

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**Інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є. О. Патона**  
**Кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії**

До захисту допущено:  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Юрій БОГОМОЛ  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

**Дипломна робота**  
**на здобуття ступеня бакалавра**  
**за освітньо-професійною програмою**  
**«Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів»**  
**спеціальності 132 «Матеріалознавство»**  
**на тему: «Моделювання процесу електронно-променевого нагрівання пористої**  
**заготовки в умовах обертання»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ФК-71

Козаковцев Владислав Володимирович \_\_\_\_\_

Керівник:

доцент, д. т. н.,

Богомол Юрій Іванович \_\_\_\_\_

Консультант з розділу охорони праці:

професор, д. т. н.,

Левченко Олег Григорович \_\_\_\_\_

Консультант з економічного розділу:

старший викладач к.е.н.,

Нараєвський Сергій Вікторович \_\_\_\_\_

Нормоконтроль:

Доцент, к. т. н., доцент,

Бірюкович Ліна Олегівна \_\_\_\_\_

Рецензент:

Доцент каф. ФМ, к. т. н., доц.,

Іващенко Євген Вадимович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає  
запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.  
Студент \_\_\_\_\_

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є. О. Патона**  
**Кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма « Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_Юрій БОГОМОЛ

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на дипломну роботу студенту**  
**Козаковцеву Владиславу**  
**Володимировичу**

1. Тема роботи «Моделювання процесу електронно-променевого нагрівання пористої заготовки в умовах обертання», керівник роботи: Богомол Юрій Іванович, доктор техн. наук, доц., затверджені наказом по університету від 27.05.2021 р. № 1355-с

2. Термін подання студентом роботи 14.06.2021 р.

3. Вихідні дані до роботи: Аналіз сучасного стану виробництва матеріалів на основі молібдену та впровадження нових методів спікання повинно дати можливість сформулювати шляхи отримання виробів з молібдену з вищими техніко-економічними показниками. Технологічні процеси повинні забезпечувати певний рівень найважливіших властивостей виробів на основі молібдену, що залежать від складу вихідного матеріалу та його структури, що формується у

процесі спікання.

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях повинні відповідати нормативним вимогам.

#### 4. Зміст роботи:

а) провести аналіз сучасного стану теорії і технології отримання матеріалів на основі молибдену з наперед заданими властивостями та високими техніко-економічними показниками їх виготовлення;

б) вивчити закономірності отримання виробів на основі молибдену методом електронно-променевого спікання;

в) вивчити закономірності теплопередачі у пресовках з молибдену під час електронно-променевого спікання;

г) визначити шкідливі та небезпечні виробничі фактори;

д) розробити заходи для попередження впливу шкідливих та небезпечних виробничих факторів;

е) обґрунтувати необхідну кількість робітників, розмір фонду їх заробітної плати, визначити показники продуктивності праці;

5. Перелік ілюстративного матеріалу: технологічна схема отримання виробів з молибдену методом електронно-променевого спікання; презентація доповіді .ppt на захисті дипломної роботи.

#### 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ   | Прізвище, ініціали та посада консультанта   | Підпис, дата   |                  |
|--|---|----------------|------------------|
|  |   | завдання видав | завдання прийняв |
| Розділ охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях | професор, д. т. н.<br>Левченко О. Г.        | 12.04.2021     |                  |
| Економічний розділ                                       | старший викладач к.е.н.<br>Нараєвський С.В. | 12.04.2021     |                  |

7. Дата видачі завдання 12.04.2021 р.

## Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломної роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|--------------------------------|----------|
| 1.    | Підготовка експериментального матеріалу | 15.04                          |          |
| 2.    | Підготовка ілюстративного матеріалу     | 27.04                          |          |
| 3.    | Написання тексту роботи                 | 20.05                          |          |
| 4.    | Підготовка презентації                  | 03.06                          |          |
| 5.    | Оформлення роботи.                      | 10.06                          |          |
| 6.    | Захист дипломної роботи.                | 16.06                          |          |

Студент \_\_\_\_\_

Владислав КОЗАКОВЦЕВ.

Керівник \_\_\_\_\_

Юрій БОГОМОЛ

## РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 78 с., 8 табл., 27 рис., 29 джерел.

ЕЛЕКТРОННИЙ ПРОМІНЬ, МОЛІБДЕН, ПОРОШКОВА МЕТАЛУРГІЯ,  
ТЕПЛОПЕРЕДАЧА, ТУГОПЛАВКІ МЕТАЛИ.

В даній роботі викладено огляд сучасного стану теорії і технології отримання виробів з молібдену методом електронно-променевого спікання.

Об'єкт дослідження: пористі молібденові пресовки.

Предмет дослідження: закономірності процесу теплопередачі під час електронно-променевого спікання пресовок молібдену в умовах обертання.

Мета роботи: вивчення закономірностей процесу теплопередачі у пористих молібденових зразках під час електронно-променевого спікання в умовах обертання.

В результаті проведеної роботи було досліджено закономірності ущільнення під час пресування порошку молібдену.

Методом скінченно-елементного моделювання в середовищі ANSYS встановлено вплив пористості молібденових пресовок на теплопередачу під час їх нагрівання електронним променем з використанням обертання.

## ABSTRACT

Research report: 78 p., 8 tables. 27 figures, 29 sources.

ELECTRON BEAM, MOLYBDENUM, POWDER METALLURGY, HEAT TRANSFER, REFRACTORY METALS.

This paper presents an overview of the current state of the theory and technology of production of molybdenum products by electron beam sintering.

Object of research: porous molybdenum presses.

Subject of research: regularities of heat transfer process during electron beam sintering of molybdenum presses in rotation conditions.

Purpose: to study the patterns of the heat transfer process in porous molybdenum samples during electron beam sintering.

As a result of this work, the regularities of compaction during pressing of molybdenum powder were investigated.

The influence of the porosity of molybdenum presses on heat transfer during their electron beam heating was established by the finite element modeling method in the ANSYS medium.

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП.....   | 9  |
| 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....  | 12 |
| 1.1 Загальна характеристика молібдену.....                                   | 11 |
| 1.2 Фізичні властивості молібдену.....                                       | 14 |
| 1.3 Хімічні властивості молібдену.....                                       | 16 |
| 1.4 Области застосування молібдену.....                                      | 19 |
| 1.4.1 Застосування молібдену та його сплавів.....                            | 20 |
| 1.5 Способи отримання компактного молібдену.....                             | 21 |
| 1.5.1 Отримання компактного молібдену методом порошкової металургії.....     | 22 |
| 1.5.2 Отримання компактного молібдену плавкою.....                           | 23 |
| 1.6 Використання для адитивних технологій.....                               | 26 |
| 1.7 Відомості про електронний промінь та електронно-променеві установки..... | 29 |
| 1.8 Висновки та постановка задач дослідження.....                            | 31 |
| 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....  | 32 |
| 2.1 Методика проведення експерименту.....                                    | 32 |
| 2.2 Вихідні матеріали.....   | 32 |
| 2.3 Дозування, пресування молібденових пресовок із пластифікатором.....      | 33 |
| 2.4 Спінання молібдену електронним променем.....                             | 34 |
| 2.5 Моделювання поля температури методом скінченних елементів.....           | 37 |
| 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....                               | 42 |
| 4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....                                      | 52 |
| 4.1 Науково-технічна актуальність ДР.....                                    | 52 |
| 4.2 Мета і завдання дипломної роботи.....                                    | 53 |
| 4.3 Розрахунок планової собівартості проведення дослідження.....             | 53 |
| 4.3.1 Витрати на оплату праці.....   | 54 |
| 4.3.2 Єдиний соціальний внесок.....  | 55 |
| 4.3.3 Витрати на матеріали, що використовуються в роботі.....                | 56 |
| 4.3.4 Витрати на спеціальне обладнання та прилади.....                       | 56 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.3.5 | Витрати на службові відрядження.....   | 56 |
| 4.3.6 | Інші прямі невраховані витрати.....  | 57 |
| 4.3.7 | Накладні витрати.....  | 57 |
| 4.4   | Планова кошторисна вартість НДР.....   | 57 |
| 4.5   | Економічна ефективність ДР.....  | 58 |
| 4.6   | Висновки.....  | 62 |
| 5     | ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....   | 63 |
| 5.1   | Характеристика об'єкту (комплексу) та умови його експлуатації.....   | 63 |
| 5.2   | Оцінка ключових небезпечних та шкідливих виробничих факторів і розроблення заходів поліпшення умов праці при виконанні роботи..... | 67 |
| 5.2.1 | Оцінка мікроклімату та повітря навколишнього середовища.....   | 69 |
| 5.2.2 | Освітленість.....  | 70 |
| 5.2.3 | Шум та вібрація.....   | 70 |
| 5.2.4 | Виробничі випромінювання.....  | 71 |
| 5.3   | Електробезпека.....  | 71 |
| 5.4   | Пожежна безпека.....   | 72 |
|       | ВИСНОВКИ.....  | 74 |
|       | CONCLUSIONS.....   | 75 |
|       | ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....   | 76 |

## ВСТУП

За сучасними прогнозами протягом найближчих десятиліть світовий попит на молибден буде збільшуватися в середньому на 2 % в рік. Таке зростання здебільшого пов'язане з тим, що молибден у великій кількості використовується для високоенергетичних методів (адитивних технологій).

Адитивні технології – галузь матеріального виробництва, що дуже динамічно розвивається. Вона дає можливість отримувати нові властивості виробів, економити час та ресурси при їх виготовленні. На сьогоднішній день впровадження адитивних технологій у різні промислові виробництва є неминучим, а кількість та якість таких впроваджень є показником індустріально-технологічної потужності держави.

Характерною тенденцією останніх років є постійний ріст асортименту та кількості деталей, що виготовляються за адитивними технологіями [1]. І особливо важливим є прогрес у найважчому та інноваційному секторі адитивних технологій – «виращуванні» виробів із металів та сплавів. Наприклад, компанія Boeing десятками тисяч виготовляє сотні найменувань деталей для військових та комерційних літаків, а General Electric планує протягом 5-10 років наростити обсяги виробництва адитивними технологіями та досягнути виготовлення приблизно половини деталей енергетичних турбін та авіадвигунів цими методами, де, якраз, у великих кількостях використовується молибден. Перевагами методу є: раціональне використання матеріалів та економія часу при виробництві. При виготовленні деталей складної форми традиційними методами відношення маси використаного матеріалу до готового виробу може сягати 15–20 разів, тоді як для виготовлення аналогічних деталей за допомогою адитивних технологій дозволяє знизити показник до 1,5–2 разів.

Дослідження нових методів виготовлення металевих матеріалів, зокрема спікання електронним променем, є актуальним для покращення фізико-механічних властивостей деталей та частин конструкцій з молибдену, адже це дозволить скоротити час виробництва, а також витрати на нього. Врешті-решт

такий підхід до сучасного виробництва дозволить знизити екологічні ризики та покращити ситуацію з розвитком промисловості в Україні.

## 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Загальна характеристика молібдену

Молібден (Mo) – рідкісний хімічний елемент VI групи періодичної системи Д. Менделєєва (Molybdaenum, Mo; від грец. μόλυβδος – свинець; атом. номер 42, атомна маса 95,94), сріблясто-сірий тугоплавкий пластичний метал. Густина 10200 кг/м<sup>3</sup>. У природі Mo трапляється у вигляді сполук та в складі близько 20 мінералів. Чистий метал сріблясто-білого кольору (рис. 1.1), достатньо м'який та має одну з найвищих температур плавлення (2890 K) з усіх чистих елементів [2].



Рисунок 1.1 – Чистий молібден [2]

Дисульфід молібдену – м'який свинцево-сірий мінерал з металевим блиском – використовували в Стародавній Греції та Римі разом з галенітом (свинцевим блиском) і графітом як грифелі для малювання та письма. У 1758 році швед. мінералог і хімік А.-Ф. Кронстедт припустив, що графіт, галеніт і молібден – 3 окремих речовини. 1778 року швед. хімік Шелле в результаті кип'ятіння концентрованої азотної кислоти отримав білий осад і припустив, що його прожарюванням з вугіллям можна отримати метал. У 1782 році шведському хіміку Гьельму вдалося реалізувати цей спосіб – отримати Mo

сильно забруднений карбідами. У 1817 році шведському хіміку Берцеліусу вдалося отримати відносно чистий Мо.

У 90-х роках 19 століття був відкритий вплив домішок молібдену на властивості сталі. У 1910 році відбувся початок широкого розвитку виробництва молібденових сталей, коли виявили особливі властивості гарматних сталей, що містять молібден. Згодом молібден став важливим компонентом різноманітних конструкційних, жаростійких та стійких до корозії сталей [3].

Найважливішим мінералом молібдену є молібденіт ( $\text{MoS}_2$ ), що утворюється в результаті первинних геохімічних процесів. У результаті окислення молібденіту може утворитися галеніт (свинцевий блиск), а вульфеніт ( $\text{PbMoO}_4$ ) часто зустрічається саме поблизу родовищ свинцевих руд (галеніту). Із близько 20 відомих мінералів молібдену найбільш важливими, окрім перерахованих вище, є наступні: повеліт ( $\text{CaMoO}_4$ ), белонезит ( $\text{MgMoO}_4$ ), патерзит ( $\text{CoMoO}_4$ ), ільземаніт ( $\text{MoO}_2 \cdot 4\text{MoO}_3$ ), еозит ( $3\text{PbO} \cdot \text{V}_2\text{O}_4 \cdot \text{MoO}_3$ ). Практичного значення з точки зору отримання молібдену вони не мають [2].

Вміст молібдену в земній корі становить  $3 \cdot 10^{-4}$  % (по масі). Родовища молібдену розділяються згідно двох генетичних типів: гідротермального і скарнового. В розвинених країнах, при розробці родовищ, перевагу віддають штоквертковим молібденовим і міднопорфіровим родовищам. Формування покладів відбувається в кілька стадій під впливом гідротермальних умов, велика роль у формуванні покладів відводиться тектонічним розломам.

За даними Геологічної служби США, щорічний обсяг видобутку молібдену становить 250-275 тисяч тонн, при цьому частка Китаю в світовому видобутку становить 39,2%, США – 25,2%, Чилі – 15,2%, Перу – 7,1% і частка Мексики – 4,1%. Вірменія володіє кількістю молібденових покладів, що перевищує 7% всіх його світових запасів. Варто відзначити, що Каджаранське мідно-молібденове родовище (Вірменія) в своїх надрах зберігає близько 90% з них. Також варто наголосити на тому, що основна сировинна база молібдену, приблизно 75-80% відомих запасів, зосереджена в 30 найбільших родовищах і 50% з них 8 надвеликих.

Сьогодні головними виробниками молібдену є США, Чилі, Китай, Перу, Канада і Мексика, на частку яких припадає понад 90% світового виробництва, причому понад 60% видобутку молібдену забезпечується п'ятьма компаніями: Codellco (Чилі), Phelps Dodge (США), Grupo Mexico (Мексика і Перу), Jinduicheng Molybdenum Mining Corp. (Китай) і Thompson Creek (США і Канада).

Використання молібдену досить швидко зростає. У 1950 р. глобальне виробництво молібдену становило 14500 метричних тонн. До 2015 року воно збільшилося до 235000 т. Це еквівалентно шістнадцятикратному зростанню протягом 65 років або річному темпу приросту в 4,4% (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Загальносвітове виробництво молібдену 1900-2015 рр. (тис. т/рік) [4]

Такі темпи зростання, ймовірно, не збережуться назавжди. Дослідження Halada et al. (2008) [5] чітко показує, що після перевищення певного порогу ВВП на душу населення, ріст використання металів починає зменшуватися в залежності від зростання ВВП.

Сумарна потужність підприємств світу з переробки молібденових концентратів становить близько 300 тис. т. Здебільшого вони зосереджені в США, країнах Західної Європи, Канаді, Чилі, Японії і Китаї, при цьому найбільшою компанією з переробки є CyprusClimaxMetals [6].

## 1.2 Фізичні властивості молібдену

Молібден і сплави на його основі мають високий модуль пружності, малий коефіцієнт термічного розширення, високу термостійкість. Електропровідність даного металу нижча, ніж у міді, але вища, ніж у заліза. Механічна міцність молібдену дещо нижча, ніж у вольфраму, але, внаслідок цього, Мо легше піддається обробці тиском.

