

PACS numbers: 07.30.-t, 64.75.Nx, 68.37.Hk, 81.05.Vx, 81.05.-t, 81.40.-z

Порошковий зварювальний дріт високоентропійної системи легування за Кантором для натоплень

А. В. Завдовєєв, О. А. Гайворонський, В. Д. Позняков,
А. В. Клапатюк, Д. В. Ведель*, Т. Baudin**, О. А. Лось, Р. А. Козин,
М. А. Скорик***

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11,
03150 Київ, Україна*

**Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
вул. Академіка Кржижановського, 3,
03142 Київ, Україна*

***Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay, CNRS,
Université Paris-Saclay,
91405 Orsay Cedex, France*

****Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського, 36,
03142 Київ, Україна*

Високоентропійні стопи складаються з п'ятих і більше основних елементів в еквімолярних співвідношеннях; такі стопи можуть містити основні елементи з концентрацією кожного елемента від 5 до 35 ат.%. Це приводить до створення багатьох систем стопів із простими кристалічними

Corresponding author: Anatoliy Viktorovich Zavdoveev
E-mail: avzavdoveev@gmail.com

*E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine,
11 Kazymyr Malevych Str., UA-03150 Kyiv, Ukraine*

**I. M. Frantsevich Institute for Problems in Materials Science, N.A.S. of Ukraine,
3 Academician Krzhyzhanovsky Str., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

***Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay, CNRS,
Université Paris-Saclay, 91405 Orsay Cedex, France*

****G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: A. V. Zavdoveev, O. A. Gaivoronsky, V. D. Poznyakov, A. V. Klapatyuk, D. V. Vedel, T. Baudin, O. A. Los', R. A. Kozin, and M. A. Skoryk, Powder Welding Wire of High-Entropy Alloying System Cantor for Surfacing, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 44, No. 8: 1025–1035 (2022) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.44.08.1025](https://doi.org/10.15407/mfint.44.08.1025)

структурами та надзвичайними властивостями. Такі стопи мають велике прикладне значення та зазвичай виготовляються методами порошкової металургії, звичайним литтям тощо. Ці металургійні процеси в основному використовуються для створення деталей простої геометрії з потребою подальшого механічного оброблення. У роботі запропоновано нову методу одержання високоентропійного стопу за Кантором за допомогою адитивного виробництва методом дугового зварювання (АВДЗ) з використанням новітнього порошкового дроту. Розглянуто особливості виготовлення високоентропійних стопів альтернативними методами, а також підкреслено переваги використання АВДЗ.

Ключові слова: високоентропійний стоп, адитивне виробництво методом дугового зварювання, порошковий дріт, фазовий склад, топлення.

High-entropy alloys, consisting of five or more basic elements in equimolar ratios, such alloys may contain basic elements with a concentration of each element from 5 to 35 at.%. This leads to the creation of many alloy systems with simple crystalline structures and extraordinary properties. Such alloys have great practical value and are usually made by powder metallurgy, conventional casting, *etc.* These metallurgical processes are mainly used to create details of simple geometry with the need for further machining. The paper proposes a new method of obtaining a high-entropy alloy of the Cantor alloying system by means of wire arc additive manufacturing (WAAM) using metal powder cored wire. Features of manufacturing high-entropy alloys by alternative methods are considered, and the advantages of using WAAM are emphasized.

Key words: high-entropy alloy, wire arc additive manufacturing, metal powder cored wire, phase composition, melting.

(Отримано 25 травня 2022 р.; остаточн. варіант — 28 червня 2022 р.)

1. ВСТУП

Загальновідомо, що стопи з високою ентропією, складаються з п'яти та більш основних елементів в еквімолярних співвідношеннях, такі стопи можуть містити основні елементи з концентрацією кожного елемента від 5 до 35%. Це приводить до створення багатьох систем стопів із простими кристалічними структурами та надзвичайними властивостями [1]. Такі стопи мають велике прикладне значення.

Наприклад, п'ятикомпонентний еквімолярний стоп системи легування за Кантором CrMnFeCoNi має виняткову в'язкість до руйнування при криогенних температурах (понад 200 МПа·м^{1/2}), що робить його ідеальним матеріалом для використання при низьких температурах [2–7].

