

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ТА ЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О. ПАТОНА

Кафедра ливарного виробництва

До захисту допущено  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Михайло ЯМШИНСЬКИЙ  
“ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

**Дипломна робота**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**зі спеціальності 136 «Металургія»**

**за освітньо-професійною програмою «Комп’ютеризовані процеси лиття»**

на тему: “Особливості одержання високоентропійних сплавів системи  
Al-Ni-Cr-Fe-Cu ливарними методами та їх властивості”

Виконав: студент 4-го курсу, групи ФЛ-91

|                                      |                                                                                                                                                 |                |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Керівники                            | <u>Матковський Дмитро Юрійович</u><br>(прізвище, ім’я, по батькові)                                                                             | _____ (підпис) |
|                                      | <u>д.т.н., професор Верховлюк А. М.</u><br><u>к. т.н., доцент Лютий Р. В.</u><br>(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) | _____ (підпис) |
| Консультант<br>з охорони праці       | <u>д.т.н., професор Левченко О. Г.</u><br>(вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)                                                         | _____ (підпис) |
| Консультант<br>з економічної частини | <u>к.е.н., доцент Нараєвський С. В.</u><br>(вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)                                                        | _____ (підпис) |
| Консультант<br>з нормоконтролю       | <u>к.т.н., доцент Лютий Р. В.</u><br>(вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)                                                              | _____ (підпис) |
| Рецензент                            | <u>д.т.н., ст.н.с., Квасницька Ю. Г.</u><br>(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)                                      | _____ (підпис) |

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає  
запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2023 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона  
Кафедра ливарного виробництва

Освітньо-кваліфікаційний рівень «бакалавр»

Спеціальність 136 Металургія

Освітньо-професійна програма «Комп'ютеризовані процеси лиття»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Михайло ЯМШИНСЬКИЙ  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Матковський Дмитро Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Особливості одержання високоентропійних сплавів системи Al-Ni-Cr-Fe-Cu ливарними методами та їх властивості

керівники роботи к.т.н. доцент Лютий Ростислав Володимирович

д.т.н., професор Верховлюк Анатолій Михайлович

( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «01» червня 2023 року № 2122-с

2. Строк подання студентом роботи 14 червня 2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: результати проведеного аналітичного огляду; матеріали переддипломної практики; результати попередньо проведених експериментів; наявні матеріали та лабораторне обладнання; методичні вказівки до виконання дипломних робіт

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1) вивчити особливості плавлення високоентропійного сплаву 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; 6) обґрунтувати економічну ефективність проведеної роботи; 7) провести аналіз небезпечних виробничих факторів та розробити заходи з охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Презентація: мета дипломної роботи та постановка задач (1 слайд); загальний опис високоентропійних сплавів (1 слайд); лабораторне обладнання для проведення досліджень (1 слайд); характеристика шихтових матеріалів (1 слайд); результати термічного аналізу та фазовий склад сплаву (1 слайд); мікроструктура сплаву (1 слайд); ливарні та механічні властивості сплаву (1 слайд); висновки (1 слайд).

#### 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ             | Прізвище, ініціали та посада консультанта         | Підпис, дата   |                  |
|--------------------|---------------------------------------------------|----------------|------------------|
|                    |                                                   | завдання видав | завдання прийняв |
| Економічна частина | к.е.н, ст. викладач Нараєвський Сергій Вікторович |                |                  |
| Охорони праці      | д.т.н., професор Левченко Олег Григорович         |                |                  |

7. Дата видачі завдання 01 травня 2023

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів виконання дипломної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|-----------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | Аналіз структури кваліфікаційної роботи | 08.05.2023                    |          |
| 2     | Поставлення задач                       | 08.05.2023                    |          |
| 3     | Аналіз літературних джерел              | 12.05.2023                    |          |
| 4     | Проведення лабораторних досліджень      | 19.05.2023                    |          |
| 5     | Оформлення дипломної роботи             | 12.06.2023                    |          |
| 6     | Оформлення графічного матеріалу         | 14.06.2023                    |          |

Студент \_\_\_\_\_ Матковський Д. Ю.

( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівники роботи \_\_\_\_\_ Верховлюк А. М.

( підпис ) (прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ Лютий Р. В.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

|                                                                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ВСТУП.....</b>                                                                                                 | <b>6</b>  |
| <b>1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ І ВИКОРИСТАННЯ ВИСКОЕНТРОПІЙНИХ СПЛАВІВ У ЛИВАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ.....</b> | <b>7</b>  |
| 1.1 Загальна характеристика високоентропійних сплавів та їх різновиди .....                                       | 7         |
| 1.2 Механічні та спеціальні властивості сплавів та галузь їх використання .....                                   | 10        |
| 1.3 Особливості процесів отримання високоентропійних сплавів .....                                                | 19        |
| 1.4 Висновки та постановка задач дослідження .....                                                                | 21        |
| <b>2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ .....</b>                                                                 | <b>23</b> |
| 2.1 Вихідні матеріали .....                                                                                       | 23        |
| 2.2 Устаткування для виплавлення сплавів .....                                                                    | 25        |
| 2.3 Опис технологічних зразків та методів їх отримання .....                                                      | 26        |
| 2.4 Металографічне дослідження .....                                                                              | 30        |
| 2.5 Методика термоаналізу.....                                                                                    | 31        |
| 2.6 Методика визначення ливарних та механічних властивостей .....                                                 | 33        |
| 2.7 Рентгенофазовий аналіз.....                                                                                   | 35        |
| 2.8 Хімічний аналіз .....                                                                                         | 36        |
| <b>3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....</b>                                                                           | <b>37</b> |
| 3.1 Дослідження фазових перетворень високоентропійного сплаву $Al_{20}Ni_{20}Cr_{20}Fe_{20}Cu_{20}$ .....         | 37        |
| 3.2 Дослідження хімічного та фазового складу сплаву.....                                                          | 38        |
| 3.2.1 Хімічний склад сплаву $Al_{20}Ni_{20}Cr_{20}Fe_{20}Cu_{20}$ .....                                           | 38        |
| 3.2.2 Рентгенофазовий аналіз сплаву $Al_{20}Ni_{20}Cr_{20}Fe_{20}Cu_{20}$ .....                                   | 39        |
| 3.3 Металографічний аналіз .....                                                                                  | 40        |
| 3.4 Ливарні та механічні властивості сплаву .....                                                                 | 42        |
| 3.5 Висновки .....                                                                                                | 46        |
| <b>4. ОХОРОНА ПРАЦІ .....</b>                                                                                     | <b>48</b> |
| 4.1 Характеристика лабораторії №144 для проведення плавки.....                                                    | 48        |
| 4.2 Вентиляція.....                                                                                               | 51        |

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3 Шум.....                                                            | 53        |
| 4.4 Освітленість .....                                                  | 54        |
| 4.5 Фактори небезпеки .....                                             | 56        |
| 4.6 Пожежна безпека та евакуація .....                                  | 58        |
| 4.7 Електронебезпека.....                                               | 60        |
| <b>5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ НДР .....</b>                    | <b>62</b> |
| 5.1. Науково-технічна актуальність НДР.....                             | 62        |
| 5.2. Розрахунок витрат на проведення НДР .....                          | 63        |
| 5.2.1. Витрати на оплату праці .....                                    | 63        |
| 5.2.2. Єдиний соціальний внесок.....                                    | 65        |
| 5.2.3. Матеріали, необхідні для проведення досліджень .....             | 66        |
| 5.2.4. Енергоносії для проведення досліджень .....                      | 67        |
| 5.2.5. Вартість послуг сторонніх організацій.....                       | 67        |
| 5.2.6. Інші прямі невраховані витрати.....                              | 68        |
| 5.2.8. Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми ..... | 69        |
| 5.3. Науково-технічна ефективність НДР .....                            | 70        |
| <b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>                                           | <b>74</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>                                 | <b>76</b> |

## ВСТУП

Високоентропійні сплави є особливими матеріалами, які вважаються суперсплавами, оскільки вони мають низку унікальних характеристик та неординарну структуру, що підкреслює їх велике значення у сучасній науці та технології.

Головна мета дипломної роботи – **дослідження особливостей одержання високоентропійних сплавів системи Al-Ni-Cr-Fe-Cu ливарними методами та визначення їх властивостей.**

Дослідження даної теми включає такі розділи:

- загальні характеристики високоентропійних сплавів та їх різновиди;
- механічні та спеціальні властивості сплавів та галузь їх використання;
- особливості процесів виплавлення і лиття високоентропійних сплавів;
- вихідні матеріали;
- устаткування для виплавлення сплавів;
- опис технологічних зразків та методів їх отримання;
- методика визначення властивостей;
- дослідження фазових перетворень у сплавах системи Al-Ni-Cr-Fe-Cu;
- дослідження хімічного складу сплаву;
- властивості сплаву;
- висновки;

Під час виконання дипломної роботи отримуються значна кількість корисних знань та результатів, які допоможуть розширити розуміння про високоентропійні сплави. Дослідження високоентропійних сплавів важливо для отримання високоякісного матеріалу та розробки унікальних технологій, які можуть бути використані для різних галузях промисловості.

# **1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ І ВИКОРИСТАННЯ ВИСКОЕНТРОПІЙНИХ СПЛАВІВ У ЛИВАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

## **1.1 Загальна характеристика високоентропійних сплавів та їх різновиди**

Високоентропійні сплави (ВЕС) – це особливі металеві сплави, які виділяються своїми надзвичайними властивостями та структурою. ВЕС складаються з п'яти або більше 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 визначає їх назву. Атоми різних компонентів у сплаві розташовуються випадковим чином, утворюючи структуру зі значною неупорядкованістю. Неупорядковане розташування має значний вплив на механічні, фізичні та хімічні властивості сплаву [1].

Унікальність високоентропійних сплавів проявляється у складності їх структури, що покращує їх механічні властивості і забезпечує їм високу міцність та стійкість при високих температурах. Вони також мають високу стійкість до окиснення. Застосування ВЕС сплавів різноманітне. Вони можуть працювати у високотемпературних середовищах, в енергетиці, аерокосмічних конструкціях та інших галузях, де необхідна висока міцність та стійкість [2].

В кінці 20-го століття виникла нова ідея у створенні суперсплавів, яка заснована на "змішуванні кількох основних елементів" у високій концентрації для синтезу нового класу сплавів. Найпершими з відомих дослідників цієї ідеї були Брайан Кантор (з філії Університету Сассекса, Великобританія), Дж. В. Йех (з Національного університету Цін Хуа, Тайвань), а також їхні колеги. Історія розвитку високоентропійних сплавів

(BEC) та пов'язаних з ними концепцій складних концентрованих сплавів (СКС) схожа на "повільний" процес дифузії [3].

Стаття "Huang K.H., Yeh J.W. Master's Thesis. National Tsing Hua University; Hsinchu, Taiwan: 1996. Azuly on the Multicomponent Alloy Systems Containing Equal-Mole Elements" була написана К. Х. Хуангом і Дж.В. Йехом. Ця дисертація була захищена у 1996 році в Національному університеті Цін Хуа в Тайвані. У цій дисертації автори досліджували системи мультикомпонентних сплавів, що містять еквімольні елементи. Ця стаття надає певні уявлення щодо історії розробки високоентропійних сплавів.

Але ще в 1980-х роках Брайан Кантор запропонував дослідникам у фінансових організаціях Великобританії ідею вивчення багатоосновних матеріалів, тобто сплавів, що складаються з еквіатомних сумішей різних компонентів. Однак його пропозиція була відхилена з різким коментарем: "Будь ласка, займіться чимось розумнішим". Однак для вирішення більш фундаментальних "божевільних" питань у галузі металургії та матеріалознавства потрібна сильна особистість. Саме в цьому напрямі Б. Кантор та його бакалаврський студент Ален Вінсент із Сассекса відкрили однофазний ГЦК-сплав із складом  $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}$ , який став відомий як "сплав Кантора" [4].

У 1990-х роках "сплави Кантора" отримали розвиток з додаванням інших елементів, що розширило виробничий процес. Цим займався сам Б. Кантор та його колеги (Пітер Найт та Ісаак Чанг) в Оксфорді. Також було досліджено кмітливую ідею еквіатомного заміщення, тобто заміни одного або кількох компонентів хімічно подібними компонентами. В ході досліджень було встановлено, що п'ятиелементна система  $\text{FeCrMnNiCo}$  складається переважно з однієї гранецентрованої кубічної (ГЦК) ґратки фази, яка має дендритну структуру [5].

Сплав Кантора, який складається з цих п'яти елементів, привернув значний інтерес наукової спільноти. Виявлено, що сплав має цікаву комбінацію міцності, пластичності та ударної в'язкості. Особливо цікавим є

механізм деформації нанодвійників (зміну орієнтації кристалічної ґратки), який спостерігається у сплаві Кантора.

Таким чином, історія розробки високоентропійних сплавів пов'язана з роботами Брайана Кантора, Дж. В. Йеха та інших дослідників, які почали досліджувати та розвивати новий клас матеріалів на основі багатоеlementних сплавів.

На початку XX століття тему дослідження і впровадження ВЕС підхопили вчені різних країн, в т.ч. і в Україні. До цього часу номенклатура цих сплавів значною мірою розширилась.

Високоентропійні сплави є цікавими матеріалами, оскільки вони можуть мати безліч поєднань різних елементів, що призводить до великої кількості різновидів цих сплавів. Далі переличимо декілько прикладів таких різновидів високоентропійних сплавів:

Евтектичні високоентропійні сплави  $\text{CoCrFeNiTa}_x$ , де  $x = 0,1, 0,2, 0,3, 0,395, 0,4$  і  $0,5$  у мольному співвідношенні [6]. Ці сплави мають особливі фізико-хімічні властивості, які дають змоги їм знаходити застосування в різних галузях, включаючи термічну стійкість і механічну міцність.

Існує система високоентропійних сплавів (ВЕСів) під назвою  $\text{VCrMnFeCoNi}_x$  [7], яка проявляє високу стійкість до абразивного зношування. Ці сплави мають структуру схожу на природні композиційні матеріали з пластичною металевою матрицею, що має твердий розчин з гранецентрованою кубічною (ГЦК) структурою, а також армована твердою фазою, позначеною як  $\sigma$ -фаза.

Унікальні високоентропійні сплави  $\text{Fe}_5\text{CrCuNiMnSi}$  та  $\text{Fe}_5\text{CoCuNiMnSi}$ , які були загартовані з рідкого стану за допомогою методики splat-охолодження [8]. Ці сплави мають унікальну структуру, яка формується завдяки їх високій швидкості охолодження, що сприяє формуванню твердих розчинів з гранецентрованими кубічними ґратками.

Splat – заливання розплавленого металу між двома спеціальними охолоджуваними мідними роликами. Ці ролики активно циркулюються з

використанням холодної води, що дозволяє швидко відвести тепло від металу та майже миттєво його затвердіння.

Є багатокомпонентні сплави [9] на основі Al-Cu-Ni-Fe-Cr-Ti-V, які були піддані процесу механічного легування та наступного спікання. Експериментальні дослідження показали, що навіть після процесу відпалу при високій температурі 1000 °C, ці сплави продовжують мати склад, який складається з фаз на основі об'ємно центрованої кубічної (ОЦК) і графцентованої кубічної (ГЦК) кристалічних структур. Це вказує на наявність особливих закономірностей формування структури та фазового складу у цих сплавах.

## **1.2 Механічні та спеціальні властивості сплавів та галузь їх використання**

Щоб матеріали та деталі відповідали оптимальним механічним властивостям та могли бути успішно використані, наприклад, як конструкційний матеріал або захисне покриття, для цього потрібно мати необхідну міцність та стійкість, залежно від конкретної задачі.