Таблиця 1.1 – Фізичні та механічні властивості молібдену [7]

| Властивість   | Значення          |
|---|-------------------|
| Атомний номер   | 42                |
| Атомна маса   | 95,94             |
| Параметр елементарної комірки, нм                                 | 0,31470           |
| Атомний діаметр, нм   | 0,272             |
| Густина при 20°C, г/см <sup>3</sup>                               | 10,2              |
| Температура плавлення, °C   | 2610              |
| Температура кипіння, °C   | 4612              |
| Теплота плавлення, кДж/моль:                                      | 28                |
| Теплота випаровування, кДж/моль:                                  | 590               |
| Молярний об'єм, см <sup>3</sup> /моль:                            | 9,4               |
| Питома теплоємність, Дж/(г·К)                                     | 0,256 (рис. 1.4)  |
| Теплопровідність, Вт/(м·К)  | 142 (рис. 1.3)    |
| Коефіцієнт лінійного розширення, 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup> | 4,9               |
| Електроопір, мкОм·см  | 5,70              |
| Модуль Юнга, ГПа  | 336,3             |
| Модуль зсуву, ГПа   | 122               |
| Коефіцієнт Пуассона   | 0,30              |
| Твердість, НВ   | 125               |
| Група металів   | Тугоплавкий метал |

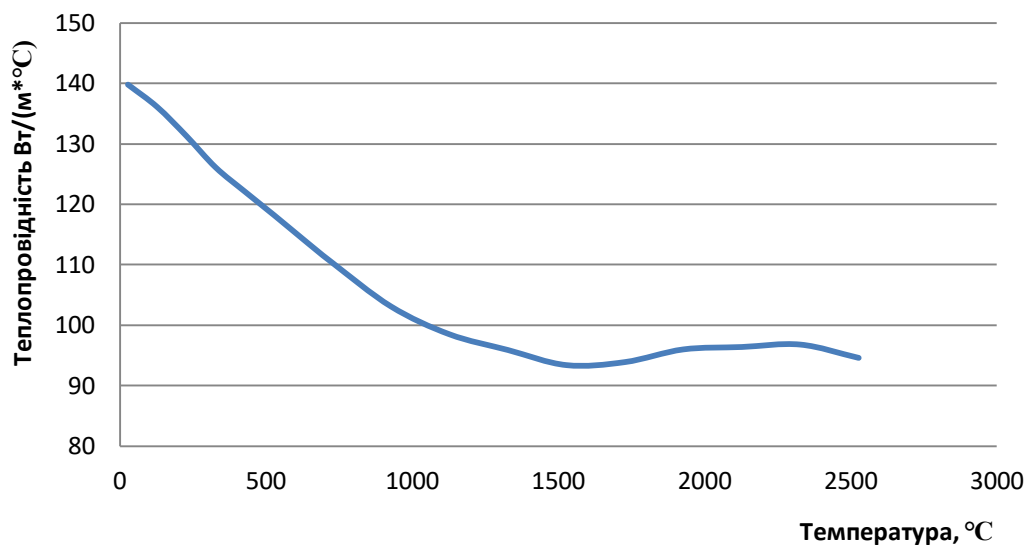


Рисунок 1.3 – Залежність теплопровідності Мо від температури

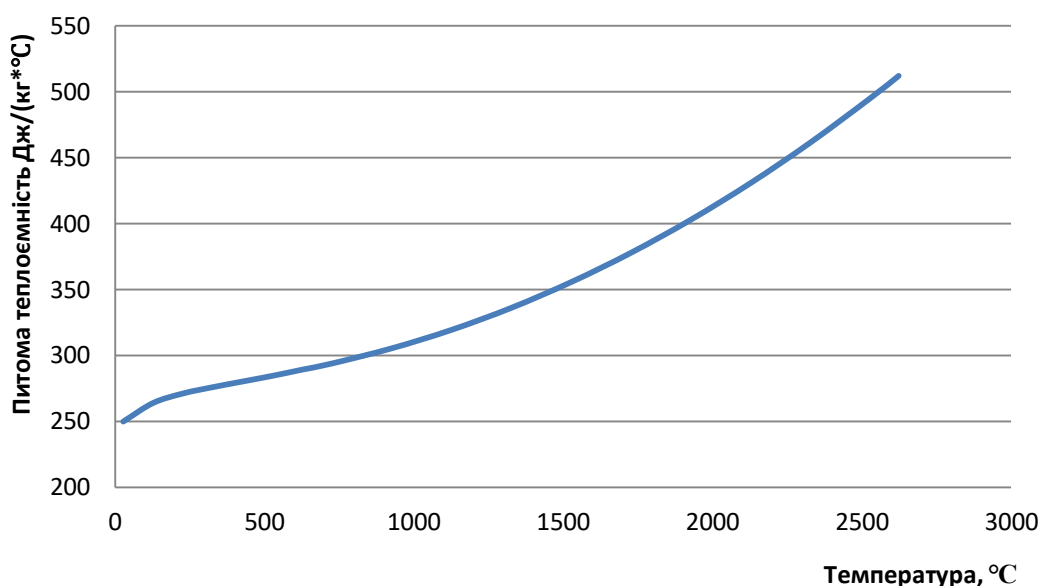


Рисунок 1.4 – Залежність питомої теплоємності Мо від температури

На сьогодні відомо про існування 31-го ізоотопу молібдену з  $^{83}\text{Mo}$  по  $^{113}\text{Mo}$ . З них стабільні:  $^{92}\text{Mo}$ ,  $^{94}\text{Mo}$ - $^{98}\text{Mo}$ . Найбільш нестабільні ізоотопи Мо мають періоди піврозпаду менше 150 нс. Найбільш стійка ступінь окислення +6. Основні механічні та фізичні властивості молібдену наведені у таблиці 1.1.

В абсолютно чистому стані молібден пластичний, ковкий, тягучий, досить легко піддається штампуванню і прокатці. При високих температурах (але не в окислювальній атмосфері), міцність молібдену перевищує міцність більшості інших металів. При забрудненні вуглецем, азотом або сіркою

молібден, подібно хрому, стає крихким, твердим, ламким, що істотно ускладнює його обробку. Водень дуже мало розчинний в молібдені, тому не може помітно впливати на його властивості. Молібден має досить високу електропровідність та поступається сріблу всього в 3 рази, тому електропровідність молібдену більше, ніж у платини, нікелю, ртуті, заліза і багатьох інших металів [8].

### 1.3 Хімічні властивості молібдену

Молібден - це перехідний метал з електронегативністю 2,16 за шкалою Полінга [9].

Таблиця 1.2 – Хімічні властивості молібдену [7]

| Властивість                             | Значення             |
|---|----------------------|
| Ковалентний радіус:                     | 130 пм               |
| Йонний радіус:                          | (+6e) 62 (+4e) 70 пм |
| Електронегативність (за шкалою Полінга) | 2,16                 |
| Електродний потенціал:                  | -0,2                 |
| Ступені окиснення:                      | 6, 5, 4, 3, 2        |

При кімнатній температурі на повітрі молібден стійкий до корозійного впливу. Початок окислення настає при 400 °С, вище 600 °С швидко окислюється до триоксиду  $\text{MoO}_3$ . Цей оксид отримують також окисленням дисульфиду молібдену  $\text{MoS}_2$  і термолізом молібдату амонію  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ .

Mo утворює оксид молібдену (IV)  $\text{MoO}_2$  і ряд оксидів, проміжних між  $\text{MoO}_3$  і  $\text{MoO}_2$ .

З галогенами Mo утворює ряд сполук з різними ступенями окислення: при взаємодії порошку молібдену або  $\text{MoO}_3$  з  $\text{F}_2$  отримують гексафторид молібдену  $\text{MoF}_6$  (безбарвна легко кипляча рідина); Mo (+4 і +5) утворює тверді галогеніди  $\text{MoHal}_4$  і  $\text{MoHal}_5$  ( $\text{Hal} = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}$ ); з йодом відомий тільки дийодид молібдену

$\text{MoI}_2$ . Молибден також утворює оксигалогеніди:  $\text{MoOF}_4$ ,  $\text{MoOCl}_4$ ,  $\text{MoO}_2\text{F}_2$ ,  $\text{MoO}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{MoO}_2\text{Br}_2$ ,  $\text{MoOBr}_3$  та інші.

При нагріванні молибдену з сіркою утворюється дисульфід молибдену  $\text{MoS}_2$ , з селеном - діселенід молибдену складу  $\text{MoSe}_2$ . Відомі карбіди молибдену  $\text{Mo}_2\text{C}$  і  $\text{MoC}$  – кристалічні тугоплавкі речовини і силіцид молибдену  $\text{MoSi}_2$ .

Особлива група сполук молибдену – молибденові сині: при дії відновників, (сірчастого газу, цинкового пилу, алюмінію або інших), на слабкокислі ( $\text{pH} = 4$ ) суспензії оксиду молибдену утворюються яскраво-сині речовини змінного складу:  $\text{Mo}_2\text{O}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mo}_4\text{O}_{11} \cdot \text{H}_2\text{O}$  і  $\text{Mo}_8\text{O}_{23} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ .

Мо утворює молибдати, солі, не виділені у вільному стані, слабких молибденових кислот,  $x\text{H}_2\text{O} \cdot y\text{MoO}_3$  (парамолібдат амонію  $3(\text{NH}_4)_2\text{O} \cdot 7\text{MoO}_3 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{CaMoO}_4$ ,  $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$  - зустрічаються в природі). Молибдати металів I і III груп містять тетраедричні групи  $[\text{MoO}_4]$ .

При підкисленні водних розчинів нормальних молибдатів спочатку утворюються іони  $\text{MoO}_3\text{OH}^-$ , потім іони полімолибдати: гепта-, (пара-)  $\text{Mo}_7\text{O}_{266}^-$ , тетра- (мета-)  $\text{Mo}_4\text{O}_{132}^-$ , окта-  $\text{Mo}_8\text{O}_{264}^-$  і інші. Безводні полімолибдати синтезують спіканням  $\text{MoO}_3$  з оксидами металів.

Існують подвійні молибдати, до складу яких входять відразу два катіона, наприклад,  $\text{M} + 1\text{M} + 3(\text{MoO}_4)_2$ ,  $\text{M} + 15\text{M} + 3(\text{MoO}_4)_4$ . Оксидні сполуки, що містять молибден у нижчих ступенях окислення - молибденові бронзи, наприклад, червона  $\text{K}_0,26\text{MoO}_3$  і синя  $\text{K}_0,28\text{MoO}_3$ . Ці сполуки мають металеву провідність і володіють напівпровідниковими властивостями [7].

На рисунку 1.5 зображена діаграма стану системи залізо-молибден:

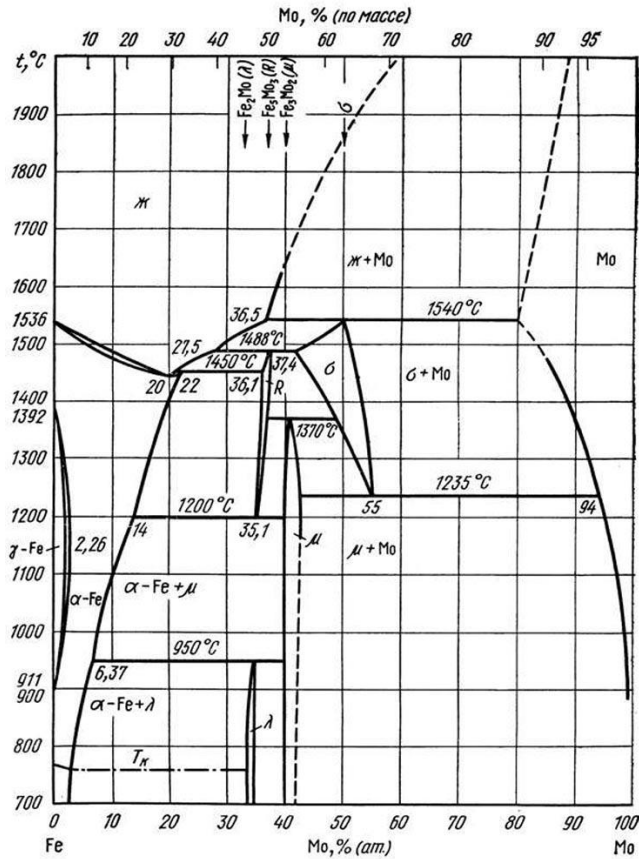


Рисунок 1.5 – Діаграма стану системи Fe-Mo [10]

Діаграма стану системи залізо-молібден досліджена в багатьох наукових роботах. Фаза R існує при 37% (ат.) Мо; Фаза  $\alpha$  утворюється по перитектичній реакції за температури 1540 °C в сплавах, що містять 50% (ат.) Мо, і стійка до температури 1235 °C, за якої розпадається на суміш  $\lambda$ -фази і твердого розчину на основі молібдену.

На рисунку 1.5 приведена діаграма стану системи залізо-молібден. Фаза  $\mu$  знаходиться в рівновазі з  $\alpha$ -Fe за температур нижче 1200 °C, а присутня в сплавах до 1370 °C. Фаза R утворюється за температури 1488 °C по перитектичній реакції і розпадається по евтектоїдній за 1200 °C на суміш  $\alpha$ -Fe +  $\mu$ . За температури 950 °C по перитектоїдній реакції утворюється  $\lambda$ -фаза на основі поєднання  $\text{Fe}_2\text{Mo}$  [10].

## 1.4 Области застосування молибдену

Близько 80% молибдену застосовується у високоякісних сталях для поліпшення ряду характеристик, таких як: загартовуваність та здатність протистояти високим температурам, морській воді та агресивним хімікатам. Молибден є важливим металом в рамках переходу до виробництва енергії [17].

В цілому, молибден застосовують для виробництва зносостійких, жароміцних і корозійностійких сплавів, контактних сплавів (сплави Мо з Cu чи Ag) та «важких» сплавів [3].

Молибден – найважливіша складова різноманітних конструкційних сталей, до складу яких, окрім хрому та нікелю, вводять до 0,5% Мо. В інструментальних сталях для штамів міститься 1-1,5% молибдену; 2-4% – в нержавіючих хромонікелевих сталях; 7,5-8,5% – в швидкорізальних, де молибден частково замінює вольфрам. 0,2-0,5% Мо вводять у чавун для його легування.

Основне застосування оксиду молибдену (VI),  $\text{MoO}_3$  – в якості каталізатора окислення і в якості сировини для виробництва металевого молибдену. Шестикутний триоксид молибдену,  $h\text{-MoO}_3$  має потенційне застосування для вторинних літій-іонних акумуляторів. Об'ємний  $\text{MoS}_2$  (складається з складених моношарів, які утримуються разом слабкими Ван-дер-Ваальсовими взаємодіями) слизький чорний порошок, який виглядає і поводить себе так само, як графіт. Він широко використовується, як і понад 200 років тому, в якості твердого мастильного матеріалу через його властивість низького тертя і високу міцність. Одношаровий дисульфід молибдену – це двовимірний напівпровідник з прямою забороненою зоною, що володіє унікальними механічними, електронними, оптичними та хімічними властивостями, який можна використовувати для нових нано- та оптоелектронних пристроїв [11].

Молибден підвищує червоностійкість інструментальних сталей, їхню твердість і міцність, опір утворенню гартівних тріщин, зношуванню. Мо входить до складу низки кислотостійких і жароміцних сплавів. Домішки від 2

до 4 % Мо в нержавіючі хромонікелеві сталі поліпшують їхні антикорозійні властивості. Мо також підвищує жароміцність і знижує крихкість хромистих і хромонікелевих сталей в умовах тривалої експлуатації. Більшість жароміцних і корозійностійких сплавів містять 20–28 % хрому й 3–10 % молібдену. У найкислотостійкіших сплавах на основі нікелю міститься 17–28 % Мо.

Серед розроблених українськими вченими є хромомолібденові сталі з високою міцністю (до 120 МПа) і пластичністю (видовження 12 % після термообробки) для виготовлення деталей авто- і авіадвигунів та ін. машин і конструкцій, що працюють при підвищених температурах, для деталей машин, що мають велику межу витривалості в умовах великих швидкостей (зубчасті колеса, шпинделі тощо).

Нікелемолібденові сталі використовують для виготовлення деталей великих моторів, молотів, пресів та ін. машин, що працюють в умовах великих навантажень. Хромонікелемолібденові сталі, що після цементації та гартування поєднують високу поверхневу твердість та міцність із пластичністю серцевини, використовують для виготовлення деталей з великими ударними навантаженнями при великих швидкостях робочого циклу (черв'ячні колеса, кулачкові муфти тощо). Тонкий шар Мо наносять на поверхню металевих виробів (молібденування; наприклад, зі сталі, титану, ніобію) з метою підвищення їхньої твердості, поверхневої міцності, корозійної стійкості в азотній кислоті, а з додатковим силіціюванням – і для жаростійкості за високих температур [11].

#### **1.4.1 Застосування молібдену та його сплавів**

Багато властивостей молібдену привабливі для інженерів та дизайнерів, тому метал та його сплави використовуються в багатьох областях, таких як:

- а) Конструкційні матеріали, що працюють в екстремальних умовах
- б) Освітлення.
- в) Електричні та електронні пристрої.
- г) Медичне обладнання.

д) Обладнання для випробування матеріалів.

е) Високотемпературні печі та супутнє обладнання.

ж) Теплові розпилувальні покриття.

и) Аерокосмічні та оборонні компоненти.

Молибден, його композити та сплави, забезпечують унікальне поєднання корисних властивостей, таких як тепло- та електропровідність, теплове розширення, високотемпературна міцність та опір повзучості, низький тиск пари, стабільність до навколишнього середовища та стійкість до стирання та зносу.

Лампа розжарювання перше застосування металічного молибдену, починаючи з 1910 р. (Мо у формі дроту в лампах розжарювання).

Навіть у 21 столітті для освітлення, як і раніше, необхідна велика кількість молибдену, оскільки як компоненти лампи, так і дріт використовуються в якості оправок для намотування вольфрамових ниток.

Проте на сьогодні покоління світла кардинально змінюється: лампа розжарювання замінюється компактними люмінесцентними і світлодіодними лампами (LED). Попри це, молибден, як тугоплавкий метал, досі використовується для захисту дроту та скла в галогенних лампах. Цінні властивості молибдену роблять його матеріалом, що обирають для багатьох інших застосувань. Деякі з них використовують міцність і стійкість молибдену при високих температурах, як це було для перших ламп [12].

### **1.5 Способи отримання компактного молибдену**

Компактний молибден переважно буває у вигляді компактів або злитків. Він є сировиною для виробництва напівфабрикатів, таких як дроти, прутки, листи.

Існує два способи отримання компактного молибдену. Перший полягає в застосуванні методів порошкової металургії. Другий – за допомогою плавки в печах різного принципу дії [13].

Визначення способу виготовлення компактних заготовок (методи порошкової металургії або вакуумна плавка) проводиться в залежності від

розмірів, форм заготовок, а також від їх чистоти [14].

### **1.5.1 Отримання компактного молібдену методом порошкової металургії**

Даний спосіб складається з пресування порошку і спікання отриманої заготовки. Компакти молібдену отримують в сталевих прес-формах при тиску до 300 МПа. Спікання компактів у атмосфері водню проводять в дві стадії: перша попереднє спікання проводиться при 1100-1200 °С і має підвищити міцність і електричну провідність компактів, друга стадія високотемпературне спікання здійснюється пропусканням електричного струму, поступово нагріває компакти до 2200-2400 °С. При цьому отримується компактний метал. Спечені компакти надходять на механічну обробку - ковку, протягування [15].

Для отримання дроту і листів невеликого розміру з порошку молібдену пресують компакти заготовки перерізом від 10x10 до 40x40 мм і довжиною 500 - 650 мм в сталевих прес-формах. Для пресування застосовують гідравлічні преси зусиллям 5-20 кН. При цьому одержані компакти мають щільність 12 - 13 г/см<sup>3</sup>, що відповідає пористості 35 - 40%. Для формування великих заготовок однорідної щільності масою 100 - 300 кг, які практично неможливо отримати пресуванням в сталевих прес-формах, використовують метод гідростатичного пресування. При гідростатичному пресуванні немає тертя порошку об стінки прес-форми, що забезпечує рівномірну щільність спресованої заготовки. Отримують заготовки з пористістю 30 - 35% при тисках 200 - 250 МПа, масою до кількох сотень кілограмів.

Спікання молібденових компактів проводять в дві стадії: попереднє низькотемпературне спікання і високотемпературне спікання (зварювання).

Низькотемпературне спікання. Попереднє спікання молібденових компактів ведуть при 1100 - 1200 °С в муфельних електропечах у водневому середовищі. Нагрівачем служить молібденовий дріт. Після витримки протягом 30-120 хв (в залежності від розмірів) отримують помітно зміцнені компакти, проте лінійна усадка їх незначна (2-3%). Спресовані «штабіки» мають відкриту пористість.

