

References:

1. Titanium (Ti) – Properties, Applications [Electronic resource] // AZO materials [official website]. – Electronic data. – access mode: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=712>. – Name from the screen. – View date: 12.06.2023.
2. Hedren M. Simulation of Additive Manufacturing Process Physics and Properties in Powder Bed Electron-Beam Melting of Ti-6Al-4V / M. Hedren. – Thesis, University of Washington: Washington, 2020. – 167 p.

Верховлюк А.М.¹, Лютий Р.В.², Матковський Д.Ю.²
(¹ФТІМС НАН України; ²КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ)
ЛИВАРНІ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОЕНТРОПІЙНОГО
СПЛАВУ Al-Cu-Ni-Cr-Fe
E-mail: rvl2005@ukr.net

Високоентропійні сплави (ВЕС) – це особливі металеві сплави, які виділяються своїми надзвичайними властивостями та структурою. ВЕС складаються із п'яти або більшої кількості різних компонентів, які розподіляються майже рівномірно по всій матриці сплаву. Це відрізняє їх від традиційних сплавів, де переважає один головний компонент, а інші додаються в незначних кількостях. Головна особливість ВЕС полягає у найбільших значеннях ентропії, що і визначає їх назву. Атоми різних компонентів у сплавах розташовуються випадковим чином, утворюючи структуру зі значною неупорядкованістю. Така структура має значний вплив на механічні, фізичні та хімічні властивості [1].

Нова ідея створення суперсплавів виникла наприкінці ХХ ст. і була заснована на «змішуванні кількох основних елементів» у високій концентрації для синтезу нового класу сплавів. Найпершим з відомих дослідників цієї ідеї був Брайан Кантор (з філії Університету Сассекса, Великобританія, 80-ті р.р. ХХ ст.), однак його теорію не було прийнято і не було реалізовано на практиці. У 1996 р. Дж. В. Йех (з Національного університету Цін Хуа, Тайвань) вперше реалізував цю ідею.

Після цього «сплави Кантора» отримали розвиток з додаванням інших елементів, що розширило виробничий процес. Номенклатура цих сплавів також значною мірою розширилась. Найбільш відомими з них стали:

– евтектичні сплави системи Co-Cr-Fe-Ni-Ta_x, де $x = 0,1, 0,2, 0,3, 0,395, 0,4$ і $0,5$ у мольному співвідношенні [2]. Ці сплави з особливими властивостями знаходять застосування в різних галузях, де потрібна термічна стійкість та висока механічна міцність;

– зносостійкі сплави системи V-Cr-Mn-Fe-Co-Ni [3] мають структуру з гранецентрованою кубічною граткою (ГЦК), армованою твердою σ -фазою. Характеризуються високою стійкістю до абразивного зношування;

– загартовані з рідкого стану за допомогою методики splat-охолодження сплави Fe₅-Cr(або Co)-Cu-Ni-Mn-Si, тобто заливанням металу між двома спеціальними охолоджуваними мідними роликками [4]. Сплави мають унікальну структуру, представлену різними твердими розчинами з гранецентрованими кубічними гратками (ГЦК);

– багатоконпонентні сплави [5] системи Al-Cu-Ni-Fe-Cr-Ti-V, які після відпалу за високих температур (1000 °C) зберігають структуру із поєднанням об'ємноцентрованої кубічної (ОЦК) і гранецентрованої (ГЦК) кубічної граток.

У високоентропійних сплавах, завдяки наявності багатьох компонентів, утворюються різноманітні можливості розташування атомів у кристалічній гратці, а це, в свою чергу, призводить до значного зростання ентропії. Висока ентропія сприяє формуванню неупорядкованого твердого розчину [6]. Відомо, що при високій ентропії змішування виникає велика ймовірність формування однієї фази неупорядкованого твердого розчину з ОЦК (замість неї може утворитися ГЦК гратка). Щодо гексагональної щільно-упакованої (ГЩУ) – є підтвердження існування і такої структури у ВЕС [7].

Отримання ВЕС можливе за допомогою різних методів, серед яких варто виділити ливарне виробництво та порошкову металургію [8]. Ливарні методи включають плавлення сплаву в печах та його заливання в форму. Цей процес дає змогу отримувати деталі різної конфігурації. Важливою перевагою ливарних

методів є можливість виготовлення деталей набагато більших розмірів, порівняно з методом порошкової металургії [8].