Серед притаманних сплавам механічних властивостей особливо важливими є міцність, а також такі параметри, як твердість, пластичність, зносостійкість, ударна в'язкість. Високоентропійні сплави, за даними багатьох дослідників, мають унікальне поєднання властивостей, що дає змогу їх використовувати у різних галузях [10].

Високоентропійні сплави мають декілька основних переваг порівняно зі звичайними сплавами [11]:

- випадкове розташування атомів у кристалічній ґратці: висока ентропія означає, що атоми розташовані у кристалічній ґратці хаотично;
- сплав з п'яти або більше компонентів. Склад сплаву вибирається так, щоб створити умови максимально високої ентропії;

– мають високу міцність, яка пояснюється дислокаційним зміцненням (дислокації, що ковзають через хаотично розташовані нерухомі дислокації взаємодії);

– жароміцність, тобто сплав зберігає свої механічні властивості при високих температурах;

– деякі високоентропійні сплави можуть мати високу стійкість до корозії, що робить їх приваблими для використання в умовах агресивних середовищ (висока вологість або хімічна корозія);

З точки зору термодинаміки, ВЕС – це система змішаних багатьох компонентів. У цих сплавах велика кількість компонентів формує неупорядкований кристалічний розчин зі складними структурними особливостями. Термодинамічні властивості цих сплавів вивчаються для розуміння їхньої стабільності, фазових переходів та механічних властивостей [12].

Під час дослідження термодинаміки ВЕС головними чинниками є розуміння ентропії змішування, фазових діаграм та інших термодинамічних характеристик [12]. Специфічна особливість таких сплавів полягає в їх властивості переважно формувати неупорядковані тверді розчини, стабільність яких забезпечується високою ентропією змішування. Для твердого розчину, що утворюється з  $n$  компонентів, це все описується рівнянням Гіббса:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (1.1)$$

де  $\Delta G$  – повна енергія Гіббса;

$\Delta H$  – ентальпія;

$T$  – температура;

$\Delta S$  – ентропія.

Цей вираз показує взаємозв'язок між енергетичними величинами та ентропією змішування, який відіграє важливу роль у формуванні структури твердого розчину високоентропійних сплавів.

Значення ентальпії  $\Delta H$  сприяє утворенню стабільних твердих розчинів (якщо значення наближене до 0 Дж/моль), тоді як додатне або від'ємне значення можуть призводити до небажаних явищ, таких як сегрегація, розшарування або утворення складних багатофазних структур. Якщо сплав має рівні молярні концентрації, тоді рівняння для визначення ентропії [12]:

$$\Delta S = R \cdot \ln \cdot n \quad (1.2)$$

де  $R$  – універсальна газова постійна,  $R = 8,31446261815$  Дж/(моль·К);

$n$  – кількість компонентів.

Якщо ентропія змішування  $\Delta S$  розплаву набуває значних додатних значень, то при врахуванні температури, згідно з рівнянням, це явище має значний негативний вплив на повну енергію Гіббса, формування фаз та стабілізацію твердорозчинної структури. Велике зростання ентропії при змішуванні розплавів призводить до складного балансу енергетичних величин і спричиняє формуванню стійких твердих розчинів [12].

У високоентропійних сплавах, завдяки наявності багатьох компонентів, утворюються різноманітні можливості розташування атомів у кристалічній ґратці, тобто це призводить до значного зростання конфігурації ентропії. Висока ентропія сприяє формуванню неупорядкованого твердого розчину [13].

Відомо, що при високій ентропії змішування виникає велика ймовірність формування однієї фази неупорядкованого твердого розчину з ОЦК (замість неї може утворитися об'ємноцентрована кубічна) ґратка або ГЦК (замість неї може утворитися гранецентрована кубічна) ґратка [14]. Щодо гексагональної щільно-упакованої (ГЩУ) – є згадки підтвердження

існування такої структури у високоентропійних сплавах [2]. Таке обмеження пояснюється складністю контролювання хімічного складу та мікроструктури сплавів, які потрібні для утворення інших типів ґраток. Навіть незначні відхилення у складі можуть суттєво впливати на структурні властивості і спричинити утворення інших фаз або відхилень від неупорядкованої структури [4].

Тому отримання ВЕС з альтернативними кристалічними ґратками залишається викликом для подальших досліджень і розвитку металургії в цілому, в т. ч. порошкової.

Збільшення числа елементів у сплаві призводить до зміни ентропії змішування за логарифмічним законом. Збільшення значення  $\Delta S$  призводить до зменшення вільної енергії і, отже, до підвищення стійкості твердого розчину [15].

Всі сплави можна розділити на такі категорії, залежно від величини ентропії змішування (рис 1.1):

- сплави з низькою ентропією змішування ( $\Delta S < 5,9$  Дж/(моль·К) – низькоентропійні сплави. Сплави такого типу мають обмежену здатність формувати неупорядковані тверді розчини. Їх структура може бути складною, можлива поява інтерметалідів та інших фаз;

- сплави з середньою ентропією змішування ( $5,9 < \Delta S < 13,4$  Дж/(моль·К) – середньоентропійні сплави. Ці сплави можуть утворювати неупорядковані тверді розчини з певною стабільністю. Вони мають різноманітні структури, які можуть включати в себе інтерметаліди, впорядковані фази та інші складові;

- сплави з високою ентропією змішування ( $\Delta S > 13,4$  Дж/(моль·К) – високоентропійні сплави. Вони здатні формувати стійкі неупорядковані тверді розчини із складною структурою, яка включає багато компонентів. Висока ентропія змішування сприяє утворенню гомогенних та стабільних фаз.

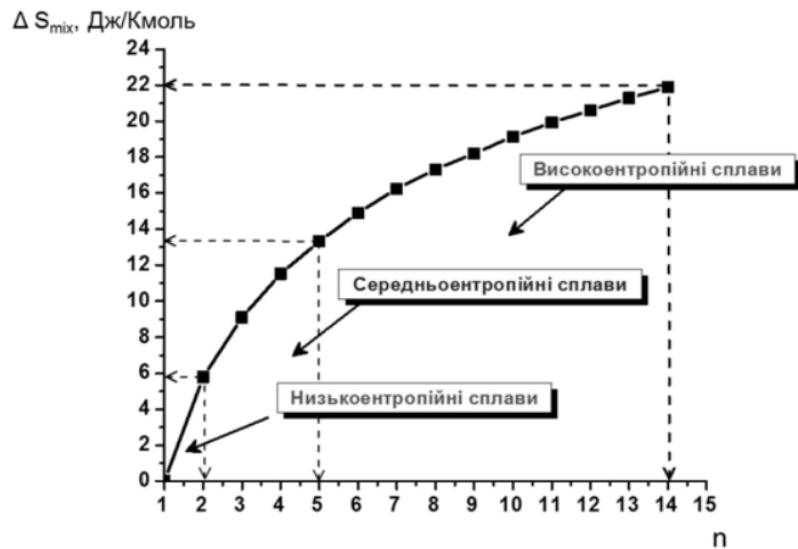


Рисунок 1.1 – Класифікація сплавів за параметром ентропії змішування

Розподіл сплавів за категоріями, пов'язаними з ентропією змішування, дійсно залежить від значення цієї величини і може впливати на їхні властивості та структуру. Значення ентропії змішування визначає ступінь хаотичного розташування атомів у сплаві [12].

Для отримання загального уявлення про механічні властивості високоентропійних сплавів проведено ряд досліджень. Ці дослідження дають змогу встановити зв'язок між складом сплаву, його мікроструктурою та механічними властивостями.

Згідно з дослідженнями [16], ВЕС складу  $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrCuFeNi}$  у литому стані має дендритну структуру, яка складається з двох ГЦК ґраток з помітними відмінностями в локальному розподілі елементного складу. Термооброблення сплаву призводить до змін структурного стану, внаслідок чого у мікроструктурі з'являється невелика кількість фази ОЦК і перерозподіляється локальна концентрація різних елементів. Незалежно від стану сплаву, будь то литий чи після термооброблення, спостерігаються нанорозмірні виділення з однотипних кластерів атомів, які входять до його структури.

У цьому ж дослідженні детально вивчали механічні властивості сплаву в області наднизьких температур. Виявлено, що сплав має високу міцність  $\sim 750$  МПа в діапазоні температур від 4,2 до 300 К та відзначається також високою пластичністю. Порівнюючи зі сталлю 45Л, яка зазвичай має значення міцності в діапазоні 550...690 МПа при кімнатній температурі, високоентропійний сплав  $\text{Al}_{0,5}\text{CoCrCuFeNi}$  демонструє вищі показники міцності.

У дослідницькій роботі [17] було проведено дослідження високоентропійного сплаву, який містить п'ятиелементний катод Ti-Zr-Nb-Ta-Hf, який було отримано за допомогою методу вакуумно-дугової плавки. Для забезпечення однорідності катодів, проводилося повторне переплавлення їх 5-7 разів. Далі, з використанням вакуумно-дугової установки "Булат-6", було сформовано захисне покриття. Для цього здійснювалося осадження з двох катодів, які розташовувалися протилежно один одному відносно зразка. Тримач зразка безперервно обертався, що дало змогу досягти товщини кожного шару близько 50 нм. Покриття із ВЕС наносили на заготовки у вигляді сталевих дисків та пластин діаметром 45 мм та товщиною 4 мм, які зроблені із сталі 12Х18Н9Т.

Після проведення випробування на тертя з контртілом  $\text{Al}_2\text{O}_3$  виявлено рівномірне абразивне зношування поверхні, при якому часточки зношування виникають і накопичуються в кряях канавки. По роботі було виявлено, що кількість перенесеного матеріалу залежить від міцності адгезійного зв'язку, що залежить від електронної структури контртіла на основі  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та багат шарового покриття, що визначає можливість утворення твердих розчинів або інтерметалідних сполук між ними, а також стабільність оксидів при високих температурах. Це пояснює високі значення коефіцієнта тертя при випробуваннях з контртілом з  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -покриттями, включаючи високоентропійний нітрид  $(\text{TiZrHfVNbTa})\text{N}$ . При цьому покриття демонструють хорошу стійкість до зношування, при цьому значення

зношування контртіл перебувають у значно більших межах:  $(0,39...2,12) \cdot 10^{-5} \text{H}^{-1} \text{мм}^{-1}$ .

Висновок дослідження підкреслює, що багатошарові покриття на основі високоентропійного сплаву Ti-Zr-Nb-Ta-Hf виявляють досить універсальну стійкість. Вони можуть бути успішно використані як захисні покриття в умовах комплексного абразивного зношування. Цей підхід має потенціал для застосування в різних галузях захисних покриттів.

Особливості високоентропійних сплавів є дуже привабливими для застосування в умовах високих температур, наприклад, в авіаційній та аерокосмічній промисловості, атомній енергетиці, оскільки головним фактором таких сплавів являє стійкість до високих температур [18].

У звіті НДР **"Дослідження вискотемпературного окислення високоентропійних сплавів"** представлено результати досліджень високоентропійного сплаву системи FeCoNiMnCr на жароміцність, інтенсивність та температуру початку окиснення. Сплав проявляє високу стійкість до окиснення та підтверджує здатність матеріалу для використання в вискотемпературних умовах [19].

Для дослідження використовувався метод синхронного термічного аналізу (СТА) в конфігурації ТГ + ДСК (термогравіметрія + диференціальна сканувальна калориметрія). Основна перевага синхронного термічного аналізу полягає у його здатності одночасно вимірювати зміну маси та теплові ефекти на одному зразку. Цей підхід дає змогу отримати результати, які можна порівняти, оскільки усувається вплив факторів, таких як неоднорідність матеріалу та умови експерименту. Завдяки можливості вимірювати маси та теплові ефекти одночасно, синхронний термічний аналіз забезпечує високу точність отриманих даних. В роботі [19] представлені дані, які показують, що досліджений сплав є дуже стійким до окиснення.

Методика досліджень складалась з двох етапів:

1. Дослідження початку та інтенсивності окиснення ВЕС.

Для проведення експерименту використовували зразки розмірами

3x3x1 мм або діаметром 3 мм та висотою 1 мм. Вони піддавалися нагріванню до температури 1450 °С в атмосфері повітря. Шляхом аналізу кривої зміни маси визначалась температура початку приросту маси зразка, що відповідає початку окиснення. За допомогою ДСК кривої визначалась температура початку інтенсивного тепловиділення та величина теплового ефекту процесу утворення оксидної плівки.

## 2. Дослідження окалиностійкості (стійкості до окиснення).

Зразки сплавів нагрівали в середовищі повітря до температури 900 °С та витримували 10 годин. Для таких випробувань використовували термічний аналізатор СТА, що давало можливість контролювати параметри під час всього експерименту, а саме зміни маси зразків та можливі теплові ефекти. Визначали збільшення маси зразків за відповідний проміжок часу та ділили це значення на площу поверхні зразка. При нагріванні сплаву Сталь 45Л отримали наступні результати: інтенсивне тепловиділення спостерігається в інтервалі температур від 118 °С до 1400 °С. При цьому виділяється 2840 Дж/г тепла, а маса зразка збільшується на 32,94%.

Інтенсивність окиснення становить 2840 Дж/г·см<sup>2</sup>. Стійкість сталі 45Л до окиснення при температурі 900 °С та витримці 10 годин становить 32,8 мг/см<sup>2</sup>. Щодо високоентропійного сплаву системи CrMnFeCo<sub>2</sub>Ni<sub>3</sub>, то процес окиснення відбувається при температурі 1067 °С. При цьому виділяється 42,6 Дж/г тепла, а маса збільшується на 0,35%, інтенсивність окиснення становить 3224,2 Дж/г·см<sup>2</sup>. Через утворення оксидної плівки окислення зупиняється і інтенсивно починає протікати процес окиснення при температурі 1381 °С. Стійкість сплаву до окиснення при температурі 900 °С та витримці 10 годин становить 5,3 мг/см<sup>2</sup>.

Аналіз одержаних результатів показав, що високоентропійні сплави мають значно вищу стійкість до окиснення, ніж вуглецеві сталі. Вони переконливо демонструють, що високоентропійний сплав проявляє надзвичайну стійкість до окиснення у високотемпературних умовах, що робить його придатним матеріалом до застосування.

У публікації представлено [20], що високоентропійний сплав AlCuNiFeCr у спеченому до 800 °С стані має Твердість за Віккерсом 8,35 ГПа, а міцність на стиск при кімнатній температурі досягла 1960 МПа.

Інноваційний високотемпературний сплав, що має формулу NbMoTaWVTi, був успішно синтезований шляхом поєднання двох методів – механічного сплавлення (МС) і ультрашвидкого охолодження з плавлення (УОП). Цей сплав відзначається вражаючими механічними характеристиками, зокрема межею плинності при стисканні на рівні 2709 МПа, межею міцності на рівні 3115 МПа та високим показником деформації руйнування, який становить 11,4% [21].

МС – це технологічний процес, що базується на використанні динамічної деформації сумішей порошкових компонентів у високоенергетичних кульових млинах. метод розроблений для досягнення високої однорідності в сплавах.

Дана робота була спрямована на дослідженні двох високоентропійних сплавів [22]. Перший сплав –  $Ti_{25}Zr_{25}Hf_{25}Nb_{12,5}Ta_{12,5}$ , характеризується твердістю на рівні 4,1 ГПа та модулем пружності 85 ГПа. Цей сплав має структуру на основі об'ємно-центрованої кубічної (ОЦК) ґратки. Другий сплав,  $CrMnFeCoNi_2Cu$ , який в литому стані представляє собою твердий розчин зі структурою на основі гранецентрованої кубічної (ГЦК) решітки. Його твердість становить 2,6 ГПа, а модуль пружності – 137 ГПа

Дослідження сплавів включало вивчення впливу пластичної деформації на їх структуру та механічні властивості в діапазоні температур від 77 до 1123 К. Виявлено, що незважаючи на високі міцнісні характеристики в литому стані, обидва сплави піддаються деформації при кімнатній температурі. У процесі деформації високоентропійних сплавів відбувається формування наноструктури, що суттєво підвищує їх міцнісні властивості.