Високотемпературне спікання (зварювання). Для отримання компактів з найбільш сприятливою для подальшої механічної обробки структурою потрібен нагрів приблизно до 2200-2400 °С. Таку високу температуру найпростіше отримати шляхом безпосереднього пропускання електричного струму через компакт, зміцнений попередніми (низькотемпературним) спіканням.

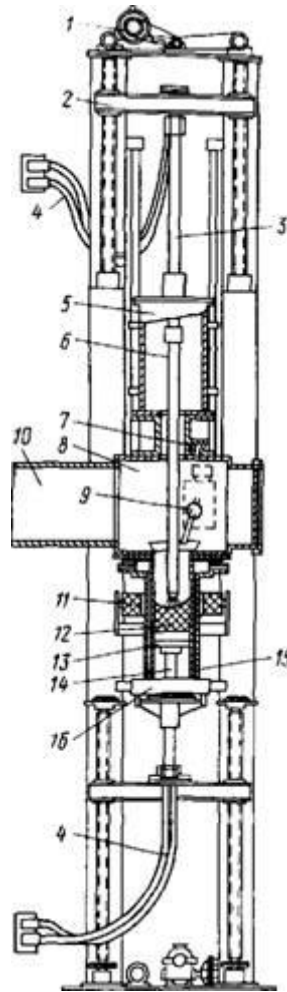
Для спікання великих заготовок масою 100-300 кг, що були отримані гідростатичним пресуванням, використовують індукційні печі. Спікання молібденових заготовок ведуть у водні при 1700-1850 °С упродовж 3-15 годин (залежно від температури і розміру заготовки) [3].

### **1.5.2 Отримання компактного молібдену плавкою**

Для виробництва великих заготовок (200 - 3000 кг), призначених для прокату листів великих розмірів, витяжки труб і виробництва виробів методом лиття застосовується плавка молібдену і сплавів на його основі в дугових і електронно-променевих печах.

У всіх сучасних дугових печах плавку ведуть у вакуумі з молібденовим електродом і охолоджувальним мідним тиглем - кристалізатором (рис. 1.6). Метал плавиться в дузі, що виникає між верхнім і нижнім електродом розплавленим металом у мідному кристалізаторі. Стиковим зварюванням компакти з'єднують в електрод довжиною 1-2,5 м. Потім їх об'єднують в пакет (4-16 і більше компактів, в залежності від розмірів кристалізатора). Плавку здійснюють в вакуумі (0,13-0,013 Па) в робочій камері печі. У зоні дуги тиск приблизно на два порядки вище. Постійність напруги дуги (30-60 В) підтримується автоматично за рахунок регулювання відстані між електродами.

Після вакуумної дугової плавки з розкисленням, вміст домішок в молібдені знижується і знаходиться в наступних межах: кисень  $1 \cdot 10^{-3} - 10^{-4}$ ; водень  $3 \cdot 10^{-4} - 10^{-5}$ ; азот  $1 \cdot 10^{-3} - 10^{-4}$ ; вуглець –  $2 \cdot 10^{-3}$ . Отримані злитки мають крупнокристалічну структуру.



1 - механізм подачі дроту; 2 - траверса; 3 - шток; 4 - струмопровідні шини; 5 - камера електрода, що витрачається; 6 - електрод, що витрачається; 7 - оглядове віконце; 8 - плавильна камера; 9 - механізм засипки лігатур; 10 - патрубок до вакуумної системи; 11 - соленоїд; 12 - злиток; 13 - піддон; 14 - нижній шток; 15 - кристалізатор; 16 - механізм витяжки злитка

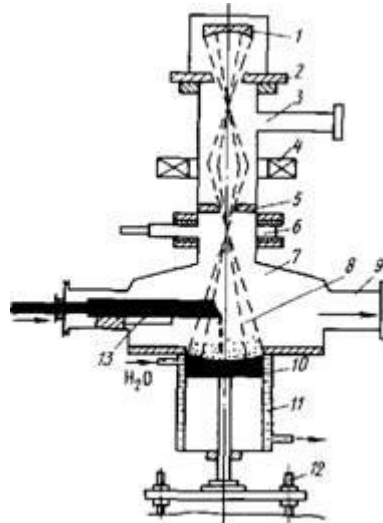
Рисунок 1.6 – Схема дугової печі з електродом, що витрачається, для плавки молібдену [3]

В електронно-променевої установці джерело енергії винесено з об'єму, де здійснюється технологічний процес, і тому його потужність можна регулювати незалежно від того, що відбувається в робочій камері. Це дозволяє перегрівати метал в потрібних межах, здійснювати його витримку при постійній температурі, необхідній для глибокого очищення від домішок і газів, проводити операції рафінування з використанням шлаків. Це дає можливість отримати метал (головним чином, тугоплавкі метали і сплави) більш високої якості в

порівнянні з вакуумними дуговими печами, де не можливо припинити наплавлення злитка [15].

На рисунку 1.7 зображена схема плавильної установки з однією електронною гарматою.

У більш потужних печах, що призначені для плавки великих злитків, застосовують кілька електронних гармат.



1 - катод електронної гармати; 2 - анод; 3 - патрубок до вакуумної системи; 4 - електромагнітна котушка (лінза); 5 - діафрагма; 6 - шиббер; 7 - плавильна камера; 8 - електронний пучок; 8 - патрубок до вакуумної системи; 10 – злиток, що виплавляється; 11 - мідний кристалізатор, що охолоджується водою; 12 - механізм витягування злитка; 13 – заготовка, що переплавляється

Рисунок 1.7 – Схема печі для плавки електронним променем [3]

При плавці електронним променем можна здійснити контрольований перегрів рідкого металу і підтримувати його в рідкому стані заданий час. У дугових вакуумних печах це неможливо. Додаткова перевага полягає в можливості переплавки металу в будь-якому вигляді (компакти, таблетки з порошку, стружка), тоді як для дугової плавки необхідно приготувати електрод, що буде витрачатись.

В результаті електронно-променевої плавки молібден очищається від більшої частини домішок (зокрема O, N, C, H, Fe, Cu, Ni, Mn, Co). Для глибокого очищення від кисню необхідне введення розкислювачів.

Внаслідок високої чистоти, злитки після електронно-променевої плавки мають крупнокристалічного структуру і є не дуже піддатливими до пластичної деформації [3].

## 1.6 Використання для адитивних технологій

Адитивні технології або технології пошарового синтезу, зокрема 3D-друк, сьогодні одні із найбільш динамічних напрямів “цифрового” виробництва. Проведений економіко-правовий аналіз показав, що вони дозволяють значно прискорити виконання НДДКР (Науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи) і вирішення задач підготовки виробництва, виготовлення продукції. Технології можуть збільшити в середньому на 23% прибутковість виробництва окремої одиниці продукції і зменшити бар’єри для організації виробництва на 90%. 3D-друк здатний здійснити революцію в багатьох сферах життя. За динамікою розвитку ринок адитивних технологій випереджає інші галузі виробництва [1].

Деякі моделі будівельних принтерів здатні не тільки зводити будівлі з бетону, але й прокладати всі необхідні комунікації (електропроводку, трубопровід, газову розв'язку і таке інше). Принцип будівництва дуже простий: у 3D принтер заливається спеціально підготовлена в'язка бетонна суміш, і потім за рахунок екструзії здійснюється формування шар за шаром заданої конструкції, в процесі чого нижні шари бетону ущільнюються, що надає міцності створюваної конструкції. Робочим залишається тільки вставляти арматуру між стінами для забезпечення жорсткості конструкції, це значно скорочує терміни будівництва, і здешевлює його. Привабливим є можливість часткового використання промислових відходів в якості будівельного матеріалу. На підставі проведеного аналізу слідує висновок, що 3D друк це перспективна технологія, яка займатиме провідне місце в будівельній сфері світу [16].

Загальними методами 3D-друку є: моделювання методом наплавлення, селективне лазерне спікання, струменевий 3D-друк, стереолітографія і 3D-

креслення [17].

Суть адитивних технологій полягає в з'єднанні матеріалів для створення об'єктів з даних 3D-моделі шар за шаром – цим вони відрізняються від звичайних субтрактивних технологій виробництва, що забезпечують механічну обробку – видалення речовини з заготовки. Адитивні технології класифікують:

- а) за використаними матеріалами (рідкими, сипкими, полімерними, металопошкковими);
- б) за наявності лазера;
- в) за способом фіксування шару побудови (тепловий вплив, опромінення ультрафіолетом або видимим світлом, сполучним складом);
- г) за способом утворення шару.

Існує два способи формування шару: перший полягає в тому, що спочатку насипають на платформу порошковий матеріал, розподіляють його роликком або ножем, для створення рівного шару матеріалу заданої товщини, відбувається селективна обробка порошку лазером або іншим способом з'єднання частинок порошку (плавкою або склеюванням) згідно з поточним перерізом САD-моделі. Площина побудови незмінна, а частина порошку залишається недоторканою. Цей спосіб називають селективним синтезом, а також селективним лазерним спіканням, якщо інструментом з'єднання є лазер. Другий спосіб полягає в безпосередньому осадженні матеріалу в точку підведення енергії.

Існує поділ 3D-адитивних технологій на 7 категорій:

а) Перша категорія – видавлювання матеріалу. В точку побудови по підігрітому екструдеру подається пастоподібний матеріал, що представляє собою суміш сполучного і металевого порошку. Побудована модель поміщається в піч для того, щоб видалити сполучні матеріали і спекти порошок. Ця адитивна технологія реалізована під марками багатофазне затвердіння струменя), моделювання методом пошарового наплавлення (зображено на рис.1.8), виробництво способом наплавлення ниток).

б) Друга – розбризкування матеріалу. Віск або фотополімер по багатоструменевій голівці подається в точку побудови.

в) Третя – розбризкування сполучного реагенту. В зону побудови вприскування не модельного матеріалу, а сполучного реагенту.

г) Четверта – з'єднання листових матеріалів. Будівельний матеріал являє собою полімерну плівку, металеву фольгу, аркуші паперу та ін.

д) П'ята – ультразвукове адитивне виробництво. Тонкі пластини з металу зварюються ультразвуком, після чого надлишки металу видаляються фрезеруванням. Адитивна технологія тут застосовується в поєднанні з субстрактивною.

ж) Шоста – фотополімеризація у ванні. Технологія використовує рідкі модельні матеріали – фотополімерні смоли. Плавка матеріалу в заздалегідь сформованому шарі. В якості джерела енергії використовують лазер або термоголовку.

е) Сьома – пряме підведення енергії в місце побудови. Матеріал і енергія для його плавлення надходять в точку побудови одночасно. В якості робочого органу використовується голівка, оснащена системою підведення енергії і матеріалу. Енергія надходить у вигляді сконцентрованого пучка електронів або променю лазера. Іноді голівка встановлюється на «руці» робота [18].



Рисунок 1.8 – Збільшений масштаб процесу пошарового наплення металевого порошку в виробництві деталі за допомогою 3D-принтера [18]

## 1.7 Відомості про електронний промінь та електронно-променеві установки

Електронно-променевий нагрів широко застосовується при обробці тугоплавких і хімічно активних металів, зварюванні, випаровуванні металів і оксидів, вирощуванні монокристалів, напиленні [19].

Основні переваги електронно-променевого нагріву: можливість в широких межах плавно змінювати питому енергію в зоні нагріву; велика питома потужність в місці взаємодії електронного променя з оброблюваним виробом або матеріалом; можливість за допомогою магнітної системи керувати просторовим положенням променя; можливість використання вакууму як робочого середовища; можливість отримати малорозмірну зону впливу електронного променя на матеріал, що оброблюється.

Головними недоліками даного виду нагріву є: необхідність високого вакууму; складність виготовлення та експлуатації; висока вартість електронно-променевого обладнання.

Електронний промінь, що використовується в якості нагрівальної установки, являє собою спрямований потік електронів, які переносять свою енергію від випромінювача до виробу [20].

Нагрів і плавка металів електронним пучком базуються на перетворенні кінетичної енергії електронів у теплову, при зіткненні їх з поверхнею металу. При напругах до 30 -35 кВ, що використовують в установках, більша частина електронів перетворюється у теплову енергію і тільки мала частина – в енергію рентгенівського випромінювання та енергію електронів вторинної емісії [3].

З огляду на те що електрони віддають свою енергію при зіткненні з молекулами і атомами речовини, в робочій камері повинен підтримуватися глибокий вакуум, який необхідний і для захисту катода від бомбардування позитивними іонами.

Електрони, що випускаються катодом отримують прискорення в електричному полі і формуються електромагнітними полями в електронний пучок або промінь. Сформований пучок електронів проходить через робочу

камеру і потрапляє на поверхню об'єкта, що оброблюється.

Всі конструкції електронно-променевої установок мають набір систем, які подібні за своїм призначенням і принципом дії. Їх можна розділити на два комплекси:

- а) енергетичний;
- б) електромеханічний.

Енергетичний комплекс складається з керування променем та електронної гармати з блоками живлення. Електронна гармата пристрій, в якому пучок електронів під впливом електричного і магнітного полів виводиться через анод і направляється на виріб або поверхню, що нагрівається. Одним з головних вузлів електронної гармати є катод. Його виготовляють з тугоплавких металів (W, Ta, Mo), оксидів рідкоземельних металів (Zr, La). Катоди прямого нагріву застосовуються при невеликих токах емісії (до 20 мА), катоди непрямого нагріву при великих (до 200 мА). Задана щільність електронного променя знаходиться шляхом підбору конфігурації катодного електрода і анода, так як після проходження анода електрони рухаються в просторі поза електричним полем.

З огляду на те що електронний промінь володіє об'ємним просторовим зарядом, в результаті зіткнення електронів порушується фокусування променя. Тому після електростатичного фокусування промінь додатково фокусується електромагнітною лінзою. Вона представляє собою котушку в магнітопроводі, яка живиться від випрямлювача, що забезпечує сталу напругу і невелику пульсацію.

Електромеханічний комплекс включає: вакуумну робочу камеру; систему позиціонування і переміщення заготовки; систему спостереження за ходом процесу; систему захисту від рентгенівського випромінювання.

Вакуумна камера є базовим елементом електронно-променевої установки, найбільш важливим і складним вузлом електромеханічного комплексу. Камера повинна бути герметичною і механічно міцною. Матеріал, з якого вона виготовлена, повинен надійно поглинати рентгенівське випромінювання. Головна функція вакуумної камери створювати і підтримувати в робочому

просторі та електронній гарматі необхідний вакуум [20].

### **1.8 Висновки та постановка задач дослідження**

Отже, враховуючи вагомі переваги електронно-променевого спікання: швидкість, екологічність, якість, економічна доцільність, даний метод може стати новим перспективним і високошвидкісним методом отримання компактних виробів з молібдену, оскільки він не тільки не поступається традиційним методам, а й в деякій мірі перевершує їх за багатьма показниками.

Таким чином, метою роботи було вивчення закономірностей процесу теплопередачі у пористих молібденових зразках під час електронно-променевого спікання в умовах обертання. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- а) дослідити закономірності ущільнення під час пресування порошку молібдену;
- б) методом скінченно-елементного моделювання в середовищі ANSYS встановити вплив пористості молібденових пресовок на теплопередачу.

## 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Методика проведення експерименту

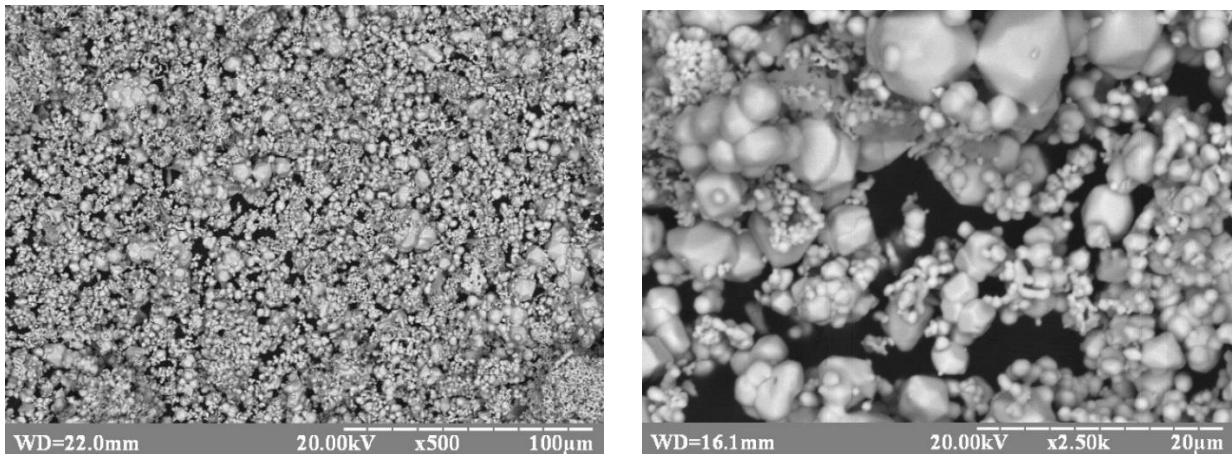
Процес виготовлення молібдену методом електронно-променевого спікання складається з: дозування порошоків, замішування суміші з пластифікатором, сушки, пресування заготовок, відпалу і спікання електронним променем. Технологічна схема одержання сплавів показана на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Технологічна схема отримання молібдену методом електронно-променевого спікання

### 2.2 Вихідні матеріали

У якості вихідних матеріалів використовували промисловий порошок молібдену з чистотою близько 98 масових % з розміром частинок від 5 мкм до 10 мкм. На початковому етапі дослідження використовували два типи пластифікаторів: 1 % розчин синтетичного каучуку в бензині та поліетиленгліколь. На рисунку 2.2 приведено фото вихідних порошоків при збільшенні 500 та 2500 разів.



а

б

а – збільшення в 500 раз, б – в 2500 раз

Рисунок 2.2 – Фото вихідних порошків молібдену

### 2.3 Дозування, пресування молібденових пресовок із пластифікатором

Дозування матеріалів проводилось за допомогою електронних лабораторних ваг, змішування проводилося в ручну із застосуванням лабораторних сит для протирки вихідної суміші. У якості пластифікатору вводився 1 % розчин синтетичного каучуку. Пластифікатор додавався у вигляді 1 масового % від маси суміші. Змішування проводилося протиранням через сито 40 мкм. Розрахунок кількості порошку необхідної для пресування однієї заготовки проводився за формулою:

$$G = V \cdot \rho_k \cdot (1 - \Pi) \cdot K,$$

де  $G$  – маса порошку, г;

$V$  – об'єм пресовки,  $\text{см}^3$ ;

$\rho_k$  – густина компактного матеріалу,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;

$\Pi$  – пористість пресовки, що дорівнює 50 %;

$K$  – коефіцієнт, що дорівнює 1,01.

