

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ІНЖЕНЕРНО-ФІЗИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
Кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії**

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Мазур В.І.  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

**Дипломна робота  
на здобуття ступеня бакалавра  
за освітньо професійною програмою «Нанотехнології та комп'ютерний  
дизайн матеріалів»  
спеціальності 132 «Матеріалознавство»  
на тему: «Моделювання процесу теплопередачі під час спікання  
молібдену електронним променем»**

Виконала:  
студентка IV курсу, групи ФН-61  
Андрієнко Юлія Євгенівна \_\_\_\_\_

Керівник:  
доцент, д. т. н. Богомол Ю. І. \_\_\_\_\_

Консультант з розділу охорони праці:  
доцент, к. т. н. Арламов О. Ю. \_\_\_\_\_

Консультант з нормоконтролю:  
доцент, к. т. н. Троснікова І. Ю. \_\_\_\_\_

Рецензент:  
Доцент каф. ФМ, к. т. н., доц.  
Іващенко Євген Вадимович \_\_\_\_\_

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

Студентка Андрієнко Ю.Є.

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**ІНЖЕНЕРНО-ФІЗИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 132 Матеріалознавство

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ В.І.Мазур

«\_\_»\_\_\_\_\_2020 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломну роботу студентці**

**Андрієнко Юлії Євгенівні**

1. Тема роботи «Моделювання процесу теплопередачі під час спікання молібдену електронним променем», керівник роботи Богомол Юрій Іванович, доктор техн. наук, доц., затверджені наказом по університету від \_\_21.05\_\_2020 р. № 1132-с

2. Термін подання студентом роботи 12.06.2020 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 під час виконання магістерської дисертації.

Охорона праці та безпека в надзвичайній ситуації повинні відповідати нормативним вимогам.

#### 4. Зміст роботи:

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

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

в) вивчити закономірності теплопередачі у пресовках з молібдену 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 молібдену 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 | доцент, к.т.н.<br>Арламов О.Ю.              | 20.04.2020     |                  |
| Економічний розділ                                       | старший викладач к.е.н.<br>Нараєвський С.В. | 20.04.2020     |                  |

7. Дата видачі завдання 20.04.2020 р.

## Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломної роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|--------------------------------|----------|
| 1.    | Підготовка експериментального матеріалу | 25.04                          |          |
| 2.    | Підготовка ілюстративного матеріалу     | 30.04                          |          |
| 3.    | Написання тексту роботи                 | 15.05                          |          |
| 4.    | Підготовка презентації                  | 01.06                          |          |
| 5.    | Оформлення роботи.                      | 10.06                          |          |
| 6.    | Захист дипломної роботи.                | 16.06                          |          |

Студентка \_\_\_\_\_

Андрієнко Ю. Є.

Керівник роботи \_\_\_\_\_

Богомол Ю. І.

## РЕФЕРАТ

Робота вміщує: 81 стор., 26 рис., 9 табл., 28 літ. дж.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОННИЙ ПРОМІНЬ, МОЛІБДЕН, ПОРОШКОВА МЕТАЛУРГІЯ, ТЕПЛОПЕРЕДАЧА, ТУГОПЛАВКІ МЕТАЛИ.

У даній роботі викладено огляд сучасного стану теорії і технології отримання компактів молібдену методом електронно-променевого спікання.

Об'єкт дослідження: пористі молібденові пресовки.

Предмет дослідження: закономірності процесу теплопередачі під час електронно-променевого спікання.

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

В результаті проведених досліджень було досліджено закономірності ущільнення під час пресування порошку молібдену.

Методом моделювання в середовищі Ansys встановлено вплив пористості молібденових пресовок на теплопередачу.

## ABSTRACT

The work contains: 81 p., 26 fig., 9 tabl., 28 refer.

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

This paper presents a current state overview of the theory and technology of obtaining molybdenum using the electron-beam additive manufacturing.

Object of research: porous molybdenum compacts.

Subject of study: regularities of the heat transferring process during the electron-beam additive manufacturing.

Purpose: to investigate the regularities of the heat transferring process during the electron-beam additive manufacturing in porous molybdenum.

As a result of the research were investigated the regularities of compaction during pressing of molybdenum powder.

The influence of molybdenum compacts porosity on heat transfer was established by the simulation method in Ansys.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП .....   | 9  |
| 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД .....  | 11 |
| 1.1 Загальна характеристика молібдену .....                                   | 11 |
| 1.2 Фізичні властивості молібдену .....                                       | 14 |
| 1.3 Хімічні властивості молібдену .....                                       | 15 |
| 1.4 Області застосування молібдену .....                                      | 18 |
| 1.4.1 Застосування металічного молібдену та його сплавів .....                | 19 |
| 1.5 Способи отримання компактного молібдену .....                             | 20 |
| 1.5.1 Отримання компактного молібдену методом порошкової металургії .....     | 20 |
| 1.5.2 Отримання компактного молібдену плавкою .....                           | 22 |
| 1.6 Використання для адитивних технологій .....                               | 25 |
| 1.7 Відомості про електронний промінь та електронно-променеві установки ..... | 28 |
| 1.8 Висновки та постановка задач дослідження .....                            | 30 |
| 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 Спікання молібдену електронним променем .....                             | 34 |
| 2.5 Моделювання поля температури методом скінченних елементів .....           | 36 |
| 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ .....                               | 46 |
| 4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ .....                                      | 54 |
| 4.1 Науково-технічна актуальність НДР .....                                   | 54 |
| 4.2 Мета і завдання дипломної роботи .....                                    | 55 |
| 4.3 Розрахунок планової собівартості проведення дослідження .....             | 55 |
| 4.3.1 Витрати на оплату праці .....   | 56 |
| 4.3.2 Єдиний соціальний внесок .....  | 58 |
| 4.3.3 Витрати на матеріали, що використовуються в роботі .....                | 58 |

|  |    |
|--|----|
| 4.3.4 Витрати на спеціальне обладнання та прилади .....  | 59 |
| 4.3.5 Витрати на службові відрядження .....  | 59 |
| 4.3.6 Інші прямі невраховані витрати .....   | 59 |
| 4.3.7 Накладні витрати .....   | 60 |
| 4.4 Планова кошторисна вартість НДР.....   | 60 |
| 4.5 Економічна ефективність ДР .....   | 61 |
| 4.6 Висновки .....   | 65 |
| 5 РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ .....   | 66 |
| 5.1 Характеристика об'єкту та умови його експлуатації .....  | 66 |
| 5.2 Оцінка ключових небезпечних та шкідливих виробничих факторів і<br>розроблення заходів поліпшення умов праці при виконанні роботи ..... | 70 |
| 5.2.1 Оцінка мікроклімату та повітря навколишнього середовища .....  | 72 |
| 5.2.2 Освітленість.....  | 73 |
| 5.2.3 Шум та вібрація.....   | 73 |
| 5.2.4 Виробничі випромінювання .....   | 73 |
| 5.3 Електробезпека.....  | 74 |
| 5.4 Пожежна безпека.....   | 75 |
| ВИСНОВКИ.....  | 77 |
| CONCLUSIONS.....   | 78 |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....  | 79 |



## ВСТУП

За прогнозом Mining Magazine, в найближчі кілька років світовий попит на молібден буде підвищуватися в середньому на 2 - 3% в рік. Цей попит ще й зв'язаний з тим, що Мо у великій кількості використовується для високоенергетичних методів – адитивних технологій.

Адитивні технології сьогодні – галузь матеріального виробництва, що дуже динамічно розвивається. За допомогою адитивних технологій можна отримувати нові властивості виробів, економити час та матеріали при їх виготовленні. Західні аналітики розглядають ступінь впровадження цих технологій як надійний індикатор реальної індустріальної потужності держави.

Характерною тенденцією останніх років є те, що асортимент та кількість деталей, що виготовляються за адитивними технологіями почали активно рости [1]. І особливо важливим є прогрес у найбільш важкому та інноваційному секторі адитивних технологій – «виросуванні» виробів із металу. Наприклад, компанія Boeing виговляє незліченну кількість 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 молібден. За допомогою методу матеріали використовуються значно раціональніше, а часу потребується значно менше. При виготовленні деталей складної форми традиційними методами відношення маси використаного матеріалу до готового виробу може сягати 15-20 разів. Якщо застосовувати адитивні технології для виготовлення аналогічних деталей, можна знизити показник до 1,5-2 разів.

