

ЛИВАРНІ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОЕНТРОПІЙНОГО СПЛАВУ Al-Cu-Ni-Cr-Fe

АНОТАЦІЯ. Високоентропійні сплави (ВЕС) – це новий клас матеріалів із багатокомпонентним складом, що характеризуються високою ентропією змішування та унікальними властивостями. У статті досліджено сплав системи Al-Cu-Ni-Cr-Fe, отриманий ливарними методами. Вивчено його фазовий склад, термічні перетворення, механічні та ливарні властивості. Сплав демонструє високу міцність (450–550 МПа), твердість (320–340 НВ), задовільну пластичність (2 % видовження) і добру рідкотекучість. Отримані результати вказують на перспективність застосування ВЕС у виробництві конструкційних матеріалів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: високоентропійні сплави, ливарні властивості, механічна міцність, твердість Брінелля, фазовий склад.

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 ґраткою (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 ґратками (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 ґраток.

У високоентропійних сплавах, завдяки наявності багатьох компонентів, утворюються різноманітні можливості розташування атомів у кристалічній ґратці, 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 ґратка). 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

№ 4, 2024

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.

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

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.

Таблиця 1 – Хімічний склад компонентів шихти

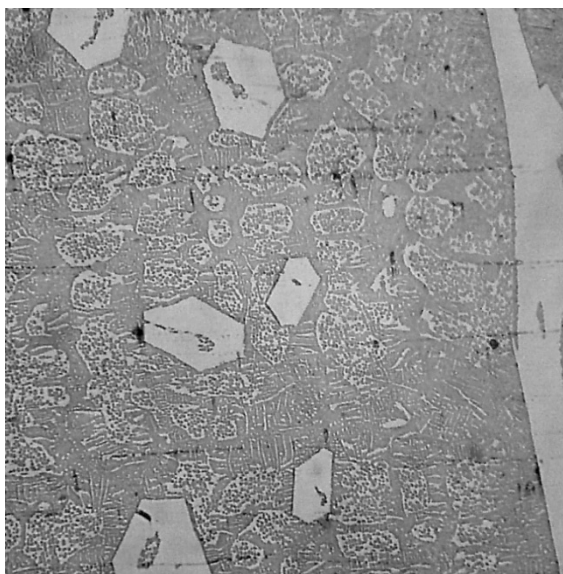
| Компонент шихти | Елемент, мас. % | | | | | | | | | | Маса (г) на 1 кг сплаву |
|-----------------|-----------------|-----|------|------|-----|------|------|-----|-------|-------|-------------------------|
| | Fe | C | Ni | Cr | Mn | Al | Cu | Si | S | P | |
| Чавун | 74,1 | 2,6 | 17,0 | 1,6 | 1,4 | 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%.

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 |

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 $\times 250$

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 $(1450 \pm 20)\text{ }^{\circ}\text{C}$, лежить у межах $100\dots 105\text{ мм}$. 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) – $70\dots 80\text{ мм}$; високохромистий чавун (3,0 % C; 1,4 % Si; 1,6 % Mn; 18,8 % Cr; 3,0 % Ni) – $100\dots 110\text{ мм}$; спеціальний чавун (3,0 % C; 2,0 % Si; 17,0 % Ni; 2,5 % Cu; 2,5 % Cr; 1,4 % Mn) – $85\dots 90\text{ мм}$.

Вперше визначено основні механічні властивості ВЕС системи Al-Cu-Ni-Cr-Fe. Установлено, що міцність при розриванні сплаву становить $450\dots 550\text{ МПа}$, 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 $320\dots 340\text{ НВ}$, 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 $\text{Fe}_5\text{CrCuNiMnSi}$ та $\text{Fe}_5\text{CoCuNiMnSi}$.

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/mateconf/201714203003.



ABSTRACT. High-entropy alloys (HEAs) represent a novel class of materials with multicomponent compositions, characterized by high mixing entropy and unique properties. This study investigates the Al-Cu-Ni-Cr-Fe alloy produced by casting methods. Its phase composition, thermal transformations, mechanical, and casting properties were analyzed. The alloy exhibits high tensile strength (450–550 MPa), hardness (320–340 HB), satisfactory ductility (2% elongation), and excellent fluidity. The results highlight the potential of HEAs for use in structural material production.

Keywords: High-entropy alloys, casting properties, mechanical strength, brinell hardness, phase composition.