Порошковий зварювальний дріт високоентропійної системи легування Кантор для наплавлень. (українською) Порошковая сварочная проволока высокоэнтропийной системы легирования Кантор для наплавок (на русском)

A V Zavdoveev, O A Gaivoronsky, V D Poznyakov, A V Klapatyuk, D V Vedel, T Baudin, O A Los, R A Kozin, M A Skoryk

▶ **To cite this version:**

A V Zavdoveev, O A Gaivoronsky, V D Poznyakov, A V Klapatyuk, D V Vedel, et al.. Порошковий зварювальний дріт високоентропійної системи легування Кантор для наплавлень. (українською) Порошковая сварочная проволока высокоэнтропийной системы легирования Кантор для наплавок (на русском). Metallofizika i Noveishie Tekhnologii [Metallophysics and Advanced Technologies], 2022, 44 (8), pp.1025 - 1035. ⟨10.15407/mfint.44.08.1025⟩. ⟨hal-03812058v2⟩

HAL Id: hal-03812058

https://hal.science/hal-03812058v2

Submitted on 17 Oct 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

HAL Authorization

Powder welding wire of high-entropy alloying system Cantor for surfacing

A.V. Zavdoveev *, O.A. Gaivoronsky *, V.D. Poznyakov *, A.V. Klapatyuk *, D.V. Vedel **, T. Baudin ***, O.A. Los *, R.A. Kozin *, M.A. Skoryk ****

Порошковий зварювальний дріт високоентропійної системи легування Кантор для наплавлень. *(українською)*

Порошковая сварочная проволока высокоэнтропийной системы легирования Кантор для наплавок *(на русском)*

А. В. Завдовєєв*, О.А. Гайворонський*, В. Д. Позняков*, А.В. Клапатюк*, Д.В. Ведель**, T. Baudin***, О.А. Лось*, Р.А. Козин*, М.А. Скорик****
(П.І.Б. усіх авторів трьома мовами)
А. В. Задовеев*, О.А. Гайворонский, В. Д. Позняков, А.В. Клопотюк*, Д.В. Ведель**, T. Baudin***, О.А. Лось*, Р.А. Козин*, М.А. Скорик****

* *E.O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine 03150, Kyiv, Ukraine, st. K.Малевича 11*
* *Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України 03150, Київ, Україн, вул. К.Малевича 11*
* *Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины 03150, Киев, Украина, ул. К.Малевича 11*
** *Institute of Problems of Materials Science IM Frantsevich NAS of Ukraine 03142, Kyiv, Ukraine, st. Krzyzanowski, 3*
** *Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України 03142, Київ, Україна, вул. Кржижановського, 3*
** *Институт проблем материаловедения им. И. М. Францевича НАН Украины 03142, Киев, Украина, ул. Кржижановского, 3*
*** *Université Paris-Saclay, CNRS, Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'-Orsay, 91405, Orsay, France*, e-mail: thierry.baudin@universite-paris-saclay.fr
*** *Університет Париж-Саклі, CNRS, Інститут молекулярної хімії та матеріалів Орсе, 91405, Орсе, Франція, електронна пошта: thierry.baudin@universite-paris-saclay.fr*
*** *Университет Париж-Сакле, CNRS, Институт молекулярной химии и материалов Орсе, 91405, Орсе, Франция, электронная почта: thierry.baudin@universite-paris-saclay.fr*
*****G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,*
36 Academician Vernadsky Blvd.,
UA-03142 Kyiv, Ukraine
*****Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,*
бульв. Академіка Вернадського, 36,
03142 Київ, Україна
*****Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,*
бульв. Академика Вернадского, 36,
03142 Киев, Украина

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

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.