Об'єм пресовки визначається за формулою:

$$V = \pi h d^2 / 4,$$

де  $d$  – діаметр пресовки, см;

$h$  – довжина пресовки, см.

Пресування проводилося на гідравлічному пресі з тиском пресування 100 МПа, 200 МПа, 400 МПа, 600 МПа.

Молібден є пластичним матеріалом тому після пресування він не потребує спеціальних умов транспортування: зберігання та транспортування здійснювалося у пластикових боксах. Наступним етапом технологічної схеми є відпал: відпал проводили в атмосфері водню за температур 750°C, 950°C, 1100°C.

#### **2.4 Спикання молібдену електронним променем**

Спикання зразків здійснювалося електронним променем на установці СВ–112, фото установки приведено на рисунку 2.3. Дана установка призначена для високоенергетичної обробки порошків металів, їх спикання та розпилювання.

Для спикання зразків з молібдену і його сплавів була змінена конструкція установки, що дало можливість одержувати високу щільність потоку електронів на одиницю площі поперечного перетину зразку і розігрівати його до температури плавлення.

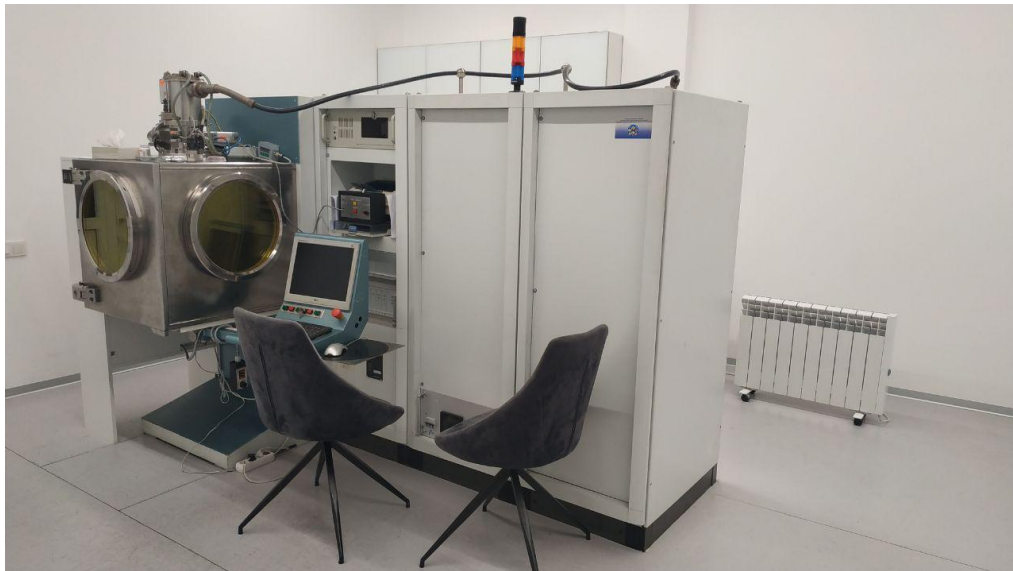


Рисунок 2.3 – Фото установки СВ-112

Оскільки зразок піддавався впливу потоку електронів на бокову площину зразка та використовувалось обертання зразка навколо своєї осі, буде доречним навести схему нагрівання зразка у камері (рисунок 2.4).

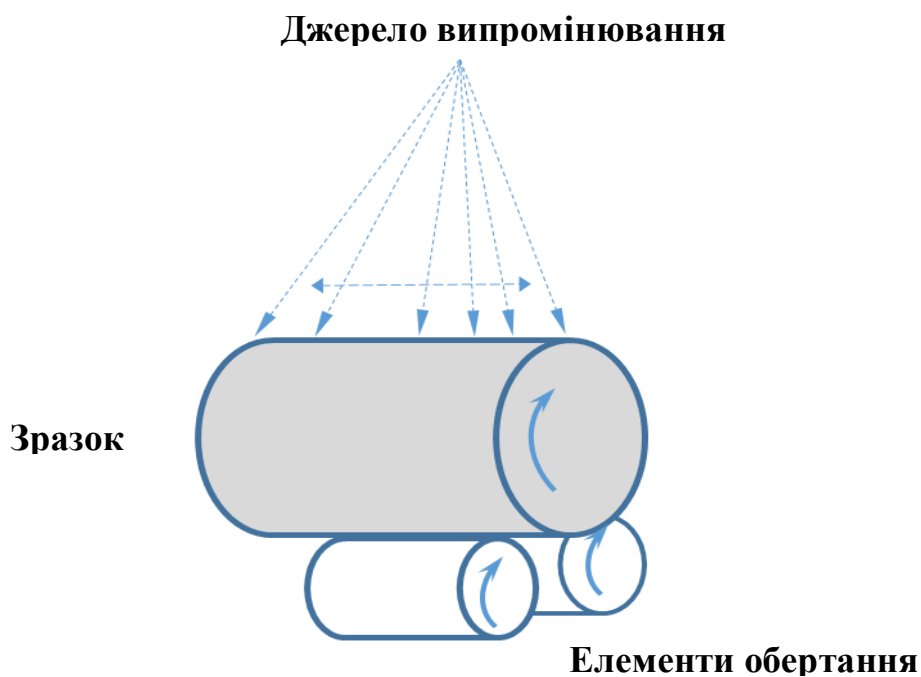


Рисунок 2.4 – Схема нагрівання зразка у камері

Спикання проводилося зі зразками різної пористості та розділялось на 8 етапів, кожен із яких мав свої характеристики сили струму. При цьому

використовувалось обертання зразка. Перелік етапів, за яких проводилося спікання наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Етапи спікання, що використовувалися під час дослідження

| № | Етап спікання      |
|---|--------------------|
| 1 | 0,5 mA; 30 с       |
| 2 | 1 mA; 30-60 с      |
| 3 | 1,5 mA; 60-90 с    |
| 4 | 2 mA; 90-120 с     |
| 5 | 2,5 mA; 120-170 с  |
| 6 | 7,5 mA; 170-220 с  |
| 7 | 12,5 mA; 220-270 с |
| 8 | 17,5 mA; 270-320 с |

Важливим чинником будь якої термічної обробки є температура та походження середовища у якому відбувається процес спікання. Під час спікання електронним променем важливим є підтримання постійного вакууму в робочій камері для забезпечення стабільного фокусування електронного променя. Також це забезпечує зниження кількості шкідливих домішок. Контроль температури здійснювався пірометром. На основі даних, отриманих з пірометра та часу проведення спікання, були побудовані залежності температури від часу проходження спікання на певному його етапі (6, 7 та 8 етапи, табл. 2.1) що дозволило отримувати значення, зручні для аналізу та інтерпретації. Одну із залежностей для зразка із пористістю 20% зображено на рисунку 2.5.

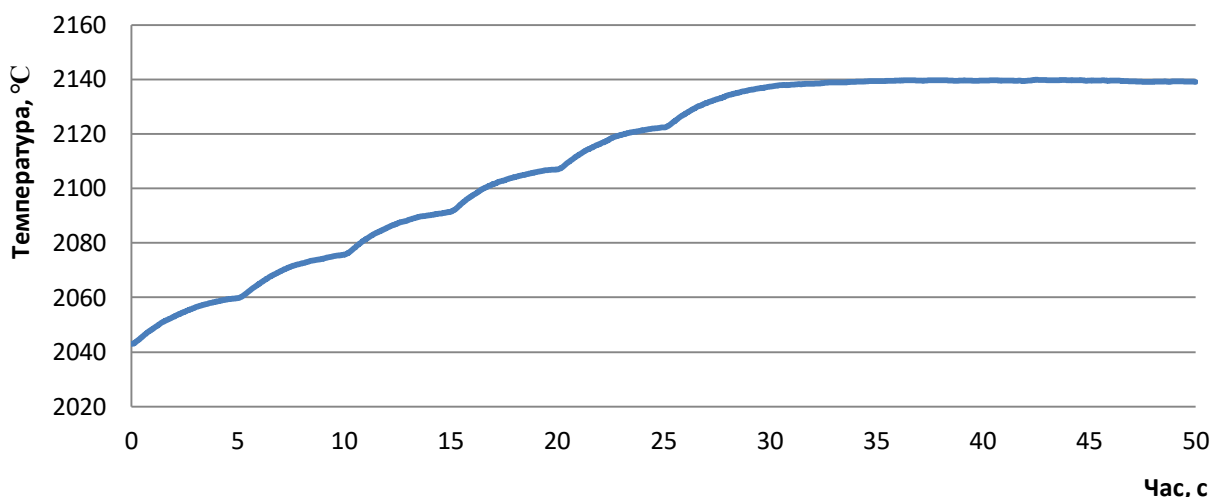


Рисунок 2.5 – Залежність температури зразка від часу на 8 (останньому) етапі спікання для зразка із пористістю 20%

## 2.5 Моделювання поля температури методом скінченних елементів

Поле температур відіграє важливу роль при спіканні пористих заготовок будь-якого матеріалу, зокрема й молібдену, тому, знаючи розподіл цього поля по зразку, можна керувати процесом спікання, обираючи ті чи інші його режими, а, отже, й впливати на кінцеві властивості матеріалу.

Однією з основних характеристик, що впливає на характер формування градієнта температур, є питома теплопровідність матеріалу. В умовах, коли вихідний виріб має деяку пористість, необхідно встановити залежність питомої теплопровідності пористого матеріалу від його пористості.

Типова інженерна задача в МСЕ (методі скінченних елементів) починається з підготовки моделі — віртуального аналога реальної будівельної конструкції, технологічного виробу, деталі механізму тощо.

З геометричної точки зору, розрахункова модель є полем точок, що пов'язані між собою примітивами (відрізками прямих ліній, трикутниками, прямокутниками та ін.). Так утворюється сітчаста структура — геометрія вихідної конструкції апроксимується накладеною на неї сіткою і подальша робота здійснюється вже не з вихідною системою, а з цією отриманою сіткою.

Окрім геометрії, примітиви, які з'єднують вузлові точки моделі, мають також відомі механічні властивості. Це означає, що якщо пов'язати жорсткості всіх елементів сітки в єдине ціле (в межах прийнятих в моделі припущень), то можна встановити напружено-деформований стан усієї системи. Так проєктувальник може отримати будь-які показники, які його цікавлять — поздовжні і поперечні сили, згинальні і крутильні моменти, напруження, деформації тощо.

Кількість вузлів і елементів, з яких складається розрахункова модель, заздалегідь відома. Для деяких складних систем вона може вимірюватися тисячами і навіть мільйонами, але ця кількість, так чи інакше, скінченна. Ця обставина, а також те, що заздалегідь відомий принцип "роботи" кожного окремого елемента системи, й обумовила назву — метод скінченних елементів. А саму сітку називають скінченно-елементною [21].

### **2.5.1 Визначення питомої теплопровідності пористого тіла**

При передачі тепла в пористому тілі розглядають три елементарні способи передачі тепла:

- а) Кондуктивний – всередині суцільної твердої фази.
- б) Конвекційний – через газову фазу, що заповнює пори.
- в) Радіаційний теплообмін (теплове випромінювання) – через простір пор.

Конвекційна теплопровідність, яка пов'язана з коефіцієнтом теплопередачі від твердого тіла до газової фази і передачею через газову фазу при низькому тиску і малому перепаді температур, як і теплообмін випромінюванням, досить малі, проте були враховані під час моделювання у вигляді граничних умов.

Кондуктивна теплопровідність переважає інші механізми за ефективністю, оскільки заснована на передачі теплових коливань всередині матеріалу.

Для визначення теплопровідності потрібно обрати граничні умови. Реалізується розрахунок у середовищі ANSYS на платформі Workbench як

задача типу Transient Thermal.

Для розрахунку ефективної теплопровідності потрібно сформулювати та розв'язати обернену задачу стаціонарної теплопровідності. Визначальним рівнянням теплопровідності є рівняння Фур'є, яке в стаціонарному одновимірному випадку при відсутності внутрішніх джерел тепла, має вигляд:

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} = 0. \quad (2.1)$$

Розв'язком прямої задачі теплопровідності є температурне поле в домені та розраховані на його основі теплові потоки, що визначаються за відомими значеннями температури на протилежних сторонах домену та характеристиками теплопровідності матеріалу домену.

### 2.5.2 Задача нестационарної теплопровідності

Задачі нестационарної теплопровідності виникають при аналізі процесів теплообміну з плином часу, зокрема задач нагрівання та охолодження твердих тіл. Прикладом є нагрівання пористої заготовки молибдену, яка обертається зі швидкістю 1 об/с, у вакуумі під час спікання. Для визначення теплопровідності обираємо граничні умови:

а) Граничні умови 1 роду – температура поверхні тіла задається як функція часу:

$$t_c(\tau) = f(\tau). \quad (2.2)$$

б) Граничні умови 2 роду – щільність теплового потоку на поверхні тіла задається як функція часу:

$$q_c(\tau) = f(\tau). \quad (2.3)$$

в) Граничні умови 3 роду – описуються рівнянням Ньютона-Ріхмана і характеризують закон конвективного теплообміну між навколишнім середовищем та поверхнею тіла:

$$q = \alpha(t_c(\tau) - t_{ж}), \quad (2.4)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від середовища до тіла чи навпаки [22].

Для вирішення нашої задачі ми обираємо такі граничні умови:

- а) першого роду (граничні умови Діріхле) – з протилежних сторін домена;
- б) другого роду – тепловий потік (що є джерелом нагріву) на поверхню зразка;
- в) третього роду – відведення тепла (конвекція) від зразка;

Задача нестационарної теплопровідності використовується для прогнозування поля температур та його еволюції в часі.

Вигляд розрахункової моделі в середовищі ANSYS приведено на рисунку 2.6

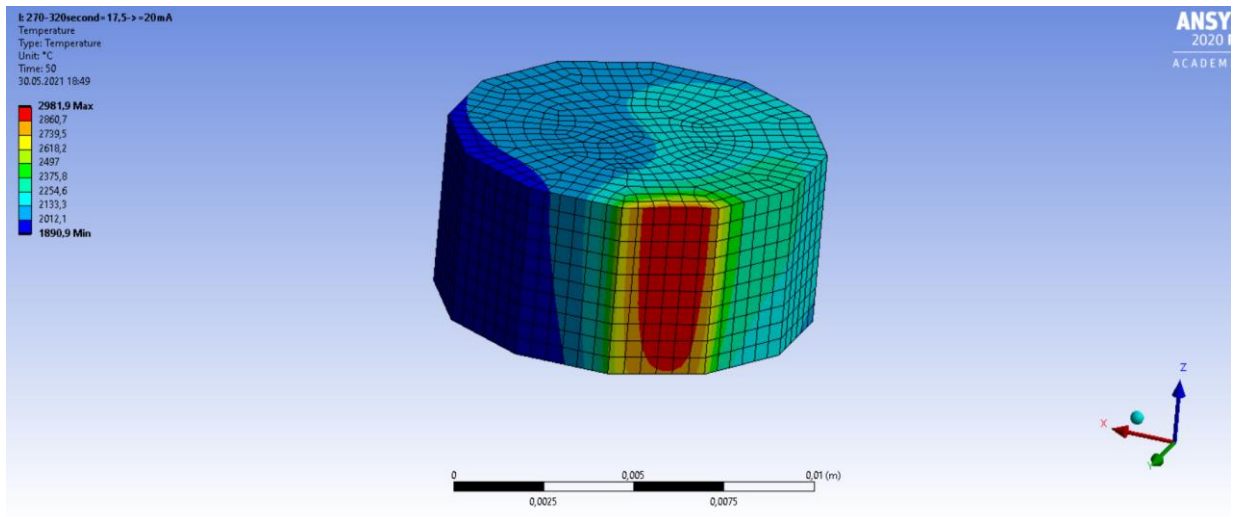


Рисунок 2.6 – Зразок, розрахований в середовищі ANSYS

На рисунку 2.6 видно, що розмір сітки на різних елементах неоднаковий. Сітка адаптована під форму виробу для того, щоб краще відобразити температурні градієнти та значення теплового потоку в тій чи іншій точці виробу.

Також були накладені граничні умови. Розглянемо їх детальніше:

- а) Конвекція теплового потоку відведена з поверхні зразка, де виходить тепловий потік  $q$ . Коефіцієнт тепловіддачі  $k = 10 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ .
- б) Випромінювання: від кожної з граней зразка, не змінюється в

залежності від температури (рисунок 2.7). Початкові умови: у момент часу  $t=0$ , температура  $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

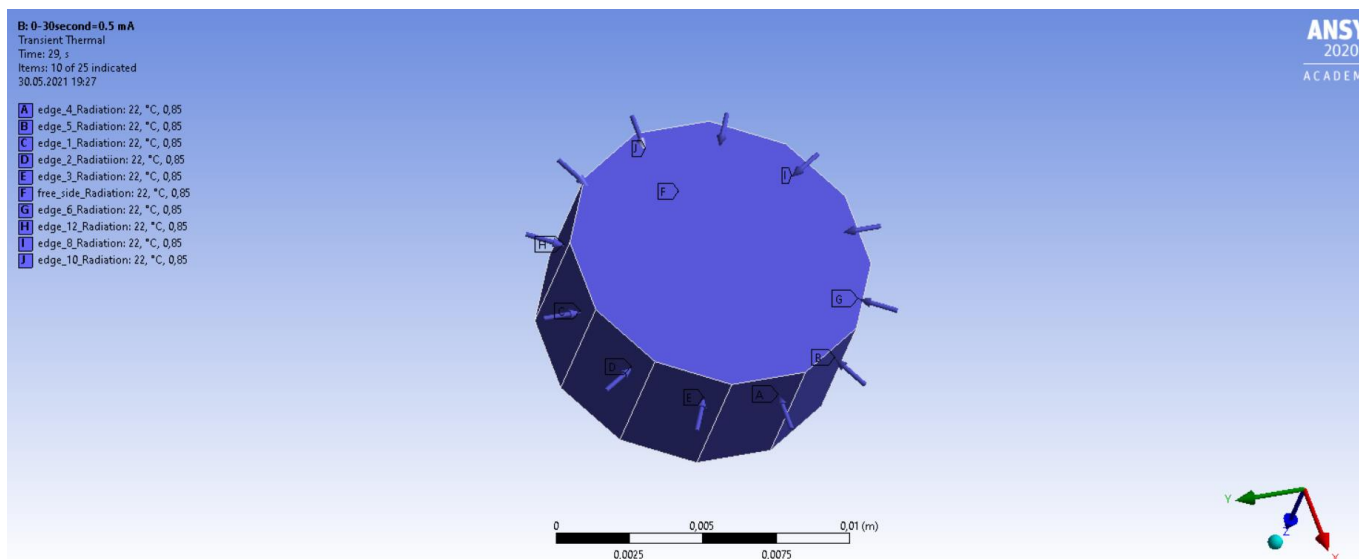


Рисунок 2.7 Випромінювання зразка в навколишнє середовище

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В процесі дослідження, після формування та пресування зразків молібдену з пластифікатором (в нашому випадку використовувався 1% розчин синтетичного каучуку), було визначено та пораховано відносну щільність і пористість отриманих зразків. Результати наведені на рисунку 3.1.