Машини, які за адитивними технологіями створюють деталі з металу – вважаються верхом інженерного мистецтва, адже в них сконцентровано найпередовіші знання з металургії, лазерної техніки, оптики, електроніки,

систем управління, вимірювальних пристроїв, механіки, вакуумної техніки та інших.

Дослідження нових методів виготовлення металевих матеріалів, зокрема спікання електронним променем, є актуальним для покращення фізико-механічних властивостей деталей та частин конструкцій з молібдену. Адже це дозволить зменшити час виробництва, є економічно доцільним, а найголовніше – більш екологічне для впровадження на сучасних виробництвах.

## 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Загальна характеристика молібдену

Молібден належить до малорозповсюджених у природі металів, але має велике технічне значення і тому є одним з найважливіших. Чистий метал сріблясто-білого кольору (рис. 1.1), достатньо м'який та має одну з найвищих температур плавлення ( $2890^{\circ}\text{K}$ ) з усіх чистих елементів [2].



Рисунок 1.1 – Чистий метал молібден

Елемент молібден відкрив шведський хімік Шееле у 1778 році. Молібден був відкритий у найбільш поширеному його мінералі – молібденіті, який упродовж багатьох років вважали різновидом графіту. Металічний молібден уперше отриманий у 1781 році відновленням триоксиду молібдену киснем. Більш чистий метал на початку 19 століття отримав Берцеліус відновленням триоксиду молібдену воднем. Лише через сто років після відкриття, він отримав широке промислове застосування.

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). З близько двох десятків 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 гінетичних типів, яких існує всього два: гідротермальний і скарновий. На території розвинених країн при розробці родовищ перевагу віддають штоквертковим молібденовим і міднопорфіровим родовищам. Формування покладів відбувається в кілька стадій під впливом гідротермальних умов. Величезна 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 Мексики 4,1%. Вірменія володіє кількістю молібденових покладів, що перевищує 7% всіх його світових запасів. Варто відзначити, що Каджаранське мідно-молібденове родовище 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% випуску молибдену забезпечується п'ятьма компаніями: Codellco (Чилі), PhelpsDodge (США), GrupoMexico (Мексика і Перу), JinduichengMolybdenumMiningCorp. (Китай) і ThompsonCreek (США і Канада).

Використання молибдену дуже швидко зростає. У 1950 р. глобальне виробництво молибдену становило 14 500 метричних тонн. До 2015 року воно збільшилося до 235 000 тонн. Це еквівалентно шестнадцятикратному зростанню протягом 65 років або річному темпу приросту в 4,4% (рис. 1.2).

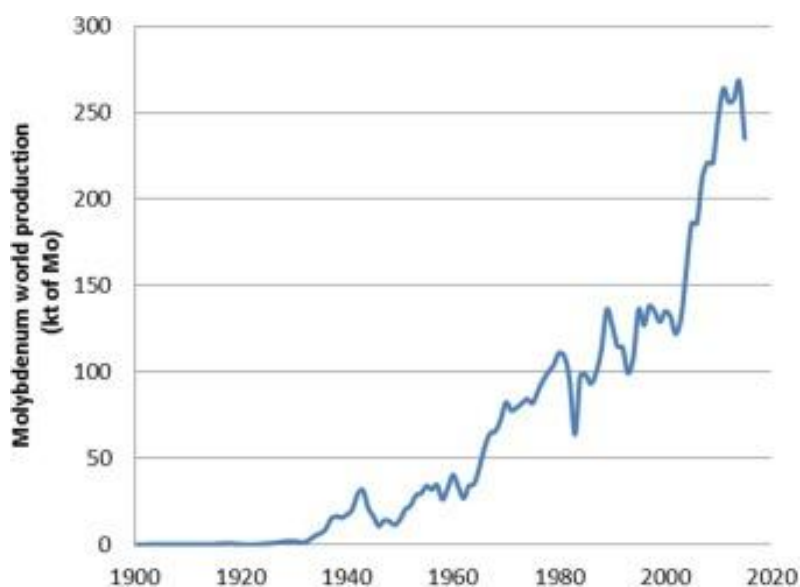


Рисунок 1.2 - Світове виробництво молибдену 1900-2015 рр. (Кт/рік) [4]

Цей високий темп зростання, ймовірно, не збережеться назавжди. Дослідження Halada et al. (2008) [5] чітко показує, що після перевищення певного порогу ВВП на душу населення ріст використання металів починає зменшуватися від зростання ВВП.

Сумарна потужність підприємств світу з переробки молибденових концентратів становить близько 300 тисяч тонн. В основному 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

Мо і його сплави на його основі відрізняються високим модулем пружності, малим коефіцієнтом термічного розширення, гарною термостійкістю. Електропровідність даного металу нижче, ніж у міді, але вище, ніж у заліза. Що стосується механічної міцності, він дещо поступається вольфраму, але 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    |
| Теплопровідність, Вт/(м·К)  | 142      |
| Коефіцієнт лінійного розширення, 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup> | 4,9      |
| Електроопір, мкОм·см  | 5,70     |

Продовження таблиці 1.1

|                     |                   |
|---------------------|-------------------|
| Модуль Юнга, ГПа    | 336,3             |
| Модуль зсуву, ГПа   | 122               |
| Коефіцієнт Пуассона | 0,30              |
| Твердість, НВ       | 125               |
| Група металів       | Тугоплавкий метал |

Відомий 31 ізотоп молібдену з  $^{83}\text{Mo}$  по  $^{113}\text{Mo}$ . З них стабільні:  $^{92}\text{Mo}$ ,  $^{94}\text{Mo}$  -  $^{98}\text{Mo}$ . Найнестабільніші ізотопи елемента № 42 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 компактний молібден пластичний, ковкий, тягучий, досить легко піддається штампуванню і прокатці. При високих температурах (але не в окислювальній атмосфері) міцність молібдену вища більшості інших металів. При забрудненні вуглецем, азотом або сіркою молібден, подібно хрому, стає крихким, твердим, ламким, що робить процес його обробки складнішим. Водень майже не розчиняється в молібдені, тому й не може помітно впливати на його властивості. Молібден – хороший провідник електрики, менший від срібла у цій характеристиці лише в 3 рази. 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. Починає окислюватися при 400 °С. Вище 600 °С швидко окислюється до триоксиду  $\text{MoO}_3$ . Цей оксид отримують також окисненням дисульфїду молібдену  $\text{MoS}_2$  і термолізом молібдату амонію  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ .

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

З галогенами Мо 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 легкозакипаюча рідина). Мо (+4 і +5) утворює тверді галогенїди  $\text{MoHal}_4$  і  $\text{MoHal}_5$  ( $\text{Hal} = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}$ ). З йодом відомий тільки дийодид молібдену  $\text{MoI}_2$ . Молібден утворює оксигалогенїди:  $\text{MoOF}_4$ ,  $\text{MoOCl}_4$ ,  $\text{MoO}_2\text{F}_2$ ,  $\text{MoO}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{MoO}_2\text{Br}_2$ ,  $\text{MoOBr}_3$  і інші.

При нагріванні молібдену з сіркою утворюється дисульфїд молібдену  $\text{MoS}_2$ , з селеном - діселенїд молібдену складу  $\text{MoSe}_2$ . Відомі карбїди молібдену  $\text{Mo}_2\text{C}$  і  $\text{MoC}$  – кристалїчні високоплавкі речовини і силїцид молібдену  $\text{MoSi}_2$ .

Особлива група сполук молібдену – молібденові синї. При дії відновників – сірчистого газу, цинкового пилу, алюмінію або інших на слабокислі ( $\text{pH} = 4$ ) суспензїї оксиду молібдену утворюються яскраво-синї 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 молібдати, солі не виділені у вільному стані слабких молібденових 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). Молібдати металів першої та третьої груп містять тетраедричні групи  $[\text{MoO}_4]$ .

При підкисленні водних розчинів нормальних молібдатів спочатку утворюються іони  $\text{MoO}_3\text{OH}^-$ , потім іони полімолібдати: 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 полімолібдати синтезують спіканням  $\text{MoO}_3$  з оксидами металів.