Як правило, такі стопи виготовляють методами порошкової металургії [8], звичайним литтям [9, 10] тощо. Для досягнення необ-

хідних властивостей шляхом уточнення мікроструктур, стопи обробляють методом холодного формування та/або відпалу металу [9, 10]. Ці металургійні процеси, в основному використовуються для створення деталей простої геометрії з подальшим механічним обробленням.

При використанні метод порошкової металургії одержання високоентропійного стопу відбувається шляхом змішування порошків-компонентів стопу, компактуванням одержаної суміші з наступним стопоутворенням при спіканні у високотемпературній печі [11]. Недоліками цього способу є необхідність використання спеціалізованого устаткування та значні енергозатрати. Також можна одержати високоентропійний стоп процесом, що включає змішування порошків-компонентів, компактування одержаної суміші та її стопоутворення у відкритому позапічному просторі під дією концентрованої сонячної енергії [12]. Однак цей спосіб також не дає змогу одержувати габаритні зразки.

Створювати високоентропійні стопи можна використовуючи в якості джерела нагріву високоенергетичні лазери [13] або електронно-променеве обладнання [14]. Такі способи дають змогу одержувати високоякісні стопи та сформувати з них деталі складної геометричної форми. Однак, з точки зору економічних витрат, використання цих метод нагріву для створення об'ємних адитивних (багатошарових) натоплень не доцільно. Більш того, для реалізації таких технологій необхідно мати вже готові заготовки певного складу, які витолені з використанням традиційних металургійних процесів, що також суттєво підвищує витрати.

Високоентропійні стопи можливо також створювати з використанням адитивного виробництва електродуговим способом зварювання з використанням дроту суцільного перерізу. Це обумовлено економічною ефективністю в порівнянні з традиційними методами та використанням лазерного та променевого нагріву. Джерелом нагріву для топлення в цьому випадку є електрична дуга. У якості матеріалу присадки використовуються дроти промислового виробництва різного складу.

Поєднання цих двох чинників дає перевагу перед високоенергетичним лазерним або електронно-променевим обладнанням. Така метода більш ефективна для використання в дизайні адитивного виробництва. Дає змогу створювати високоентропійні стопи різних складів. Як показано в роботі [15], адитивне виробництво методом дугового зварювання (АВДЗ) з газовою вольфрамовою дугою (GTA) з попередньо легованим дротом може бути відповідним альтернативним шляхом виробництва для AlCoCrFeNi стопу із заздалегідь визначеним складом. Недоліком цього способу є те, що наявність дротів необхідних складів в виробництві дуже обмежена. Цю проблему частково вирішує створення потрібного зварювального матеріалу у

формі джгута, який складається з тонких дротів певного хемічного складу, що дає змогу одержати необхідний хемічний склад металу адитивного натоплювання.

Як приклад такої форми зварювального матеріалу відомо тип комбінованого кабельного дроту (джгуту) з багатоелементним складом для АВДЗ з нееквіатомного високоентропійного стопу Al–Co–Cr–Fe–Ni [16]. Джгут складається з 5–7 дротів, так званих «ниток», кожна з яких відповідає окремому хемічному складу стопу. Як показали автори роботи, така форма кабельного дроту має переваги високої ефективності осадження, самостійного обертання зварювальної дуги та енергозбереження. Цей стоп має доволі високу тимчасову міцність (2900 МПа) та показники пластичності (подовження 42%). При цьому, змінюючи тепловіддачу можна керувати мікроструктурою та механічними властивостями цього стопу. Таким чином доведено, що за методом електродугового зварювання можливо успішно створювати високоентропійні адитивні стопи. Однак, головним недоліком зазначеного способу, як ми вже відзначили вище, є відсутність у виробництві деяких дротів потрібного хемічного складу, що обмежує можливість одержати стоп необхідної системи легування при адитивному натоплюванні. Вирішенням цієї проблеми можливо було б створення порошкових дротів для натоплювання.