Високоентропійні сплави, складаються з п'яти та більш основних елементів в еквімолярних співвідношеннях, такі сплави можуть містити основні елементи з концентрацією кожного елемента від 5 до 35 ат.-%. Це призводить до створення багатьох систем сплавів із простими кристалічними структурами та надзвичайними властивостями. Такі сплави мають велике прикладне значення та зазвичай виготовлюються методами порошкової металургії, звичайним литтям, тощо. Ці металургійні процеси, в основному використовуються для створення деталей простої геометрії з потребою подальшої механічної обробки. У роботі запропоновано новий метод отримання високоетнропійного сплаву системи легування Кантор за допомогою адитивного виробництва методом дугового зварювання (АВДЗ) з використанням новітнього порошкового дроту. Розглянуті особливості виготовлення високоентропійних сплавів альтернативними методами а також підкреслено переваги використання АВДЗ.

Ключові слова: високоентропійний сплав, адитивне виробництво методом дугового зварювання, порошковий дріт, фазовий склад, плавлення.

Высокоэнтропийные сплавы, состоящие из пяти и более основных элементов в эквимолярных соотношениях, такие сплавы могут содержать основные элементы с концентрацией каждого элемента от 5 до 35 ат.-%. Это приводит к созданию многих систем сплавов с простыми кристаллическими структурами и чрезвычайными свойствами. Такие сплавы имеют большое прикладное значение и обычно изготавливаются методами порошковой металлургии, обычным литьем и т.д. Эти металлургические процессы в основном используются для создания деталей простой геометрии с потребностью последующей механической обработки. В работе предложен новый метод получения высокоэтнропийного сплава системы легирования Кантор с помощью аддитивного производства методом дуговой сварки (АПДС) с использованием новейшей порошковой проволоки. Рассмотрены особенности изготовления высокоэнтропийных сплавов альтернативными методами, а также подчеркнуты преимущества использования АПДС.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, аддитивное производство методом дуговой сварки, порошковая проволока, фазовый состав, плавление.

1. ВСТУП

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

Наприклад, квінарний еквімолярний сплав Cantor системи легування CrMnFeCoNi має виняткову в’язкість до руйнування при кріогенних температурах (понад 200 МПа м 1/2), що робить його ідеальним матеріалом для використання при низьких температурах [2-7].

Як правило такі сплави виготовлюють методами порошкової металургії [8], звичайним литтям [9-10] тощо. Для досягнення необхідних властивостей шляхом уточнення мікроструктур, сплави 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.

З методами порошкової металургії одержання високоентропійного сплаву відбувається шляхом змішуванням порошків-компонентів сплаву, компактуванням одержаної суміші з наступним сплавоутворенням при спіканні у високотемпературній печі [11]. Недоліками цього способу є необхідність використання спеціалізованого устаткування та значні кількості енергозатрати. Також можна отримати високоентропійний сплав процесом, що включає змішування порошків-компонентів, компактування одержаної суміші та її сплавоутворення у відкритому позапічному просторі під дією концентрованої сонячної енергії [12]. Однак цей спосіб також не дозволяє отримувати габаритні зразки.

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

Високоентропійні сплави 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 плавлення в цьому випадку є електрична дуга. У якості матеріалу присадки використовуються дроти промислового виробництва різного складу.

Поєднання цих двох факторів дає перевагу перед високоенергетичним лазерним або електронно-променевим обладнанням. Такий метод більш ефективний для використання в дизайні адитивного виробництва. Дозволяє створювати високоентропійні сплави 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 сплаву 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 хімічного складу, що дозволяє отримати необхідний хімічний склад металу адитивного наплавлення.

Як приклад такої форми зварювального матеріалу відомо тип комбінованого кабельного дроту (джгуту) з багатоелементним складом для АВДЗ з нееквіатомного високоентропійного сплаву Al-Co-Cr-Fe-Ni [16]. Джгут складається з 5-7 дротів, так званих «ниток», кожна з яких відповідає окремому хімічному складу сплаву. Як показали автори роботи, така форма кабельного дроту має переваги високої ефективності осадження, самостійного обертання зварювальної дуги та енергозбереження. Цій сплав має доволі високу тимчасову міцність (2900 МПа) та показники пластичності (подовження 42%). При цьому, змінюючи тепловіддачу можна керувати мікроструктурою та механічними властивостями цього сплаву. Таким чином доведено, що за методом електродугового зварювання можливо успішно створювати високоентропійні адитивні сплави. Однак, головних недоліком зазначеного способу, як ми вже відзначили вище, є відсутність у виробництві деяких дротів

потрібного хімічному складу, що обмежує можливість отримати сплав необхідної системи легування при адитивному наплавленні. Вирішенням цієї проблеми можливо було б створення порошкових дротів для наплавлення.