Існують подвійні молібдати, 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 молібден у нижчих ступенях окислення - молібденові 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 1.3 зображена діаграма стану системи залізо-молібден:

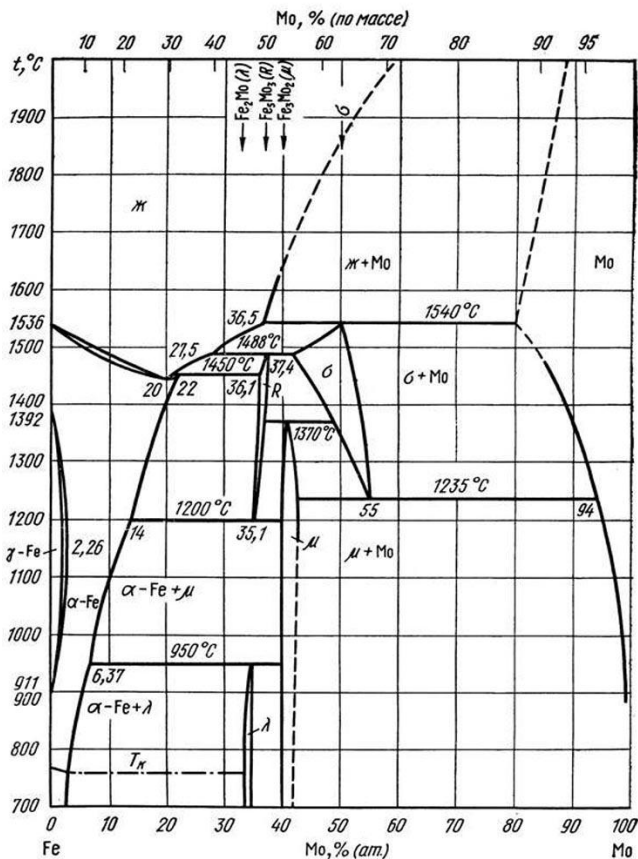


Рисунок 1.3 – Діаграма стану системи Fe-Mo [10]

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

На рисунку 1.3 приведена діаграма стану системи залізо-молібден. Фаза  $\mu$  знаходиться в рівновазі з  $\alpha$ -Fe при температурах нижче 1200 °C, а присутня в сплавах до 1370 °C. Фаза R утворюється при 1488 °C по перитектичній реакції і розпадається по евтектоїдній при 1200 °C на суміш  $\alpha$ -Fe +  $\mu$ . При 950 °C по перитектоїдній реакції утворюється  $\lambda$ -фаза на основі поєднання Fe<sub>2</sub>Mo [10].

#### 1.4 Області застосування молібдену

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

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

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

Основне застосування оксиду молібдену (VI), MoO<sub>3</sub> – в якості каталізатора окислення і в якості сировини для виробництва металевого

молібдену. Шестикутний триоксид молібдену,  $h\text{-MoO}_3$  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 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 молібдену – 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].

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

Оскільки багато властивостей молібдену привабливі для інженерів та дизайнерів, метал та його сплави використовуються в таких областях:

- Освітлення.
- Електричні та електронні пристрої.
- Медичне обладнання.
- Обладнання для випробування матеріалів.
- Високотемпературні печі та супутнє обладнання.
- Теплові розпилювальні покриття.
- Аерокосмічні та оборонні компоненти.

Молібден та його сплави, а також композити, що містять молібден, 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 застосуванням металічного молібдену, починаючи з 1910 р. (Mo у формі дроту в лампах розжарювання).

На сьогоднішній день для освітлення як і раніше необхідна велика кількість молібденового металу, оскільки як компоненти лампи, так і дріт використовуються в якості оправок для намотування вольфрамових ниток.

В даний час покоління світла кардинально змінюється, коли лампа розжарювання замінюється компактними люмінесцентними лампами і лампами світлодіодними лампами (LED). Молібден досі використовується для захисту дроту та скла в галогенних лампах. Цінні властивості молібдену роблять його матеріалом, що обирають для багатьох інших застосувань. Деякі з них використовують міцність і стійкість молібдену при високих температурах, як це було для перших ламп [11].

### **1.5 Способи отримання компактного молібдену**

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

Існує два способи отримання компактного молібдену. Перший полягає в застосуванні методів порошкової металургії. Другий – за допомогою плавки в печах різного принципу дії [12].

Спосіб виготовлення компактних заготовок - методи порошкової металургії або вакуумна плавка – визначається, дивлячись на те, які вимоги до розмірів, форм заготовок, а також до їх чистоти [13].

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

Цей спосіб складається з пресування порошку в заготовку і спікання заготовки. Компакти молібдену отримують в сталевих прес-формах при тиску до 300 МПа. Спікання компактів у атмосфері водню проводять в дві

стадії. Перша з них - 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 виходить компактний метал. Спечені компакти надходять на механічну обробку - ковку, протягання [14].

Розглянемо детальніше вищевказані стадії.

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 володіють відкритою пористістю.

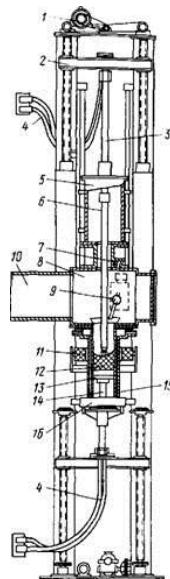
Високотемпературне спікання (зварювання). Для отримання компактів з найбільш сприятливою для подальшої механічної обробки структурою, потрібен нагрів приблизно до 2200-2400 °С. Таку високу температуру напростіше отримати шляхом безпосереднього пропускання електричного

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 та його в дугових і електронно-променевих печах.



- 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 1.4 – Схема дугової печі з електроном, що витрачається для плавки молібдену [3]

У всіх сучасних дугових печах плавку ведуть у вакуумі з молібденовим електродом і охолоджувальним мідним тиглем - кристалізатором (рис. 1.4). 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 дугового 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 крупнокристалічного структуру.

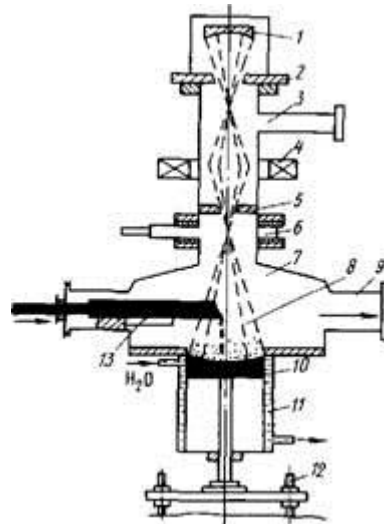
В електронно-променевої установці джерело енергії винесено з об'єму, де здійснюється технологічний процес, і тому його потужність можна регулювати незалежно від того, що відбувається в робочій камері. Це дозволяє перегрівати метал в потрібних межах, здійснювати його витримку при постійній температурі, 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 неможливо припинити наплавлення злитка [15].

На рисунку 1.5 зображена схема плавильної установки з однієї електронної гарматою.

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

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.



1 - катод електронної гармати; 2 - анод; 3 - патрубок до вакуумної системи; 4 - електромагнітна котушка (лінза); 5 - діафрагма; 6 - шибер; 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 1.5 – Схема печі для плавки електронним променем [3]

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 крупнокристалічну структуру і є не дуже піддатливими до пластичної деформації [3].



## 1.6 Використання для адитивних технологій

Адитивні технології або технології пошарового синтезу, 3D-друк — сьогодні один 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].

Технологія «тривимірного друку» з’явилася завдяки розвитку цифрових технологій в області проектування, моделювання, розрахунків і механічної обробки та набула вибуховий характер. На даному етапі розвитку технології 3D-друку, що відомі як адитивні технології, широко використовуються в області матеріального виробництва, та представляють собою побудову фізичного об’єкта (деталі) методом пошарового нанесення матеріалу. При використанні адитивних технологій всі стадії реалізації проекту від ідеї до матеріалізації знаходяться в єдиному технологічному ланцюзі, в якому кожна технологічна операція реалізується в цифровому вигляді. Це означає реальний перехід до «безпаперових» технологій, коли для виготовлення деталі немає потреби в традиційній креслярській документації. Адитивні технології охоплюють все нові сфери діяльності людини, однією з яких є створення будівель і архітектурних споруд методом 3D друку.

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 створюваній 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 слідє висновок, що 3D друк це перспективна технологія, яка займе провідне місце в будівельній сфері світу [16].

Загальними методами 3D-друку є: моделювання методом наплавки, 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 накладанням шарів. Цим вони відрізняються від звичайних субтрактивних технологій виробництва, що забезпечують механічну обробку – видалення речовини з заготовки.

