

При порівнянні результатів дослідження неметалевих включень за новою технологією при збільшеннях у 100 та 300 разів у зразках неметалевих включень розмірами понад 0,5 мкм не виявлено.

Загальний результат попереднього кількісного аналізу: він показав значно вищу якість металу, отриманого за новою технологією.

Нині розробляється програмне забезпечення визначення наборів вторинних ознак компонентів структур матеріалів, формування просторів класів і автоматичного багаторівневого розпізнавання. Зменшення розмірності простору класів здійснюватиметься з використанням технологій генетичних алгоритмів.

#### Література:

1. Tokody D. Digitizing the European industry – Holonic systems approach. *Procedia Manufacturing*. Volume 22, 2018, P. 1015-1022.

DOI: 10.1016/j.promfg.2018.03.144

2. Decost B.L. A computer vision approach for automated analysis and classification of microstructural image data / Decost, B.L., Holm E.A. // *Computational Materials Science*. Volume 110, 29, December 2015, P. 126-133. DOI: 10.1016/j.commatsci.2015.08.011.

3. Sato N. A. change and prospect of quantitative evaluation of microstructure Morphology/ Sato, N., Sadamatsu S. // *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. Volume 100, Issue 10, 2014, P. 1182-1190. DOI: 10.2355/tetsutohagane.100.1182.

**Ліхацький І.Ф., Ворон М.М.**  
**(ФТІМС НАН України, м. Київ)**

### **РОЗРОБКА ЛИВАРНИХ АЛЮМІНІЄВИХ ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ ТА СЕРЕДНЬОЕНТРОПІЙНИХ СПЛАВІВ**

E-mail: likhatskyi8@gmail

Високоентропійні сплави (ВЕС) з'явилися в переліку передових матеріалів не так давно, про їх успішну розробку було оголошено у 2004 році [1, 2], після

чого вони стали важливим об'єктом для досліджень і застосування в різних галузях промисловості.

За останні кілька років інтерес до ВЕС стабільно зростає, що підтверджується збільшенням кількості наукових публікацій, присвячених цим матеріалам. За даними бази даних Scopus, до квітня 2021 року було опубліковано 3541 наукову публікацію, в яких розглядалися різні аспекти ВЕС, що свідчить про високу актуальність та потенціал досліджень в цій галузі [3].

ВЕС визначаються як сплави, що містять від 5 до 13 головних елементів, з атомним відсотком кожного елемента від 5% до 35%. Залежно від складу сплаву, ВЕС мають тенденцію утворювати прості фази твердого розчину, такі як ГЦК та ОЦК фази. З термодинаміки відомо, що система намагається мінімізувати свою вільну енергію Гіббса ( $\Delta G_{зміш}$ ) для досягнення стабільного або метастабільного стану рівноваги.  $\Delta G_{зміш}$  визначається як:

$$\Delta G_{зміш} = \Delta H_{зміш} - T\Delta S_{зміш}, \quad (1)$$

де  $\Delta H_{зміш}$  – ентальпія змішування,  $\Delta S_{зміш}$  – ентропія змішування,  $T$  – температура.

Зменшення ентальпії змішування або збільшення ентропії змішування може зменшити вільну енергію Гіббса.  $\Delta S_{зміш}$  має чотири основні внески, такі як конфігураційний, вібраційний, магнітний диполь та електронна випадковість. У порівнянні зі звичайними сплавами, які зазвичай містять один або два основні елементи, конфігураційна ентропія в ВЕС значно вища.

Утворення простих багатоелементних твердих розчинів в високоентропійних сплавах залежить від конкуренції між ентальпією та ентропією ( $\Delta H$  та  $T\Delta S$ ). При високих температурах  $T\Delta S$  стає визначальним фактором і розглядається як основна причина утворення твердих розчинів в ВЕС.

Ентропія досягає максимуму, коли сплав має еквіатомне співвідношення, і виражається у рівнянні:

$$\Delta S_{\text{зміш}} = R \ln n, \quad (2)$$

де  $R$  газова стала, ( $R = 8,314$  Дж/К/моль), а  $n$  – кількість елементів.

З рівняння можна побачити, що конфігураційна ентропія зростає зі збільшенням кількості елементів. Після 13 елементів подальше збільшення їх кількості дає обмежений внесок в ентропію змішування. Конфігураційна ентропія сплаву з п'ятьма елементами в ідеальному випадку становить  $1,61 R$ . Висока ентропія змішування ефективно зменшує кількість фаз і збільшує взаємну розчинність між складовими елементами [4].

ВЕС визначаються як сплави, у яких конфігураційна ентропія у випадковому стані більше або дорівнює  $1,5 R$ . Висока ентропія необхідна для утворення єдиного твердого розчину і запобігання утворенню багатофазних або інтерметалічні сполук. За допомогою конфігураційної ентропії ми також можемо визначити сплави із середньою та низькою ентропією, як  $1,5 R$  це межа поділу між сплавом з високою та середньою ентропією, а  $1,0 R$  – це межа поділу між низькоентропійними та середньоентропійними сплавами. Рис. 1 показує типи сплавів в залежності від  $\Delta S_{\text{зміш}}$  [5].