Задачею даної роботи, було створення способу електродугового адитивного наплавлення з використанням дроту, який би дозволив отримати широкий спектр хімічного складу високоентропійного багатошарового наплавлення. Вирішення цієї задачі досягалось нами за рахунок використання порошкового дроту та механізованого наплавлення в середовищі захисних газів, в склад шихти якого можна вводити такі компоненти, як кобальт, марганець, хром, нікель (Заявка № A202201578 на Патент України від 17.05.2022 [17]). Це сприяло отриманню оптимальної структури металу адитивного високоентропійного наплавлення.

2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для виготовлення порошкового дроту діаметром 2,2 та 2,4мм використовувалась стрічка з сталі 08пс розміром 0,4×10 та 0,5х12мм, конструкція дроту одношарова (рис.1). Введення до складу шихти дроту кобальту, марганцю, хрому, нікелю в кількості 20…25% кожен (табл.1), забезпечує в результаті наплавлення високоентропійний адитивний сплав з заданими характеристиками. Порошковий дріт складався з стальної оболонки та порошкоподібної шихти, яка в своєму складі мала тільки металеві компоненти.

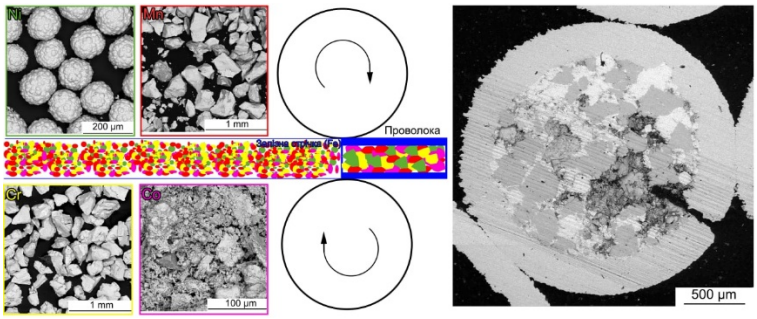

Рис.1 Схема виготовлення порошкового дроту ВЕС.

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

ТАБЛИЦЯ 1. – Хімічний 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

Коефіцієнт заповнення дроту при цьому був в межах 50…60%, а його співвідношення до діаметру дроту складало 20…23од. Дослідження впливу заповнення дроту шихтою на його якість показало, що при зниженні цього співвідношення нижче 20од з'являється небезпека так званого пересипання шихти в оболонці (сепарації) та пов'язаного с цим виникнення неоднорідності в наплавленому металі. При співвідношенні більш за 23од в оболонці дроту виникають мікротріщин, які призводять до руйнування порошкового дроту в процесі зварювання.

Для проведення порівняльних досліджень, було виконано плавки високоентропійного сплаву (ВЕС) з використанням отриманого порошкового дроту. Один вид плавки проводили у вакуумній печі СШВЛ-10 (ІПМ, Київ) при температурі 1450±50ºС. Дріт поміщався в тигель із оксиду алюмінію, нагрівався зі швидкістю 50 ºС/хв, витримувався 15 хв, та охолоджувався зі швидкістю 100ºС/хв. Другий вид плавки проводився на установці плазмового-дугового переплаву (сила струму 220А, напруга 18В) у мідному кристалізаторі з водяним охолодженням.

Нами запропоновано виготовлення адитивного високоентропійного сплаву з використанням порошкового дроту при механізованому зварюванні в середовищі суміші захисних газів Ar та CO_2. Для виконання наплавлень використовували джерело живлення ВДУ 506, при цьому параметри зварювання були наступні: струм зварювання 280-350А, напруга на дузі 32-34В, температура багатошаровому зварюванні складала 200…250°С. Зварювання виконувалось на режимах які забезпечували стабільне горіння дуги, що досягається при швидкості подавання дроту 280..330м/год.