Адитивні технології класифікують:

А) по матеріалам, які використовуються (рідкі, сипучі, полімерні, металопошккові);

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 ножом, для створення рівного шару матеріалу заданої товщини. Відбувається селективна обробка порошку лазером або іншим способом з'єднання частинок порошку (плавкої або склеюванням) згідно з поточним перерізу САD-моделі. Площина побудови стала, а частина порошку залишається недоторканою. Цей спосіб називають селективним синтезом, або селективним лазерним спіканням (якщо інструментом з'єднання є лазер).

Другий – полягає в безпосередньому осадженні матеріалу в точку підведення енергії.

Адитивні 3D-технології можна поділити на 7 категорій:

1) 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.1.6), виробництво способом наплавлення ниток).

2) розбризкування матеріалу;

Віск або фотополімер по багатоструменевій голівці подається в точку побудови.

3) розбризкування сполучного реагенту;

4) з'єднання листових матеріалів;

У ролі будівельного листового матеріалу виступають полімерна плівка, металева фольга, аркуші паперу.

5) ультразвукове адитивне виробництво;

Тонкі пластини з металу зварюються ультразвуком, після чого надлишки металу видаляються фрезеруванням. Адитивна технологія тут застосовується в поєднанні з субтрактивною.

6) фотополімеризація у ванні;

Технологія використовує рідкі модельні матеріали – фотополімерні смоли. Плавка матеріалу в заздалегідь сформованому шарі. В якості джерела енергії використовують лазер або термоголовку.

7) пряме підведення енергії в місце побудови;

Матеріал і енергія для його плавлення надходять в точку побудови одночасно. В якості робочого органу використовується головка, оснащена системою підведення енергії і матеріалу. Енергія надходить у вигляді

сконцентрованого пучка електронів або променю лазера. Іноді голівка встановлюється на «руці» робота [18].



Рисунок 1.6 –Збільшений масштаб процесу послойного напилення металевого порошку в виробництві деталі за допомогою 3д-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 установки 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 обсязі та електронній гарматі необхідний вакуум [20].

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

Отже, зважаючи на очевидні та вагомі переваги електронно-променевого спікання (швидкість, екологічність, якість, економічна доцільність) перед традиційними методами, електронно-променеве спікання може стати новим перспективним і високошвидкісним методом отримання виробів з молібдену.

Таким чином метою роботи було: вивчення закономірностей процесу теплопередачі у пористих молібденових зразках під час електронно-променевого спікання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

а) дослідити закономірності ущільнення під час пресування порошку молібдену;

б) методом моделювання встановити вплив пористості молібденових пресовок на теплопередачу.

## 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Методика проведення експерименту

Для процесу електронно-променевого спікання молібдену потрібно виконати такі етапи: дозування порошоків, замішування порошку та пластифікатору, пресування заготовок у гідравлічному пресі, відпал у печі та спікання електронним променем. Після цього здійснювалось моделювання поля температур методом скінченних елементів у середовищі ANSYS. Технологічна схема одержання сплавів з молібдену показана на рисунку 2.1:

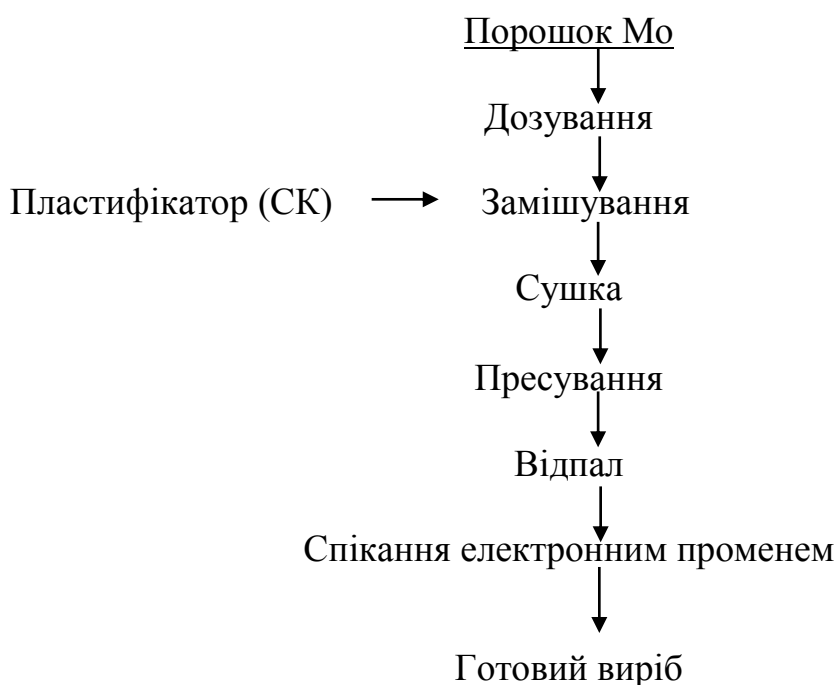
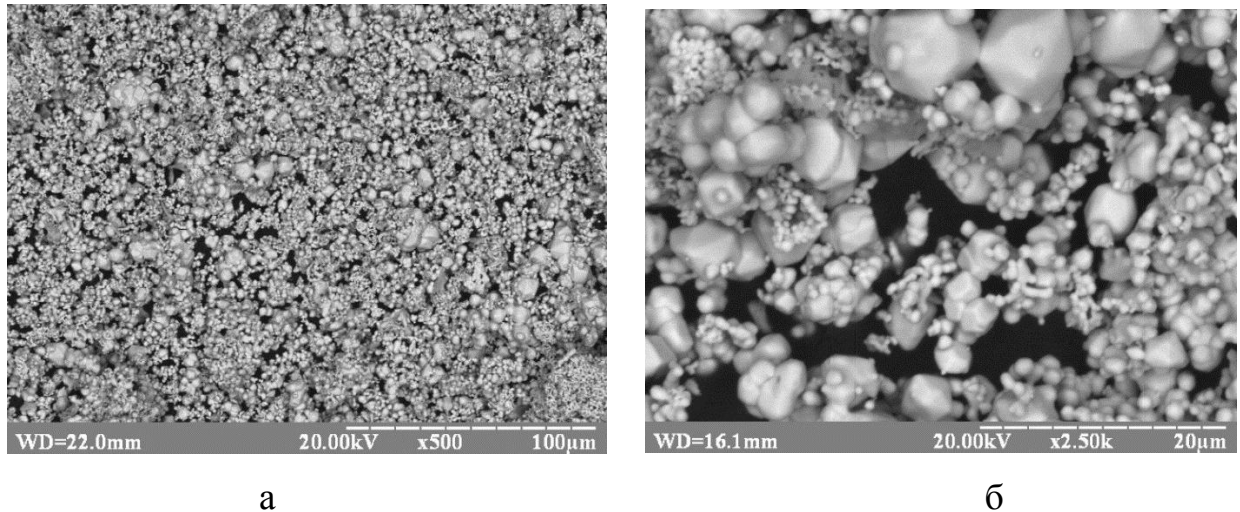


Рисунок 2.1.—Технологічна схема отримання молібдену методом електронно-променевого спікання

### 2.2 Вихідні матеріали

Як вихідний матеріал, вистовувався промисловий чистий молібден (чистота близько 98 масових %). Розмір частинок порошку 5-10 мкм. У ролі пластифікатора виступав: 1 % розчин синтетичного каучуку в бензині. На рисунку 2.2 зображений вихідний порошок, збільшений у 500 та 2500 разів.





а – збільшення у 500 разів; б – збільшення у 2500 разів

Рисунок 2.2 – Фото вихідних порошків

### 2.3 Дозування, пресування молібденових пресовок із пластифікатором

Дозування та пресування заготовок з Мо проводилось у лабораторії. Дозування відбувалось на електронних вагах, що забезпечило високу точність, далі порошок та пластифікатор ( 1 масовий % від усієї суміші) змішували, протерли через спеціальні сита розміром 40 мікрметрів, аби досягти однорідності.

Потрібна кількість порошку, що спресувати одну заготовку, розраховувалась за формулою:

$$G = V \cdot \rho_k \cdot (1 - \Pi) \cdot K, \quad (2.1)$$

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 визначався за формулою:

$$V = \pi h d^2 / 4, \quad (2.2)$$

де  $d$  – діаметр пресовки, см;

$h$  – довжина пресовки, см.

Пресування проводилося на гідравлічному пресі з такими тисками пресування: 100 МПа, 200 МПа, 400 МПа, 600 МПа.

Молібден досить пластичний метал і не має особливих умов зберігання та транспортування. Зберігання та транспортування здійснювалося у пластикових боксах. Після чого здійснювався високотемпературний відпал.

Відпалення проводили у атмосфері водню при температурі 750-1100 °С упродовж 2 годин.