Вдалося успішно синтезувати бінарні та шестиатомні еквіатомні високоентропійні сплави в системі Al-Fe-Ti-Cr-Zn-Cu. У всіх складах спостерігається утворення наноструктур з твердими розчинами, які мають

кристалічну структуру об'ємно центровану кристалічну (ОЦК) ґратку. Ці високоентропійні сплави, отримані за допомогою методу механічного сплавлення (МС), характеризуються високою однорідністю складу та малим розмірів зерен, який становить приблизно 10 нм. Важливо зазначити, що такий високоентропійний сплав являє стійким навіть після спікання при 800 °С протягом 1 години і має високу твердість, що становить 2 ГПа [23].

Порівнявши вищезгадані результати досліджень, можна зробити загальний висновок, що високоентропійні сплави виявляються універсальними матеріалами з широким спектром можливого використання. Вони проявляють високий потенціал у різних галузях, де потрібна стійкість до низьких або високих температур, виробництві зносостійких сплавів (матеріалів) та високу твердість.

### **1.3 Особливості процесів отримання високоентропійних сплавів**

Високоентропійні сплави мають підвищені вимоги до технології плавлення порівняно зі звичайними сплавами. Особливості цих сплавів, такі як багатоелементний склад і вузький діапазон температури плавлення, вимагають більш точного контролю та уваги під час їх приготування [24].

При плавці високоентропійного сплаву треба дотримуватися таких правил [24]:

- кожен компонент шихти має бути дотриманий у потрібній кількості, щоб забезпечити відповідні еквіатомні відсотки кожного елемента у сплаві;
- високоентропійні сплави, як правило, мають різні інтервали кристалізації, що може призвести до ризику перегрівання або переохолодження сплаву;
- сплави можуть бути чутливі до окиснення при високій температурі та при контакті з повітрям. Можна запобігти окисненню, використовуючи середовища інертного газу (аргон або азот), вакуум під час плавлення;

– додатково потрібно забезпечити рівномірний розподіл компонентів у високоентропійному сплаві. Це може бути досягнуто за допомогою інтенсивного перемішування розплаву або переплавленням у декілька разів.

Виготовлення високоентропійних сплавів можливе за допомогою різних методів, серед яких варто виділити ливарні методи та порошкову металургію [24].

Ливарні методи включають плавлення сплаву в печах та його заливання в форму. Цей процес дає змогу отримувати деталі різної конфігурації, використовуючи високоентропійні сплави. Важливою перевагою ливарних методів є можливість виготовлення деталей набагато більших розмірів, порівняно з методом порошкової металургії [24].

Плавлення високоентропійних сплавів в дуговій печі є одним із способів їх отримання. Дугова піч є розповсюдженим плавильним агрегатом, в т. ч. для цієї групи сплавів.

Процес плавлення в дуговій печі передбачає використання електричної дуги між електродом та плавильною ванною. Енергія, яка проходить через дугу, забезпечує достатню температуру для плавлення сплаву. Компоненти сплаву, які мають різні температури плавлення, розплавляються та змішуються, утворюючи однорідну рідку фазу. Наприклад, за допомогою методу вакуумно-дугового плавлення успішно отримано п'ятикомпонентний сплав CoCrFeMnNi [25]. Плавлення компонентів може також відбуватися в контрольованій атмосфері інертного газу (аргону), що забезпечує захист від негативного впливу атмосферних факторів. Використання цього методу плавлення дає змогу отримати сплав з високими механічними властивостями та однорідним хімічним складом.

Індукційна піч є ще одним поширеним агрегатом, який застосовується для плавлення ВЕС [24]. У цій печі тигель розташований в електромагнітному полі. Індукція створюється шляхом проходження високочастотного електричного струму через котушку індуктора навколо печі. Індукція нагріває шихтові матеріали в тиглі, що призводить до плавлення сплаву.

Порошкова металургія використовує порошки заданих елементів для отримання високоентропійних сплавів [26]. Цей метод дає змогу досягти високої однорідності складу та мікроструктури сплаву. Порошки змішують, компактують і спікають, що призводить до формування повністю щільних зразків. У дослідженні [26] для отримання ВЕС було використано метод порошкової металургії. Як вихідні матеріали використали порошки Cr, Fe, Ni, Cu та Ti, які мали високу чистоту в діапазоні від 99,5% до 99,8%. Співвідношення цих порошків було підібрано в еквіатомному співвідношенні, тобто кількість атомів кожного елемента в шихті була однаковою.

Наведені ливарні методи дійсно можна використовувати для виплавлення ВЕС, але кожен з них має свої переваги та особливості. Вибір конкретного методу залежить від різних факторів: необхідні властивості сплаву, доступність обладнання та технічним вимогам щодо чистоти сплаву.

#### **1.4 Висновки та постановка задач дослідження**

Високоентропійні сплави – новий клас металевих матеріалів, які мають унікальні поєднання механічних та спеціальних властивостей. Вони складаються із щонайменше 5 різних хімічних елементів, які входять до складу сплавів в однакових атомних частках. Для їх створення використовують методи порошкової металургії та лиття, зокрема дугове або індукційне плавлення.

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, одержанного ливарними методами, поки що немає.

Як правило, структура металевої матриці ВЕС являє собою суміш твердих розчинів з ГЦК або ОЦК ґратками. Про фазовий склад сплаву Al-Cu-Ni-Cr-Fe інформація недостатня.

Для ливарної технології важливими є такі властивості як температура плавлення та рідкотекучість, ця інформація щодо наведеного сплаву також відсутня.

В літературі також практично відсутні дані щодо механічних властивостей цього сплаву, а також динаміки його фазових перетворень під час нагрівання. Цю інформація важлива з точки зору прогнозування можливих галузей використання сплаву та його роботи в екстремальних умовах.

Зважаючи на проведений аналіз наявних наукових та практичних даних, **метою нашої роботи є визначення особливостей одержання високоентропійного сплаву системи Al-Ni-Cr-Fe-Cu ливарними методами, встановлення його структури та властивостей.**

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовано такі задачі:

1. Вивчити особливості плавлення високоентропійного сплаву 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.

## 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

У даному розділі ми розглянемо короткі огляди методів дослідження, які застосовуються для отримання результатів відповідного високоентропійного сплаву Al-Ni-Cr-Fe-Cu.

### 2.1 Вихідні матеріали

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 20% атомної частки в загальній кількості.

Одним з використаних матеріалів був чавун, який за результатами хімічного аналізу має наступний склад, мас. вміст %: Fe – 73,17; Ni – 16,2; Cr – 2,07; Mn – 0,91; Cu – 2,78; C – 2,82; Si – 1,99; S – 0,025; P – 0,035.

Для забезпечення необхідного вмісту нікелю в сплаві був використаний катодний нікель з високою чистотою – 99,99%.

Хром електролітичний марок CPX1, X99 (99,5% масового вмісту) також було включено у склад сплаву.

Для додавання міді було використано електротехнічний дріт марки М0 з масовим вмістом міді 99,93%.

Алюміній чушковий високої чистоти марки А95 також було використано у складі шихтових матеріалів.

Усі ці складові були ретельно збалансовані, щоб отримати сплав з бажаними властивостями. Використання цих матеріалів у правильних пропорціях гарантувало отримання якісного та функціонального сплаву Al-Cu-Ni-Cr-Fe.

Перед плавленням було проведено попередню підготовку лігатури з алюмінію і міді (Al-Cu). Ця лігатура була використана з метою додавання цих елементів під час плавлення для забезпечення зручного та рівномірного

розподілу компонентів у сплаві. Використання лігатури дає змогу досягти кращого контролю та однорідності в процесі плавлення, порівняно з використанням окремих дротів міді.

Хімічний склад використаних компонентів шихти наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад компонентів шихти

| Компонент шихти | Елемент, мас. % |      |      |      |      |     |      |      |       |       | Маса на 1 кг |
|-----------------|-----------------|------|------|------|------|-----|------|------|-------|-------|--------------|
|                 | Fe              | C    | Ni   | Cr   | Mn   | Al  | Cu   | Si   | S     | P     |              |
| Чавун           | 73,17           | 2,82 | 16,2 | 2,07 | 0,91 | 0   | 2,78 | 1,99 | 0,025 | 0,035 | 285,2        |
| Нікель          |                 |      | 100  |      |      |     |      |      |       |       | 169,8        |
| Хром            |                 |      |      | 100  |      |     |      |      |       |       | 188,8        |
| Мідь            |                 |      |      |      |      |     | 100  |      |       |       | 227,3        |
| Алюміній        |                 |      |      |      |      | 100 |      |      |       |       | 105,0        |

Після перерахунку масових співвідношень компонентів в атомні отримано результат, представлений в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Склад сплаву в масових та атомних відсотках

| Елемент | Розрахунковий вміст елементів у сплаві, мас/ат. % |      |       |       |      |       |       |      |      |      | 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   |
| Атом. % | 19,02                                             | 3,52 | 19,02 | 19,02 | 0,31 | 19,03 | 19,02 | 1,04 | 0,01 | 0,01 | 100   |

Перед початком плавлення підготовляли лігатури. Потім проводили подрібнення всіх компонентів шихти – суміші матеріалів, яку завантажують у піч. При цьому важили кожен складову окремо для точного дозування.

Температуру під час плавлення підтримували на рівні  $(1450 \pm 10) ^\circ\text{C}$  для забезпечення оптимальних умов для розплавлення та перемішування сплаву. Ця температура дала змогу досягти необхідної рідкотекучості для заливання у форму.

## 2.2 Устаткування для виплавлення сплавів

У лабораторії доступно кілька печей для проведення плавлення сплавів. Ці печі є спеціальним устаткуванням, яке використовується для нагрівання шихтових матеріалів, їх розплавлення та заливання в форму.

Всі експериментальні плавки було проведено в індукційній печі №1, яка є експериментальною розробкою ФТІМС НАН України. Ця піч (рис. 2.1) складається з кількох важливих компонентів, включаючи перетворювач частоти, струмопровід та мідний індуктор. Місткість тигля печі становить 6,0 кг.



Рисунок 2.1 – Піч №1, індукційна з механізмом нахилу

Перетворювач частоти відповідає за регулювання частоти струму, який створюється в печі. Струмопровід забезпечує передачу струму до індуктора, який створює магнітне поле. Індуктор, в свою чергу, взаємодіє з розташованими в печі шихтовими матеріалами, індукцією змінюється магнітне поле, що призводить до нагрівання та плавлення матеріалів.

Індукційна піч також має механізм нахилу, який дає змогу зручно заливати сплав у ківш або в форму. Індуктор охолоджується водою, що необхідно для підтримання оптимальної температури та захисту від перегрівання. Футерівку тигля виготовлено на основі  $Al_2O_3$ , який забезпечує підвищену вогнетривкість та не проводить електричний струм. Футерівка має нейтральний характер, що робить її стійкою до шлаків та високих температур.

Піч працює на промисловій частоті 50 Герц і має потужність 15 кВт при напрузі 380 В. Ці параметри дають змогу забезпечити ефективну роботу печі та досягти потрібних температур для плавлення та перегрівання різних сплавів.

### 2.3 Опис технологічних зразків та методів їх отримання

Для випробування на розтягування використано оригінальні зразки тріфоподібної форми (рис. 2.2).

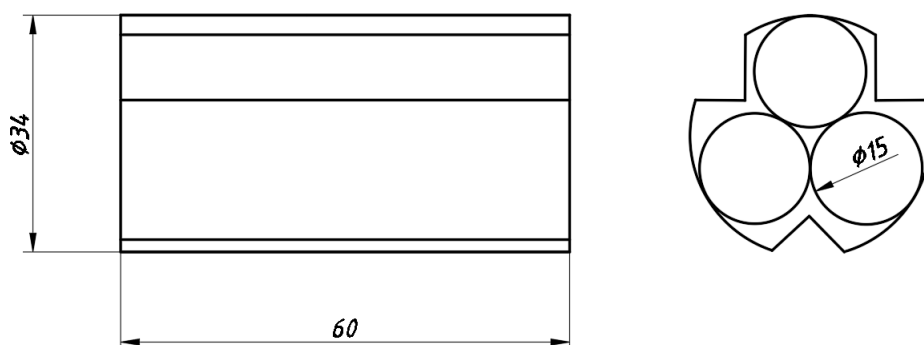


Рисунок 2.2 – Ескіз тріфоподібного зразка

Ця форма має вигляд трьох пелюсток, кожна з яких має діаметр 15 мм. Довжина зразка становить 60 мм. Головною особливістю цього зразка є його конструкція: така тріфоподібна форма зразка є унікальною. При розміщенні зразків головна увага зосереджується на їх газовій пористості, яка має проявлятися переважно в центральній частині, що дає змогу визначати міцність сплаву при розтягуванні на практично безпористих зразках.

Для випробування на твердість за методом Брінелля використано спеціальний зразок у формі шайби (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Зразок у вигляді шайби для випробування на твердість

Цей зразок має діаметр 30 мм і висоту 10 мм. Попередньо виготовляли литу заготовку висотою 60 мм. Така конструкція дає змогу виготовляти по декілька зразків на перевірку твердості одночасно.

Зразок у формі шайби є оптимальним для випробування на твердість за Брінеллем, оскільки його плоска поверхня ідеально підходить для прикладання навантаження. Твердість за Брінеллем визначали шляхом нанесення стандартного навантаження на поверхню зразка і вимірювання діаметра відбитку.

Усі наведені зразки з високоентропійних сплавів одержували за допомогою піщано-глинясто-рідкоскляних форм з наповнювачем кварцитом. Їх готували наступним чином. Перед формовкою просіювали кварцит через сито з розміром вічка 0,2 мм для поділу дрібних гранул від великих, адже для

форми важливі саме дрібні частинки кварциту, так набагато краще відтворюється відбиток моделі (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Модель зразка для формовки

Після цього замішували кварцит з водою та бентонітовою глиною, додавали рідке скло і суміш ретельно перемішували за допомогою лопатки. Після приготування формувальної суміші засипали її в опоки і ущільнювали. Фото готової під заливання форми наведено на рис. 2.5.

Отриману форму сушили протягом 24 год при температурі 50 °С і прожарювали при температурі від 700 °С до 800 °С протягом 2 год. Після її сушіння виплавляли сплав і заливали його у форми. Температуру заливання витримували на рівні  $1450 \pm 10$  °С.



Рисунок 2.5 – Форма для заливання

Після заливання форми з металом охолоджували і вибивали. Фото ливарних зразків із високоентропійного сплаву на рис. 2.6.



Рисунок 2.6 – Зразки з ливниковою системою, зліва направо: ливникова система, зразок 1 (на твердість), зразок 2 (на міцність)

## 2.4 Металографічне дослідження

Метод передбачає підготовку та вивчення структури поверхні матеріалу з використанням оптичного мікроскопу, що дає змогу отримати детальну інформацію про його мікроструктуру.

Першим етапом у металографії є підготовка зразка для подальшого аналізу. Це включає зрізання зразка з метою отримання плоскої поверхні, яка буде піддаватись подальшому шліфуванню та можливому поліруванню. Ці процедури допомагають усунути нерівності та перевести зразок у зручну форму для мікроскопічного дослідження.