У ливарному виробництві найбільш розповсюдженими є такі метали як Fe, Al, Cu, Ni, Cr та деякі інші. Тому саме сплав, який складається із цих 5 елементів, можна вважати найбільш перспективним та економічно вигідним. Структуру та властивості цього сплаву, отриманого методами порошкової металургії, досить добре досліджено. При цьому експериментальних даних щодо сплаву, одержаного ливарними методами, поки що немає.

В роботі сформульовано та вирішено такі завдання:

1. Вивчити особливості плавлення високоентропійного сплаву системи Al-Cu-Ni-Cr-Fe та розробити технологічний процес його отримання.
2. Дослідити фазовий склад сплаву.
3. Встановити динаміку фазових та термічних перетворень сплаву під час нагрівання.
4. Визначити ливарні властивості високоентропійного сплаву.
5. Визначити механічні властивості високоентропійного сплаву.

Під час підготовки шихтових матеріалів для створення сплаву Al-Cu-Ni-Cr-Fe було використано різноманітні складові з точними пропорціями. Кожен елемент сплаву вніс свій внесок, який в результаті становив близько 20 % атомної частки в загальній кількості.

Хімічний склад використаних компонентів шихти наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад компонентів шихти

Компонент шихти	Елемент, мас. %										Маса (г) на 1 кг сплаву
	Fe	C	Ni	Cr	Mn	Al	Cu	Si	S	P	
Чавун	74,1	2,6	17,0	1,6	1,4	0	2,6	2,0	0,025	0,035	285,2
Нікель			100*								169,8
Хром				100*							188,8
Мідь							100*				227,3
Алюміній						100*					105,0

Примітка. У використаних компонентах шихти вміст основного елемента не менше 99,5%.

Після перерахунку масових співвідношень компонентів на атомні отримано результат, представлений в табл. 2.

Таблиця 2 – Склад сплаву в масових та атомних відсотках

Елемент	Розрахунковий вміст елементів у сплаві										Разом
	Fe	C	Ni	Cr	Mn	Al	Cu	Si	S	P	
Мас. %	21,34	0,85	22,41	19,86	0,34	10,31	24,28	0,59	0,01	0,01	100
Ат. %	19,02	3,52	19,02	19,02	0,31	19,03	19,02	1,04	0,01	0,01	100

Плавлення ВЕС було проведено в індукційній тигельній печі номінальною місткістю 6,0 кг. Для визначення міцності на розтягування використано зразки тріфоподібної форми. Для випробування на твердість за методом Брінелля використано зразок у формі шайби. Для визначення рідкотекучості використано модифіковані пруткові проби.

В результаті проведення рентгенофазового аналізу було встановлено, що склад високоентропійного сплаву за нормальних умов являє собою суміш структурних складових, які мають ГЦК та ОЦК ґратки. Також у структурі сплаву помічені карбіди переважно шестикутної форми та газоусадкові пори (рис. 1).