#### **2.4 Спінання молібдену електронним променем**

Спінання зразків здійснювалося електронним променем на установці СВ – 112, фото установки у лабораторії приведено нижче на рисунку 2.3. Дана установка призначена для високоенергетичної обробки порошків металів, їх спінання та розпилювання.

Конструкція установки була дещо перероблена задля того, щоботримати високу щільність потоку електронів на одиницю площі поперечного перетину зразку і розігрівати його до температури плавлення.



Рисунок 2.3 – Установка СВ-112

Оскільки зразок піддавався впливу потоку електронів лише на верхню площину зразка, нижче наведена схема нагрівання зразка у камері (рис. 2.4).

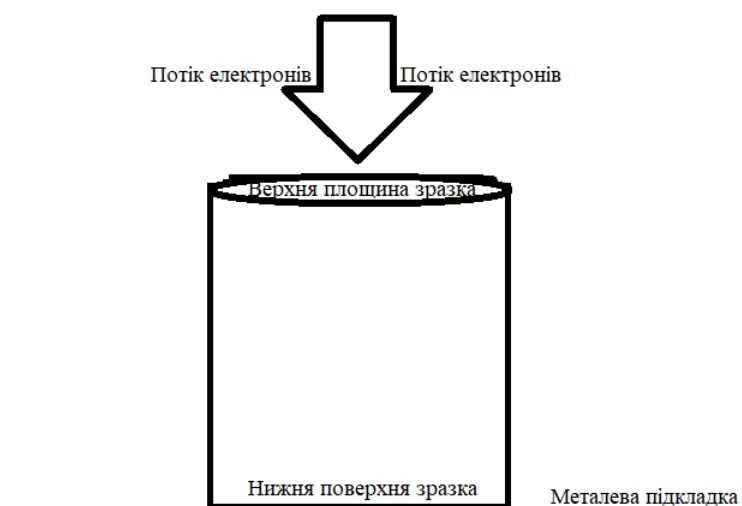


Рисунок 2.4 – Схема нагрівання зразка у камері

Походження середовища (у якому матеріал спікається) та його температура є дуже важливими чинниками будь якої термічної обробки. Під час спікання електронним променем важливо підтримувати постійний вакуум у робочій камері для забезпечення стабільного фокусування електронного променя. Також це забезпечує зниження кількості шкідливих домішок. За допомогою пірометра знімалися показники температури. На їх основі та на основі даних сили струму в камері було побудована залежність

температури від сили струму, що дозволило отримувати значення зручні для аналізу та інтерпретації. Залежність зображено на рисунку 2.5.

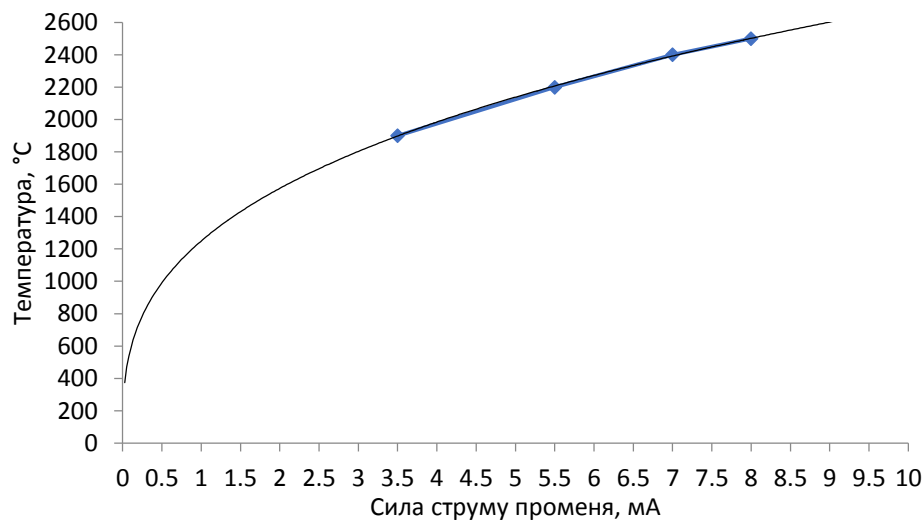


Рисунок 2.5 – Залежність температури зразка від сили струму

## 2.5 Моделювання поля температури методом скінченних елементів

Знання поля температур в зразку який спікається в умовах електронно-променевого нагрівання є необхідною умовою успішного прогнозування швидкості спікання та структурних особливостей спечених виробів. 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 пористості.

Метод скінченних елементів (МСЕ) широко застосовується для прогнозування механічних або термомеханічних реакцій твердих тіл і споруд при накладених геометричних, теплових або механічних обмеженнях. Однією з найбільших переваг методу є те, що за допомогою МСЕ легко розглянути граничні умови з розривним поверхневим навантаженням, а також змішані граничні умови; прогнозувати верхню і нижню межі

критичних особливостей компонента при накладених граничних умовах, що імітують фактичні теплові та / або механічні умови експлуатації [21].

### 2.5.1 Визначення питомої теплопровідності пористого тіла

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

1. Кондуктивний – всередині суцільної твердої фази.
2. Конвекційний – через газову фазу, що заповнює пори.
3. Радіаційний теплообмін (теплове випромінювання) – через простір пор.

Конвективна 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, тому не брались до уваги. Саме тому проводились обчислення лише кондуктивної теплопровідності.

Кондуктивна теплопровідність переважає інші механізми за ефективністю.

Стаціонарна теплопередача – теплопередача між середовищами з різними температурами через стінку, що їх розділяє. Характеризується незмінними в часі параметрами процесу. Найпростіший і найрозповсюдженіший одномірний процес – теплопередача зі зміною температурного поля тільки в одному напрямку.

Для визначення теплопровідності обираємо граничні умови. Реалізується розрахунок у середовищі ANSYS на платформі Workbench як задача типу Steady-State Thermal. Домен конструюється шляхом генерації випадкового набору пор. Пори в домені генерувались різної форми: круглі, прямокутні, ромбовидні, трикутні та п'ятикутні без дотримання їх ізоляції одна від одної.

Приклади розрахункових доменів зображені на рисунку 2.6:

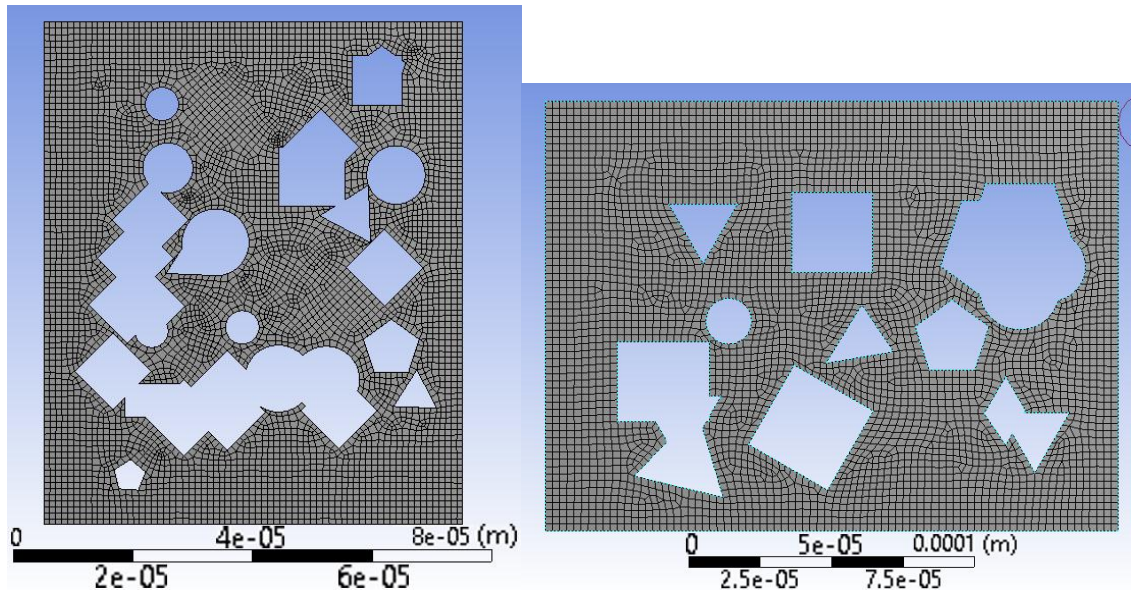


Рисунок 2.6 – Розрахункові домени

Розв'язок прямої задачі теплопровідності – визначення поля температур по відомих властивостях матеріалу. В оберненій задачі, яка є продовженням прямої задачі і використовується в даній роботі, обчислюється ефективна теплопровідність через визначення теплового потоку домену з порами.