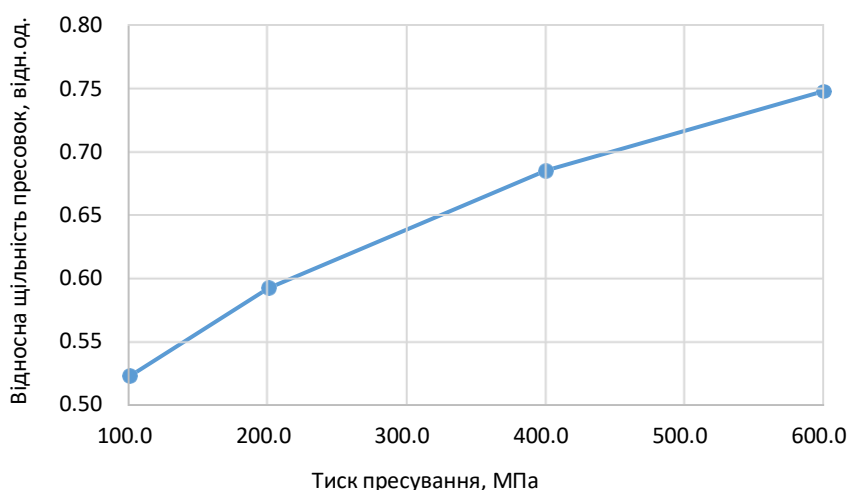


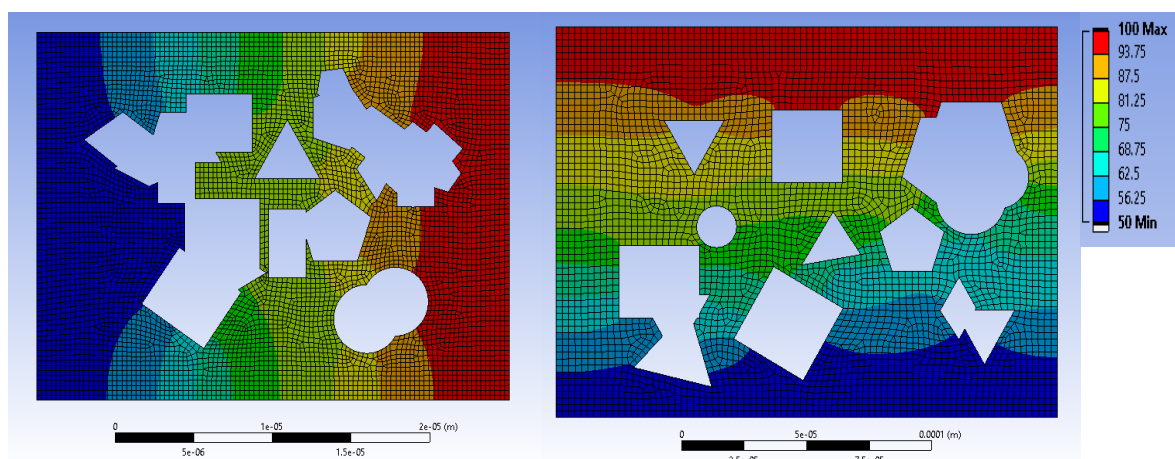
Рисунок 3.1 – Залежність відносної щільності зразків Мо, пресованих з 1% розчином синтетичного каучуку в бензині, після відпалу в атмосфері водню при 750 °С-1100 °С протягом 2 годин, від тиску пресування

З рисунку 3.1 видно, що отримані залежності відповідають теорії: зі збільшенням тиску пресування, відносна щільність зразків зростає. Відповідно до характеру отриманих залежностей, можемо зробити висновок, що молібден під час пресування поводить себе як пластичний метал, що підтверджує теоретичні дані по матеріалу.

Для прогнозування поля температур визначали питому теплопровідність матеріалу за різної пористості. Приклади змодельованого температурного поля, як результат розв'язання задачі стаціонарної теплопровідності показано на рисунку 3.2.

Також розрахунок проведено на пористих структурах, одержаних шляхом графічного оброблення зрізів реальних зразків, пористістю 25%, 31% та 41%. Застосовували ту ж методику – розв'язання задачі стаціонарної

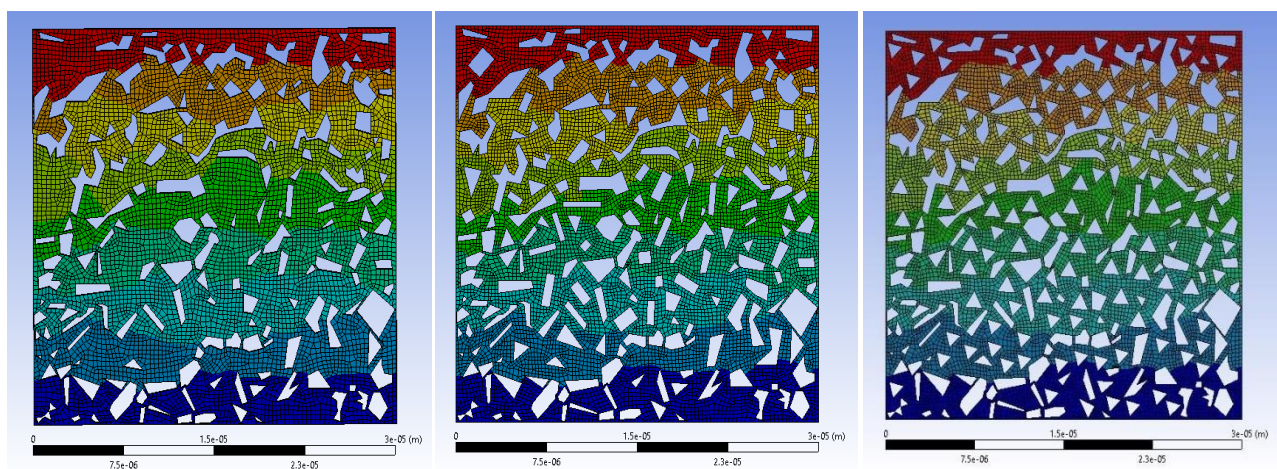
теплопровідності та зворотної задачі для визначення питомих значень.



а) «пропускання» теплового потоку справа-наліво; б) «пропускання» теплового потоку згори – донизу

Рисунок 3.2 – Поле температур в змодельованих зразках [23]

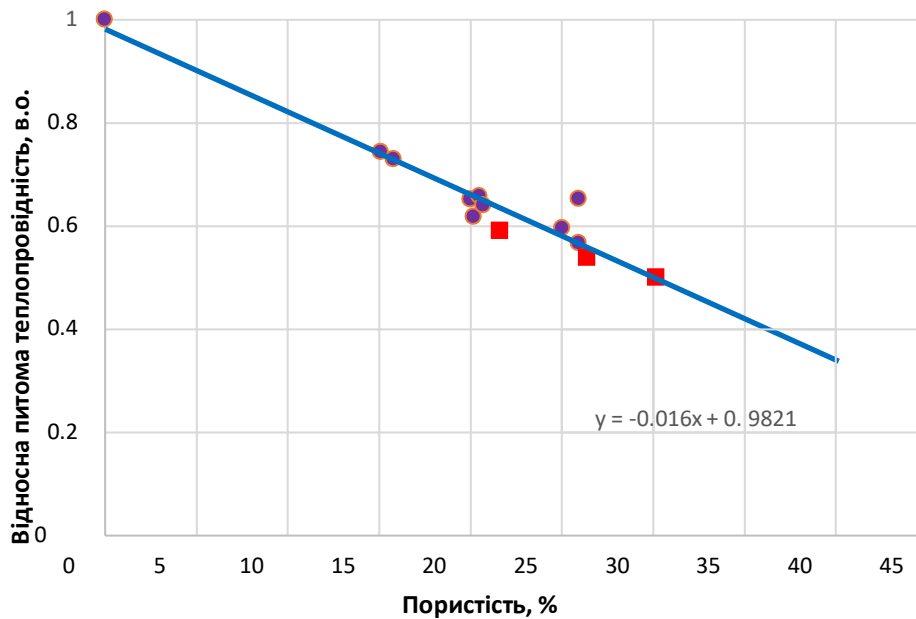
Приклади температурного поля показано на рисунку 3.3:



Пористість зразків: а) 21,5%, б) 26,37% в) 30,14%

Рисунок 3.3 – Поле температур в структурах, побудованих за зрізами реальних зразків [23]

Значення питомої теплопровідності, обчислені за модельними зразками та зразками, побудованими за реальними структурами, було перераховано у відносні величини. Було побудовано відношення обчисленої теплопровідності до табличних значень теплопровідності матеріалу за тих же температур. Результати розрахунків показано на рисунку 3.4.



○ – модельні об'єкти, □ – структури,

побудовані за реальними пористими об'єктами

Рисунок 3.4 – Залежність відносного значення питомої теплопровідності від пористості

Відповідно до рисунку 3.4, розрахунки дозволяють стверджувати, що залежність відносної питомої теплоємності від пористості зразків задовільно описується лінійною залежністю з коефіцієнтом, близьким до -1.6 (в розмірності [відносні одиниці] / [відносні одиниці]). Значення відносної питомої теплопровідності не залежить від застосованих граничних умов. Відхилення окремих значень питомої теплопровідності від прямої збільшуються зі збільшенням пористості, що пов'язано з випадковим характером розташування пор в окремо взятій структурі це створює відповідний рівень невизначеності, який необхідно враховувати при використанні розрахункових значень теплопровідності в реальних розрахунках.

Обчислені значення питомої теплопровідності пористих заготовок молибдену застосовані в скінченно-елементній моделі нагрівання цих заготовок електронним променем в умовах обертання.

В якості матеріалу для розрахунку моделі зразків обрали гомогенізоване середовище, питома теплопровідність якого визначалась за рівнянням:

$$\lambda_{\Pi} = \lambda \cdot (1 - \theta), \quad (3.1)$$

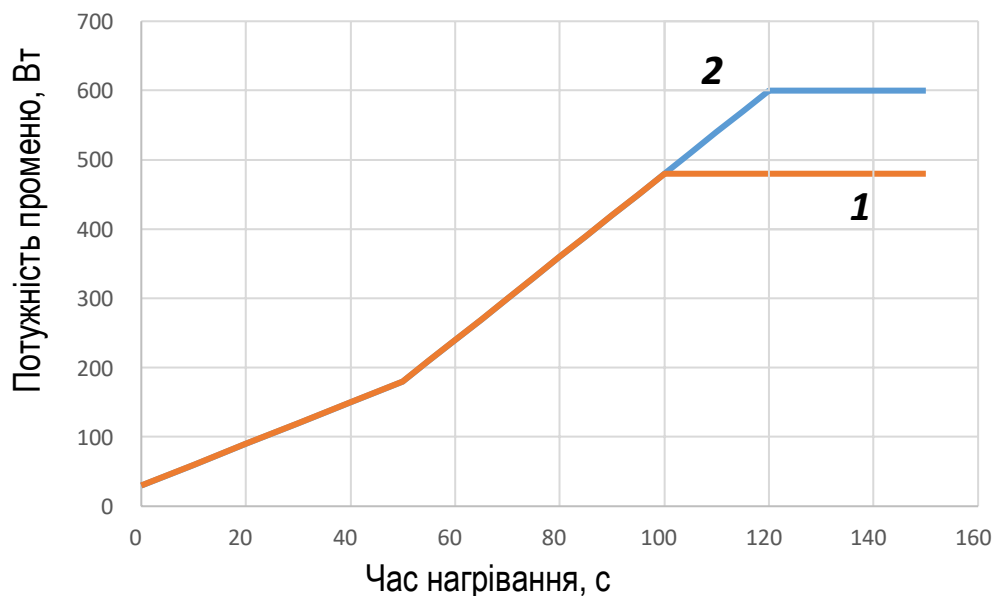
де  $\lambda$  – питома теплопровідність молібдену, Вт/(м\*°С);

$\lambda_{\Pi}$  – питома теплопровідність пористого молібдену, Вт/(м\*°С);

$\theta$  – пористість, відн. од.

У якості густини середовища використовувалась відносна густина пористої заготовки, в якості питомої теплопровідності використовувалась питома теплопровідність молібдену відповідно. Розрахунок поля температур проводили для зразків з пористістю 20%, 25%, 31%, 36% та 41%.

Потужність нагріву електронним променем визначали як добуток напруги прискорення та струму електронного променя. Діаграма підвищення потужності нагрівання в залежності від часу зображена на рисунку 3.5.



1 – до потужності 480Вт (8 мА); 2 – до потужності 600 Вт (10 мА)

Рисунок 3.5 – Діаграма потужності нагрівання,

На рисунку 3.6 зображений розподіл температур по зразкам різної пористості за 320 секунд, за швидкості обертання 1 об/с, при потужності нагріву  $14,2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, отриманий за результатом моделювання в середовищі ANSYS (Transient Thermal).

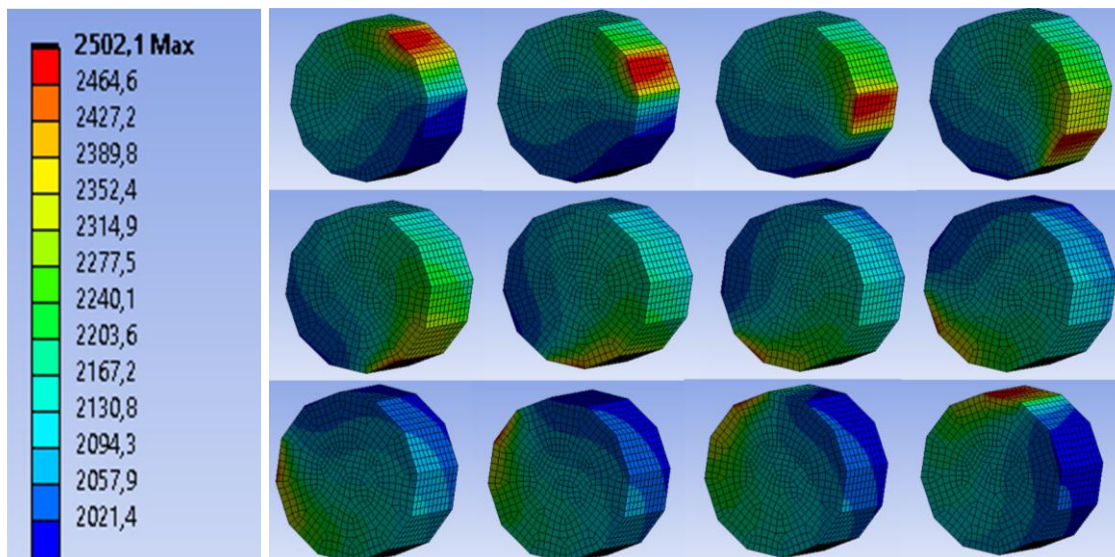


Рисунок 3.6 – Моментальний розподіл температури на поверхні зразка молібдену із пористістю 36%

В результаті моделювання зафіксовано зміну температури від часу в центрі зразка та на 2 окремих гранях, що мають максимум та мінімум відповідно, оскільки в якості моделі маємо 12-гранну призму.

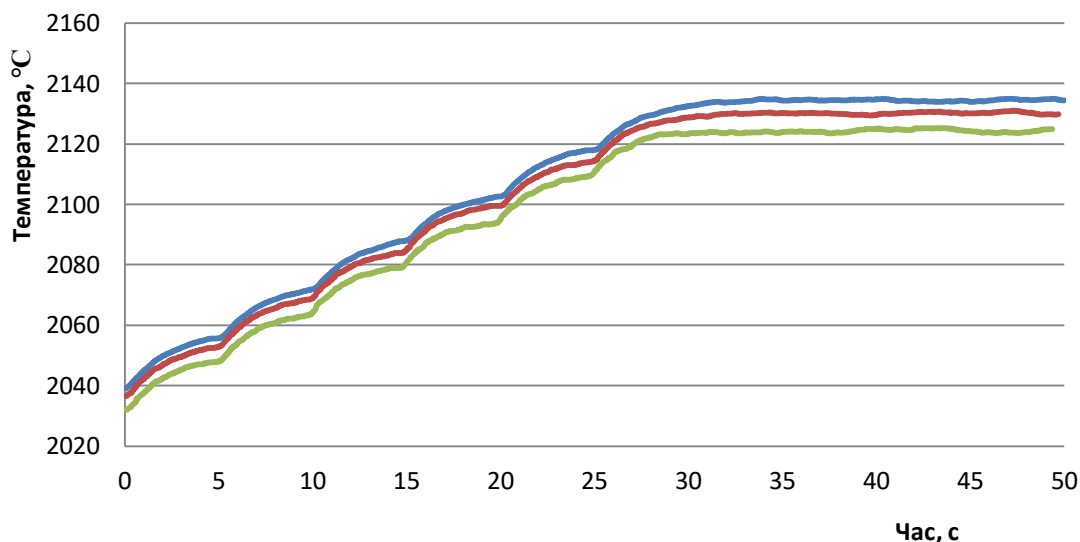
Приклад зміни температури з часом нагрівання зразків різної пористості у вказаних точках показано на рисунку 3.7 та 3.8.

Із рисунку 3.7 видно, що за однакової потужності нагріву найвищої температури досягає зразок з найбільшою пористістю (41%), що в першу чергу пов'язано зі зменшенням теплопровідності більш пористого зразка (рис. 3.4). Варто також зазначити, що, попри різну пористість, великої різниці в динаміці нагріву не спостерігається.

Рисунки 3.6 та 3.8 демонструють, що температурний максимум на зразку знаходиться на конкретній грані модельного зразка, а в умовах обертання динаміка нагріву тієї чи іншої грані має синусоїдний характер, що очевидно.