Дослідження структури наплавлень проводили за допомогою растрового електронного мікроскопу Mira 3 LMU (Tescan). При дослідженні 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. РЕЗУЛЬТВТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

З використанням виготовленого високоентропійного зварювального порошкового дроту було вирощено об’ємний зразок високоентрпійного сплаву системи легування Cantor. Загалом було виконано десять шарів наплавлень, що дало змогу отримати монолітний зразок розмірами 150х35х20мм (рис.2). З даних аналізу фазового контрасту (CEM/BSE) видно однорідне формування однофазного сплаву. Крім того данні карт розподілу хімічних елементів також підтверджують їх однорідний розподіл. Незначна ліквація марганцю, що спостерігається, є цілком закономірним явищем.

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

Макроструктура ВЕС, як виготовленого за допомогою адитивного підходу, так і виплавлених в вакуумній печі, а також за допомогою аргоно-плазмового плавлення, наведено на рис. 4.

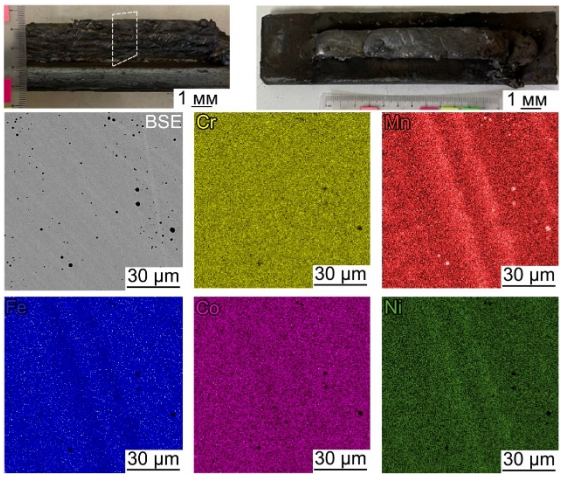

Рис.2 Загальний вигляд наплавлень та карти розподілу хімічних елементів ВЕС.
Fig.2 General view of surfacing and distribution maps of HEA chemical elements.

Рис. 3 Макрознімок зразка ВЕС виплавленого з дроту.
Fig. 3 Macro image of the HEA sample melted from wire.

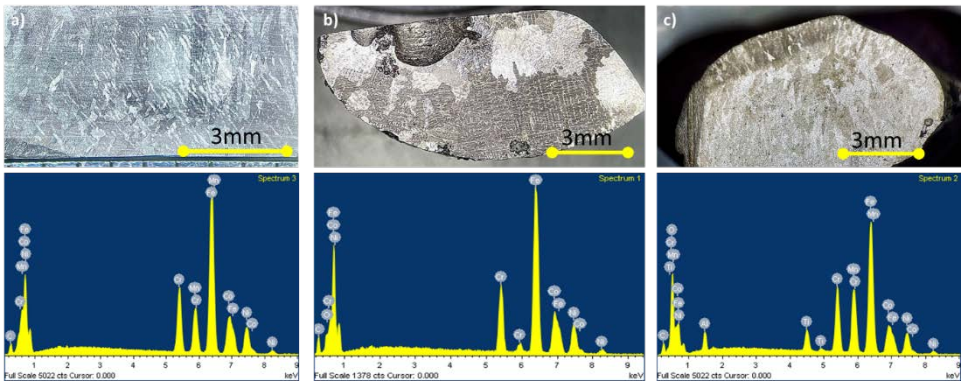

Рис. 4 Макроструктура та енергетичні спектри спектри, для сплаву виготовленого електродуговим зварюванням (а), вакуумним плавленням (б), та аргоно-плазмовим плавленням (с)
Fig. 4 Macrostructure and energy spectra for an alloy fabricated by electric arc welding (a), vacuum melting (b), and argon-plasma melting (c)