У загальному випадку процес передачі теплоти теплопровідністю у твердому тілі супроводжується зміною температури, як у просторі, так і в часі:

$$t = f(x, y, z, \tau). \quad (2.3)$$

Відповідно до гіпотези Фур'є кількість теплоти  $dQ$ , що проходить через елемент ізотермічної поверхні  $dF$  за проміжок часу  $d\tau$ , пропорційна градієнту температури:

$$dQ = \lambda \cdot \text{grad } t \cdot dF \cdot d\tau. \quad (2.4)$$

Коли тепло передається через домен, через який граничними умовами 1-го роду на протилежних сторонах (фіксована температура) забезпечується стаціонарний тепловий потік  $q$ , температури стінок  $t_1$  і  $t_2$  зберігають свої значення в часі (рис. 2.7) [22].

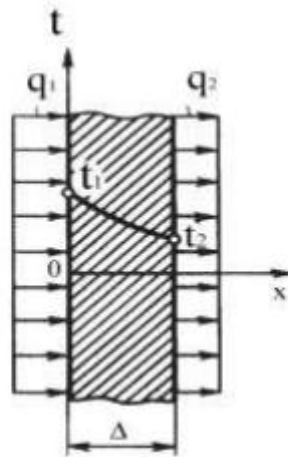


Рисунок 2.7 – Однорідний домен[22]

Для стаціонарного одномірного температурного поля закон Фур'є можна дати у вигляді:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}. \quad (2.5)$$

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:

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (2.6)$$

Результатом розв'язку прямої задачі є сумарний тепловий потік, який фіксувався на одній з поверхонь, з застосованими граничними умовами першого роду  $Q$ .

Теплопровідність домену визначали, як результат оберненої задачі за формулою:

$$\lambda_i = \frac{Q_i \cdot l_i}{m_i \cdot \delta \cdot \Delta T_i} \quad (2.7)$$

де  $l, m$  – повздовжній та поперечний розміри домена відносно напрямку перенесення тепла, м;

$Q$  – сумарний тепловий потік через домен, Вт;

$\Delta T$  – різниця температур на протилежних сторонах домена, °С;

$\delta$  – товщина домена,  $1 \cdot 10^{-6}$  м.

Для врахування того, що використовується двовимірна модель розрахункового домену, за обчисленими значеннями теплопровідності домену для взаємоперпендикулярних напрямів  $(\lambda_1, \lambda_2)$  знаходили ефективну кондуктивну теплопровідність:

$$\lambda_{eff}^c = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{ss}(T) \cdot (1 - \theta)}{3} \quad (2.8)$$

Де  $\lambda_{ss}(T)$  – значення питомої теплоємності безпористого матеріалу за температури  $T$ , яка є середньою для розрахункового домену,  $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{°С}$ ;

$\theta$  – пористість, відн. од.

## 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 виробу з печі, або його охолодження на повітрі чи в іншому середовищі під час гартування.

Розглянемо процес теплопровідності в однорідному твердому тілі, що займає тривимірну область  $\Omega$  [23]. Усі середовища ізотропні, у них немає залежності теплопровідності від напрямку, тому диференціальне рівняння нестационарної теплопровідності для одномірного потоку тепла має вигляд:

$$c_v \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \quad (2.9)$$

Позначивши коефіцієнт температуропровідності як

$$\frac{\lambda}{c_v \rho} = a, \quad (2.10)$$

Одновимірне рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 t. \quad (2.11)$$

Якщо немає внутрішніх джерел тепла, то на всьому домені використовується рівняння  $\frac{d^2 T}{dx^2} = 0$ .

Для визначення теплопровідності обираємо граничні умови:

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

$$t_c(\tau) = f(\tau). \quad (2.12)$$

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

$$q_c(\tau) = f(\tau). \quad (2.13)$$

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

$$q = \alpha(t_c(\tau) - t_{ж}), \quad (2.14)$$

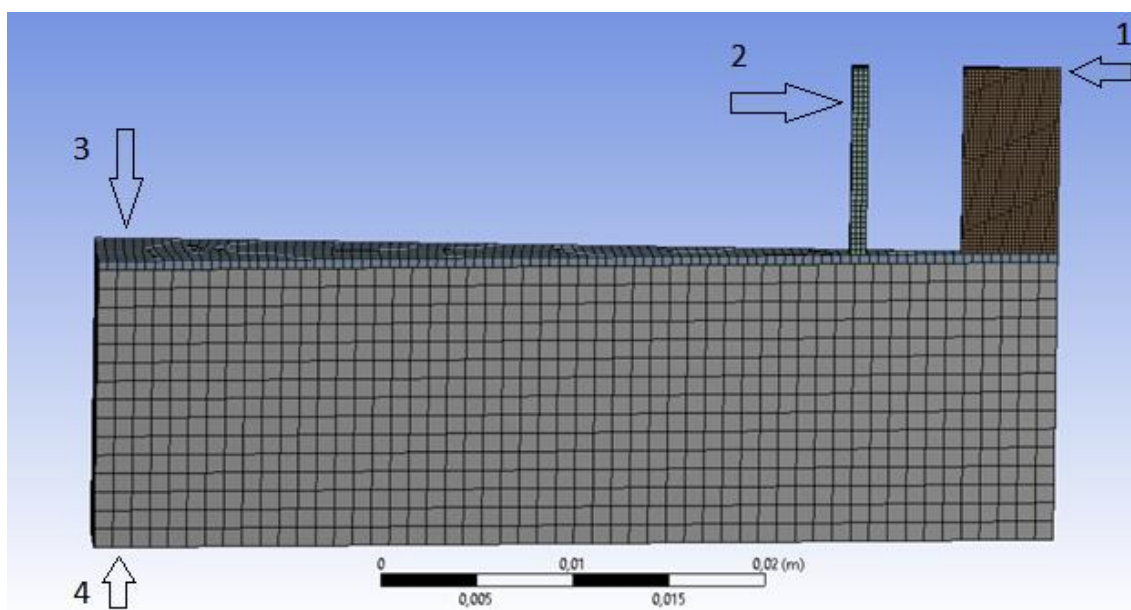
де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від середовища до тіла чи навпаки [24].

Для вирішення нашої задачі ми обираємо такі граничні умови:

- першого роду (граничні умови Діріхле) з протилежних сторін домена;
- другого роду – тепловий потік (що є джерелом нагріву) на поверхню зразка;
- третього роду – відведення тепла (конвекція) від плити;
- четвертого роду – теплопередача випромінюванням та через контакти (між підкладкою та плитою, між підкладкою та екраном).

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

Вигляд розрахункової моделі в середовищі ANSYS приведено на рисунку 2.8, а на рисунку 2.9 приведене збільшене зображення сітки зразка та екрану.



1 – зразок; 2 – екран; 3 – підкладка; 4 – плита

Рисунок 2.8 – Схема розрахункової моделі

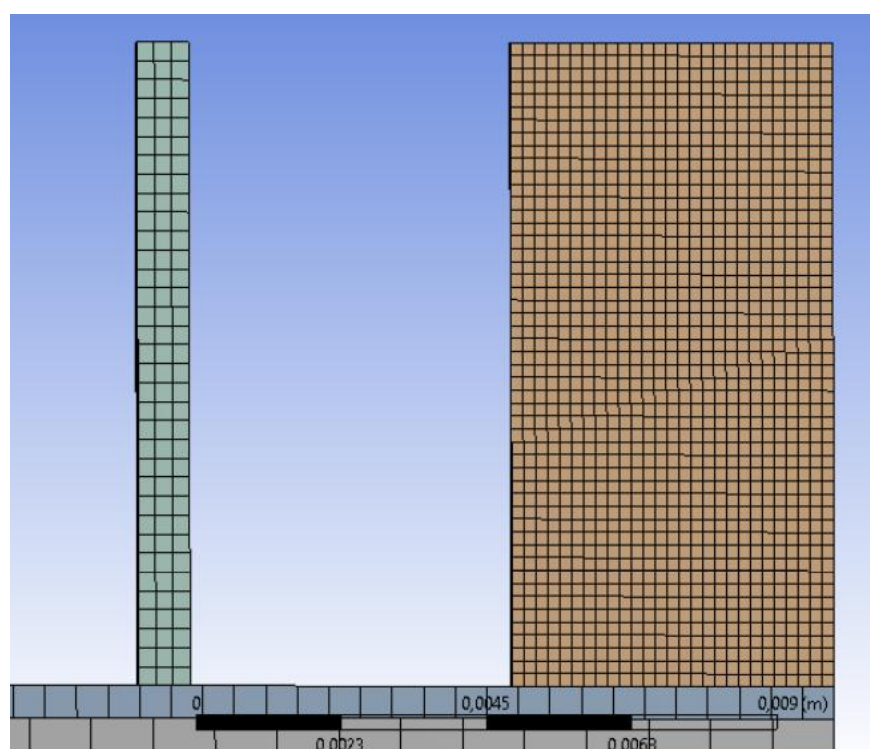


Рисунок 2.9 – збільшене зображення сітки зразка та екрану

На схемі видно, що розмір сітки на різних елементах неоднаковий. Сітка адаптована під роль та розмір виробу, саме тому монолітна плита взята крупною сіткою, оскільки теплові потоки в ній будуть

однорідні, а зразок та екран взяті більш густою сіткою (рис. 2.9), яка дозволяє подивитися градієнти температур.