Задачею даної роботи, було створення способу електродугового адитивного натоплювання з використанням дроту, який би дав змогу одержати широкий спектр хемічного складу високоентропійного багат шарового натоплювання. Вирішення цієї задачі досягалось нами за рахунок використання порошкового дроту та механізованого натоплювання в середовищі захисних газів, в склад шихти якого можна вводити такі компоненти, як Кобальт, Манган, Хром, Нікель (заявка № А202201578 на патент України від 17.05.2022 [17]). Це сприяло одержанню оптимальної структури металу адитивного високоентропійного натоплювання.

2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для виготовлення порошкового дроту діаметром 2,2 та 2,4 мм використовувалась стрічка з криці 08пс розміром 0,4×10 мм та 0,5×12 мм, конструкція дроту одношарова (рис. 1). Введення до складу шихти дроту Кобальту, Мангану, Хрому, Нікелю в кількості 20–25% кожен (табл. 1), забезпечує в результаті натоплювання високоентропійний адитивний стоп з заданими характеристиками. Порошковий дріт складався з крицевої оболонки та порошкоподібної шихти, яка в своєму складі мала тільки металеві компоненти.

Коефіцієнт заповнення дроту при цьому був в межах 50–60%, а його співвідношення до діаметра дроту складало 20–23 од. Дослі-

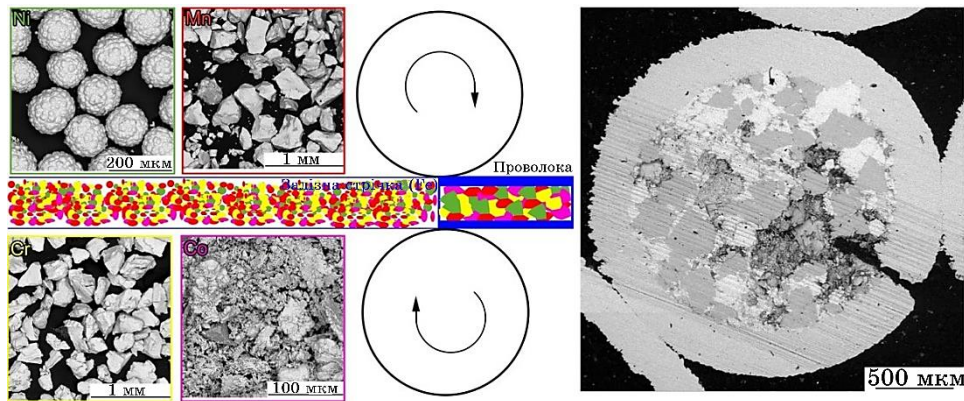


Рис. 1. Схема виготовлення порошкового дроту ВЕС.

Fig. 1. Scheme of manufacturing of HEA metal powder cored wire.

дження впливу заповнення дроту шихтою на його якість показало, що при пониженні цього співвідношення нижче 20 од. з'являється небезпека так званого пересипання шихти в оболонці (сепарації) та пов'язаного з цим виникнення неоднорідності в нагрітому металі. При співвідношенні більш за 23 од. в оболонці дроту виникають мікротріщини, які приводять до руйнування порошкового дроту в процесі зварювання.

Для проведення порівняльних досліджень, було виконано топлення високоентропійного ступу (ВЕС) з використанням одержаного порошкового дроту. Один вид топлення проводили у вакуумній печі СШВЛ-10 (Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України) при температурі $(1450 \pm 50)^\circ\text{C}$. Дріт поміщався в тигель із оксиду Алюмінію, нагрівався зі швидкістю $50^\circ\text{C}/\text{хв.}$, витримувався 15 хв., та охолоджувався зі швидкістю $100^\circ\text{C}/\text{хв.}$ Другий вид топлення проводився на установці плазмово-дугового переплаву (сила струму 220 А, напруга 18 В) у мідному кристалізаторі з водяним охолодженням.

Нами запропоновано виготовлення адитивного високоентропійного ступу з використанням порошкового дроту при механізованому зварюванні в середовищі суміші захисних газів Ar та CO_2 . Для виконання нагріть використовували джерело живлення ВДУ

ТАБЛИЦЯ 1. Хемічний склад дроту.

TABLE 1. Chemical composition of the wire.

Елемент	Cr	Mn	Co	Ni	Fe
Кількість, ат. %	15–20	15–20	15–20	15–20	Решта

506, при цьому параметри зварювання були наступні: струм зварювання 280–350 А, напруга на дузі 32–34 В, температура при багатшаровому зварюванні складала 200–250°C. Зварювання виконувалось на режимах, які забезпечували стабільне горіння дуги, що досягається при швидкості подавання дроту 280–330 м/год.