Наступним кроком є оптичний аналіз зразка в мікроскопі. За допомогою різних методів освітлення та налаштування збільшення, дослідник може виявити та дослідити різні структурні елементи матеріалу, такі як зерна, вкраплення та фази. Цей аналіз дає змогу отримати інформацію про кристалічну орієнтацію, розмір та розташування структурних елементів.

Додатково застосовується в металографії процедура травлення зразка. Вона використовується для виявлення контурів структурних елементів, зокрема зерен. Травлення дає змогу виділити межі між зернами та дослідити їх форму, розмір та розташування.

Металографічне дослідження проводили на оптичному мікроскопі «Epiquant» (рис. 2.7) із діапазоном збільшення від 5 до 1000 разів.



Рисунок 2.7 – Мікроскоп «Epiquant»

## 2.5 Методика термоаналізу

Термічний аналіз, відомий також як калориметрія, є методом дослідження фізико-хімічних процесів, що базується на вимірюванні теплових ефектів, які виникають під час перетворення речовин за контрольованої температури. Цей метод дає змогу реєструвати температурні зміни в часі шляхом створення та аналізу кривих нагрівання або охолодження зразків.

Під час термічного аналізу зразок піддається поступовому нагріванню або охолодженню, а його температура вимірюється і записується. Під час проходження фазових перетворень в речовині або суміші речовин відбувається виділення або поглинання теплоти, що відображається на термограмі – графіку температурних змін. За допомогою аналізу термограми можна виявити такі явища, як плавлення, кристалізацію, реакції окиснення, розкладу та інші фізико-хімічні перетворення.

Метод диференційної сканувальної калориметрії (ДСК) часто є невід'ємною частиною сучасних досліджень фізико-хімічних процесів. Цей метод забезпечує можливість вимірювати теплові ефекти, які супроводжують перетворення речовин, з високою точністю та чутливістю.

Для нашого дослідження використано метод синхронного термічного аналізу (СТА) у конфігурації ТГ + ДСК (термогравіметрія + диференціальна сканувальна калориметрія). Синхронний термічний аналіз має особливу перевагу у здатності одночасно вимірювати зміну маси та теплові ефекти на одному зразку, що надає нам можливість отримати порівняльні результати. Такий підхід забезпечує уникнення впливу таких факторів, як неоднорідність матеріалу та умови експерименту, оскільки ми можемо вимірювати маси та теплові ефекти одночасно. Це забезпечує високу точність отриманих даних та надає надійну інформацію про фізико-хімічні процеси, які відбуваються в матеріалі.

Диференційний термічний аналіз проведено на приладі “STA 449 F1 Jupiter” (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 – СТА прилад “STA 449 F1 Jupiter”

## 2.6 Методика визначення ливарних та механічних властивостей

Для проведення дослідження ливарних властивостей (зокрема рідкотекучості) використано пруткові проби. Основною метою було визначення довжини, на яку рідкий метал може заповнити порожнину форми при відливанні цих проб. Для цього застосовано технологію лиття за моделями, що газифікуються, у вакуумних формах при температурі заливання  $1450 \pm 20$  °С.

У нашому експерименті використано стаяк із пінополістиролу, до якого було приклеєно чотири прутки (стрижні) з того ж матеріалу. Кожен пруток мав власну довжину: 70, 95, 150 і 195 мм, та діаметр 6,5 мм. Після заливання проб порівнювали отримані дані рідкотекучості дослідженого сплаву та чавунів різного складу, на рис. 2.8 наведені вже відлиті пруткові проби для вимірювання рідкотекучості сплавів.



Рисунок 2.8 – Пруткові проби

Для визначення механічних властивостей використовували твердомір ТШ-2М, фото наведено на рис. 2.9. Це прилад, який використовується для

вимірювання твердості металів та сплавів за допомогою методу Брінелля відповідно до стандарту ГОСТ 23677-79.

Метод Брінелля визначає твердість матеріалу шляхом вимірювання діаметра відбитку, який утворюється під дією стандартизованого навантаження на поверхню матеріалу. Зазвичай це виконується за допомогою сферичного індентора діаметром 5 мм. Після зняття навантаження вимірюють діаметр утвореного відбитка, а потім використовують таблиці для визначення твердості матеріалу.

Випробування на розтягування проводили наразків діаметром 6 мм, довжиною 30 мм використовуючі розривну машину моделі Р5.

Розривна машина Р-5 є приладом, призначеним для проведення статичних випробувань на розтяг різноманітних матеріалів згідно з вимогами ГОСТ 1497 або ДСТУ EN 10002-1:2006. Цей стандарт визначає процедури та параметри, які дозволяють визначити деформаційні характеристики та механічну міцність матеріалів (металів) під дією розтягуючих сил. Швидкість розтягування становила 1 мм/хв., що відповідає швидкості деформації  $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ .



Рисунок 2.9 – Твердомір ТШ-2М



Рисунок 2.10 – Розривна машина моделі Р5



Рисунок 2.11 – Зразки діаметром 6 мм та довжиною 60 мм для випробування на розтяг

## **2.7 Рентгенофазовий аналіз**

Для рентгенофазового аналізу замовили послугу від іншого підрозділу.

Підрозділ використовував прилад рентгенівського дифрактометра Дрон-3. Користуючись базою даних, де зібрані файли порошкової дифракції (PDF), які детально описують розсіяння рентгенівського випромінювання від різних порошкових речовин. Кожен PDF-файл має унікальний набір даних (кути  $2\theta$ , міжпощинні атомні відстані та інтенсивності піків), що дає змогу однозначно ідентифікувати речовину по піковим позиціям, які пов'язані з розташуванням атомів у кристалічній ґратці і можуть бути використані для визначення структури матеріалу.

Використання дифрактометра забезпечує надзвичайно високу точність при визначенні параметрів ґратці і вивченні структурних характеристик широкого спектру елементів.

## **2.8 Хімічний аналіз**

Для проведення хімічного аналізу було здійснено замовлення послуги іншого підрозділу.

Підрозділ використовував прилад для хімічного аналізу методом рентгенофлуоресцентного аналізу (РФА) приладом Expert3L.

Аналізатор має на меті точне визначення вмісту хімічних елементів у різноманітних матеріалах, незалежно від їхньої форми – чи це буде монолітний об'єкт, що має однорідну структуру, або порошкоподібний матеріал зі змішаною композицією.

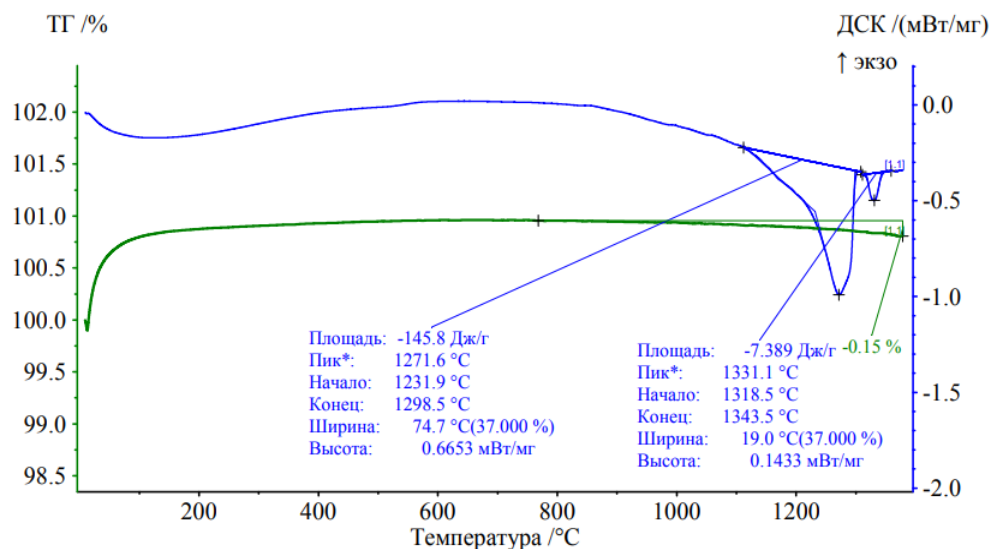
Вміст вуглецю визначали на експрес аналізаторі АН-7529 у ФТІМС НАН України методом спалювання стружки в алундованій ємності.

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

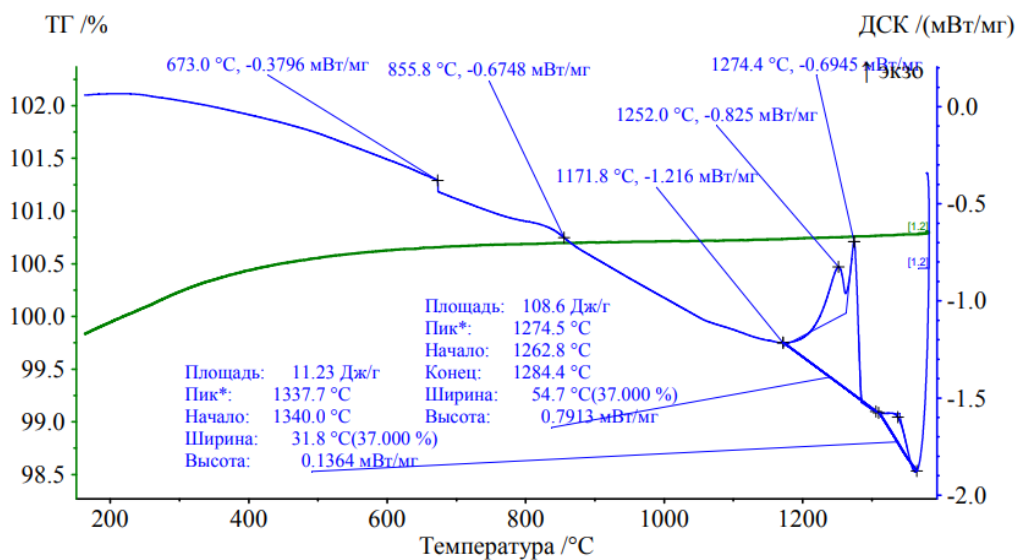
#### 3.1 Дослідження фазових перетворень високоентропійного сплаву $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$

За допомогою синхронного термічного аналізу (СТА) досліджували термофізичні властивості високоентропійного сплаву  $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$ . При цьому визначали температуру солідус ( $T_c$ ), ліквідус ( $T_l$ ), інтервал кристалізації ( $\Delta T$ ) та площі піків теплопоглинання ( $\Delta H_{\text{погл}}$  при нагріванні) і тепловиділення ( $\Delta H_{\text{вид}}$  при кристалізації). Для дослідного високоентропійного сплаву було визначено наступні термофізичні параметри:  $T_c = 1231,9$  °С,  $T_l = 1343,5$  °С,  $\Delta T = 111,6$  °С,  $\Delta H_{1\text{погл}} = -145,8$  Дж/г,  $\Delta H_{2\text{погл}} = -7,39$  Дж/г,  $\Delta H_{1\text{вид}} = 11,23$  Дж/г,  $\Delta H_{2\text{вид}} = 108,6$  Дж/г. СТА експеримент з дослідним сплавом показав, що маса зразка при нагріванні зменшується на 0,15% (крива ТГ).

Плавлення сплаву проходить за кілька стадій в температурному інтервалі від 1232,9 °С до 1331,1 °С (рис. 3.1(а)). При цьому спостерігається два чітких піка, але перший пік має перегин при температурі приблизно 1252 °С, що означає часткове перекриття піків, тобто можна зробити висновок про наявність трьох піків, при цьому кожен пік відповідає за плавлення певної фази. Під час плавлення першої фази починає плавитися друга. Температуру солідус визначали на кривій плавлення – це початок плавлення першої фази (рис. 3.1(а)). При швидкості нагрівання 20 °С/хв плавлення сплаву починається при 1231,9 °С, а плавлення третьої фази починається при температурі 1318,5 °С. Кристалізація починається при температурі 1340 °С, яка відповідає температурі ліквідус, тобто кристалізація першої фази (рис. 3.1 (б)). Наступні два піки частково перекриваються і це означає, що під час кристалізації другої фази починає кристалізуватися третя фаза. Сплав  $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Al}_{20}$  має досить широкий інтервал кристалізації, а саме:  $\Delta T = 111,6$  °С.



а



б

Рисунок 3.1 – ДСК криві плавлення (а) та кристалізації (б) високоентропійного сплаву  $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$ , швидкість нагрівання  $20\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{хв}$

### 3.2 Дослідження хімічного та фазового складу сплаву

#### 3.2.1 Хімічний склад сплаву $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$

Хімічний аналіз високоентропійного сплаву  $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$  представлений у табл. 3.1. Методику проведення аналізу докладно описано у

розділі 2.8. Кількість таких елементів як Fe, Ni, Cr, Mn, Al, Cu, P, S, Si визначали за допомогою рентгенофлуоресцентного експрес-аналізатора. Такі елементи, як C, P, S, Si з'являються у сплаві при введенні у шихту чавуну. Кількість марганцю в сплаві не перевищує 0,2% масової частки, а кількість фосфору та сірки знаходиться на рівні домішок. При виплавці сплаву в індукційній печі на повітрі втрата алюмінію та хрому була не більше 2,0%, мас. част., а загальний угар елементів, в тому числі, і на утворення шлаку в середньому не перевищував 9,5%, мас. част.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад високоентропійного сплаву  $Al_{20}Ni_{20}Cr_{20}Fe_{20}Cu_{20}$

| Елементи | Мас. част. % |
|----------|--------------|
| Fe       | 23,36±0,16   |
| Ni       | 22,65±0,15   |
| Cr       | 18,60±0,11   |
| Mn       | 0,17±0,045   |
| Al       | 9,67±0,47    |
| Cu       | 23,13±0,16   |
| C        | 0,640,10     |
| Si       | 1,78±0,12    |
| S        | 0,014±0,015  |
| P        | 0,014±0,015  |

### 3.2.2 Рентгенофазовий аналіз сплаву $Al_{20}Ni_{20}Cr_{20}Fe_{20}Cu_{20}$

Методику проведення рентгенофазового аналізу описано у розділі 2.7. Дослідження структури високоентропійного сплаву  $Al_{20}Ni_{20}Cr_{20}Fe_{20}Cu_{20}$  показало, що рентгенограма на рис. 3.2 показує присутність суміші твердих

розчинів на базі ґраток двох типів – ґранецентрованої кубічної ґратки (ГЦК) з просторовою ґрупою  $Fm\bar{3}m$  і кристалічним типом, аналогічним до ГЦК структури міді (PDF 04-0836) та об’ємноцентрованої кубічної ґратки (ОЦК) з просторовою ґрупою  $Im\bar{3}m$  і параметрами близькими до ОЦК структури заліза (PDF 06-0696) або хрому (PDF 06-0964), тому, що кутові значення  $2\theta$  елементів хрому та заліза близькі між собою. Також в районі  $2\theta = 17,9^\circ$  присутній малоінтенсивний пік, який можливо відноситься до складного карбїду типу  $(FeCr)_xC_y$ .