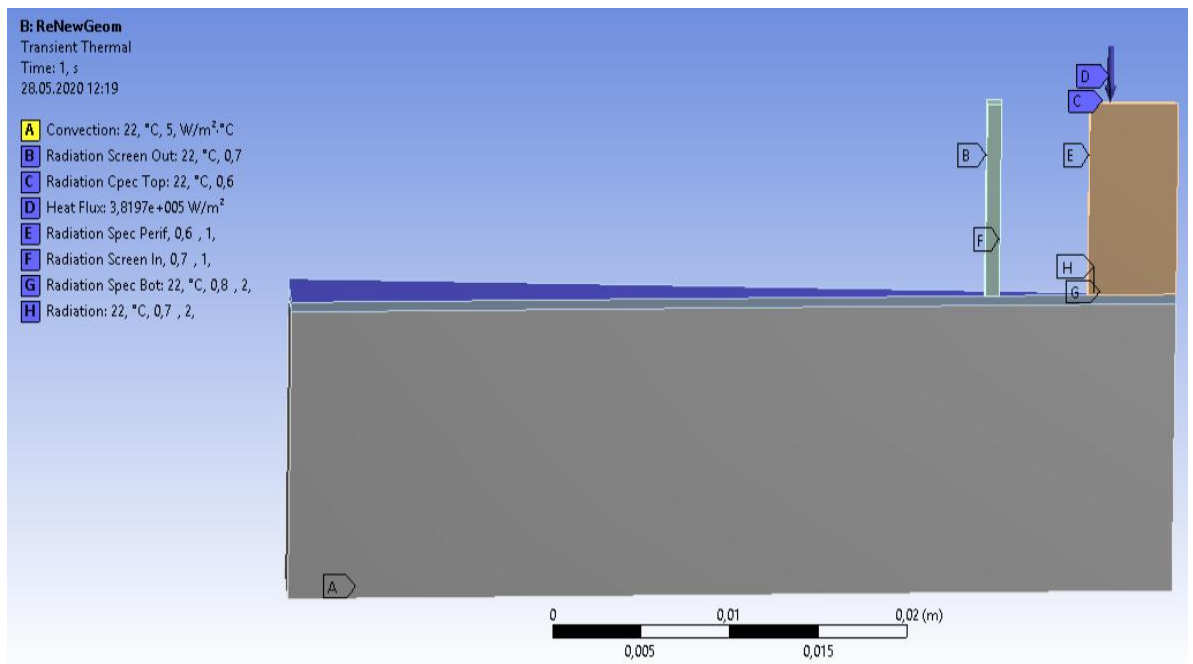


Рисунок 2.10 – Розрахунковий домен із зображеними граничними умовами

Також були накладені граничні умови. Розглянемо їх детальніше:

1. Конвекція (на рисунку 2.10 – літера А)

Конвекція теплового потоку відведена з нижньої поверхні (плити), де виходить тепловий потік  $q$ .

Коефіцієнт тепловіддачі  $k = 5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ .

2. Контакти

2.1. Контакт між підкладкою та плитою.

$$k = 5000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$$

2.2. Контакт між екраном та підкладкою.

$$k = 3000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$$

3. Симетрія

Так як наведена вище модель – зрізана, то на всі бокові поверхні накладена умова симетричності, що означає відсутність теплового потоку перпендикулярно до цих поверхонь.

#### 4. Випромінювання

##### 4.1. Випромінювання від екрану назовні (на рис. 2.10 – літера В)

Коефіцієнт чорноти  $\varepsilon = 0,7$ ; температура навколишнього середовища  $t = 22\text{ }^\circ\text{C}$ .

##### 4.2. Випромінювання з вершини зразка у навколишнє середовище (на рис. 2.10 – літера С).

Коефіцієнт чорноти  $\varepsilon = 0,6$  – менший, бо поверхня зразка пориста; температура навколишнього середовища  $t = 22\text{ }^\circ\text{C}$ .

##### 4.3. Випромінювання зі зразка на екран та з екрану на зразок (на рис. 2.10 – літери Е та F відповідно).

2 параметри об'єднані, бо у даному випадку тепло нікуди не витрачається, а лише передається від однієї поверхні до іншої.

Зі зразка на екран  $\varepsilon = 0,6$ ; з екрану до зразка  $\varepsilon = 0,7$ .

##### 4.4. Випромінювання від зразка на підкладку (на рис. 2.10 – літера G).

Відстань між двома поверхнями досить мала, тому  $\varepsilon = 0,8$ .

Початкові умови: у момент часу  $t=0$ , температура  $T=22\text{ }^\circ\text{C}$ .

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У ході дослідження, після пресування зразків з пластифікатором (1% розчин синтетичного каучуку), були визначені та пораховані відносна щільність і пористість зразків. Результати наведені на рисунку 3.1.

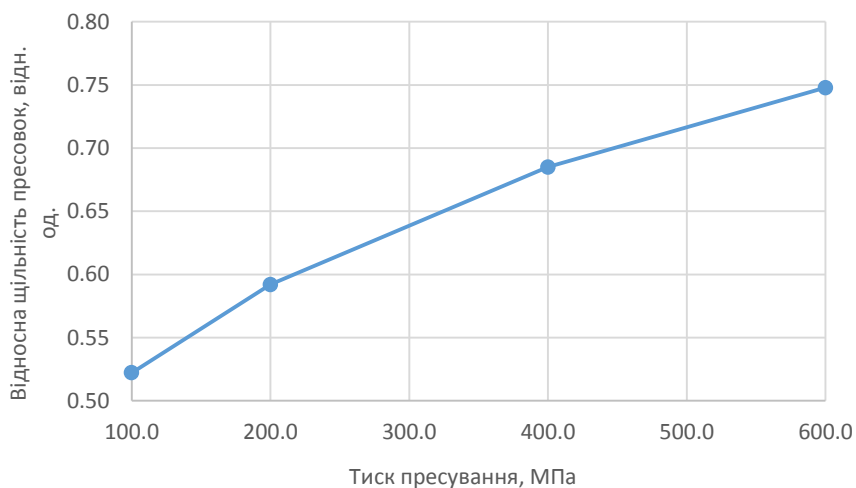
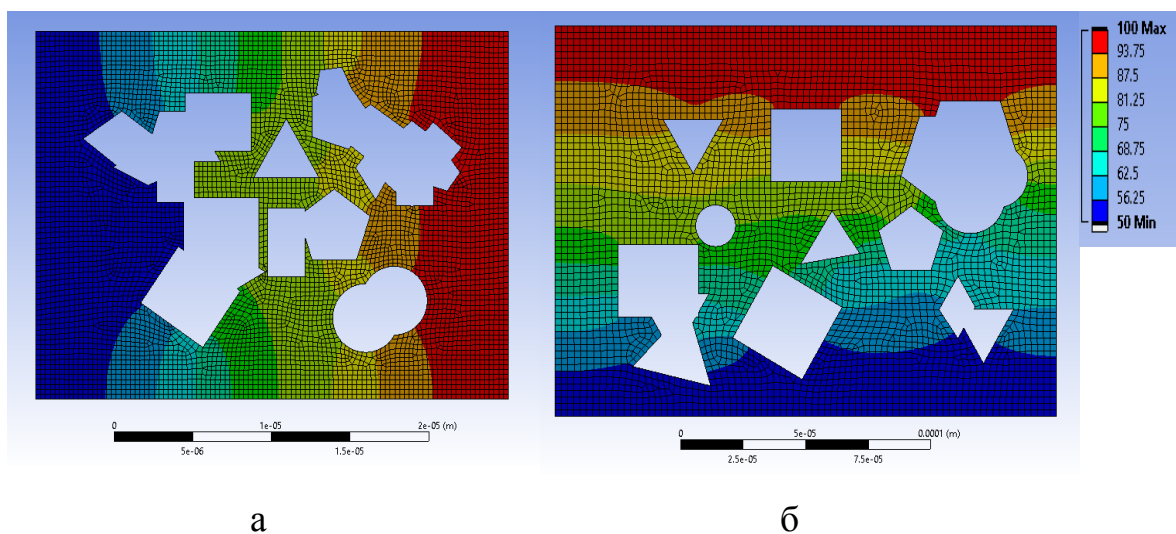