Дослідження структури натоплень проводили за допомогою растрового електронного мікроскопу Mira 3 LMU (Tescan). При досліджуванні використовували детектор пружньовідбитих електронів (позначення BSE на електронному знімку). Для оцінки елементного складу під час дослідження використовувався детектор-спектрометр Oxford X-Max 80 та аналітичний програмний продукт INCA Energy.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

З використанням виготовленого високоентропійного зварювального порошкового дроту було вирощено об'ємний зразок високоентропійного стопу системи легування Cantor. Загалом було виконано десять шарів натоплень, що дало змогу одержати монолітний зра-

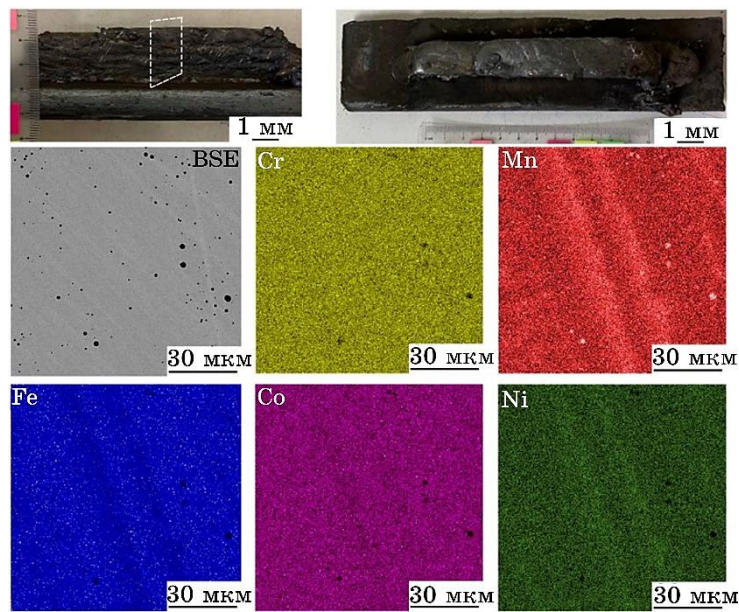


Рис. 2. Загальний вигляд натоплень та мапи розподілу хемічних елементів ВЕС.

Fig. 2. General view of surfacing and distribution maps of HEA chemical elements.

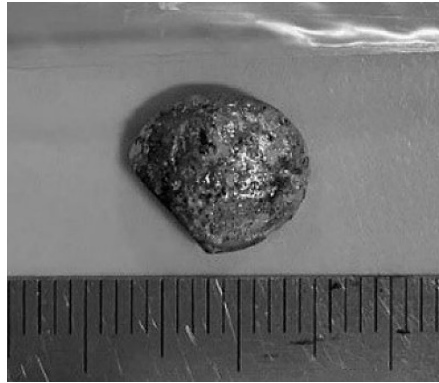


Рис. 3. Макрознімок зразка ВЕС, витопленого з дроту.

Fig. 3. Macroimage of the HEA sample melted from wire.

зок розмірами 150×35×20 мм (рис. 2). З даних аналізу фазового контрасту (SEM/BSE) видно однорідне формування однофазного стопу. Крім того, данні мап розподілу хемічних елементів також підтверджують їх однорідний розподіл. Незначна ліквіація Мангану, що спостерігається, є цілком закономірним явищем.

З метою проведення порівнянь були виконані топлення зразків порошкового дроту вагою 5–7 г (рис. 3), як у вакуумній печі, так і за допомогою аргано-плазмового топлення.

