Thermodynamic analysis of the simple microstructure of AlCrFeNiCu high-entropy alloy with multiprincipal elements. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, vol. 22, iss. 3, pp. 219–224, doi: [https://doi.org/10.1016/S1006-7191\(08\)60092-7](https://doi.org/10.1016/S1006-7191(08)60092-7)
7. Yang, X., Zhang, Y., Liaw, P.K. (2012). Alloy Design and Properties Optimization of High-Entropy Alloys. *Procedia Engineering*, vol. 64, pp. 830–838, doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0366-5>
8. Hsu, C.-Y., Juan, C.-C., Wang, W.-R. et al. (2011). On the superior hot hardness and softening resistance of Al-CoCrFeMo_{0.5}Ni high-entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, iss. 10–11, pp. 3581–3588, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.072>
9. Tsai, M.-H., Wang, C.-W., Tsai, C.-W. et al. (2011). Thermal Stability and Performance of NbSiTaTiZr High-Entropy Alloy Barrier for Copper Metallization. *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 158, no. 11, pp. 1161–1165, doi: <https://doi.org/10.1149/2.056111jes>
10. Tsai, M.-H., Yeh, J.-W., Gan, J.-Y. (2008). Diffusion barrier properties of AlMoNbSiTaTiVZr high-entropy alloy layer between copper and silicon. *Thin Solid Films*, vol. 516, iss. 16, pp. 5527–5530, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.07.109>
11. Shun, T.-T., Hung, C.-H., Lee, C.-F. (2010). Formation of ordered/disordered nanoparticles in FCC high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 493, iss. 1–2, pp. 105–109, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.12.071>
12. Wu, W.-H., Yang, C.-C., Yeh, J. W. (2006). Industrial development of high-entropy alloys. *European Journal of Control*, vol. 31 (6), pp. 737–747, doi: <https://doi.org/10.3166/acsm.31.737-747>
13. Gludovatz, B., Hohenwarter, A., Catoor, D., Chang, E.H., George, E.P., Ritchie, R.O. (2014). A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications. *Science*, vol. 345, iss. 6201, pp. 1153–1158, doi: <https://doi.org/10.1126/science.1254581>
14. Zhang, Y., Zhou, Y.J., Lin, J.P., Chen, G.L., Liaw, P.K. (2008). Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys. *Advanced Engineering Materials*, vol. 10, iss. 6, pp. 534–538, doi: <https://doi.org/10.1002/adem.200700240>