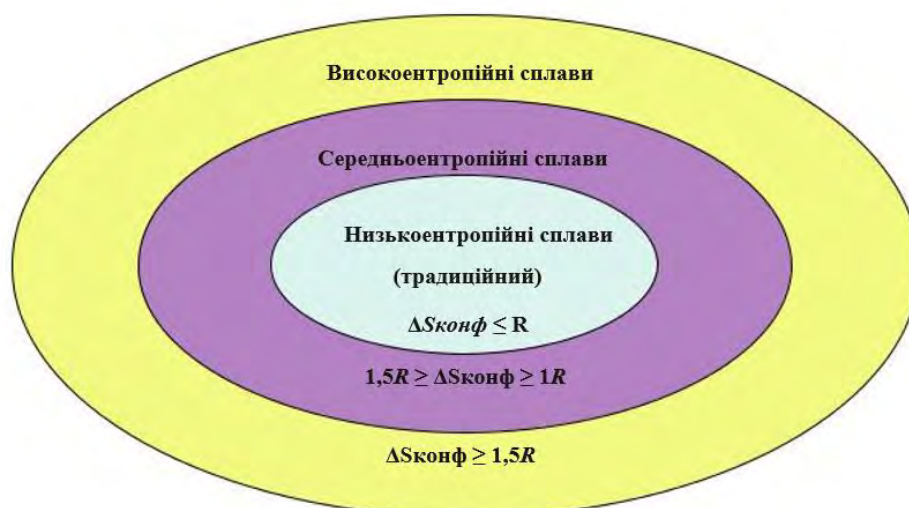


Рис. 1. Типи сплавів на основі конфігураційної ентропії [4]

Застосування високоентропійних сплавів обумовлене поєднанням високих механічних та спеціальних властивостей, але їх виробництво наразі залишається дорогим, складним та не має промислових об'ємів. Одним з перспективних шляхів виготовлення комерційних високоентропійних та середньоентропійних сплавів є створення композицій на основі алюмінію. Цей метал має багато евтектичних діаграм стану з багатьма елементами періодичної системи, та має достатню розчинність тугоплавких компонентів у рідкому стані до температур 800-900 °С. Це свідчить про можливість масштабного виробництва таких сплавів та виробів з них.

Хоча алюміній є сам по собі пластичним елементом, збільшення його вмісту може фактично зміцнити ВЕС. На рис. 2 зображено, що у сплаві  $Al_xCoCrCuFeNi$  значно підвищується твердість з додаванням алюмінію. Частково це пов'язано з утворенням твердої ОЦК-фази, а частково через сильніший когезійний зв'язок між алюмінієм та іншими елементами.

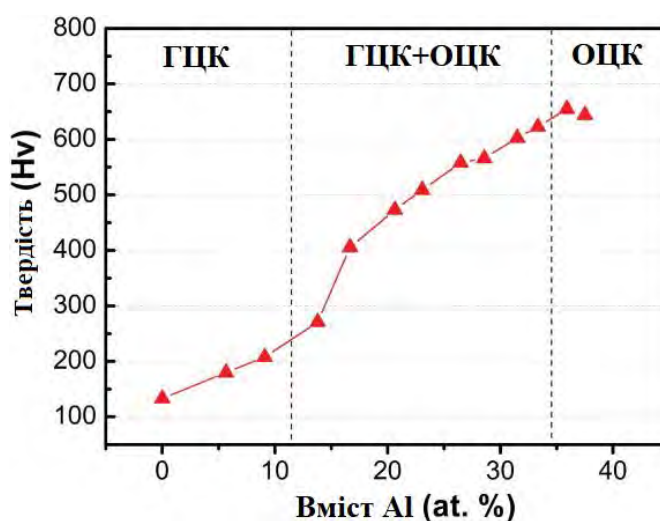


Рис. 2. Твердість сплавів  $Al_xCoCrCuFeNi$ , залежно від вмісту Al [6]

Ідея створення високоентропійних алюмінієвих сплавів базується головним чином на додаванні елементів, які сприятимуть утворенню упорядкованих, або частково упорядкованих інтерметалідів всередині алюмінієвої матриці [7, 8]. Зазвичай мають на увазі наступні елементи: Cu, Co, Cr, Fe, Ni, Ti, Zr, Mo, V, а також, нечасто і в малих кількостях – деякі РЗМ. 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 B2 (ОЦК). Така надструктура, в даному випадку, може бути представлена попарно взаємопроникаючими ґратками типу DO<sub>3</sub> та L1<sub>2</sub> або DO<sub>22</sub> та L1<sub>2</sub>. Саме формування таких надструктур може забезпечити поєднання вкрай високих механічних та експлуатаційних характеристик високоентропійних алюмінієвих сплавів.

#### Література:

1. J.-W. Yeh, et al. (2004). Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*. Vol. 6, no. 5, pp. 299–303, May 2004, doi: 10.1002/adem.200300567.
2. B. Cantor, I. T. H. Chang, P. Knight, and A. J. B. Vincent. (2004) Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering*. Vol. 375–377, pp. 213–218, Jul. 2004, doi: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
3. A. D. Akinwekomi and F. Akhtar. (2022) Bibliometric mapping of literature on highentropy/multicomponent alloys and systematic review of emerging applications. *Entropy*. Vol. 24, no. 3, pp. 329, Feb. 2022, doi: 10.3390/e24030329.
4. J.-W. Yeh.(2013) Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. *JOM*. Vol. 65, no. 12, pp. 1759–1771. doi: 10.1007/s11837-013-0761-6.
5. Z. Y. Zhang. (2016) High-Entropy Alloys. *Cham: Springer International Publishing*. doi: 10.1007/978-3-319-27013-5.
6. Wang, Shaoqing. (2013). Atomic Structure Modeling of Multi-Principal-Element Alloys by the Principle of Maximum Entropy. *Entropy*. pp. 5536–5548.
7. 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: 10.1038/s41467-018-06757-2
8. Miracle D. B., Senkov O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. Vol. 122. pp. 448–511.