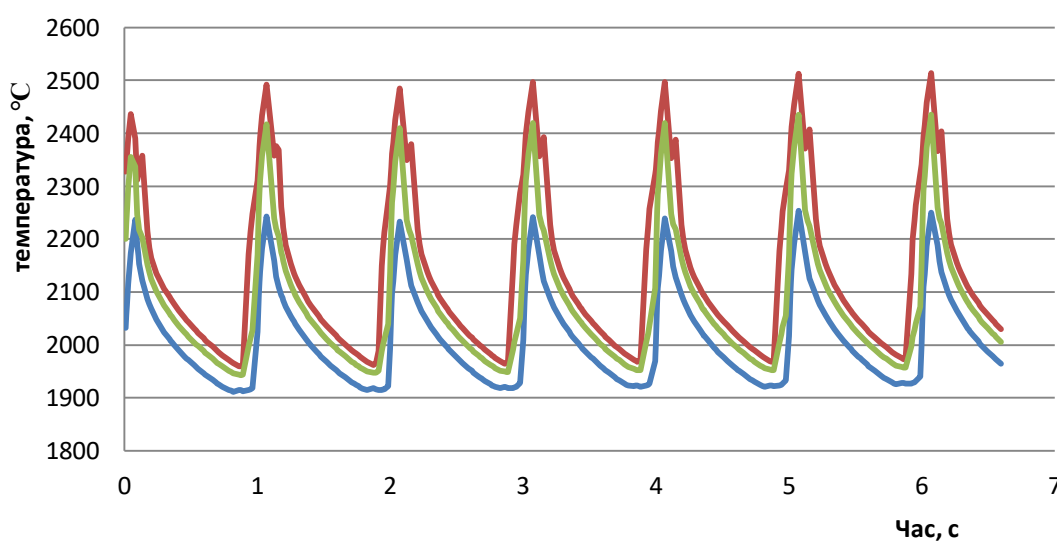
Даний обчислювальний експеримент дозволяє стверджувати, що температура (в кожній контрольній точці) зростає зі зростанням потужності нагрівання. При цьому витримка зразка протягом деякого часу при сталій потужності променя не призводить до підвищення температури, що, ймовірно, пов'язано з тим, що тепловий баланс системи в такому випадку знаходиться в рівновазі: кількість енергії, підведена електронним променем, дорівнює сумі

усіх теплових втрат зразка – відведення випромінюванням та внаслідок умовної конвекції. Такий результат виглядає досить закономірним, оскільки час експерименту є недостатнім для суттєвої зміни зовнішніх теплових умов – нагрівання масивної плити та стінок камери.



Пористість зразків: 41% – синя крива, 36% – червона крива та 31% – зелена крива

Рисунок 3.7 – Зміна температури центру зразків при силі струму 20 мА за тривалості нагріву 320 с



мінімуми синя крива, середнє зелена крива, максимуми червона крива

Рисунок 3.8 – Зміна розподілу температури на окремій грані зразка з пористістю 20%

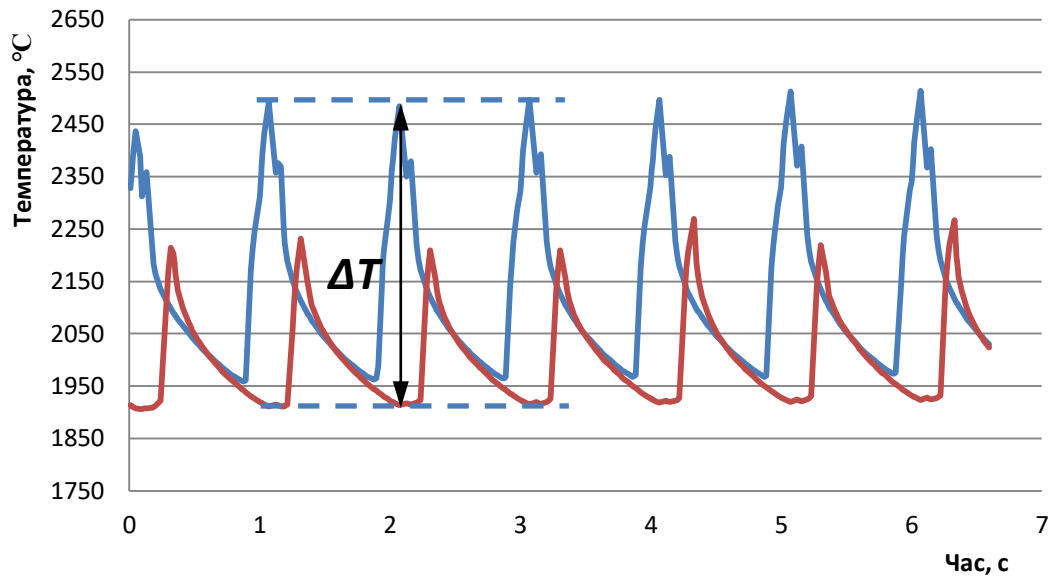
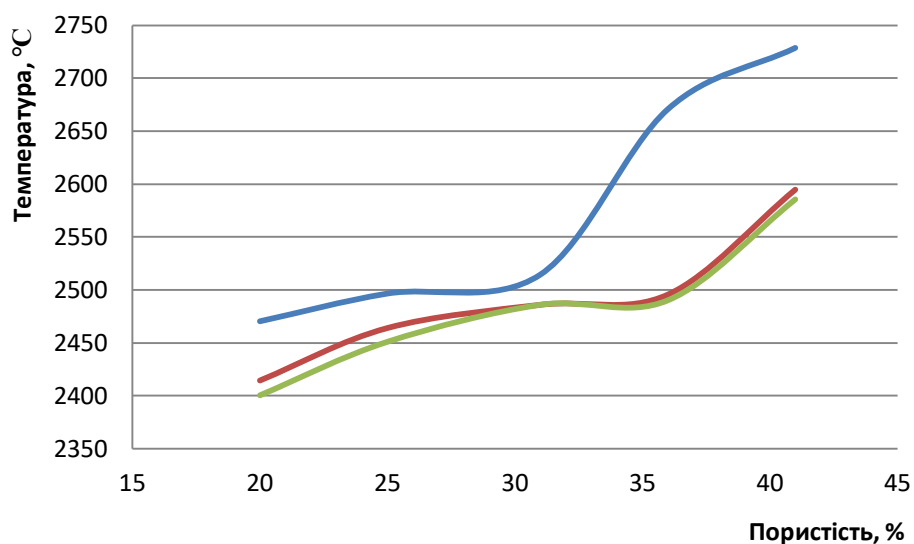


Рисунок 3.9 – Поточне значення різниці температури між точками, які формують максимальний градієнт

Максимальні значення температури, які досягаються на поверхні зразка, залежать також від пористості. Характер їх залежності показано на рисунку 3.10.



Зелена крива – режим нагрівання до 12 мА; червона крива – режим нагрівання до 13 мА; синя крива – режим нагрівання до 20 мА

Рисунок 3.10 – Залежність максимальної температури поверхні зразка від пористості

З рисунку 3.10 видно різкий підйом максимальної температури поверхні зразка після близько 2500 °С, що можна пояснити характером залежності питомої теплопровідності чистого молібдену від температури (рис. 1.3).

Вплив пористості на максимальну температуру можна пояснити різницею тепловідведення по зразку: чим вище значення теплопровідності, тим більше тепла відводиться зразком, і, відповідно, знижується максимальна температура поверхні (рис. 3.7).

Відповідно до рис. 3.7, максимальна температура центру зразка коливається в межах 2100-2200 °С та досягається вже після 30 с нагріву. Причому, залежність температури нагріву від часу має ступінчатий характер, пов'язаний із ступінчатою зміною потужності електронного променя.

По мірі нагрівання, формуються численні градієнти температури всередині пресовки, оскільки зразок обертається. На рис. 3.9 показано поточне значення градієнту температур під час нагріву зразка із пористістю 20%: точка А в серединному перетині, на грані 0, точка В на периферійному зрізі, на грані, що знаходиться на 270° від грані 0 у напрямку обертання.

Також приклад зміни градієнта температур від потужності променя для зразків з різною пористістю продемонстровано на рис. 3.10. Звідси бачимо, що при підвищенні потужності променя (фактично збільшення сили струму) максимальна температура зразка зростає. Причому дана залежність має нелінійний характер, що може бути пов'язано з одночасною роботою декількох нелінійних механізмів: нелінійна залежність теплопровідності молібдену від температури, нелінійна залежність потужності теплообміну випромінюванням від температури, залежність теплопровідності і питомої теплоємності (одиниці об'єму) від пористості.

Градієнти температур збільшуються з ростом пористості, що є наслідком меншого значення питомої теплопровідності, а також з ростом потужності нагрівання, що пов'язано з тим, що механізми теплопередачі в зразку поступаються потужності джерела теплової енергії.

Як видно з рисунку 3.11, за температури 2500°С значення градієнта температур на поверхні зразка змінюється нелінійно, хоча присутня загальна

тенденція до збільшення даного показника. Загальне збільшення градієнта з підвищенням пористості можна пояснити тією ж такою зміною теплопровідності зразків молібдену: зі зростанням пористості теплопровідність знижується (хоч і не лінійно, оскільки присутня певна невизначеність), тому нагрів стає менш рівномірним на поверхні зразка.

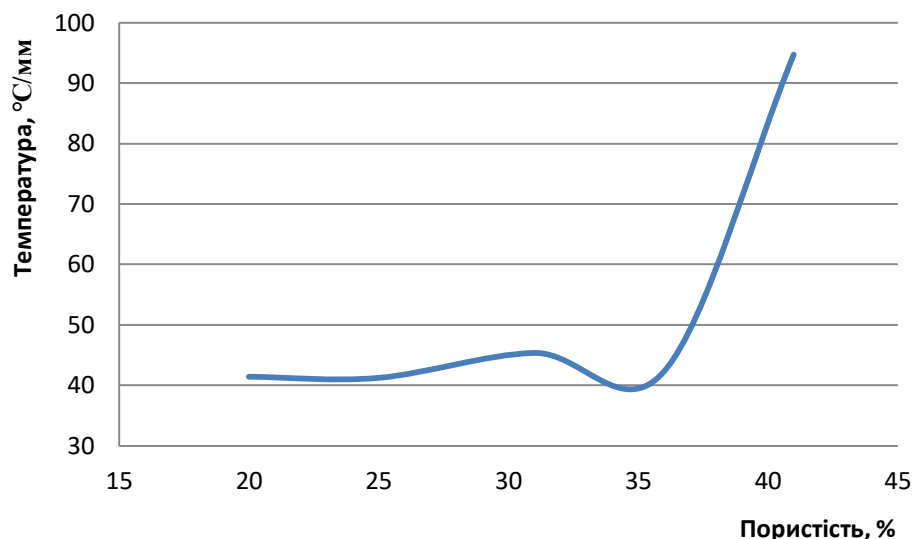


Рисунок 3.11 – Залежність градієнта температури на поверхні зразка від пористості за температури 2500°C

Також варто зазначити, що максимальний температурний градієнт формується якраз по сусідніх гранях призми (видно з рис. 3.6): від максимальної до мінімальної температури, що може бути пов'язано з обертанням зразка, оскільки під час обертання одна з граней направлена в протилежну сторону відносно електронного променя та проходить максимальну відстань відносно точки нагріву, що дозволяє їй «охолонути». Максимальний розрахований градієнт температур для зразка з пористістю 20% та силою струму 20 мА, складає близько 600° на зразок, або близько 60 °C/мм для звичайного режиму нагріву, а з використанням процесу обертання зразка цей показник знижується до 40 °C/мм.

Отже, порівнюючи звичайний нагрів пористих зразків молібдену з нагрівом в умовах обертання, варто сказати, що при дії електронного променя на різні площини зразка рівномірно (оскільки маємо сталу швидкість

обертання), спостерігається зниження градієнта температур, а також рівномірніший розподіл температур. Такі переваги дозволяють спрогнозувати досить широке використання даного способу нагріву в практичній площині.

## 4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 4.1 Науково-технічна актуальність ДР

Впровадження електронно-променевої технології є одним з вирішальних факторів прискорення науково-технічного прогресу у енергетичному, важкому і транспортному машинобудуванні, літакобудуванні, медицині, приладобудуванні.

Розвиток і вдосконалення електронно-променевих пристроїв на шляху підвищення ступеню автоматизації, потужності і стабільності енергетичних, просторово-геометричних характеристик електронних пучків, довговічності приладів і пристроїв електронної техніки призводить до розвитку технологій виготовлення матеріалів з особливими властивостями.

Молибден має високе значення температури плавлення і високу жаростійкість, що забезпечує стабільність його роботи в агресивних середовищах, при низьких та високих температурах і тому знаходить застосування в різних галузях науки і техніки. Установки технологічного призначення широко розвиваються для забезпечення можливостей обробки та пришвидшення виробництва молибдену.

Використання молибдену надає можливість позбутися ряду ефектів нестабільності, а виготовлення молибдену методом електронно-променевого спікання забезпечує оптимальну пористість, геометрію і хімічну однорідність виробів, а також підвищити параметри виробництва за рахунок використання високоефективного електронного променя для виготовлення молибденових виробів.

В галузі літакобудування молибден широко застосовується такими компаніями як ДП «АНТОНОВ», ПАТ «Мотор Січ» та ДП «Дослідний завод зварювальних матеріалів Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України», а розвиток технології електронно-променевого спікання молибдену дозволить збільшити ефективність виробництва за рахунок зменшення часу та витрат на виготовлення деталей з молибдену.

Тому дослідження технології і закономірностей отримання молибдену методом електронно-променевого спікання є досить важливим для розвитку

науки та техніки в цілому.

## **4.2 Мета і завдання дипломної роботи**

Метою даної роботи є вивчення закономірностей отримання виробів на основі молібдену методом електронно-променевого спікання; скінченно-елементне моделювання процесу теплопередачі у пористих молібденових зразках під час спікання в умовах обертання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- а) дослідити закономірності ущільнення під час пресування порошку молібдену;
- б) дослідити закономірності ущільнення під час електронно-променевого спікання пористих заготовок з молібдену;
- в) дослідити мікроструктури одержаних зразків;
- г) методом моделювання встановити вплив пористості молібденових пресовок на теплопередачу.

## **4.3 Розрахунок планової собівартості проведення дослідження**

Розрахунок усіх витрат на науково-дослідну роботу, пов'язаних з виконанням даної теми, дає можливість встановити планову кошторисну вартість даної роботи. Планування забезпечує зниження трудових і матеріальних витрат з метою отримання найкращих результатів за найменших витрат.

Планова собівартість визначається за наступними статтями витрат:

- а) заробітна плата науково-дослідницького персоналу;
- б) єдиний соціальний внесок;
- в) вартість спеціального обладнання для виконання МД;
- г) вартість матеріалів, необхідних для проведення МД;
- д) витрати на службові відрядження;
- е) інші прямі невраховані витрати по темі;
- ж) накладні витрати.

### 4.3.1 Витрати на оплату праці

Витрати за цією статтею включають заробітну плату працівників усіх категорій, зайнятих виконанням робіт з даної теми.

Заробітна плата розраховується на основі даних про трудомісткість окремих робіт і посадових окладів виконавців цих робіт. Розрахунок ведеться в людино-днях.

Перелік робіт та їх трудомісткість зведено в таблицю 4.1.

Денні зарплати визначаються як відношення місячного окладу до умовного місяця (для НДР з п'ятиденним робочим тижнем складає 21,2 дня).

Перемножуючи середньоденну заробітну плату за кожною категорією виконавців на відповідну планову трудомісткість робіт, розраховується плановий фонд заробітної плати всіх виконавців.

Таблиця 4.1 – Розрахунок трудомісткості виконання НДР

| Етапи НДР               | Трудомісткість людино-днів                               |                                |                   |          |
|-------------------------|--|--------------------------------|-------------------|----------|
|                         | Відповідальний виконавець, старший науковий співробітник | Молодший науковий співробітник | Інженер-дослідник | Лаборант |
| Підготовчий етап        | 6  | 3                              | 5                 | -        |
| Проведення експерименту | 15   | 7                              | 35                | 34       |
| Написання записки       | 7  | -                              | 5                 | -        |

## Продовження таблиці 4.1

|                                       |    |    |    |    |
|---------------------------------------|----|----|----|----|
| Оформлення,<br>перевірка та<br>захист | 5  | -  | 5  | -  |
| Разом                                 | 33 | 10 | 50 | 34 |

Результати розрахунку фонду заробітної плати з даної теми зведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Розрахунок фонду заробітної плати виконавців теми

| Посада   | Трудомісткість<br>людино-днів | Місячний<br>оклад,грн. | Денна<br>заробітна<br>плата,грн. | Сумарна<br>заробітна плата<br>за виконавцями,<br>грн. |
|--|-------------------------------|------------------------|----------------------------------|---|
| Відповідальний<br>виконавець теми,<br>старший науковий<br>співробітник | 33                            | 18262                  | 861,4                            | 28426,7   |
| Молодший<br>науковий<br>співробітник                                   | 10                            | 6245                   | 294,57                           | 2945,7  |
| Інженер-<br>дослідник  | 50                            | 7730                   | 364,62                           | 18231,1   |
| Лаборант   | 30                            | 6245                   | 294,57                           | 8837,1  |
| Разом  |                               |                        |                                  | 58440,6   |

**4.3.2 Єдиний соціальний внесок**

Сума єдиного соціального внеску ( $B_C$ ) визначається у відсотках від загального фонду заробітної плати виконавців з теми. Норматив відрахувань необхідно брати в розмірі 22% від загального фонду заробітної плати.

Таким чином, єдиний соціальний внесок складе:

$$B_C = 58440,6 * 0,22 = 12856,93 \text{ грн.}$$

#### 4.3.3 Витрати на матеріали, що використовуються в роботі

Витрати на матеріали, які необхідні для проведення даної НДР, вираховуються з ціни одиниці і загальної кількості використаного матеріалу. Результати розрахунків зведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Вартість матеріалів, необхідних для виконання НДР

| Найменування матеріалів | Стандарт        | Одиниця виміру | Кількість | Ціна за одиницю, грн. | Сума, грн. |
|-------------------------|-----------------|----------------|-----------|-----------------------|------------|
| Порошок Мо              | ТУ 48-19-316-80 | кг             | 0,1       | 1200                  | 120        |
| Пластифікатор           | -               | кг             | 0,01      | 350                   | 3,5        |
| Разом                   |                 |                |           |                       | 123,5      |

Транспортно-заготівельні витрати складають 10 % від планової вартості використаних матеріалів, тоді загальні витрати по цій статті становлять:

$$B_m(\text{заг}) = 123,5 * 1,1 = 135,85 \text{ грн.}$$

#### 4.3.4 Витрати на спеціальне обладнання та прилади

В роботі використовуються вже існуюче обладнання: лабораторні терези, гідравлічний прес RP-L023, відновлювальна піч Siemens, електронно-променева установка СВ-112.