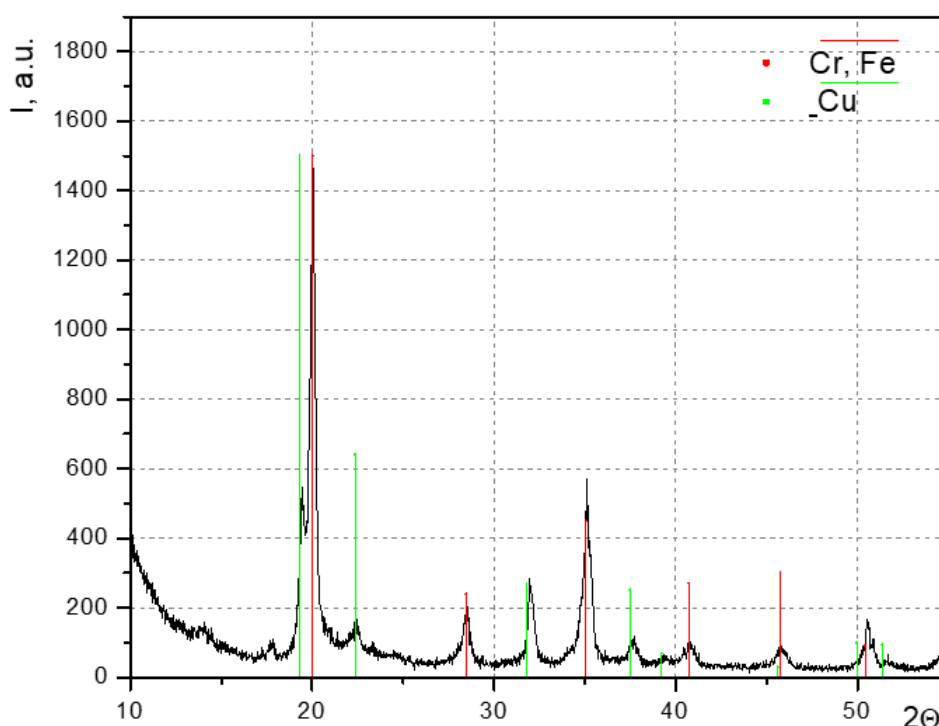


Рисунок 3.2 – Рентгенофазовий аналіз високоентропійного сплаву  $Al_{20}Ni_{20}Cr_{20}Fe_{20}Cu_{20}$

### 3.3 Металографічний аналіз

Для виявлення мікроструктурних складових сплаву зразок потравлювали у водному розчині кислот  $HF$  – 5%,  $HNO_3$  – 30%,  $H_2O$  – 65% приблизно одну хвилину. Високоентропійний сплав проявляє високу хімічну стійкість, тому для виявлення макрозерна сплаву потрібно травити шліф

протягом 5 хвилин. При аналізі мікроструктури зразка (рис. 3.3) в площині мікрошліфа розкидані карбіди ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Fe}_{23}\text{C}_6$ ) у вигляді шестикутників та пластин з гострими кутами. Також на фотографії мікроструктури виявлено присутність пластинчастого перліту, який представляє собою евтектоїдну суміш фериту і цементиту, які чергуються у вигляді пластинок. Крім того, спостерігається зернистий перліт, де цементит знаходиться у вигляді зерен. Чорні плями на мікрошліфі свідчать про присутність невеликої кількості газових пор в зразку.

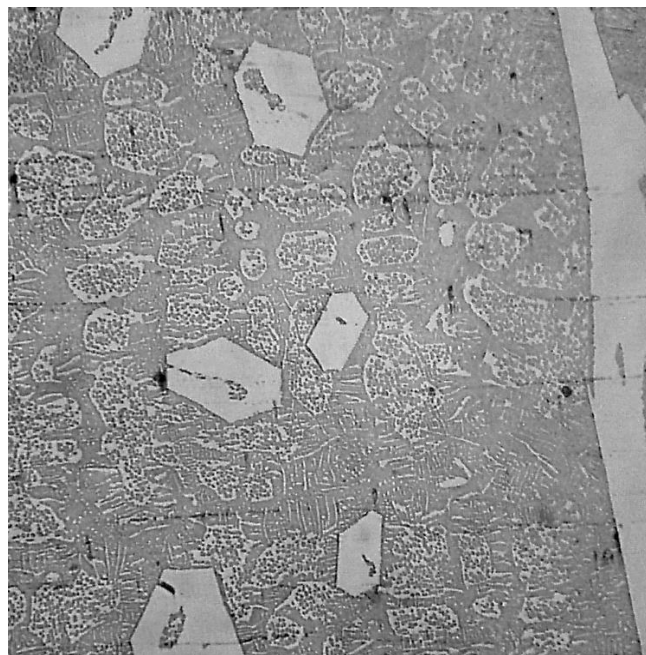


Рисунок 3.3 – Мікроструктура зразка високоентропійного сплаву  $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$ , збільшення  $\times 250$

Для оцінки однорідності структури сплаву в різних його частинах було використано мікрошліф, який був взятий зі стояка ливникової системи (рис. 3.4). Цей мікрошліф візуально має схожі характеристики, що свідчить про однаковість структури сплаву у різних місцях.



Рисунок 3.4 – Мікроструктура зразка (зі стояка) високоентропійного сплаву  $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$ , збільшення  $\times 250$

### 3.4 Ливарні та механічні властивості сплаву

Для дослідження ливарних властивостей високоентропійного сплаву  $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$  використовували пруткові проби, які виготовляли з пінополістиролу. Фото проби наведено на рис. 3.5. Після охолодження вимірювали довжину на яку проливався рідкий метал. Проби заливали по технології лиття по моделях, що газифікуються, у вакуумні форми з дисперсним вогнетривким наповнювачем при температурі  $1450 \pm 20$  °C. До ливарного стояку із пінополістирола приклеювали чотири прутки з того ж матеріалу довжиною 70, 95, 150, 195 мм та діаметром 6,5 мм. Після заливки проб порівнювали ливарні властивості високоентропійного сплаву та чавунів різного складу (сірого чавуну складу, мас. %: C – 3,0, Si – 2,0, Mn – 0,6), високохромістого чавуну складу, мас. %: C – 3,0, Si – 1,4, Mn – 1,6, Cr – 18,8, Ni – 3,0 та спеціального чавуну, наступного складу, мас. %: C – 3,0, Si – 2,0, Ni – 17, Cu – 2,5, Cr – 2,5, Mn – 1,4.

Аналіз одержаних результатів проводили наступним чином. Для всіх сплавів спочатку знаходили довжини чотирьох прутків, які пролилися і

визначали їх середню довжину. Виходячи з отриманих величин, можна заключити, що порівняно хороші ливарні властивості показали високоентропійний сплав  $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$  (102,5 мм) та високохромистий чавун (104 мм), а чавуни сірий і спеціального призначення показали гірші ливарні властивості, 72 мм, 89,5 мм, відповідно. Таким чином, на основі попередньо одержаних результатів можна зробити висновок, що рідкотекучість трохи вища ніж нелегованих чавунів, тому ним можна заповнювати форму методом лиття при нормальних умовах. Це вказує на його потенційну перевагу у виготовленні виливків методом лиття.



Рисунок 3.5 – Пруткова проба зі високоентропійного сплаву  $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$

Серед механічних властивостей високоентропійного сплаву визначали твердість та міцність зразків на розтяг. Твердість сплаву вимірювали по методу Брінелля (випробування на твердість за Брінеллем) вдавллюванням в зразок на спеціальному приладі сталевій загартованій кульки діаметром 5 мм під дією навантаження 750 кгс протягом певного часу. Для перевірки однорідності структури вимірювання робили в різних точках зразку, всього

було отримано 4 значень твердості (НВ) (рис. 3.6): 341, 321, 333, 321, що в середньому становить 329 НВ. Різниця в значеннях твердості НВ в зразку із сплаву  $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Al}_{20}\text{Cu}_{20}$  може бути пояснена наявністю газової пористості або газова-усадкова пористість в структурі цього сплаву. Для порівняння вимірювали твердість сірого, високоміцного та високохромистого чавунів. Твердість за Брінеллем для спеціального чавуну складу, мас. %: С – 2,6, Si – 2,0, Ni – 17, Cu – 2,5, Cr – 2,5, Mn – 1,4 складає 167 НВ (вимірювання в п'яти точках). Твердістю сірого чавуну СЧ200 згідно з ДСТУ 8833:2019 складає 255 НВ, а високоміцного чавуну ВЧ600-3 згідно з ДСТУ 3925:99 складає 192-277 НВ. В структурі сірого СЧ200, високоміцного ВЧ600-3 та спеціального чавунів вуглець знаходиться у вигляді пластинчатого та кулястого графіту, а в структурі високоентропійного сплаву  $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$  вуглець знаходиться у вигляді карбідів, тому твердість СЧ200 на 23% нижче, ВЧ600-3 на 32% нижче, а спеціального чавуну на 51% нижче ніж в зразках із сплаву  $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$ .

Випробування на розтягування зразків діаметром 6 мм, довжиною 60 мм проводили на розривній машині моделі Р5. Швидкість розтягування становила 1 мм/хв., що відповідає швидкості деформації  $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , на рис. 3.7 наведено загальний вигляд зразку для випробування. Досліди показали, що тимчасовий опір ( $\sigma_{\text{в}}$ ) під час розтягання для зразків із високоентропійного сплаву  $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$  складає 450-550 МПа, а відносне видовження зразку ( $\delta$ ) складає 1,5-2%. Також для порівняння вимірювали границю міцності ( $\sigma_{\text{в}}$ ) під час розтягування для спеціального чавуну складу, мас. %: С – 2,6, Si – 2,0, Ni – 17, Cu – 2,5, Cr – 2,5, Mn – 1,4, яка складає  $197 \pm 23$  МПа. Границя міцності ( $\sigma_{\text{в}}$ ) під час розтягування для сірого чавуну СЧ200 згідно з ДСТУ 8833:2019 складає 200 МПа, а високоміцного чавуну ВЧ600-3 згідно з ДСТУ 3925:99 складає 600 МПа, а відносне видовження чавуну ВЧ600-3 ( $\delta$ ) складає 2-3 %. Таким чином міцність на розтягування для високоентропійного сплаву наближається до

міцності для високоміцного чавуну та перевищує міцність сірого і спеціального чавунів майже у 2,5 рази.



Рисунок 3.6 – Зразок шайба з високоентропійного сплаву  $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$  для випробування методом Брінелля, наявні 4 точки вдавнення



Рисунок 3.7 – Загальний вигляд кріплення зразка з високоентропійного сплаву  $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$  для випробування на розтяг

### 3.5 Висновки

В процесі виконання теоретичних та практичних досліджень з високоентропійним сплавом  $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$  встановлено наступне:

1. Технологія виплавлення сплаву базується на використанні індукційної печі відкритого типу, плавлення доцільно вести в інтервалі температур не менше 1400...1450 °С, а заливати при температурі 1450 °С. Як шихтові матеріали можуть бути використані як первинні метали (мідь, нікель, хром, алюміній), так і легованих сплавів (чавуну).

2. За допомогою рентгенофазового аналізу було встановлено, що склад високоентропійного сплаву при нормальних умовах являє собою суміш структурних складових, які мають ГЦК та ОЦК-гратки. Також в структурі сплаву помічені карбіди переважно шестикутної форми та газоусадкова пористість.

3. В результаті синхронного термічного аналізу встановлено основні точки фазових переходів високоентропійного сплаву, такі як: температура ліквідус 1343,5 °С, солідус 1231,9 °С, а також інтервал кристалізації (111,6 °С), інтервали взаємного розчинення і існування фаз із різною кристалічною будовою.

4. За допомогою пруткових проб оригінальної конструкції досліджено рідкотекучість високоентропійного сплаву в наступних умовах: температура заливання  $1450 \pm 20$  °С та порівняно отримані числові дані з аналогічними характеристиками чавунів різного складу:

– сірого чавуну складу, мас. %: С – 3,0; Si – 2,0; Mn – 0,6;

– високохромистого чавуну складу, мас. %: С – 3,0; Si – 1,4; Mn – 1,6; Cr – 18,8; Ni – 3,0;

– спеціального чавуну складу, мас. %: С – 3,0; Si – 2,0; Ni – 17; Cu – 2,5; Cr – 2,5; Mn – 1,4.

Було виявлено, що досліджений сплав  $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$  має кращу рідкотекучість (102,5 мм), ніж сірий чавун та спеціальний чавун (72 мм та

89,5 мм відповідно) і за цим показником наближений до високохромистого чавуну (104 мм).

5. Вперше визначено основні механічні властивості високоентропійного сплаву  $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$  за допомогою стандартних методик. Установлено, що міцність при розриванні сплаву становить 450-550 МПа, і цей результат переважає спеціальний чавун складу (С – 3,0; Si – 2,0; Ni – 17; Cu – 2,5; Cr – 2,5; Mn – 1,4) 197-220 МПа та наближається до високоміцних чавунів (400...600) МПа. Характеристика пластичності (відносне видовження) – складає 2%. Твердість за методом Брінелля становить 321-341 НВ, тобто сплав має досить високу твердість, але при цьому здатний до оброблення.

## **4. ОХОРОНА ПРАЦІ**

Цей розділ має велике значення для дипломної роботи, оскільки знання основних правил безпеки та постійна обережність є надзвичайно важливими. Особливо це стосується приміщень, де проводяться процеси плавлення, оскільки там можуть знаходитися безліч потенційно небезпечних речовин і обладнання.

Тому дотримання правил безпеки праці має велике значення для успішного проведення та виготовлення особливих сплавів. Робота з такими матеріалами вимагає неухильного дотримання процедур безпеки та застосування спеціальних заходів захисту.

При прийомі на роботу необхідно ознайомитися з охороною праці відповідного документу ДСТУ 2293-99, це обов'язкове проходження кожного працівника під час працевлаштування [27]. Служба з охорони праці, яка знаходиться на п'ятому поверсі (526), забезпечує навчання нових співробітників з основних аспектів охорони праці. Служба з охорони праці – Кравчук Надія Дмитрівна

Це все включає знайомство з документацією, правилами безпеки, заходами попередження аварій, ознайомлення з засобами індивідуального захисту.

### **4.1 Характеристика лабораторії №144 для проведення плавки**

У даному розділі розглянемо характеристики приміщення з погляду охорони праці, що має велике значення для забезпечення безпеки та комфорту працівників.

У приміщенні необхідно передбачити окремі робочі зони, призначені для різних технологічних процесів, з метою уникнення конфлікту між ними. Розподіл робочих зон дозволяє забезпечити оптимальні умови для кожного

процесу та уникнути взаємного впливу між ними, схема приміщення наведено на рис. 4.1.