15. Guo, S., Liu, C.T. (2011). Phase stability in high entropy alloys: formation of solid-solution phase or amorphous phase. *Progress in Natural Science: Materials International*, vol. 21, iss. 6, pp. 433–446, doi: [https://doi.org/10.1016/S1002-0071\(12\)60080-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0071(12)60080-X)
16. Santodonato, L.J., Liaw, P.K., Unocic, R.R., Bei, H., Morris, J.R. (2018). Predictive multiphase evolution in Al-containing high-entropy alloys. *Nature communications*, 9:4520, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06757-2>
17. Miracle, D.B., Senkov, O.N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, vol. 122, pp. 448–511, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
18. Yeh, J.W. (2015). Physical Metallurgy of High-Entropy Alloys. *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 67 (10), pp. 2254–2261, doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1583-5>
19. Singh, S., Wanderka, N., Murty, B.S., Glatzel, U., Banhart, J. (2011). Decomposition in multi-component AlCo-CrCuFeNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*, vol. 59, iss. 1, pp. 182–190, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.09.023>
20. Butler, T.M., Weaver, M.L. (2017). Investigation of the phase stabilities in AlNiCoCrFe high entropy alloys. *Journal of alloys and compounds*, vol. 691, pp. 119–129, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.121>
21. Hsu, C.Y. et al. (2013). Phase Diagrams of High-Entropy Alloy System Al-Co-Cr-Fe-Mo-Ni. *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, vol. 65 (12), pp. 1829–1839, doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0773-2>
22. Manzoni, A.M. et al. (2016). On the Path to Optimizing the Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni-Ti High Entropy Alloy Family for High Temperature Applications. *Entropy*, vol. 18 (4): 104, doi: <https://doi.org/10.3390/e18040104>
23. Wang, Y.P., Li, B.S., Fu, H.Z. (2009). Solid solution or intermetallics in a high-entropy alloy. *Advanced engineering materials*, vol. 11, iss. 8, pp. 641–644, doi: <https://doi.org/10.1002/adem.200900057>
24. Welk, B.A. et al. (2013). Nature of the interfaces between the constituent phases in the high entropy alloy CoCrCuFeNiAl. *Ultramicroscopy*, vol. 134, pp. 193–199, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2013.06.006>
25. Manzoni, A., Daoud, H., Völkl, R., Glatzel, U., Wanderka, N. (2013). Phase separation in equiatomic AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *Ultramicroscopy*, vol. 132, pp. 212–215, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2012.12.015>
26. Koutsoukis, T., Makhlof, M.M. (2016). Alternatives to the Al–Si Eutectic System in Aluminum Casting Alloys. *International Journal of Metalcasting*, vol. 10, pp. 342–347, doi: <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0042-6>
27. Bian, Z. et al. (2020). Regulating microstructures and mechanical properties of Al–Fe–Ni alloys. *Progress in Natural Science: Materials International*, vol. 30, iss. 1, pp. 54–62, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2019.12.006>
28. Zhang, L., Du, Y., Steinbach, I., Chen, Q., Huang, B. (2010). Diffusivities of an Al–Fe–Ni melt and their effects on the microstructure during solidification. *Acta Materialia*, vol. 58, iss. 10, pp. 3664–3675, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.03.002>
29. Zhang, L. et al. (2008). Phase equilibria of the Al–Fe–Ni system at 850 °C and 627 °C. *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 454, issues 1–2, pp. 129–135, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.12.042>
30. Premkumar, M.K., Lawley, A., Koczak, M.J. (1994). Mechanical behavior of powder metallurgy Al-Fe-Ni alloys. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 174, iss. 2, pp. 127–139, doi: [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(94\)91081-2](https://doi.org/10.1016/0921-5093(94)91081-2)
31. Pandey, P., Kashyap, S., Tiwary, C.S., Chattopadhyay, K. (2017). Development of High-Strength High-Temperature Cast Al-Ni-Cr Alloys Through Evolution of a Novel Composite Eutectic Structure. *Metallurgical and materials transactions A*, vol. 48, pp. 5940–5950, doi: <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4369-2>
32. Mehta, A., Sohn, Y. (2020). Interdiffusion, Solubility Limit, and Role of Entropy in FCC Al-Co-Cr-Fe-Ni Alloys. *Metallurgical and materials transactions A*, vol. 51, pp. 3142–3153, doi: <https://doi.org/10.1007/s11661-020-05742-z>
33. Röhrens, D. et al. (2020). Microstructure and Mechanical Properties of BCC-FCC Eutectics in Ternary, Quaternary and Quinary Alloys From the Al-Co-Cr-Fe-Ni System. *Frontiers in materials*, vol. 7, 567793, doi: <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.567793>
34. Zhang, L.J. et al. (2019). 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*, vol. 757, pp. 160–171, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.104>
35. Zhang, C. et al. (2016). Understanding phase stability of Al-Co-Cr-Fe-Ni high entropy alloys. *Materials & Design*, vol. 109, pp. 425–433, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.073>
36. Shaik, A. et al. (2020). On the effect of Fe in L1₂ strengthened Al-Co-Cr-Fe-Ni-Ti complex concentrated alloy. *Materialia*, vol. 14, 100909, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mta.2020.100909>

Received 09.09.2022

Summary

I.F. Likhatskyi, 1st cat. engin.-technologist, e-mail: likhatskyi8@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2069-5255>

M.M. Voron, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: mihail.voron@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0804-9496>

*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine
(Kyiv, Ukraine)*

Modern approaches in the creation of high-entropy and medium-entropy cast aluminum alloys

The work is devoted to the review of basics of creating high-entropy and medium-entropy alloys (HEAs and MEAs, respectively) and factors that affect on their structural and phase characteristics. The advantages of this type of materials over structural alloys are shown, which is expressed in higher specific values of mechanical properties, heat resistance and other characteristics that are important for work in extreme conditions. Despite the advantages of high-entropy alloys, their industrial production does not have a wide commercial implementation due to the complexity of the production processes. Such a situation encourages the development of HEAs and MEAs that could be produced on an industrial scale. It is shown that high-entropy aluminum-based casting alloys have the highest potential for this, as they are the most suitable for obtaining finished products by using foundry technologies.

Analysis of modern researches has shown that development of aluminum-based high-entropy and medium-entropy casting alloys, needs to use components that have an eutectic transformation with aluminum and with each other or which do not form high-temperature intermetallics at low concentrations up to 5 % at. The most suitable components for this are Si, Mg, Zn, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Ti and V. It gives possibility and rises chances to obtain alloys with a relatively low melting point and high casting properties. Preparation of Al-based HEA melts should be based on the use of concentrated and multicomponent master alloys.

Keywords

Cast aluminum alloys, high-entropy alloys, medium-entropy alloys, material design, new materials.