Спеціальне устаткування для виконання ДР не закуплялось.

#### 4.3.5 Витрати на службові відрядження

Всі роботи проводились безпосередньо в лабораторіях Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря

Сікорського», тому витрати на виробничо-наукові відрядження не передбачені.

#### **4.3.6 Інші прямі невраховані витрати**

Ця стаття поєднує в собі всі витрати на проведення НДР, що не увійшли до попередніх статей (оплата спеціалістів з інших організацій, оплата консультацій, використання обладнання інших організацій та інше). Під час проведення даної роботи інші прямі невраховані витрати складають 10% від суми врахованих витрат на МД.

$$I_B = (58440,6 + 12856,93 + 135,85) * 0,1 = 7143,34 \text{ грн.}$$

#### **4.3.7 Накладні витрати**

До накладних витрат ( $H_B$ ) відносять:

- а) заробітна плата адміністративна – управлінського, господарського та обслуговуючого персоналу з єдиним соціальним внеском;
- б) витрати на придбання експериментального спеціального обладнання та приладів;
- в) витрати по охороні праці та на техніку безпеки;
- г) утримання та експлуатація виробничих площ, приладів, устаткування та установок;
- д) витрати на воєнізовану охорону;
- ж) інші загальногосподарські та дослідницькі витрати.

За нормативами для НТУУ «КПІ» величина накладних витрат складає 20% від суми всіх прямих витрат по темі.

$$H_B = (58440,6 + 12856,93 + 135,85 + 7143,34) * 0,20 = 15715,34 \text{ грн.}$$

#### **4.4 Планова кошторисна вартість ДР**

Зроблені розрахунки дозволяють визначити загальну планову

кошторисну вартість виконання ДР. Плановий кошторис витрат по темі досліджень наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Планова кошторисна вартість ДР по темі

| Назва статей                             | Умовне позначення | Сума, грн. | Сума, % | Обґрунтування                         |
|--|-------------------|------------|---------|---------------------------------------|
| Заробітна плата виконавців теми          | ЗП                | 58440,6    | 63,1    | За розрахунками                       |
| Єдиний соціальний внесок                 | В <sub>С</sub>    | 12856,93   | 13,9    | 22% від ЗП                            |
| Вартість основних матеріалів             | В <sub>М</sub>    | 135,85     | 0,2     | За розрахунками                       |
| Вартість спец. обладнання                | В <sub>ОБ</sub>   | -          | -       | Не планується                         |
| Витрати на послуги сторонніх організацій | В <sub>СО</sub>   | -          | -       | Не планується                         |
| Інші прямі невраховані витрати           | І <sub>В</sub>    | 7143,34    | 6,1     | 10% від суми врахованих прямих витрат |
| Накладні витрати                         | Н <sub>В</sub>    | 15715,34   | 16,7    | 20% від усіх прямих витрат по темі    |
| Разом                                    | В <sub>ДР</sub>   | 94292,06   | 100     | Сума всіх попередніх статей           |

#### 4.5 Економічна ефективність ДР

Дослідження, що проводились в даній роботі є складовою частиною комплексної задачі, яка вирішується декількома організаціями. У зв'язку з цим, визначення річного економічного ефекту за допомогою прямих методів розрахунку не виконується. В цьому випадку використовується бальна система оцінки економічної ефективності за наступними показниками:

- а) важливість розробки ( $K_1$ );
- б) можливість використання результатів розробки ( $K_2$ );

в) теоретичне значення та рівень новизни ( $K_3$ );

г) складність розробки ( $K_4$ ).

Шкала для оцінки важливості розробки  $K_1$ :

а) ініціативна робота, що не є ані частиною комплексної програми, ані завданням директивних органів – 1 бал;

б) робота, яка виконується за договором про науково-технічні допомоги – 3 бали;

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

г) робота представляє собою частину відомчої комплексної програми – 7 балів;

д) робота виконується як частина міжнародної комплексної програми – 8 балів.

Шкала для оцінки можливості використання результатів розробки  $K_2$ :

а) результати розробок можуть бути використані в даному підрозділі – 1 бал;

б) результати розробки можуть бути використані в даній організації – 3 бали;

в) результати розробки можуть бути використані в багатьох організаціях – 5 балів;

г) результати розробки можуть бути використані в масштабах галузі – 8 балів;

д) результати розробки можуть бути використані в багатьох різноманітних галузях – 10 балів.

Шкала для оцінки теоретичної значимості і рівня нововведення  $K_3$ :

а) аналіз, узагальнення і класифікація відомої інформації, подібні результати були відомі в досліджуваній області – 2 бали;

б) одержання нової інформації, що доповнить подання про суттєвість досліджуваних процесів, не відомої в дослідницькій області – 3 бали;

в) одержання нової інформації, яка частково міняє уявлення про суттєвість дослідження процесів, не відомих раніше – 5 балів;

г) створення нових теорій, методик і т. п. – 6 балів;

д) одержання інформації, що служить формуванню напрямків, не відомих раніше – 6 балів.

Шкала для оцінки показників складності дослідження  $K_4$ :

- а) робота виконується одним підрозділом, затрати менше 20 тис. грн. 1;
- б) робота виконується одним підрозділом, затрати від 20 до 100 тис. грн. – 3;
- в) робота виконується одним підрозділом, затрати від 100 до 200 тис. грн. – 5;
- г) робота виконується з урахуванням багатьох підрозділів, затрати від 200 тис. грн. до 1 млн. грн. – 7;
- д) робота виконується декількома організаціями, затрати понад 1 млн. грн. – 9.

Бальна оцінка ефективності, згідно даної роботи, наведена в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Бальна оцінка ефективності дипломної роботи

| Показник оцінки ефективності НДР                    | Умовне позначення показника | Характеристики даної роботи  | Кількість балів |
|---|-----------------------------|--|-----------------|
| 1. Важливість розробки                              | $K_1$                       | робота представляє собою частину відомчої комплексної програми   | 7               |
| 2. Можливість використання результатів              | $K_2$                       | результати розробки можуть бути використані в багатьох організаціях  | 5               |
| 3. Теоретична значимість та рівень новизни розробки | $K_3$                       | одержання нової інформації, що доповнить подання про суттєвість досліджуваних процесів, не відомої в дослідницькій області | 3               |
| 4. Складність дослідження                           | $K_4$                       | роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 до 100 тис. гривень  | 3               |

Загальна оцінка вираховується перемноженням коефіцієнтів  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ . Умовний ефект на кожен бал становить 500 грн.

- а)  $K_1$  – коефіцієнт важливості розробки;
- б)  $K_2$  – коефіцієнт можливості використання результатів розробки;
- в)  $K_3$  – коефіцієнт теоретичного значення та рівня новизни;
- г)  $K_4$  – коефіцієнт складності розробки.

$$E_{0y} = 7 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 3 = 157600 \text{ грн}$$

Умовний ефект НДР:

$$E_{y\text{НДР}} = E_{0y} - E_n \cdot Z_{\text{НДР}},$$

де  $E_{0y}$  – умовний оціночний ефект;

$Z_{\text{НДР}}$  – сумарні витрати на дослідницьку роботу.

$E_n$  – коефіцієнт ефективності.

$$E_{y\text{НДР}} = 157600 - 0,25 \cdot 94292,06 = 134026,98 \text{ грн.}$$

Тоді коефіцієнт умовної економічної ефективності:

$$E = E_{y\text{НДР}} / Z_{\text{НДР}},$$

де  $E_{y\text{НДР}}$  – умовний ефект НДР;

$Z_{\text{НДР}}$  – сумарні затрати на НДР.

$$E = 134026,98 / 94292,06 = 1,421$$

Коефіцієнт умовної ефективності роботи дорівнює 1,421, що свідчить про доцільність її виконання, оскільки маємо значення більше одиниці.

Розрахований показник свідчить про доцільність виконання НДР по даній темі.

#### **4.6 Висновки**

Для розробки організаційно-економічного розділу ДР було обґрунтовано науково-технічну актуальність виконання досліджень по даній темі. Розраховано планово-кошторисну собівартість проведення НДР з урахуванням витрат всіх видів ресурсів – вона становить 94292,06 грн , а також розраховано показник умовної економічної ефективності проведення роботи за бальною шкалою оцінювання. Показник ефективності в нашому випадку становить 1,421, що свідчить про доцільність виконання даної роботи.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці та безпека життєдіяльності за сучасних умов є однією з найважливіших галузей знань у будь-якому виробництві, оскільки збереження життя та здоров'я людини є ключовою аксіомою для розвитку промисловості та суспільства в цілому.

У даному розділі основним завданням є аналіз виробничих умов та факторів, котрі можуть призвести до травматизму в процесі електронно-променевого спікання пористих зразків молібдену та в процесі підготовки цих зразків.

Як відомо, пил молібдену та його сполук, таких як триокис молібдену і різних молібдатів, що розчиняються у воді, можуть мати незначну токсичність для людини при вдиханні або потраплянні всередину організму. Внаслідок цього існує ризик накопичення молібдену в організмі працівників видобувної промисловості та на збагаченні руд, в хімічній промисловості, а також металургійній промисловості.

Оскільки робота з тугоплавкими металами є досить небезпечною, тому дотримання вимог безпеки – запорука успіху при проведенні експериментів. На кожному етапі виконання експерименту існують різні фактори ризику, такі як: шкідливий вплив на слизові оболонки та легеневі тканини; опіки різного ступеню важкості; травми при роботі на пресах; ураження електричним струмом; особливо небезпечно отримати різного роду травми під час роботи з електронним променем.

Наказ від 28.12.2017 № 2072 Про затвердження вимог безпеки та захисту здоров'я під час використання виробничого обладнання працівниками було прийнято як раз для того, щоб відрегулювати використання обладнання на виробництві та для охорони праці співробітників [24].

## 5.1 Характеристика об'єкту (комплексу) та умови його експлуатації

Технологічний процес електронно-променевого спікання та підготовки зразків молібдену відбувається за допомогою такого обладнання:

- а) прес RP-L023;
- б) трубчаста відновлювальна піч Siemens;
- в) електронно-променева установка СВ-112.

Таблиця 5.1 – Специфікація технологічного обладнання та оснащення вибраного приміщення

| № п.п. | Найменування                          | Розміри Д/Ш/В                            | Основні характеристики   | Кількість | Позиція на рисунку |
|--------|---------------------------------------|--|--|-----------|--------------------|
| 1      | Прес RP-L023                          | 810x550x1670                             | тиск до 1,2 ГПа  | 1         | 1                  |
| 2      | Трубчаста відновлювальна піч Siemens  | 1000x400x1500<br>Діаметр труби<br>20 мм; | Температура нагріву до 1400°C;<br>електричне живлення від трифазної мережі 380В. | 1         | 2                  |
| 3      | Електронно-променева установка СВ-112 | 2140x1600x1700                           | Електроживлення 380В.  | 1         | 3                  |

Гідравлічний прес RP-L023 під час пресування досягає тиску до 1,2 ГПа. За такого високого тиску існує можливість розколу прес-форми та нанесення тяжких тілесних ушкоджень. Для унеможливлення отримання травм під час пресування на робочу частину преса накладений та закріплений металевий заслін. Оскільки прес механічний, для

запобігання потрапляння частин волосся чи одягу до рухомих частин, варто використовувати спеціальний одяг. Використання металевого кожуха закриває механічні частини, що рухаються і створює безпечні умови для роботи працівника.

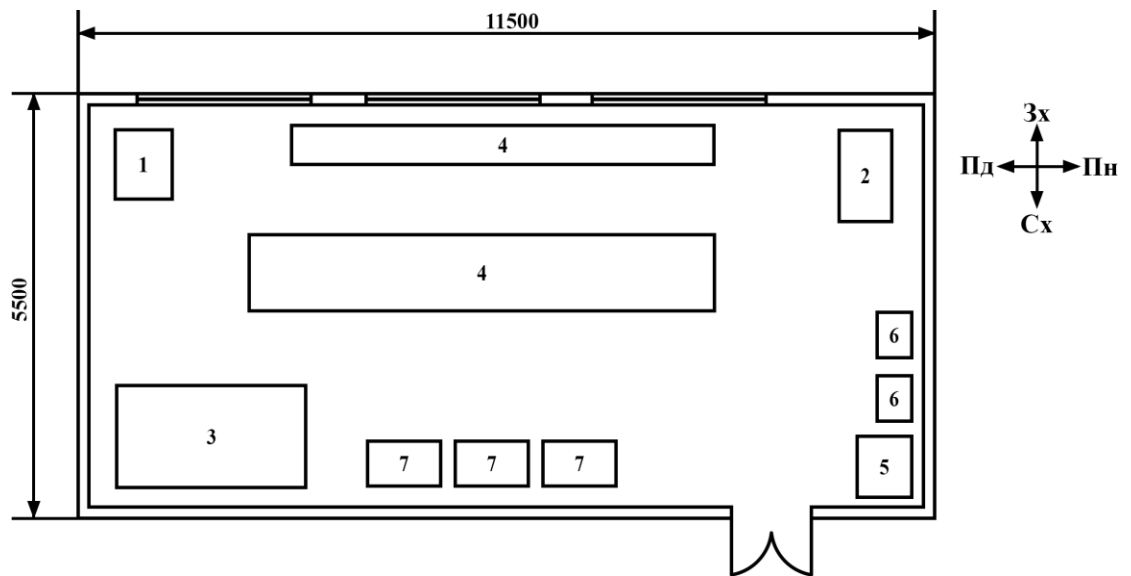
Відновлювальний відпал проводився у трубчастій електричній печі для відновлення металевих порошків та виробів з них виробництва компанії Siemens. Робоча температура печі лежить у межах від 200 °С до 1400 °С, під час виконання НДР проводили відпал за трьох різних температур, а саме 750 °С, 950 °С та 1100 °С, за високих температур існує небезпека інтенсивного теплового випромінювання, також є значна небезпека опіків. У виробничих умовах з високою температурою і вологістю навколишнього середовища тепловіддача утруднена, організм людини може «перегрітися». Таке явище називають гіпертермією. Унаслідок перегрівання організму і втрати ним великої кількості рідини з потом можливе порушення водно-електролітного обміну, що проявляється судомною хворобою. Тому для захисту використовувалися захисні екрани для печей, а також спеціальний одяг згідно з ДСТУ EN 420-2017 [25], а також окуляри та захисні килимки. Піч має електричне живлення від трифазної мережі 380В. Для створення безпечних умов роботи обладнання заземлено та оснащено спеціальними табличками та попереджувальними написами. Дана установка відповідає вимогам ПУЕ-2017 [26].

Під час виконання даної НДР спікання проводилося на установці СВ-112, яка комплектується стаціонарною гарматою потужністю до 15 кВт, двокоординатним столом X–X і Y–Y, переміщення 200 мм. Оскільки установка модифікована захисним склом, то дія випромінювання зводиться до мінімуму, за необхідності є можливість додати перерви у роботі оператора електронного променя. Під час роботи за установкою СВ-112 існує небезпека ураження електричним струмом, оскільки для роботи електронного променя використовуються струми високої потужності. Установка СВ-112 обладнана пристроєм захисного вимикання. Електронний промінь має заземлення та

програмне забезпечення, що виключає можливість прийняття небезпечних рішень, пов'язаних з режимами роботи установки.

Весь персонал, що обслуговує спеціальне обладнання періодично проходить інструктаж про безпеку, пов'язану з роботою з установками, та способи надання першої до медичної допомоги [27].

План приміщення, в якому проводиться лабораторне дослідження зображений на рисунку 5.1



1 – гідравлічний прес RP-L023; 2 – трубчаста відновлювальна піч Siemens; 3 – електронно-променева установка СВ-112; 4 – робочий стіл; 5 – сейф; 6 – умивальник; 7 – шафа

Рисунок 5.1 – План науково-дослідної лабораторії

Відповідно основним вимогам до будівель виробничого призначення, висота виробничих приміщень повинна бути не менше 3,2 м, а об'єм і площа –  $15 \text{ м}^3$  та  $4,5 \text{ м}^2$  відповідно на кожного працівника [27].

У даному випадку площа приміщення складає  $S = 11,5 \cdot 5,5 = 63,25 \text{ м}^2$ , а об'єм приміщення  $V = 11,5 \cdot 5,5 \cdot 4,5 = 284,625 \text{ м}^3$ . Під час досліджень в лабораторії працює 4 чоловіки, звідки ми отримуємо, що площа на одну людину складає  $S_{\text{ч}} = 63,25/4 = 15,81 \text{ м}^2/\text{чол.}$ , а об'єм –  $V_{\text{ч}} = 284,625/4 = 71,16 \text{ м}^3/\text{чол.}$

Таблиця 5.2 – Реальні та нормативні значення приміщення і розміщення технологічного обладнання

| № | Параметр приміщення       | Реальне значення лабораторії | Нормативні значення [27] |
|---|---------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 1 | Площа на 1-го працюючого  | 15,81 м <sup>2</sup>         | 4,5 м <sup>2</sup>       |
| 2 | Об'єм на 1-го працюючого  | 71,16 м <sup>3</sup>         | 15 м <sup>3</sup>        |
| 3 | Мінімальна ширина проходу | 2,5 м                        | 1,5 м                    |

## 5.2 Оцінка ключових небезпечних та шкідливих виробничих факторів і розроблення заходів поліпшення умов праці при виконанні роботи

Технологічні операції, що виконувалися під час проведення даної дипломної роботи несуть у собі ту чи іншу небезпеку, пов'язану з процесами підготовки та спікання зразків молібдену. Розглянемо більш детально процес отримання молібдену методом електронно-променевого спікання згідно технологічної схеми (рис. 2.1).

Основні процеси, що несуть потенційну небезпеку при виконанні ДР:

- а) дозування порошку;
- б) змішування порошку з пластифікатором;
- в) пресування заготовок;
- г) відпал;
- д) спікання електронним променем.

Під час дозування порошку молібдену повинні передбачатися заходи, що виключають потрапляння часток порошку в органи дихання, пил молібдену та його з'єднань, таких як триокис молібдену і молібдатів, що розчинюються у воді, можуть мати незначну токсичність під час вдихання або потрапляння всередину організму. Лабораторні тести свідчать, що такий молібден, у порівнянні з багатьма важкими металами, має відносно низьку токсичність. Гостра токсичність у людей малоімовірна, оскільки доза для ураження повинна

бути винятково великою. Є ризик накопичення молібдену в організмах працюючих у видобувній промисловості та на збагаченні руд, в хімічній промисловості, але досі не було повідомлень про такі ураження. Гранично допустима концентрація молібдену  $3,5 \text{ мг/м}^3$  [27].