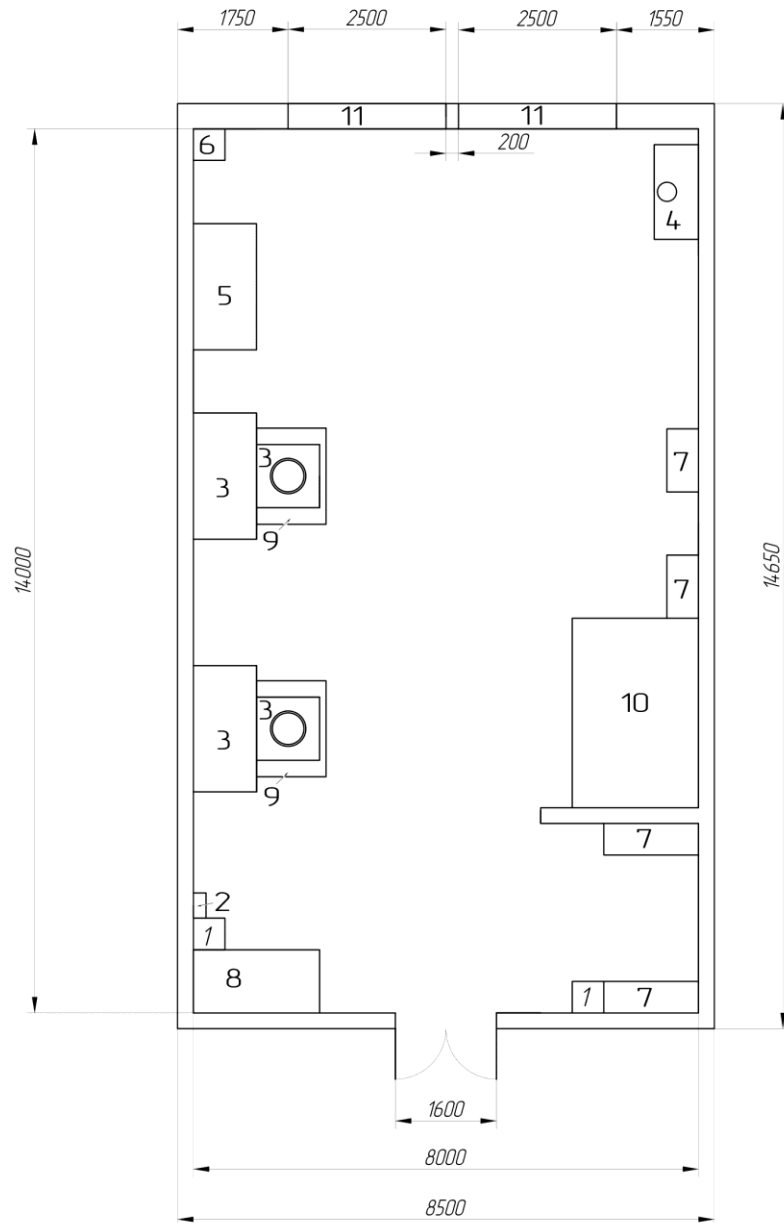


Рисунок 4.1 – Схема приміщення лабораторії №144

Для успішного виконання дослідницької роботи необхідно мати належне приміщення для плавки сплавів та отримання зразків для подальшого дослідження. Лабораторія №144, призначена для цих цілей, має декілька важливих місць, які грають важливу роль у процесі (розшифрування місць позначених цифрою):

- 1 – місце для вогнегасників x2;
- 2 – головний рубильник подачі електроживлення в лабораторію;
- 3 – індукційна піч з генератором x2;
- 4 – вакуумно-індукційна піч з панеллю керування;
- 5 – верстак, стіл;
- 6 – вмивальник, місце подачі води для охолодження індуктора печей;
- 7 – шафа з матеріалами та інструментами x4;
- 8 – робочий стіл;
- 9 – вентиляційна витяжка x2;
- 10 – склад інструментів.

Розмір приміщення, призначеного для плавки матеріалів, варіюється в залежності від потреб дослідження. Приміщення повинно бути достатньо просторим, щоб забезпечити комфортне переміщення співробітників та розташування необхідного обладнання, доступ до матеріалів чи інструментів.

У такій лабораторії також необхідна система вентиляції для забезпечення відведення шкідливих випарів та газів, що можуть утворюватися під час плавки матеріалів. Це дозволяє зберігати внутрішнє середовище безпечним для роботи співробітників.

Забезпечення системи безпеки лабораторії включає в себе наявність вогнегасників, які можуть бути використані в разі виникнення пожежі, а також можливість ручного відключення подачі енергії до всього обладнання. Це дозволяє оперативно реагувати на надзвичайні ситуації та мінімізувати ризик для співробітників та обладнання. Лабораторія №144 відповідає всім вищезазначеним вимогам безпеки і є придатним місцем для проведення дослідницьких робіт, а саме виготовлення зразків із різних сплавів.

Лабораторія відповідає всім нормативним вимогам, які стосуються встановлення обладнання, включаючи вимоги до об'єму і площі приміщення на одного працівника, а також місця розташування технологічного обладнання. Ці вимоги були детально враховані під час проектування

лабораторії, щоб забезпечити комфортні і безпечні умови праці для всього персоналу.

Розмір приміщення має ширину 8 м, довжину 14 м і висоту стелі 3,5 м. Велике приміщення є особливо важливим для ефективного проведення плавки, що дозволяє розмістити плавильну установку та необхідне обладнання з належним простором між ними [28], площа приміщення складає 112 м<sup>2</sup>, загальний об'єм приміщення 1680 м<sup>3</sup>.

В лабораторії №144 працюють три співробітники, тому було забезпечено достатню площу приміщення для кожного працівника, згідно з вимогами нормативних документів. Кожному працівнику надано достатньо простору для виконання роботи, що сприяє зручності і ефективності робочого процесу, нормативні вимоги та порівняння з реальними значеннями наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Нормативні та реальні характеристики приміщення.

| № | Параметр приміщення       | Реальне значення    | Нормативні значення |
|---|---------------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | Площа на 1 працюючого     | 37,3 м <sup>2</sup> | 4,5 м <sup>2</sup>  |
| 2 | Об'єм на 1 працюючого     | 560 м <sup>3</sup>  | 15 м <sup>3</sup>   |
| 3 | Мінімальна ширина проходу | 1,6 м               | 1,5 м               |

## 4.2 Вентиляція

Згідно з ДБН В.2.5-67:2013 "Опалення, вентиляція та кондиціонування" встановлення системи вентиляції є обов'язковим у всіх виробничих приміщеннях. Ця норма передбачає, що вентиляційна система створює безпечні умови роботи персоналу [29].

Система витяжки в лабораторіях відіграє важливу роль у забезпеченні екологічності та безпеки. у важливих приміщеннях, де можуть бути хімічні

речовини і кабінетах плавки є вентиляційна система, щоб при роботі зі шкідливими речовинами співробітник працював постійно з включеною витяжною та використовує респіратори, всі вентиляційні системи відділу працюють.

Плавлення сплавів являє собою дуже важкою умовою праці і вимагають особливої уваги. У таких умовах, де висока температура повітря, наявність пилу, газів і диму, належна вентиляція відіграє вирішальну роль в забезпеченні безпеки та комфорту працівників.

Основне завдання системи вентиляції в приміщеннях— це ефективне видалення шкідливих факторів, що мінімізує їх вплив на здоров'я людей.

Важливою особливістю вентиляційних систем у лабораторії є необхідність враховувати комплексний вплив різних небезпек: високої температури, випарів та газів, токсичних речовин, підвищений вміст пилу, аерозолів з високим вмістом твердих частинок та диму. Для досягнення максимальної ефективності і безпеки, вентиляційні системи в лабораторіях повинні бути добре розробленими і належно налаштованими. Вони повинні забезпечувати потужний обмін повітря, ефективне видалення тепла, шкідливих речовин та пилу, а також забезпечувати достатню фільтрацію повітря.

У лабораторії, де є печі відкритого типу (тобто без закритої камери), приділяється особлива увага створенню комфортних умов для працівників, а також забезпеченню безпеки. Встановлені системи вентиляційних витяжок над кожною з цих печей, що є дуже раціональним рішенням з точки зору безпеки. Системи вентиляційних витяжок призначені для видалення шкідливих речовин, пилу, газів та диму, що утворюються під час роботи печей.

Вентиляційна система, яка встановлена в лабораторії, належить до типу "Місцева витяжна вентиляція", фото вентиляційної системи наведено на рис. 4.2. Цей тип вентиляції передбачає встановлення витяжних пристроїв

безпосередньо над робочими місцями або над джерелами шкідливих речовин для того, щоб одразу відвести шкідливі речовини та пари.



Рисунок 4.2 – Вентиляційна система лабораторії

### 4.3 Шум

Шум – це небажаний звук, який може негативно впливати на здоров'я людини, знижувати її працездатність. з певною швидкістю в газоподібній, рідкій або твердій фазі.

Шум може мати різне походження. Він може бути механічного походження, що виникає внаслідок вібрації механізмів та устаткування, а також ударів у конструкції. Шум може мати аеродинамічне походження, коли газ або повітря протікає по трубопроводах, вентиляційних системах або випускається в атмосферу. Він також може бути гідродинамічного походження, що виникає внаслідок процесів, що відбуваються у рідинах, або електромагнітного походження, що виникає внаслідок коливання елементів електромеханічних пристроїв під впливом змінних магнітних полів.

У виробничих умовах шум має негативний вплив на працівників. Він знижує увагу, сприяє виникненню втоми і затримує реакцію на небезпеку [30]. Це може призводити до зниження працездатності та

збільшення ризику нещасних випадків. Тому проблема боротьби з шумом є актуальною в майже всіх галузях виробництва.

Відповідно до ГОСТ 12.1.003-83 "Система стандартів безпеки праці. Шум. Загальні вимоги безпеки.", встановлені допустимі значення рівня звуку та рівня звуку виробничих приміщень. З метою забезпечення безпеки працівників, рівень звуку на постійних робочих місцях підприємства не повинні перевищувати 85 дБА.

Усі кімнати в інституті обладнані системами вентиляції, що вимагає використання потужного обладнання для забезпечення необхідної продуктивності. Незважаючи на це, середній рівень шуму, який створюється вентиляційною системою, коли вона працює в лабораторії, становить приблизно 30 дБА, цей рівень шуму є оптимальним і відповідає комфортному умові. Для порівняння, рівень шуму вище 50 дБА вже вважається гучним звуком, який може створювати дискомфорт та впливати на концентрацію та продуктивність працівників.

Під час роботи індукційної печі важливо забезпечити стабільний потік охолоджувальної рідини. У даному випадку для цього використовується водопровідна вода. При підключенні трубок до індуктора, шум, що виникає від потоку водопровідної води, не перевищує 20 дБА, що відповідає допустимому рівню. Такі низькі значення шуму від водопровідної води забезпечують комфортні умови роботи.

#### **4.4 Освітленість**

Відповідно до Державного будівельного нормативу В.2.5-28-2006, нормування освітлення виробничих приміщень промислових підприємств базується на різних факторах, які впливають на необхідний рівень освітлення [31]. Ці фактори включають характеристику, розряд і підрозряд зорової роботи, які визначаються найменшим або еквівалентним розміром об'єкта розрізнення, контрастом між об'єктом розрізнення і фоном, а також

характеристику самого фону. Крім того, рівень освітлення також залежить від системи освітлення в приміщенні, яка може бути природною, суміщеною, боковою, верхньою, загальною або комбінованою.

Виробничі приміщення можуть мати різні типи освітлення, залежно від джерел світла, що використовуються. Існують три основних види освітлення:

- природне освітлення формується за рахунок проникнення прямих сонячних променів і розсіяного світла небосхилу. Воно володіє своїми перевагами, оскільки надає приміщенню приємний колір. Природне освітлення сприяє підвищенню настрою та енергії працівників;

- штучне освітлення забезпечується електричними джерелами світла, такими як лампи, світильники та інші. Воно дозволяє регулювати рівень освітленості в приміщенні і забезпечує стабільний доступ до світла незалежно від часу доби. Штучне освітлення широко застосовується в приміщеннях, де природне освітлення обмежене або недостатнє;

- суміщене освітлення використовується тоді, коли природне освітлення не відповідає нормативним вимогам і доповнюється штучним освітленням. Цей підхід дозволяє забезпечити достатній рівень освітленості в приміщенні шляхом комбінації природного та штучного світла.

Лабораторія використовує суміщене освітлення, оскільки у кімнаті є великі вікна, які частково затінені деревами, тому пряме сонячне світло немає. Вдень освітлення з вікон забезпечує достатній рівень світла для проведення робіт, який може сягати 300-600 люксів. Однак, з настанням вечора, коли природне освітлення зменшується, необхідно включати штучне освітлення.

У якості штучного освітлення використовуються 4 люмінесцентні лампи типу УСП11 2x40, які здатні забезпечувати освітлення приміщення до 400 люксів. Це значення є оптимальним для виконання робіт у лабораторії.

Люмінесцентні лампи мають значно вищу світлову віддачу в порівнянні з лампами розжарювання. Вони забезпечують близько п'ять разів більше світла при такій же використаній електроенергії. У порівнянні зі

звичайними лампами розжарювання, які перегорають через витривалість нитки, люмінесцентні лампи мають значно більший термін служби. Вони працюють на основі інших принципів та конструкцій, тому їх термін роботи може бути в 5-10 разів довшим.

У люмінесцентних лампах поверхня, яка випромінює світло, більша в порівнянні зі спіралью лампи розжарювання. Це сприяє рівномірнішому та м'якшому розподілу світла по приміщенню. Такий підхід до освітлення дозволяє забезпечити комфортні умови праці в лабораторії незалежно від та забезпечує необхідний рівень освітленості для виконання праці.

#### **4.5 Фактори безпеки**

Безпека є невід'ємною складовою будь-якого процесу, і важливо дотримуватись строгих правил безпеки при роботі з будь-яким обладнанням або інструментами. Індукційна піч, як і будь-який інший пристрій, також має потенційно небезпечні аспекти, що стосується індукційної печі, вона може мати деякі шкідливі фактори, такі як виділення інфрачервоного випромінювання [32], електромагнітне поле і потенційний ризик отримання електричного струму. Ці фактори потребують пильної уваги та заходів безпеки при використанні печі.

Табл. 4.2 містить перелік шкідливих факторів, що можуть бути присутніми під час певного технологічного процесу. Ці фактори потребують особливої уваги та заходів безпеки для їх контролю і запобігання можливим негативним наслідкам.

Таблиця 4.2 – Небезпечні та шкідливі виробничі фактори при виготовленні зразка

| Види процесів              | Шкідливі виробничі фактори |                                      |        |              |                      |               |                          |     |            |                               | Небезпечні виробничі фактори |                                             |                                  |                                     |
|----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|--------|--------------|----------------------|---------------|--------------------------|-----|------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
|                            | шкідливі речовини          | випромінювання в оптичному діапазоні |        |              | електромагнітні поля | магнітні поля | іонізуючі випромінювання | шум | ультразвук | статичне навантаження на руку | електричний струм            | іскри, бризки і викиди розплавленого металу | механізми і вироби, що рухаються | системи, які знаходяться під тиском |
|                            |                            | ультрафіолетове                      | видиме | інфрачервоне |                      |               |                          |     |            |                               |                              |                                             |                                  |                                     |
| Індукц. піч, плавлення     | xx                         | -                                    | -      | xx           | x                    | x             | -                        | -   | -          | x                             | xx                           | xx                                          | -                                | -                                   |
| Вибивання форми            | -                          | -                                    | -      | -            | -                    | -             | -                        | x   | -          | x                             | xx                           | x                                           | -                                | -                                   |
| Різання зразків, болгаркою | -                          | -                                    | -      | -            | -                    | -             | xx                       | x   | -          | x                             | x                            | xx                                          | xx                               | -                                   |

Примітки: xx – інтенсивний фактор; x – помірний фактор; (-) – незначний фактор чи його відсутність

Сам процес плавлення також може бути дуже небезпечним. При додаванні шихтових матеріалів до печі може виникнути ризик бризків і іскор, що можуть становити потенційну небезпеку виникнення полум'я. Крім того, під час заливання розплавленого матеріалу в форму також необхідно бути дуже обережним, оскільки розплавлений сплав є дуже гарячим і може спричинити опіки. Жодні об'єкти або речовини, які досягають високих температур, не повинні потрапляти на шкіру, і це є основою безпеки при роботі з плавленням сплавів.

Загалом, для забезпечення безпеки при роботі з індукційною піччю та процесом плавлення необхідно дотримуватись усіх правил безпеки,

включаючи застосування відповідного захисту від небезпечних факторів [33], для цього використовуються відповідних засобів захисту, щоб запобігти контакту гарячого розплавленого сплаву зі шкірою, захисні окуляри зі шкільними захисними склами та захисний халат. Ці засоби захисту мають бути призначені спеціально для захисту очей від частинок та шкіру від бризків, іскор та інших потенційно шкідливих матеріалів, які можуть викидатися під час процесу плавлення.