Макроструктура високоентропійних стопів, як виготовленого за допомогою адитивного підходу, так і стоплених в вакуумній печі, а

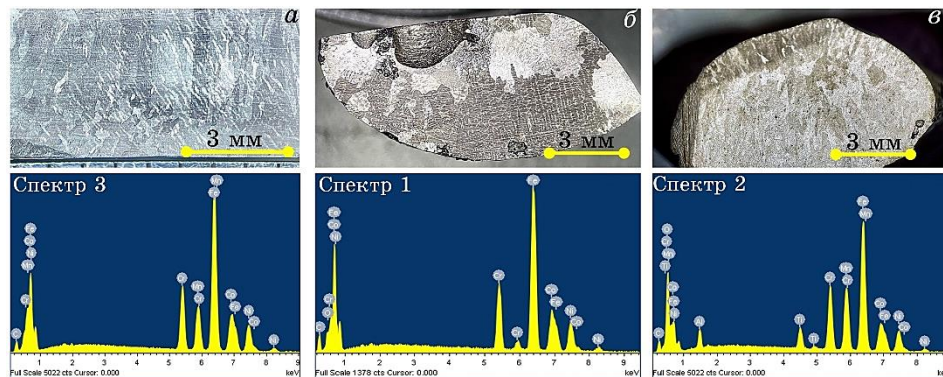


Рис. 4. Макроструктура та енергетичні спектри для стопу, виготовленого електродуговим зварюванням (а), вакуумним топленням (б) та аргано-плазмовим топленням (в).

Fig. 4. Macrostructure and energy spectra for an alloy fabricated by electric arc welding (a), vacuum melting (b), and argon-plasma melting (c).

ТАБЛИЦЯ 2. Хемічний склад.

TABLE 2. Chemical composition.

	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
Зварювання	13,6	11,8	48,8	12,7	12,9
Вакуумне топлення	13,4	0,0	55,5	14,6	15,3
Аргоно-плазмове топлення	12,5	14,4	39,2	9,9	9,5

також за допомогою аргоно-плазмового топлення, наведено на рис. 4.

Відповідно до енергетичних спектрів (рисунок 4), в хемічному складі стопів виготовлених за допомогою адитивної технології та аргоно-плазмовим топленням присутні всі потрібні елементи: Cr, Mn, Fe, Co, Ni (табл. 2). Хемічну формулу високоентропійного стопу можна записати наступним чином $Cr_{0,125}Mn_{0,125}Fe_{0,5}Co_{0,125}Ni_{0,125}$. З іншого боку, у стопі, якій одержано вакуумним перетопленням спостерігається майже повна відсутність Mn. Це скоріше всього пов'язано із властивостями самого Mn. За температури $\cong 1246^{\circ}C$ відбувається його топлення. При підвищенні температури до $(1450 \pm 50)^{\circ}C$, відбувається інтенсивне випаровування Мангану зі стопу, так як за даних температур пружність його пару становить $1,5 \cdot 10^3$ Н/мм² [18, 19]. За допомогою комп'ютерного моделювання показано, що у вакуумі можлива значна сегрегація та випаровування Мангану із поверхні, що притаманно для нашого випадку [20]. Схожа ситуація, випаровування Мангану зі стопу, спостерігається у випадку системи Fe–C–Mn [21]. Тому хемічну формулу стопу в цьому випадку можна записати наступним чином $Cr_{0,15}Fe_{0,55}Co_{0,15}Ni_{0,15}$.

Слід зазначити, що за умов підтримання у печі безперервного вакууму, відбувається випаровування Мангану, що є небажаним при технологічному процесі виготовлення високоентропійних стопів. Запобігти цьому вдалося за рахунок використання аргоно-плазмового топлення, але суттєвим недоліком такого процесу залишається обмежений в об'ємі витоп. Натомість нагрівання порошковим зварювальним дротом дає змогу одержувати великогабаритні зразки. Запропонований спосіб найбільш близький до методи одержання високоентропійного стопу з використанням багатожильного дроту [22], який формується шляхом скручування 5–7 різних дротів з чистого металу, але менш складний та простіший у використанні.

4. ВИСНОВКИ

Технічне рішення, яке було досліджено, може бути використане

при виготовленні адитивних високоентропійних стопів з використанням механізованого зварювання в середовищі захисних газів порошковими дротами з високими коефіцієнтами заповнення. Шихта дроту при цьому має мати компоненти в рівній кількості відносно один одного, в % мас.: 15–20 кобальтового порошку, 15–20 Мангану, 15–20 Хрому, 15–20 ніклевому порошку, решта крицева оболонка.