Відповідно до енергетичних спектрів (рис.4), в хімічному складі сплавів виготовлених за допомогою адитивної технології та аргоно-плазмовим плавленням присутні всі потрібні елементи: Cr, Mn, Fe, Co, Ni (табл.2). Хімічну формулу вискоентропійного сплаву можна записати наступним чином $Cr_{0.125}Mn_{0.125}Fe_{0.5}Co_{0.125}Ni_{0.125}$. З іншого боку, у сплаві, якій отримано вакуумним переплавом спостерігається почті повна відсутність Mn. Це скоріше всього пов'язано із властивостями самого Mn. За температурою ~ 1246ºC відбувається його плавлення. При підвищення температури до 1450±50 ºC, відбувається інтенсивне випаровування марганцю зі сплаву, так як за даних температур пружність його пару становить 1.5 10^3 Н/мм^2[18,19]. За допомогою комп'ютерного моделювання показано, що у вакуумі можлива значна сегрегація та випаровування марганцю із поверхні, що притаманно для нашого випадку [20]. Схожа ситуація, випаровування марганцю зі сплаву, спостерігається у випадку системи Fe-C-Mn [21]. Тому хімічну формулу сплаву в цьому випадку можна записати наступним чином $Cr_{0.15}Fe_{0.55}Co_{0.15}Ni_{0.15}$.

ТАБЛИЦЯ 2. Хімічний склад
TABLE 2. Chemical composition

	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
welding	13.6	11.8	48.8	12.7	12.9
Vacuummelt	13.4	0.0	55.5	14.6	15.3
Arc-melt	12.5	14.4	39.2	9.9	9.5

Слід зазначити, що за умов підтримання у печі безперервного вакууму, відбувається випаровування марганцю, що є небажаним при технологічному процесі виготовлення ВЕС. Запобігти цьому вдалося за рахунок використання аргоно-плазмового плавлення, але суттєвим недоліком такого процесу залишається обмежена в об'ємі виплавка. Натомість наплавлення порошковим зварювальним дротом дозволяє отримувати великогабаритні зразки. Запропонований спосіб найбільш близький до методу одержання високоентропійного сплаву 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 сплавів з використанням механізованого зварювання в середовищі захисних газів порошковими дротами з високими коефіцієнтами заповнення. Шихта дроту при цьому повинна мати компоненти в рівної кількості відносно друг друга, в мас %: 15…20 кобальтового порошку, 15…20 марганцю, 15…20 хрому, 15…20 нікелевому порошку, решта стальна оболонка.

Спосіб зварювання з використанням цього порошкового дроту забезпечує отримання адитивного високоентропійного сплаву з потрібними характеристиками. Розроблений нами метод для створення високоентропійної системи легування Cantor за низкою показників переважає такі альтернативні методи отримання об'ємного ВЕС як плавлення у вакуумі або плазмово-дуговий переплав, по перше за рахунок переважання у виплавленому об'ємі заготовки.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА / ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. K. Wu, N. Ding, T. Yin, M. Zeng, Z. Liang, Effects of single and double pulses on microstructure and mechanical properties of weld joints during high-power double-wire GMAW, J. Manuf. Process. 35 (2018) 728–734. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.025.
2. B. Cantor, I.T.H. Chang, P. Knight, A.J.B. Vincent, Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys, Mater. Sci. Eng. A. 375–377 (2004) 213–218. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257.
3. E. Johnson, Cohesion in metals: (Cohesion and structure, vol. 1) by F.R. de Boer, R. Boom, W.C.M. Mattens, A.R. Miedema and A.K. Niessen (Elsevier, Amsterdam, 1988) pp. xiv + 758, hardbound, US $ 131.50/Dfl 250-. ISBN 0-444-87098-9, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect.