#### **4.6 Пожежна безпека та евакуація**

Лабораторія дбає про всі необхідні заходи щодо пожежної безпеки. Усередині приміщення розташовані два відведені місця для вогнегасників, що дозволяє швидко знайти їх у разі потреби. В самій лабораторії розміщені 3 вогнегасники: один порошковий об'ємом ВП-9 10 л. два вуглекислотні ВП-5 об'ємом 5 і 10 літрів відповідно. Це розподілення дозволяє мати різні типи вогнегасників для різних ситуацій та забезпечує додатковий рівень безпеки [34].

В залежності від походження та зовнішніх ознак видокремлюються різні форми горіння, які можуть виникати при взаємодії займання з різноманітними речовинами:

Займання – це стійке горіння, яке виникає під впливом джерела запалювання.

Спалах – це швидке виникнення загоряння горючої суміші під впливом джерела запалювання без утворення стиснутих газів.

Спалахування – це займання, що супроводжується появою полум'я.

Самоспалахування – це самозаймання, що супроводжується появою полум'я.

Самозаймання – це горіння, яке починається без впливу джерела запалювання.

Процес плавлення металу та використання індукційних печей дійсно належать до пожежонебезпечних об'єктів. Це пов'язано з тим, що під час процесу плавлення металу температури досягаються дуже високими. Гарячий метал може спричинити загоряння легкозаймистих матеріалів, таких як папір, текстиль, дерево тощо, іскри можуть стати причиною загоряння легкозаймистих речовин.

З метою запобігання пожежі важливо дотримуватися наступних заходів безпеки:

- необхідно встановити захисні бар'єри або обгородження навколо місця плавки на відстані не менше 2 метрів. Це допоможе уникнути можливого контакту з потенційно спаленими матеріалами та розповсюдження пожежі;

- на місці роботи повинні бути розташовані вогнегасники, які можуть бути використані в разі загоряння. Персонал повинен бути навчений їх використовувати;

- двері в лабораторії мають оптимальну ширину 1,6 метра, що сприяє безпеці та ефективному виходу у разі пожежі чи інших надзвичайних ситуацій. Цей розмір дверей відповідає стандартам безпеки та дозволяє забезпечити зручний та швидкий доступ усіх працівників та відвідувачів до безпечних зон.

Кожен з трьох поверхів будівлі має свій власний план евакуації, розроблений з метою забезпечення безпеки людей у разі пожежі. Ці плани містять важливу інформацію щодо шляхів евакуації, місцезнаходження вогнегасників, а також позначення безпечних зон, крім того, на кожному поверсі встановлені покажчики, які служать орієнтиром для найближчого виходу. Ці покажчики надають важливу інформацію про напрямок до найближчого виходу і допомагають людям швидко та ефективно знайти безпечний шлях евакуації під час пожежі.

Враховуючи наявність планів евакуації та покажчиків найближчого виходу (рис. 4.3), співробітники та відвідувачі будівлі мають засоби для

швидкого реагування на небезпеку та евакуації в безпечні місця [35]. Це сприяє загальній безпеці та зменшенню ризику випадків під час пожежі, на рис. 4.4 наведено план евакуації 1-го поверху.



Рисунок 4.3 - Показчик найближчого виходу



Рисунок 4.4 – План евакуації 1-го поверху

#### 4.7 Електробезпека

ДСТУ Б В.2.5-82:2016 Електробезпека в будівлях і спорудах є документом, який встановлює вимоги до забезпечення електробезпеки.

До електроустаткування відноситься індукційна піч, яка вимагає особливої уваги до електробезпеки [36]. Піч має такі характеристики: працює

на промисловій частоті 50 Герц, має потужність 15 кВт та напругу 380 В. Це обладнання вважається дуже небезпечним, особливо для недосвідченого персоналу, тому необхідно дотримуватися певних заходів безпеки. Перш за все, необхідно забезпечити належне заземлення печі. Це допомагає уникнути непередбачених струмових розрядів і знижує ризик ураження електричним струмом. Крім того, важливо дотримуватися правила, що забороняє торкатися корпусу або деталей під час роботи печі. Це може бути небезпечно, оскільки піч працює з високою напругою.

Для забезпечення особистої безпеки завжди слід використовувати індивідуальний захист. Діелектричні рукавички є необхідним елементом індивідуального захисту, оскільки вони допомагають знизити ризик ураження електричним струмом і захищають руки оператора від можливих ушкоджень.

Наявність головного рубильника дає можливість швидко виключити живлення всієї лабораторії окремо в разі аварійної ситуації або необхідності проведення ремонтних робіт. Це дозволяє забезпечити безпеку працівників і захистити обладнання від можливих пошкоджень.

У разі виникнення короткого замикання передбачена система автоматичного захисного відключення. Ця система спрямована на безпечну експлуатацію та захист електричного обладнання. Захисне відключення - це механізм, що активується автоматично та припиняє подачу струму до споживача у разі виявлення струму на металевих частинах приладу, які зазвичай не знаходяться під напругою. Цей захисний механізм реалізується за допомогою автоматичних вимикачів або контакторів, обладнаних спеціальними реле для захисного відключення в разі пошкодження дроту або обладнання.

Ця система забезпечує оперативну реакцію на коротке замикання, що дозволяє запобігти подальшим ушкодженням обладнання та мінімізувати ризик виникнення пожежі. Автоматичне відключення є важливою складовою електробезпеки та допомагає забезпечити безпечну роботу з електричними системами.

## **5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ НДР**

Під час проведення певних досліджень основним розділ дипломної роботи бакалавра є економічний розділ, зміст якого визначається орієнтиром наукового дослідженням та очікуваними результатами дипломної роботи.

### **5.1. Науково-технічна актуальність НДР**

Головною метою економічного розділу дипломної роботи бакалавра є обґрунтування вибраної теми дослідження з різних аспектів, таких як технічність, екологічність, економічність та наукова значущість.

Дана дипломна робота присвячена детальному опису процесу виготовлення високоентропійного сплаву та подальшому дослідженню його мікроструктури, механічних властивостей. Отримані результати є дуже цінним внеском для загального розуміння даного сплаву і сприятимуть покращенню технологічних аспектів для отримання ще більш якісного сплаву та визначення його потенціалу у промислових застосуваннях.

Високоентропійні сплави відрізняються від звичайних сплавів кількома основними перевагами. Вони мають хаотичне розташування атомів у кристалічній решітці, що забезпечує високу ентропію. Склад сплаву включає п'ять або більше компонентів, що сприяє створенню оптимальних умов для досягнення високої ентропії. Ці сплави відрізняються також високою міцністю [37].

Високоентропійні сплави, крім своїх основних переваг, також можуть мати властивість жароміцності, що значно розширює їх використання для атомну енергетику та космічну промисловість [2].

При підготовці шихтових матеріалів використовувалися чавун з таким складом % (Fe – 73,17, Ni – 16,2, Cr – 2,07, Mn – 0,91; Cu – 2,78; C – 2,82; Si – 1,99), катодний нікель (99,99 мас. %), хром електролітичний марок ЄРХ1, Х99 (99,5 мас. %), електротехнічна мідь у вигляді дроту марки М0 (99,93 мас. %), алюміній чушковий високої чистоти марки А95.

## **5.2. Розрахунок витрат на проведення НДР**

Проведення аналізу всіх витрат, пов'язаних з виконанням науково-дослідної роботи (НДР), дозволяє встановити її собівартість або кошторисну вартість. Кошторис розробляється виконавцем робіт на основі календарного плану проведення досліджень і підтверджується замовником або органом, що фінансує роботи.

### **5.2.1. Витрати на оплату праці**

Витрати за цією статтею включають заробітну плату безпосередніх виконавців теми, а заробітна плата адміністративно-управлінського персоналу, працівників дослідних виробництв включаються в кошторисну вартість теми через статтю «Накладні витрати». Крім цього, слід враховувати, що для тем, які фінансуються за рахунок держбюджету прибуток не планується і тому в дану статтю витрат включається тільки основна заробітна плата (без премій та інших виплат, що здійснюються із прибутку).

Витрати на оплату праці розраховують на основі даних про трудомісткість окремих робіт по темі (табл. 5.1) та посадових окладів безпосередніх їх виконавців (табл. 5.2).

Загальна трудомісткість робіт, що виконуються безпосередньо студентом (інженером-дослідником), визначається навчальним планом відповідного напрямку підготовки.

Таблиця 5.1 – Трудомісткість робіт по темі (умовний приклад)

| Найменування робіт по темі дослідження                                              | Трудомісткість за виконавцями, людино-днів |                 |                   |                  |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------|-------------------|------------------|----------|
|                                                                                     | старший науковий співробітник              | старший інженер | інженер-дослідник | інженер-технолог | лаборант |
| 1. Вибір наукової теми, обговорення плану робіт                                     | 1                                          | 2               | 4                 | 1                | 3        |
| 2. Аналіз літератури (інформаційних джерел) та обладнання для проведення досліджень | 1                                          | 2               | 20                | -                | 3        |
| 3. Проведення плавки, отримання матеріалу                                           | 1                                          | 2               | 8                 | -                | -        |
| 4. Проведення досліджень                                                            | 1                                          | -               | 10                | -                | 8        |
| Разом за виконавцями теми                                                           | 4                                          | 6               | 42                | 1                | 14       |

Подальші розрахунки витрат на оплату праці проводяться за алгоритмом, зрозумілим із табл. 5.2.

Середньоденна заробітна плата за категоріями виконавців розраховується шляхом ділення їх посадового місячного окладу на 21,2 (де 21,2 – усереднене число робочих днів за місяць).

Таблиця 5.2 – Розрахунок витрат на оплату праці

| Посада виконавців теми        | Планова трудомісткість, люд-днів | Заробітна плата, грн     |                        |                       |
|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------|
|                               |                                  | посадовий місячний оклад | середньоденна зарплата | усього за виконавцями |
| Старший науковий співробітник | 4                                | 15620                    | 736,79                 | 2947,16               |
| Старший інженер               | 6                                | 13550                    | 639,15                 | 3834,9                |
| Інженер-дослідник             | 42                               | 8920                     | 420,76                 | 17671,92              |
| Інженер-технолог              | 1                                | 12140                    | 572,64                 | 572,64                |
| Лаборант                      | 14                               | 9880                     | 466,04                 | 6524,56               |
| Разом оплата праці з теми     |                                  |                          |                        | 31551,18              |

### 5.2.2. Єдиний соціальний внесок

Єдиний соціальний внесок (ЄСВ) – це обов’язкове відрахування на загальнодержавне соціальне страхування. З 1 січня 2016 р. ставка ЄСВ складає 22%. Базою для нарахування ЄСВ слугують загальні витрати на оплату праці по темі (підсумок по табл. 5.2).

$$\text{ЄСВ} = \text{ЗП} \cdot 0,22,$$

де ЗП – загальні витрати на оплату праці по темі.

Наразі ЄСВ буде становити:

$$\text{ЄСВ} = 31\,551,18 \cdot 0,22 = 6\,941,23 \text{ грн.}$$

### 5.2.3. Матеріали, необхідні для проведення досліджень

В даній статті враховують вартість усіх видів матеріалів, необхідних для проведення НДР, з вирахуванням вартості зворотних відходів.

Тематика дослідницьких робіт, які виконуються в Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, передбачає використання, перш за все, шихтових матеріалів, технологічних матеріалів для виготовлення експериментальних зразків. Розрахунки зводимо за формою у табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Розрахунки витрат на матеріали

| Найменування матеріалу          | Стандарт, технічні умови | Одиниця виміру | Кількість | Ринкова ціна за одиницю, грн. | Сума, грн. |
|---------------------------------|--------------------------|----------------|-----------|-------------------------------|------------|
| 1. Чавун, %                     | —                        | кг             | 1         | 125,00                        | 125,00     |
| 2. Катодний нікель              | ГОСТ 849-2008            | кг             | 1         | 650,00                        | 650,00     |
| 3. Хром електроліт. ЄРХ1        | ГОСТ 5905-2004           | кг             | 1         | 1 100,00                      | 1 100,00   |
| 4. Мідь, М0 (вигляді дроту)     | ДСТУ 3211:2009           | кг             | 1         | 90,00                         | 90         |
| 5. Алюміній чушковий, марки А95 | ДСТУ ГОСТ 11069-2003     | кг             | 1         | 150,00                        | 150,00     |
| Загальні витрати на матеріали   |                          |                |           |                               | 1 116,00   |

Транспортно-заготівельні витрати приймаємо значення на рівні 10% від планової вартості загальних витрат на матеріали:

$$T_{\text{в}} = 1\,116,00 \cdot 0,1 = 11,60 \text{ грн.}$$

У такому разі загальна сума витрат на закупівлю шихтових матеріалів та їх транспортування буде становити:

$$B_{\text{м}} = 1\,116,00 + 11,60 = 1\,127,6 \text{ грн.}$$

#### **5.2.4. Енергоносії для проведення досліджень**

Визначаємо витрати які розраховуються коли дослідження по темі потребують значних затрат електроенергії для проведення плавки.

Час плавлення становить 1 година, потужність індукційної печі становить 15 кВт, вартість електроенергії становить 2,64 грн за кВт-ч.

Тоді, електроспоживання =  $15 \text{ кВт} \cdot 1 \text{ год} = 15 \text{ кВт} \cdot \text{год}$

Вартість спожитої електроенергії =  $15 \cdot 2,64 = 39,60 \text{ грн.}$

#### **5.2.5. Вартість послуг сторонніх організацій**

Ці витрати встановлюють за договорами з організаціями, які виготовляють випробувальні стенди, зразки та оснащення, необхідні для виконання теми. В дану статтю включають також вартість оренди дослідницьких установок, які відсутні в організації, що виконує цю тему.

Спектральний аналіз металів дозволяє визначити хімічний склад зразка, хімічний аналіз для виявлення інших домішок.

Спектральний аналіз металів та хімічний аналіз металу. Використовуючи обладнання іншої організації, вартість послуги складає 260 грн за аналіз 1-го зразка.

#### **5.2.6. Інші прямі невраховані витрати**

У цій статті поєднуються всі витрати на проведення дослідження заданої тематики, що не увійшли до попередніх розділів. При проведенні роботи інші прямі витрати приймаємо на рівні 10% від суми врахованих витрати на виконання досліджень:

$$I_{\text{в}} = (ЗП + \text{ЄСВ} + B_{\text{м}} + B_{\text{е}} + B_{\text{со}}) \cdot 0,1,$$

де  $B_{\text{е}}$  – витрати на енергоносії;

$B_{\text{со}}$  – вартість послуг сторонніх організацій.

Наразі  $I_{\text{в}}$  буде становити:

$$I_{\text{в}} = (31\,551,18 + 6\,941,23 + 1\,127,6 + 39,6 + 260,0) \cdot 0,1 = 3\,991,96 \text{ грн.}$$

#### **5.2.7. Накладні витрати**

Включення накладних витрат до калькуляції кошторисної вартості теми залежить від двох факторів: обсягу витрат на оплату праці основних виконавців і суми прямих витрат на виконання дослідження згідно з нормативами організації-виконавця.

До розрахунків кошторисної вартості теми включаються різноманітні види накладних витрат, що включають у себе витрати, пов'язані з управлінням організацією-виконавцем проекту, витрати на винахідництвом і раціоналізацією, амортизацією основних засобів, науково-технічною інформацією, забезпеченням умов праці і техніки безпеки, оплатою послуг

банків, а також обов'язковими платежами, такими як податки, збори і інші подібні витрати.