Спосіб зварювання з використанням цього порошкового дроту забезпечує одержання адитивного високоентропійного стопу з потрібними характеристиками. Розроблена нами метода для створення високоентропійної системи легування за Кантором за низкою показників переважає такі альтернативні методи одержання об'ємного ВЕС як топлення у вакуумі або плазмово-дугове перетоплення, перш за все, за рахунок переважання у витопленому об'ємі заготовки.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. K. Wu, N. Ding, T. Yin, M. Zeng, and Z. Liang, *J. Manuf. Process.*, **35**: 728 (2018).
2. B. Cantor, I. T. H. Chang, P. Knight, and A. J. B. Vincent, *Mater. Sci. Eng. A*, **375–377**: 213 (2004).
3. E. Johnson, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, **42**, Iss. 3: 403 (1989).
4. Lin Wang, Chuansong Wu, Ji Chen, Jinqiang Gao, *J. Manuf. Process.*, **56**: 1193 (2020).
5. J.-W. Yeh, S.-K. Chen, S.-J. Lin, J.-Y. Gan, T.-S. Chin, T.-T. Shun, C.-H. Tsau, S.-Y. Chang, *Adv. Eng. Mater.*, **6**: 299 (2004).
6. A. Takeuchi, K. Amiya, T. Wada, K. Yubuta, and W. Zhang, *JOM*, **66**: 1984 (2014).
7. C. L. Tracy, S. Park, D. R. Rittman, S. J. Zinkle, H. Bei, M. Lang, R. C. Ewing, and W. L. Mao, *Nat. Commun.*, **8**: 15634 (2017).
8. W. Ji, W. Wang, H. Wang, J. Zhang, Y. Wang, F. Zhang, and Z. Fu, *Intermetallics*, **56**: 24 (2015).
9. B. Gludovatz, A. Hohenwarter, D. Catoor, E. H. Chang, E. P. George, and R. O. Ritchie, *Science*, **345**, No. 6201: 1153 (2014).
10. Z. Tang, T. Yuan, C.-W. Tsai, J.-W. Yeh, C. D. Lundin, and P. K. Liaw, *Acta Mater.*, **99**: 247 (2015).
11. Chi-San Chen, Chih-Chao Yang, Jien-Wei Yeh, and Chin-Te Huang, *Ultra-hard Composite Material and Method for Manufacturing the Same*, Patent of USA No. US2009/0074604 A1 (Published March 19, 2009).
12. Ю. М. Литвиненко, А. О. Перекос, В. П. Залуцький, В. М. Надутов, С. Ю. Макаренко, *Спосіб одержання високоентропійного сплаву*, Патент на корисну модель № 97118 (Опубліковано 29 жовтня 2014 р.).
13. *FeCoCrNi Series High-Entropy Alloy Selective Laser Melting In-Situ Additive Manufacturing Method and Product*, Patent of China CN111085689A (Published October 23, 2018).
14. *Method for Preparing Ni–Cr–Co–Fe–Mn High-Entropy Alloy by Electron Beam Melting, Homogenization and Purification*, Patent of China CN110423904B

(Published July 14, 2020).

15. M. R. U. Ahsan, G.-J. Seo, X. Fan, P. K. Liaw, S. Motaman, C. Haase, and D. B. Kim, *J. Manuf. Process.*, **68**: 1314 (2021).
16. Q. Shen, X. Kong, and X. Chen, *J. Mater. Sci. Technol.*, **74**: 136 (2021).
17. А. В. Завдовєєв, О. А. Гайворонський, В. Д. Позняков, А. В. Клапатюк, *Способ виготовлення високоентропійного сплаву з використанням адитивних технологій порошковим зварювальним дротом*, Заявка на патент України № А202201578 від 17.05.2022.
18. R. L. Loftness, *A Vapor Pressure Chart for Metals* (North American Aviation Inc.: 1951).
19. *Handbook of the Physicochemical Properties of the Elements* (Ed. G. V. Samsonov) (Springer: 1968).
20. A. Ferrari and F. Körmann, *Appl. Surf. Sci.*, **533**: 147471 (2020).
21. R. Ohno, *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **17**: 732 (1977).
22. *Refractory High-Entropy Alloy Stranded Wire Material, Application and Preparation Method*, Patent China CN110538945B (Published September 19, 2019).