B Beam Interact. with Mater. Atoms. 42 (1989) 403. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0168-583X(89)90456-4.
4. K. Wu, N. Ding, T. Yin, M. Zeng, Z. Liang, Effects of single and double pulses on microstructure and mechanical properties of weld joints during high-power double-wire GMAW, J. Manuf. Process. 35 (2018) 728–734. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.025.
5. G. Bernd, H. Anton, C. Dhiraj, C.E. H., G.E. P., R.R. O., A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications, Science (80-.). 345 (2014) 1153–1158. https://doi.org/10.1126/science.1254581.
6. Takeuchi, K. Amiya, T. Wada, K. Yubuta, W. Zhang, High-Entropy Alloys with a Hexagonal Close-Packed Structure Designed by Equi-Atomic Alloy Strategy and Binary Phase Diagrams, JOM. 66 (2014) 1984–1992. https://doi.org/10.1007/s11837-014-1085-x.
7. C.L. Tracy, S. Park, D.R. Rittman, S.J. Zinkle, H. Bei, M. Lang, R.C. Ewing, W.L. Mao, High pressure synthesis of a hexagonal close-packed phase of the high-entropy alloy CrMnFeCoNi, Nat. Commun. 8 (2017) 15634. https://doi.org/10.1038/ncomms15634.
8. W. Ji, W. Wang, H. Wang, J. Zhang, Y. Wang, F. Zhang, Z. Fu, Short communication, Intermetallics. 56 (2015) 24–27. https://doi.org/10.1016/j.intermet.2014.08.008.
9. G. Bernd, H. Anton, C. Dhiraj, C.E. H., G.E. P., R.R. O., A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications, Science (80-.). 345 (2014) 1153–1158. https://doi.org/10.1126/science.1254581.
10. Z. Tang, T. Yuan, C.-W. Tsai, J.-W. Yeh, C.D. Lundin, P.K. Liaw, Fatigue behavior of a wrought Al0.5CoCrCuFeNi two-phase high-entropy alloy, Acta Mater. 99 (2015) 247–258. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.07.004.
11. Chen Chi-san, Yang Chih-chao, Yeh Jien-wei, Huang Chin-te, Ultra-hard composite material and method for manufacturing the same, US 15 Patent 8075661, 13.12.2011
12. Литвиненко Ю. М., Перекос А. О., Залуцький В. П., Надутов В. М., Макаренко С. Ю. UA 97118 U «СПОСІБ ОДЕРЖАННЯ ВИСОКОЕНТРОПІЙНОГО СПЛАВУ»
13. Patent China FeCoCrNi series high-entropy alloy selective laser melting in-situ additive manufacturing method and product CN111085689A, 23.10.2018
14. Patent China Method for preparing Ni-Cr-Co-Fe-Mn high-entropy alloy by electron beam melting, homogenization and purification CN110423904B, 14.07.2020
15. M.R.U. Ahsan, G.-J. Seo, X. Fan, P.K. Liaw, S. Motaman, C. Haase, D.B. Kim, Effects of process parameters on bead shape, microstructure, and mechanical properties in wire + arc additive manufacturing of Al0.1CoCrFeNi high-entropy alloy, J. Manuf. Process. 68 (2021) 1314–1327. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.047.
16. Q. Shen, X. Kong, X. Chen, Fabrication of bulk Al-Co-Cr-Fe-Ni high-

entropy alloy using combined cable wire arc additive manufacturing (CCW-AAM): Microstructure and mechanical properties, J. Mater. Sci. Technol. 74 (2021) 136–142. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.10.037.
17. Завдовєєв А. В., Гайворонський О.А., Позняков В. Д., Клапатюк А. В. «Спосіб виготовлення високоентропійного сплаву з використанням адитивних технологій порошковим зварювальним дротом» // Патент Укр. Заявка № A202201578 від 17.05.2022
18. R. Loftness, A VAPOR PRESSURE CHART FOR METALS, (1951).
19. G. V. Samsonov, Handbook of the PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES of the ELEMENTS, 1889.
20. A. Ferrari, F. Körmann, Surface segregation in Cr-Mn-Fe-Co-Ni high entropy alloys, Appl. Surf. Sci. 533 (2020) 147471. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147471.
21. R. Ohno, Kinetics of Evaporation of Manganese, Copper and Sulfur From Iron Alloys in Vacuum Induction Melting., Trans Iron Steel Inst Jpn. 17 (1977) 732–741. https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.17.732.
22. Patent China, Refractory high-entropy alloy stranded wire material, application and preparation method thereof CN110538945B 2019-09-19