Далі розглянемо небезпеки під час змішування порошку молібдену із пластифікатором 1-відсотковим розчином синтетичного каучуку в бензині.

Замішування з пластифікатором необхідно для підвищення формованості порошку, також пластифікатор виступає у ролі додаткового відновника. У якості пластифікатора було використано розчин синтетичного каучуку в бензині. Пари бензину, що виникають під час проведення операцій є токсичним і викликають небезпеку виникнення пожежі. Бензини, будучи токсичними матеріалами, здатні проникати в організм через органи дихання, шкіру і травний тракт. Концентрація парів бензину в повітрі не повинна перевищувати  $0,3 \text{ мг/л}$ . Під час нетривалого вдихання повітря, що містить бензин в кількості від  $5 \text{ мг/л}$  до  $10 \text{ мг/л}$ , настає гостре отруєння, характерними ознаками якого є головний біль, неприємні відчуття в горлі, кашель, подразнення слизової оболонки носа і очей, нестійка хода, запаморочення, збудження. Під час видалення постраждалих з отруєної атмосфери через деякий час більшість цих явищ проходить [24].

Пресування – технологічна операція, що полягає у формуванні порошку під дією тиску. Під час проведення дослідження використовувався ручний механічний гідравлічний прес. Небезпека проведення пресування полягає у тому, що за значних тисків формування можливе руйнування рухомого пуансону чи матриці прес форми. Під великим тиском зруйновані частини прес форми досягають значних швидкостей та наносять ушкодження оператору преса. Також небезпека рухомих частин полягає у можливості потрапляння частин одягу чи волосся у незакриті механізми пресу.

Процес відпалу полягає у високотемпературній обробці отриманих зразків з метою видалення кисню. Під час цієї операції співробітник піддається впливу інфрачервоного випромінювання, а також дії високих температур. Довготривалий вплив інфрачервоного випромінювання досить шкідливий для

здоров'я людини та може призвести до ушкоджень шкіри, поверхневих опіків, а також до втрати свідомості при значних потужностях випромінювання.

Фінальною операцією отримання зразків молібдену є спікання: у НДР спікання проводилось електронно-променевим методом на установці СВ-112. Особливістю спікання електронним променем є те, що прогрівання металу йде не з поверхні, а з поверхневого шару товщиною, рівною довжині вільного пробігу електрона. Зона нагрівання, в залежності від ступеня фокусування, може змінюватися у сучасних зварювальних установках від 0,05 мм до 5 мм. Відповідно до електронно-променевої технології, можуть виникати такі шкідливі виробничі фактори як: сильне випромінювання в оптичному діапазоні, видиме ультрафіолетове та іонізуюче випромінювання, а також існує небезпека ураження електричним струмом, оскільки під час спікання використовується значна кількість електроенергії.

### **5.2.1 Оцінка мікроклімату та повітря навколишнього середовища**

Оскільки в процесі отримання молібдену методом електронно-променевого спікання, зокрема на етапі відновлення, використовується трубчаста відновлювальна піч Siemens, що працювала за температур 750-1100°C – то виникає суттєвий вплив даної установки на мікроклімат лабораторії. Мікроклімат підтримується за такими параметрами: в холодний період року температура повітря становить 17- 20°C, в теплий – 20-22°C; вологість у межах 40-60%; швидкість вітру не більше 0,2 м/с.

У виробничих умовах з високою температурою і вологістю навколишнього середовища організм людини може «перегрітись». Таке явище називають гіпертермією. Унаслідок перегрівання організму і втрати ним великої кількості рідини з потом, можливе порушення водно-електролітного обміну, що проявляється судомною хворобою. Тому для захисту використовувалися захисні екрани для печей, а також спеціальний одяг згідно з ДСТУ EN 420-2017 [25], а також окуляри, та захисні килимки.

Один з небезпечних факторів – пил, що виникає на етапі змішування пластифікатора з порошком молібдену. Вдихання пилу молібдену викликає

подразнення очей, слизистих оболонок носу, горла, що в свою чергу може призвести до тяжких легеневих хвороб.

Для попередження потрапляння шкідливих речовин в організм та отруєння шкідливими речовинами, використовується витяжна шафа, яка працює безпосередньо біля джерел випарів. Лабораторія добре провітрюється. Використовуються захисні скла (окуляри), спецодяг і досить надійні респіратори, що дозволяють знизити рівень контакту з сухими інгредієнтами, котрі містять молібден. Для додаткового захисту під час проведення даної технологічної операції використовувалися лабораторні ситата керамічні ступки, які не створюють додаткової небезпеки.

### **5.2.2 Освітленість**

Відповідно до ДБН В.2.5.28-2006 «Природне та штучне освітлення» [28] в нашій лабораторії спеціальне освітлювальне обладнання не потрібне.

Для комфортної роботи в цьому приміщенні використовується природне та штучне освітлення.

### **5.2.3 Шум та вібрація**

На етапі підготовки пресовок молібдену, присутня операція пресування, де, відповідно до технологічної схеми, використовується гідравлічний прес. Даний прес не створює додаткових вібрацій та шуму, що можуть нашкодити здоров'ю людини, оскільки, завдяки своїм конструктивним особливостям, працює за рахунок фізичної сили людини-оператора.

### **5.2.4 Виробничі випромінювання**

Під час відпалу співробітник піддається впливу інфрачервоного випромінювання. При тривалому перебуванні в зоні ІЧ випромінювань відбу-

вається порушення теплового балансу в організмі. Порушується робота терморегулюючого апарату, посилюється діяльність серцево-судинної і дихальної систем, потовиділення, відбувається втрата потрібних організму солей [24].

Для запобігання шкідливому впливу, гарячі поверхні екрановані, а співробітники мають відповідний захисний одяг: маски захисні з прозорим екраном, окуляри захисні козиркові з світлофільтрами, повсякденний костюм, каска з полікарбонату. Відповідно до технологічної схеми, в даній роботі використовується електронно-променева технологія для спікання зразків молібдену. Дана технологія може створювати такі шкідливі виробничі фактори як: видиме ультрафіолетове та іонізуюче випромінювання в оптичному діапазоні, ризик ураження електричним струмом. Оскільки установка модифікована захисним склом, то дія випромінювання зводиться до мінімуму, за необхідності є можливість додати перерви у роботі оператора електронного променя.

### **5.3 Електробезпека**

У лабораторії використовується струм напругою 220 В для живлення трубчастої відновлювальної печі Siemens і струм напругою 380 В для живлення електронно-променевої установки СВ-112.

Під час роботи за установкою СВ-112 існує небезпека ураження електричним струмом, оскільки для роботи електронного променя використовуються струми високої потужності. Електробезпека в даному випадку є вкрай важливою, тому що від цього напряму залежить здоров'я або навіть життя оператора. Установка СВ-112 обладнана пристроєм захисного вимикання. Електронний промінь має заземлення та програмне забезпечення, що виключає можливість прийняття небезпечних рішень пов'язаних з режимами роботи установки.

Також установка СВ-112 обладнана пристроєм захисного вимикання – високонадійною швидкодіючою системою захисту, яка застосовується в електроустановках, які потребують високого рівня безпеки. Струмopовідні

кабелі установки ізольовані по всій довжині та захищені від механічних ушкоджень та екрановані, що частково запобігає електромагнітному випромінюванню. За способом захисту людини від ураження електричним струмом установка СВ-112 відносить до I класу електротехнічних виробів, що мають робочу ізоляцію та елемент для заземлення. Установка має провід для приєднання до джерела живлення, а також має заземлюючу жилу і вилку із заземлюючим контактом.

До організаційних методів захисту належить наявність електрика – людини, що раз на пів року перевіряє проводку.

Варто додати, що увесь персонал, що обслуговує спеціальне обладнання періодично проходить інструктаж про безпеку, пов'язану з роботою з установками, та способи надання першої до медичної допомоги. Також біля кожної установки прикріплений відповідний плакат з інструкцією та технікою безпеки.

#### **5.4 Пожежна безпека**

Посилаючись на ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» [29], науково-дослідницька лабораторія, у якій проводилась НДР належить до категорії Б, відповідно до характеристик речовин і матеріалів, що знаходяться у приміщенні (горючий пил, волокна, легкозаймисті рідини з температурою спалаху більше 28°C, горючі рідини (ГР)) в такій кількості, що можуть утворювати вибухонебезпечні пилоповітряні або пароповітряні суміші, у разі займання яких розвивається розрахунковий надлишковий тиск вибуху у приміщенні, що перевищує 5 кПа.

У якості пластифікатора було використано розчин синтетичного каучуку в бензині. Пари бензину, що виникають під час проведення операцій є токсичним і викликають основну небезпеку виникнення пожежі. Також однією з причин виникнення пожежної небезпеки може бути коротке замикання та перегрів установок.

Для запобігання займання легкозаймистих матеріалів є декілька правил їх

зберігання та використання під час проведення експериментів: при зберіганні застосовані заходи проти забруднення вибухонебезпечних речовин пилом, що може служити причиною вибуху; матеріали зберігаються в добре закупорених скляних та металевих судинах в прохолодному темному місці; не допускається спільне зберігання з кислотами, лугами, сірчаною та азотною кислотами, з деревиною та іншими речовинами органічного походження.

З метою запобігання виникненню та ліквідації можливих пожеж в лабораторії передбачені вогнегасники типу ОУ-5 та пожежні стенди.

Детально розглянувши технологічні операції, що були проведені у ході виконання науково-дослідної роботи, з точки зору охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, можна зробити висновок, що всі технологічні операції, проведені відповідно до технологічної схеми, відповідають нормам безпечного проведення експериментів. Спеціальне обладнання має необхідні захисні деталі та елементи: захисні екрани, попереджувальні написи, захисне вимкнення та інше. Робочі місця – ергономічні, є можливість відпочинку та є спеціальні місця для нагляду за обладнанням, об'єму та площі вистачає з розрахунку на кожного працівника. Освітлення лабораторії є достатньо якісним, оскільки використовується комбінування природного та штучного світла. Рівень шуму досить низький, що позитивно впливає на психофізичний стан працівників. Частина процесів повністю автоматизована, оскільки устаткування є досить сучасним та виконане з якісних матеріалів. Самі технологічні процеси побудовані таким чином, що максимально знижують можливий контакт людини із небезпечними речовинами. Загалом проведення НДР повністю відповідало нормам та правилам безпеки життєдіяльності, а також не призвело до травм та нещасних випадків.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання дипломної роботи було досліджено закономірності ущільнення під час пресування порошку молібдену, показано, що збільшення тиску пресування приводить до підвищення відносної щільності зразків, що відповідає теоретичним даним.

Обґрунтовано застосування методу скінченних елементів для розрахунку та моделювання температурного розподілу пористих зразків молібдену. Також одержано коефіцієнти лінійної залежності відносної теплопровідності зразків молібдену від їх пористості. Розроблено та застосовано скінченно-елементну модель формування температурного поля в пористій заготовці під час нагріву електронним променем в умовах обертання.

Відповідно до проведених досліджень показано, що градієнт температурного поля залежить від пористості та потужності нагрівання і може досягати значень більше  $80\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мм}$  для зразків із високою пористістю, особливо застосовуючи високу потужність нагрівання. Окрім цього, встановлено, що в умовах обертання градієнти температури досягають менших значень за тих самих параметрів нагріву, що дозволить застосовувати даний спосіб в практичній площині.

Обґрунтована науково-технічна актуальність виконання досліджень по даній темі. Проаналізовано планово-кошторисну собівартість та економічну ефективність проведення НДР з урахуванням витрат всіх видів ресурсів. Проаналізовані виробничі умови та сформульовані основні вимоги до охорони праці під час виконання НДР за заданою тематикою.

## CONCLUSIONS

As a result of the thesis, the regularities of compaction during pressing of molybdenum powder were investigated, it was shown that an increase in the pressing pressure leads to an increase in the relative density of the samples, which corresponds to the theoretical data.

The application of the finite element method for calculation and modeling of the temperature distribution of porous molybdenum samples is substantiated. The coefficients of linear dependence of the relative thermal conductivity of molybdenum samples on their porosity are also obtained. A finite element model of temperature field formation in a porous workpiece during electron beam heating under rotating conditions is developed and applied.

According to research, it is shown that the temperature field gradient depends on the porosity and heating power and can reach values greater than  $80\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{mm}$  for samples with high porosity, especially using high heating power. In addition, it is found that under conditions of rotation, the temperature gradients reach lower values for the same heating parameters, which will allow the application of this method in the practical plane.

The scientific and technical relevance of research on this topic is substantiated. The planned and estimated cost and economic efficiency of R&D are analyzed, taking into account the costs of all types of resources. The production conditions are analyzed and the main requirements to labor protection during the implementation of research on a given topic are formulated.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (II частина) / Г.О. Андрощук // Наука, технології, інновації. – 2017. – № 2 (2). – С. 29-36.
2. Вольфрам и молибден [Текст] : Пер. с чешского / К. Агте, И. Вацек ; под ред. А. А. Котляра.– Москва ; Ленинград : Энергия, 1964. – 455 с.
3. Зеликман А. Н. Металлургия редких металлов [Текст]: учебник для вузов / А. Н. Зеликман , Б. Г. Коршунов . – Москва : Metallurgy, 1991. – 432 с.
4. Désirée E. Polyak Molybdenum Statistics [Electronic source] / Désirée E. Polyak. – USGS, 2017. – Acces mode: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/molybdenum/mcs-2017-molyb.pdf>. – Date of review: 25.05.2021.
5. Kohmei Halada Decoupling Status of Metal Consumption from Economic Growth [Electronic source] / Kohmei Halada, Masanori Shimada, Kiyoshi Ijima // Materials transactions. – 2008. – №3. – С. 411–418. – Acces mode: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/49/3/49\\_ML200705/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/49/3/49_ML200705/_article). – Date of review: 26.05.2021.
6. Галевский Г. В. Metallurgy of molybdenum [Text]: конспект лекций / Г. В. Галевский, В. В Руднева. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2018. – 52 с.
7. Молибден [Электронный ресурс] // Википедия: свободная энциклопедия [официальный вебсайт]. – Электрон. данные. – [2020]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/D0%9CD0%BED0%BBD0%B8%D0%B1%D0%B4%D0%B5%D0%BD#cite\\_note-10](https://ru.wikipedia.org/wiki/D0%9CD0%BED0%BBD0%B8%D0%B1%D0%B4%D0%B5%D0%BD#cite_note-10). – Название с экрана. – Дата просмотра: 05.05.2021
8. Зеликман А. Н. Молибден [Текст] / А. Н Зеликман. – Москва : Metallurgy, 1970. – 320 с.
9. Parish R. V. The Metallic Elements [Text] / Parish R. V. – New York: Longman, 1977. – p. 112, 133.

10. Банных О. А. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа [Текст] : справочник / О. А. Банных, М. Е. Дрица. – Москва : Metallurgia, 1986. – с.80.

11. Lunk H.-J Discovery, properties and applications of molybdenum and its compounds [Electronic source] / H.-J Lunk, H. Hartl // ChemTexts. – 2017. – №3. – p. 8-10. – Acces mode: <https://www.researchgate.net/signup.SignUp.html>. – Date of review: 27.05.2021.

12. Никонов Н. В. Молибден. Свойства, применение, производство, продукция [Текст] / Н. В. Никонов. – Москва : Метотехника, 2014. – 31 с.

13. Лыкасов А. А. Metallurgia вольфрама и молибдена [Текст] / А. А. Лыкасов, Г. М. Рысс, В. М. Жихарев. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 80

с.

14. Глинка Н. Л. Общая химия [Текст] : учеб. пособ. для вузов / Н. Л. Глинка; под ред. А. И. Ермакова. – 28-е. изд., перераб. и доп. – Москва : Интеграл-Пресс, 2000. – 727 с.

15. Электротехнологические промышленные установки [Текст] : учебник для вузов / И. П. Евтюкова, Л. С. Кацевич, Н. М. Некрасова, А. Д. Свенчанский. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 400 с.

16. Пилипенко О. С. Аналіз методів та обладнання для 3D друку будівель [Текст] / О. С. Пилипенко, Д. О. Варуха, В. А. Смирнов // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фак-ту техн. систем та енергоефективних технологій : 18– 21 квітня 2017 р. : у 2-х ч. – Суми : СумДУ, 2017. – Ч.2. – С. 91.

17. XinWang 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective [Electronic source] / XinWang, ManJiang, Zuowan Zhou, Jihua Gou // Composites Part B: Engineering. – 2017. – № 110. – P. 442–458. – Acces mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836816321230>. – Date of review: 27.05.2021.

18. Гречко А. М. Ресурсозберігаючі й екологічно безпечні технології [Текст] : конспект лекцій / А. М. Гречко. – Харків, 2016. – 20 с.

19. Чередниченко В. С. Электротехнические и конструкционные материалы [Текст] / В. С. Чередниченко, В. А. Филиков. – Москва : Академия, 2008. – 280 с.
20. Суворин А. В. Электротехнологические установки [Текст] : учеб. пособие / А. В. Суворин. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. – 376 с.
21. Y.S.Choi Representation of Materials Constitutive Responses in Finite Element-Based Design Codes [Text] / Y.S.Choi R.A.Brockman. – Springer, 2011. – P. 199-238.
22. Юшко С. В. Нестационарна теплопровідність [Текст] : навч. посіб. / С. В. Юшко, О. Є. Борщ, Г. І. Токар. – Харків : НТУ «ХП», 2012. – 112 с.
23. Андрієнко Ю. Є. Моделювання процесу теплопередачі під час спікання молібдену електронним променем [Текст] : дипломна робота / Ю. Є. Андрієнко. – Київ : НТУ «КП ім. Ігоря Сікорського», 2020. – 81 с.
24. Про затвердження Вимог безпеки та захисту здоров'я під час використання виробничого обладнання працівниками [Текст] : Z0097-18. – [Чинний від 2017-12-28]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 9 с.
25. Рукавички захисні. Загальні вимоги та методи випробування [Текст] : ДСТУ EN 420:2017. – [Чинний від 2018-02-01]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 35 с.
26. Правила улаштування електроустановок [Текст] : ПУЕ-2017. – Київ : Міненергосугілля України, 2017. – 617 с.
27. Система стандартів безпеки труда. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам [Текст] : ДСТУ ГОСТ 12.2.061:2009. – [Чинний від 2009-02-01]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2009. – 65 с.
28. ДБН В.2.5.28-2006. Природне та штучне освітлення.
29. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухо-пожежною та пожежною небезпекою.