REFERENCES

1. K. Wu, N. Ding, T. Yin, M. Zeng, and Z. Liang, *J. Manuf. Process.*, **35**: 728 (2018).
2. B. Cantor, I. T. H. Chang, P. Knight, and A. J. B. Vincent, *Mater. Sci. Eng. A*, **375–377**: 213 (2004).
3. E. Johnson, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, **42**, Iss. 3: 403 (1989).
4. Lin Wang, Chuansong Wu, Ji Chen, Jinqiang Gao, *J. Manuf. Process.*, **56**: 1193 (2020).
5. J.-W. Yeh, S.-K. Chen, S.-J. Lin, J.-Y. Gan, T.-S. Chin, T.-T. Shun, C.-H. Tsau, S.-Y. Chang, *Adv. Eng. Mater.*, **6**: 299 (2004).
6. A. Takeuchi, K. Amiya, T. Wada, K. Yubuta, and W. Zhang, *JOM*, **66**: 1984 (2014).
7. C. L. Tracy, S. Park, D. R. Rittman, S. J. Zinkle, H. Bei, M. Lang, R. C. Ewing, and W. L. Mao, *Nat. Commun.*, **8**: 15634 (2017).
8. W. Ji, W. Wang, H. Wang, J. Zhang, Y. Wang, F. Zhang, and Z. Fu, *Intermetallics*, **56**: 24 (2015).
9. B. Gludovatz, A. Hohenwarter, D. Catoor, E. H. Chang, E. P. George, and R. O. Ritchie, *Science*, **345**, No. 6201: 1153 (2014).
10. Z. Tang, T. Yuan, C.-W. Tsai, J.-W. Yeh, C. D. Lundin, and P. K. Liaw, *Acta Mater.*, **99**: 247 (2015).
11. Chi-San Chen, Chih-Chao Yang, Jien-Wei Yeh, and Chin-Te Huang, *Ultra-hard Composite Material and Method for Manufacturing the Same*, Patent of USA No. US2009/0074604 A1 (Published March 19, 2009).
12. Yu. M. Lytvynenko, A. O. Perekos, V. P. Zaluts'kyu, V. M. Nadutov, and S. Yu. Makarenko, *Sposib Oderzhannya Vysokoentropiynoho Splavu* [The Method of Manufacturing a High-Entropy Alloy], Utility Model Patent No. 97118 (Published October 29, 2014) (in Ukrainian).
13. *FeCoCrNi Series High-Entropy Alloy Selective Laser Melting In-Situ Additive Manufacturing Method and Product*, Patent of China CN111085689A (Published October 23, 2018).

14. *Method for Preparing Ni–Cr–Co–Fe–Mn High-Entropy Alloy by Electron Beam Melting, Homogenization and Purification*, Patent of China CN110423904B (Published July 14, 2020).
15. M. R. U. Ahsan, G.-J. Seo, X. Fan, P. K. Liaw, S. Motaman, C. Haase, and D. B. Kim, *J. Manuf. Process.*, **68**: 1314 (2021).
16. Q. Shen, X. Kong, and X. Chen, *J. Mater. Sci. Technol.*, **74**: 136 (2021).
17. A. V. Zavdovyeyev, O. A. Hayvorons'kyi, V. D. Poznyakov, and A. V. Klapatyuk, *Sposib Vyhotovlennya Vysokoentropiynoho Splavu z Vykorystannym Adytyvnykh Tekhnolohiy Poroshkovym Zvaryval'nym Drotom* [The Method of Manufacturing a High-Entropy Alloy using Additive Technologies with a Powder Welding Wire], Application for a Patent of Ukraine No. A202201578 (Submit May 17, 2022) (in Ukrainian).
18. R. L. Loftness, *A Vapor Pressure Chart for Metals* (North American Aviation Inc.: 1951).
19. *Handbook of the Physicochemical Properties of the Elements* (Ed. G. V. Samsonov) (Springer: 1968).
20. A. Ferrari and F. Körmann, *Appl. Surf. Sci.*, **533**: 147471 (2020).
21. R. Ohno, *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **17**: 732 (1977).
22. *Refractory High-Entropy Alloy Stranded Wire Material, Application and Preparation Method*, Patent China CN110538945B (Published September 19, 2019).