Використовуємо варіант розрахунку накладних витрат пропорційно сумі прямих витрат на рівні 20%:

$$H_{\text{в}} = (ЗП + \text{ЄСВ} + B_{\text{м}} + B_{\text{е}} + B_{\text{со}} + I_{\text{в}}) \cdot 0,2,$$

Тоді  $H_{\text{в}}$  буде становити:

$$H_{\text{в}} = (31551,18 + 6\,941,23 + 1127,6 + 39,6 + 260,0 + 3\,991,96) \cdot 0,2$$

$$H_{\text{в}} = 8\,320,33 \text{ грн.}$$

#### 5.2.8. Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

Для розробки планової калькуляції вартості проведення досліджень по заданій темі необхідний комплексний підхід, який ґрунтується на використанні нормативних даних та проведенні розрахунків. Цей етап є важливим, оскільки він дозволяє отримати точні розрахунки вартості і надає загальне уявлення щодо ефективності проведення дослідницьких робіт (табл. 5.4).

Таблиця 5.4 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

| Найменування статей витрат               | Сума, грн | Обґрунтування                                                                      |
|------------------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                        | 2         | 3                                                                                  |
| 1. Витрати на оплату праці               | 31 551,18 | Відповідно до розрахунків                                                          |
| 2. Єдиний соціальний внесок              | 6 941,23  | 22,0% від загальних витрат на оплату праці                                         |
| 3. Матеріали для проведення досліджень   | 1127,6    | Відповідно до розрахунків                                                          |
| 4. Енергоносії для проведення досліджень | 39,60     | Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати) |

Продовження табл. 5.4

| 1                                         | 2        | 3                                                                                                 |
|-------------------------------------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5. Спецобладнання для наукових цілей      | —        | Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)                |
| 6. Вартість послуг сторонніх організацій  | 260      | За договором із сторонніми організаціями (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати) |
| 7. Витрати на службові відрядження        | —        | Відповідно до розрахунків (у нашому випадку не передбачено)                                       |
| 8. Інші невраховані прямі витрати по темі | 3 991,96 | 10% від суми прямих розрахованих витрат по темі                                                   |
| 9. Накладні витрати                       | 8 320,33 | Відповідно до нормативів організації-виконавця теми (у нашому випадку 20% від суми прямих витрат) |
| 10. Усього витрат по темі                 | 52 231,9 | Сума попередніх статей                                                                            |

### 5.3. Науково-технічна ефективність НДР

Для визначення доцільності проведення дослідницьких робіт необхідно розрахувати очікуваний економічний ефект. Проте важливо зазначити, що цей розрахунок може бути здійснений лише для тих досліджень, які спрямовані на створення нових матеріалів.

Для визначення річного економічного ефекту використовуємо бальною системою оцінювання економічної ефективності за наступними показниками:

- важливість розробки ( $K_1$ );
- можливість використання результатів розробки ( $K_2$ );
- теоретичне значення та рівень новизни ( $K_3$ );
- складність дослідження ( $K_4$ ).

Коефіцієнт  $K_1$  може приймати наступні значення:

а) ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів – 1 бал;

б) робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво – 3 бали;

в) робота являє собою частину відомчої програми – 5 балів;

г) робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів – 7 балів;

д) робота є частиною міжнародної комплексної програми – 8 балів.

Коефіцієнт  $K_2$  може приймати такі значення:

а) результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;

б) результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією – 3 бали;

в) результати розробки можуть бути використані декількома організаціями – 5 балів.

г) результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі – 8 балів;

д) результатами розробки можуть користуватися у різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт  $K_3$  може приймати такі значення:

а) робота являє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації, подібні результати раніше були відомі в досліджуваній галузі – 2 бали;

б) під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів – 3 бали;

в) внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів – 5 балів;

г) внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики тощо – 6 балів;

д) отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше – 8 балів.

Коефіцієнт  $K_4$  може приймати такі значення:

- а) роботу виконує один підрозділ, витрати до 10 000 гривень – 1 бал;
- б) роботу виконує один підрозділ, витрати від 10 000 до 50 000 гривень – 3 бали;
- в) роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень – 5 балів;
- г) робота виконується декількома підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень – 7 балів;
- д) робота виконується декількома організаціями, витрати понад 200 000 гривень – 9 балів.

Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів.

$$Б = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4$$

В нашому випадку бальна оцінка ефективності згідно табл. 5.5 становить:

$$Б = 5 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 5 = 1000$$

Таблиця 5.5 – Бальна оцінка ефективності НДР

| Показник оцінки ефективності НДР                | Умовне позначення показника | Характеристики даної роботи                                                       | Кількість балів |
|-------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1. Важливість розробки                          | $K_1$                       | Робота являє собою частину відомчої програми – 5 балів                            | 5               |
| 2. Можливість використання результатів розробки | $K_2$                       | Результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі – 8 балів    | 8               |
| 3. Теоретична значимість та рівень новизни      | $K_3$                       | Внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення | 5               |

|                           |                |                                                                                |   |
|---------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------|---|
| розробки                  |                | про природу досліджуваних процесів – 5 балів                                   |   |
| 4. Складність дослідження | K <sub>4</sub> | Роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень – 5 балів | 5 |

Умовний ефект НДР розраховується за формулою:

$$E_{\text{НДР}}^y = 500 \cdot B - E_n \cdot B_{\text{НДР}},$$

де 500 – умовна вартість одного балу;

$E_n$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності (може бути в межах 0,1 – 0,3);

$B_{\text{НДР}}$  – сумарні витрати на виконання НДР (підсумок табл. 5.4);

У нашому прикладі умовний ефект виконання НДР буде становити:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot 1000 - 0,3 \cdot 52\,231,9 = 484\,330,43 \text{ грн.}$$

Економічна ефективність НДР визначається коефіцієнтом умовної економічної ефективності  $E_e$ . Він є відношенням умовного ефекту виконання НДР до сумарних витрат на виконання НДР та розраховується за формулою:

$$E_e = \frac{E_{\text{НДР}}}{B_{\text{НДР}}}.$$

У нашому прикладі  $E_e$  буде становити:

$$E_e = \frac{484\,330,43}{52\,231,9} = 9,27$$

Заданий коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи у значній мірі перевищує одиницю і становить 9,27. Це свідчить про доцільність виконання даної роботи з економічної точки зору.

## **ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ**

1. Технологія виплавлення сплаву базується на використанні індукційної печі відкритого типу, плавлення доцільно вести в інтервалі температур не менше 1400...1450 °С, а заливати при температурі 1450 °С. Як шихтові матеріали можуть бути використані як первинні метали (мідь, нікель, хром, алюміній), так і легованих сплавів (чавуну).

2. За допомогою рентгенофазового аналізу було встановлено, що склад високоентропійного сплаву при нормальних умовах являє собою суміш структурних складових, які мають ГЦК та ОЦК-гратки. Також в структурі сплаву помічені карбіди переважно шестикутної форми та газоусадкова пористість.

3. В результаті синхронного термічного аналізу встановлено основні точки фазових переходів високоентропійного сплаву, такі як: температура ліквідус 1343,5 °С, солідус 1231,9 °С, а також інтервал кристалізації (111,6 °С), інтервали взаємного розчинення і існування фаз із різною кристалічною будовою.

4. За допомогою пруткових проб оригінальної конструкції досліджено рідкотекучість високоентропійного сплаву в наступних умовах: температура заливання  $1450 \pm 20$  °С та порівняно отримані числові дані з аналогічними характеристиками чавунів різного складу:

– сірого чавуну складу, мас. %: С – 3,0; Si – 2,0; Mn – 0,6;

– високохромистого чавуну складу, мас. %: С – 3,0; Si – 1,4; Mn – 1,6;  
Cr – 18,8; Ni – 3,0;

– спеціального чавуну складу, мас. %: С – 3,0; Si – 2,0; Ni – 17; Cu – 2,5; Cr – 2,5; Mn – 1,4.

Було виявлено, що досліджений сплав  $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$  має кращу рідкотекучість (102,5 мм), ніж сірий чавун та спеціальний чавун (72 мм та 89,5 мм відповідно) і за цим показником наближений до високохромистого чавуну (104 мм).

5. Вперше визначено основні механічні властивості високоентропійного сплаву  $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$  за допомогою стандартних методик. Установлено, що міцність при розриванні сплаву становить 450-550 МПа, і цей результат переважає спеціальний чавун складу (С – 3,0; Si – 2,0; Ni – 17; Cu – 2,5; Cr – 2,5; Mn – 1,4) 197-220 МПа та наближається до високоміцних чавунів (400...600) МПа. Характеристика пластичності (відносне видовження) – складає 2%. Твердість за методом Брінелля становить 321-341 НВ, тобто сплав має досить високу твердість, але при цьому здатний до оброблення.

6. В процесі аналізу шкідливих і небезпечних виробничих факторів показано, що у лабораторії №144, де проводилося плавлення високоентропійного сплаву  $\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Cu}_{20}$ , наявні оптимальні умови, які повністю відповідають вимогам з охорони праці.

7. Коефіцієнт умовної економічної ефективності НДР становить 9,27, що перевищує нормативне значення (одиницю). Це свідчить про те, що виконана дослідницька робота є доцільною з економічної точки зору.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ming-Hung Tsai, Jien-Wei Yeh (2014). High-Entropy Alloys: A Critical Review, *Materials Research Letters*, 2:3, P. 107-123.  
DOI: 10.1080/21663831.2014.912690
2. Dada M., Popoola P.A., Adeosun S.O., Mathe N.R. (2019). High Entropy Alloys for Aerospace Applications. *Aerodynamics*.
3. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys, *Mater Sci Eng: A* 375–377 (2004). – P. 213–218.
4. Huang K.H., Yeh J.W. Master's Thesis. National Tsing Hua University; Hsinchu, Taiwan: 1996. A Study on the Multicomponent Alloy Systems Containing Equal-Mole Elements.
5. HIGH ENTROPY ALLOYS - Oxford Micromechanics Group  
<https://omg.web.ox.ac.uk/high-entropy-alloys>
6. Huo W., Zhou H., Fang F., Zhou X., Xie Z., Jiang J. (2018). Microstructure and properties of novel CoCrFeNiTa<sub>x</sub> eutectic high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 735. – P. 897-904.  
doi:10.1016/j.jallcom.2017.11.075
7. Карпець М.В. (2015). Новые материалы. Влияние содержания Ni на износостойкость литого высокоэнтروпийного сплава VCrMnFeCoNi<sub>x</sub>.
8. Полонський В.А., Башев В. Ф., Кушнерьов О. І. Структура та корозійно–електрохімічні властивості швидкозагартованих високоентропійних сплавів Fe<sub>5</sub>CrCuNiMnSi та Fe<sub>5</sub>CoCuNiMnSi
9. 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. канд. техн. наук.: 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали / Чернявський В. В. – Київ, 2016. – 26 с.

10. Miracle D.B., Senkov O.N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 122. – P. 448–511. Bibcode:2017AcMat.122..448M.

11. Zhang Wei, Zhang Yong (2018). Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Earth Science*. 2-22.

12. Шпак А.П., Лисов В.І., Куницький Ю. А., Цареградська Т.Л. Термодинаміка металів і сплавів. – Київ: Академперіодика, 2002. – 71 с.

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

14. Tang, Zhaowu & Zhang, Shang & Cai, Ruipeng & Zhou, Qing & Wang, Haifeng. (2019). Designing High Entropy Alloys with Dual fcc and bcc Solid-Solution Phases: Structures and Mechanical Properties. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 50. 10.1007/s11661-019-05131-1.

15. Savchenko, Alexey (Aleksei). (2015). Часть 2. Энтропийные эффекты в реальных системах. 10.13140/RG.2.1.2127.9763.

16. Лактионова М., Табачникова Е., Танг З., Лиану П. Механические свойства высокоэнтропийного сплава Al<sub>0,5</sub>CoCrCuFeNi в интервале температур 4,2–300 К. *Fiz. Nyzk. Temp.* 2013, 39. – С. 814-817.

17. Структура и механические свойства нитридных многослойных систем на основе высокоэнтропийных сплавов и переходных металлов VI группы// У.С. Немченко, В.М. Береснев, О.В. Соболев, С.В. Литовченко, В.А. Столбовой, В.Ю. Новиков, А.А. Мейлехов, А.А. Постельник, М.Г. Ковалева. – Харьковський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна.

18. Sheetal Kumar Dewangan, Ananddev Mangish, Sunny Kumar, Ashutosh Sharma, Byungmin Ahn, Vinod Kumar, A review on High-Temperature Applicability: A milestone for high entropy alloys, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Volume 35, 2022, 101211, ISSN 2215-0986

19. Звіт НДР "Дослідження вискотемпературного окислення високоентропійних сплавів", ФТІМС НАН України, 170 с.

20. Yurkova A. I., Cherniavsky V. V., Bolbut V., Krüger M., Bogomol I. (2019). Structure formation and mechanical properties of the high-entropy AlCuNiFeCr alloy prepared by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, 786. – P. 139-148. doi:10.1016/j.jallcom.2019.01.341

21. Enhanced Strength of a Mechanical Alloyed NbMoTaWVTi Refractory High Entropy Alloy // Yan Long, Kai Su, Jinfu Zhang, Xiaobiao Liang, Haiyan Peng, Xiaozhen Li/ DOI: 10.3390/ma11050669

22. Влияние пластической деформации на структуру и свойства высокоэнтропийных сплавов / С.А. Фирстов, В.Ф. Горбань, Н.А. Крапивка, Н.И. Даниленко, В.Н. Назаренко. Институт проблем материаловедения НАН Украины.

23. Synthesis and characterization of nanocrystalline AlFeTiCrZnCu high entropy solid solution by mechanical alloying / Varalakshmi M., Kamaraj B.S. Murty. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.05.104>

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

25. Шайсултанов Д.Г. Структура и механические свойства высокоэнтропийных сплавов системы CoCrFeNiX (X = Mn, V, Mn и V, Al и Cu). – Дисс. канд. тех. наук, Белгород, 2015. – 142 с.

26. Синтез високоентропійних еквіатомних сплавів системи Ti-Cr-Fe-Ni-Cu методами механічного легування з подальшим гарячим штампуванням / Г.А. Баглюк, М.В. Марич, А.А. Мамонова, Г.М. Молчановська.

27. ДСТУ 2293-99 Охорона праці. Терміни та визначення основних понять.

28. НПАОП 27.0-1.01-08. Правила охорони праці в металургійній промисловості

29. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування
30. ДСНЗ.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
31. ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартів безпеки праці. Шум. Загальні вимоги безпеки.
32. ДБН В.2.5-28-2006 Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення.
33. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
34. НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні
35. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека.
36. ДСТУ Б В.2.5-82:2016 «Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом».
37. Zhang, J., Xin, S., Zhang, Y., Guo, P., Sun, H., Li, T., Qin, C. (2023). Effects of Elements on the Microstructure and Mechanical Properties of AlCoCrFeNiTi High-Entropy Alloys. Metals, 13.

# ЗВІТ ПОДІБНОСТІ



Ім'я користувача:  
Ямшинський Михайло Михайлович

Дата перевірки:  
17.06.2023 21:40:44 EEST

Дата звіту:  
17.06.2023 21:41:33 EEST

ID перевірки:  
1015634385

Тип перевірки:  
Doc vs Internet + Library

ID користувача:  
76785

Назва документа: Матковський\_2023

Кількість сторінок: 79 Кількість слів: 14050 Кількість символів: 108974 Розмір файлу: 2.49 MB ID файлу: 1015280828

## 16.9% Схожість

Найбільша схожість: 6.78% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1015204168)

|                            |     |             |
|----------------------------|-----|-------------|
| 16.3% Джерела з Інтернету  | 666 | Сторінка 81 |
| 12.6% Джерела з Бібліотеки | 265 | Сторінка 91 |

## 0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

## 0% Вилучень

Немає вилучених джерел

## Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи 28