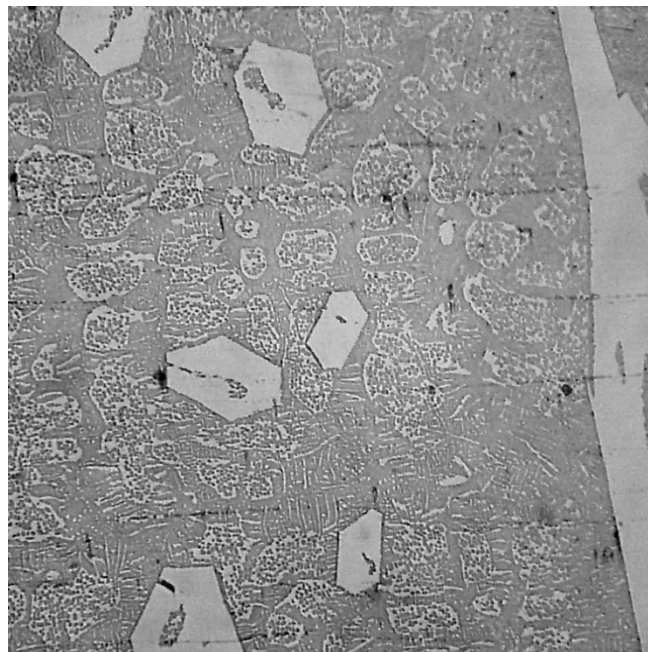


Рис. 1. Мікрошліф зразка ВЕС Al-Cu-Ni-Cr-Fe, збільшення x250

В результаті синхронного термічного аналізу встановлено, що температура ліквідусу сплаву $1343,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура солідусу $1231,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, тобто інтервал кристалізації досить значний – $111,6\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рідкотекучість ВЕС, визначена в процесі заливання пруткових проб в піщано-глинясті форми на основі кварциту з добавкою рідкого скла, температура заливання (1450 ± 20) $^{\circ}\text{C}$, лежить у межах 100...105 мм. Це досить високий показник, враховуючи те, що аналогічна характеристика чавунів різного складу, визначена за тих самих умов, становить: сірий чавун (3,0 % C, 2,0 % Si; 0,6 % Mn) – 70...80 мм; високохромистий чавун (3,0 % C; 1,4 % Si; 1,6 % Mn; 18,8 % Cr; 3,0 % Ni) – 100...110 мм; спеціальний чавун (3,0 % C; 2,0 % Si; 17,0 % Ni; 2,5 % Cu; 2,5 % Cr; 1,4 % Mn) – 85...90 мм.

Вперше визначено основні механічні властивості ВЕС системи Al-Cu-Ni-Cr-Fe. Установлено, що міцність при розриванні сплаву становить 450...550 МПа, тобто за цим показником сплав не поступається вуглецевим сталям і високоміцному чавуну.

Поєднання незначної, але задовільної пластичності (відносне видовження складає 2 %) та твердості за методом Брінелля на рівні 320...340 НВ, залишає цьому сплаву придатність до механічного оброблення.

Література:

1. Ming-Hung Tsai, Jien-Wei Yeh (2014). High-Entropy Alloys: A Critical Review, *Materials Research Letters*, 2:3, P. 107-123.
2. Huo W., Zhou H., Fang F., Zhou X., Xie Z., Jiang J. (2018). Microstructure and properties of novel CoCrFeNiTa_x eutectic high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 735. – P. 897-904. doi:10.1016/j.jallcom.2017.11.075
3. Карпець М.В. (2015). Новые материалы. Влияние содержания Ni на износостойкость литого высокоэнтропийного сплава VCrMnFeCoNi_x.

4. Полонський В.А., Башев В. Ф., Кушнерьов О. І. Структура та корозійно-електрохімічні властивості швидкозагартованих високоентропійних сплавів $Fe_5CrCuNiMnSi$ та $Fe_5CoCuNiMnSi$.

5. Чернявський В. В. Закономірності формування структури та механічних властивостей високоентропійних сплавів системи Al-Cu-Ni-Fe-Cr-Ti-V в процесі механічного легування та спікання: автореф. дис. к. т. н.: 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали / В. В. Чернявський – Київ, 2016. – 26 с.

6. Tsai M.H. High-Entropy Alloys: A Critical Review / M.H. Tsai, J.W. Yeh // Mater. Res. Lett. – 2014. – Vol. 2. – P. 107–123.

7. Dada M., Popoola P.A., Adeosun S.O., Mathe N.R. (2019). High Entropy Alloys for Aerospace Applications. Aerodynamics.

8. Yin, Xiang & Xu, Shuqiong (2018). Properties and Preparation of High Entropy Alloys. MATEC Web of Conferences. 142. 03003. 10.1051/matecconf/201714203003.

Воденнікова О.С.

(Запорізький національний університет, м. Запоріжжя)

**ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ STEM-ОСВІТИ
В ОСВІТНЬОМУ ПРОЦЕСІ ПІДГОТОВКИ ЗДОБУВАЧІВ ПЕРШОГО
(БАКАЛАВРСЬКОГО) РІВНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ
136 «МЕТАЛУРГІЯ»**

E-mail: oksana_vodennikova@ukr.net

В нинішні дні посилення ролі STEM-освіти є одним із пріоритетів модернізації освіти, складовою частиною державної політики з підвищення рівня конкурентоспроможності національної економіки та розвитку людського капіталу, одним з основних факторів інноваційної діяльності у сфері освіти, що відповідає запитам економіки та потребам суспільства. STEM-освіта спрямована на розвиток особистості через формування компетентностей, природничо-наукової картини світу, світоглядних позицій і життєвих цінностей з використанням трансдисциплінарного підходу до навчання, що базується на практичному застосуванні наукових, математичних, технічних та інженерних знань і вмінь для