Рисунок 3.1 – Залежність відносної щільності зразків з Мо (пресованих з 1% СК після відпалу в водні при  $750^{\circ}\text{C}$ - $1100^{\circ}\text{C}$  протягом 2 годин) від тиску пресування

Як бачимо, отримані залежності відповідають теорії – зі збільшенням тиску пресування відносна щільність зразків зростає. З характеру отриманих залежностей можемо зробити висновок, що молібден під час пресування поводить себе як пластичний метал.

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

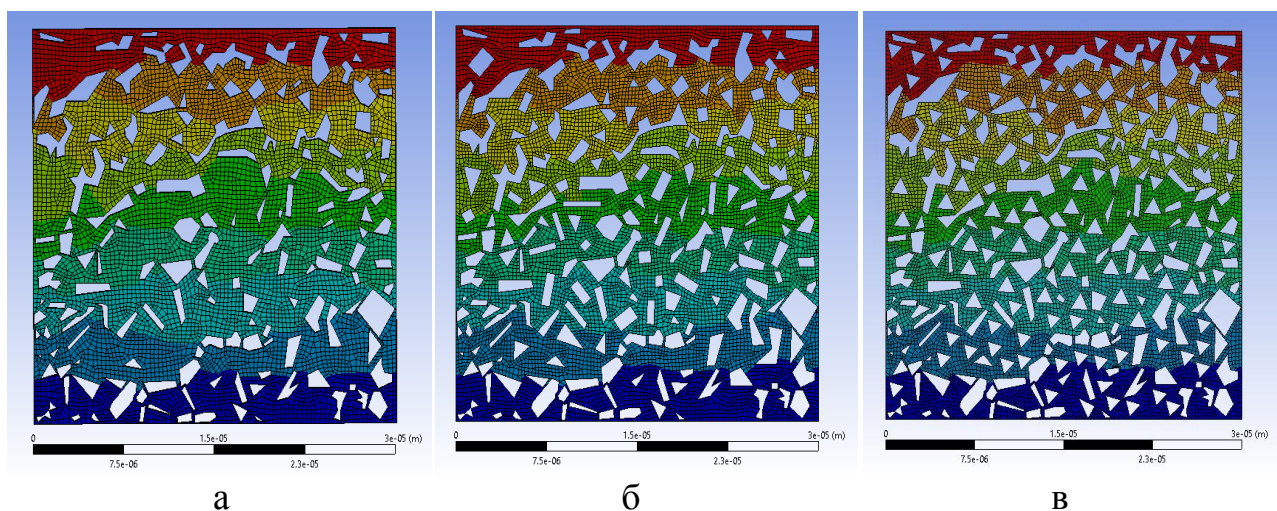
Додатково, розрахунок проведено на пористих структурах, одержаних шляхом графічного оброблення зрізів реальних зразків, пористістю 25%, 31% та 41%. Застосовували ту ж методику – розв'язання задачі стаціонарної теплопровідності та зворотної задачі для визначення питомих значень.



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

Рисунок 3.2 – Поле температур в модельних зразках

Приклади температурного поля показано на рисунку 3.3.



а – 21,5% П; б – 26,37% П; в – 30,14% П

Рисунок 3.3 – Поле температур в структурах, побудованих за пористістю реальних зразків з пористістю

Значення питомої теплопровідності, обчислені за модельними зразками та зразками, побудованими за реальними структурами було перераховано у

відносні величини – відношення обчисленої теплопровідності до табличних значень теплопровідності матеріалу за тих же температур. Результати розрахунків показано на рисунку 3.4.

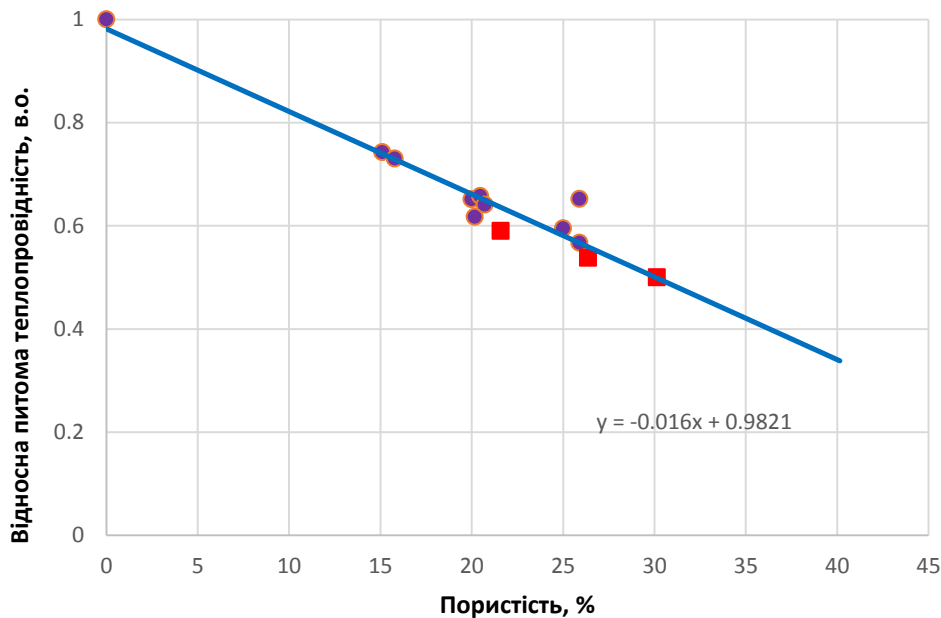


Рисунок 3.4 – Залежність відносного значення питомої теплопровідності від пористості: ○ - модельні об'єкти, □ - структури, побудовані за реальними пористими об'єктами.

Розрахунки дозволяють стверджувати, що залежність відносної питомої теплоємності від пористості зразків задовільно описується лінійною залежністю з коефіцієнтом, близьким до -1.6 (в розмірності [віднозн. одиниці] / [віднозн. одиниці]). Значення відносної питомої теплопровідності не залежить від застосованих граничних умов. Відхилення окремих значень питомої теплопровідності від прямої, збільшуються зі збільшенням пористості, і пов'язані 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 пористої заготовки застосовані в скінченно елементній моделі нагрівання молібденових заготовок в умовах електронно-променевого нагрівання. В якості матеріалу зразків обрали гомогенізоване середовище, питома теплопровідність якого визначалась за рівнянням:

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

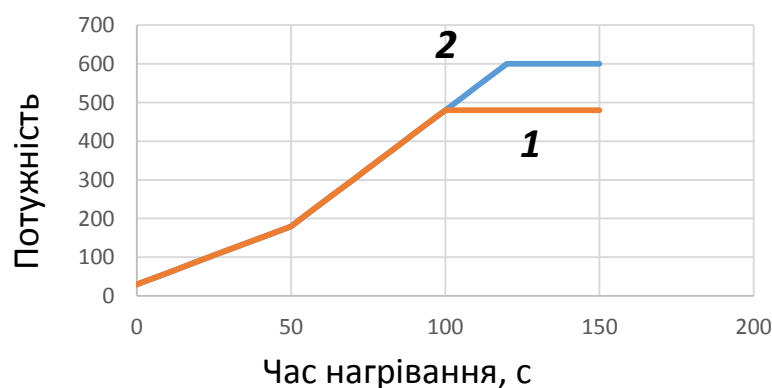
де  $\lambda$  – питома теплопровідність молібдену,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot^{\circ}\text{С}}$ ;

$\lambda_{\text{п}}$  – питома теплопровідність пористого молібдену,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot^{\circ}\text{С}}$ ;

$\theta$  – пористість, відн. од.

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

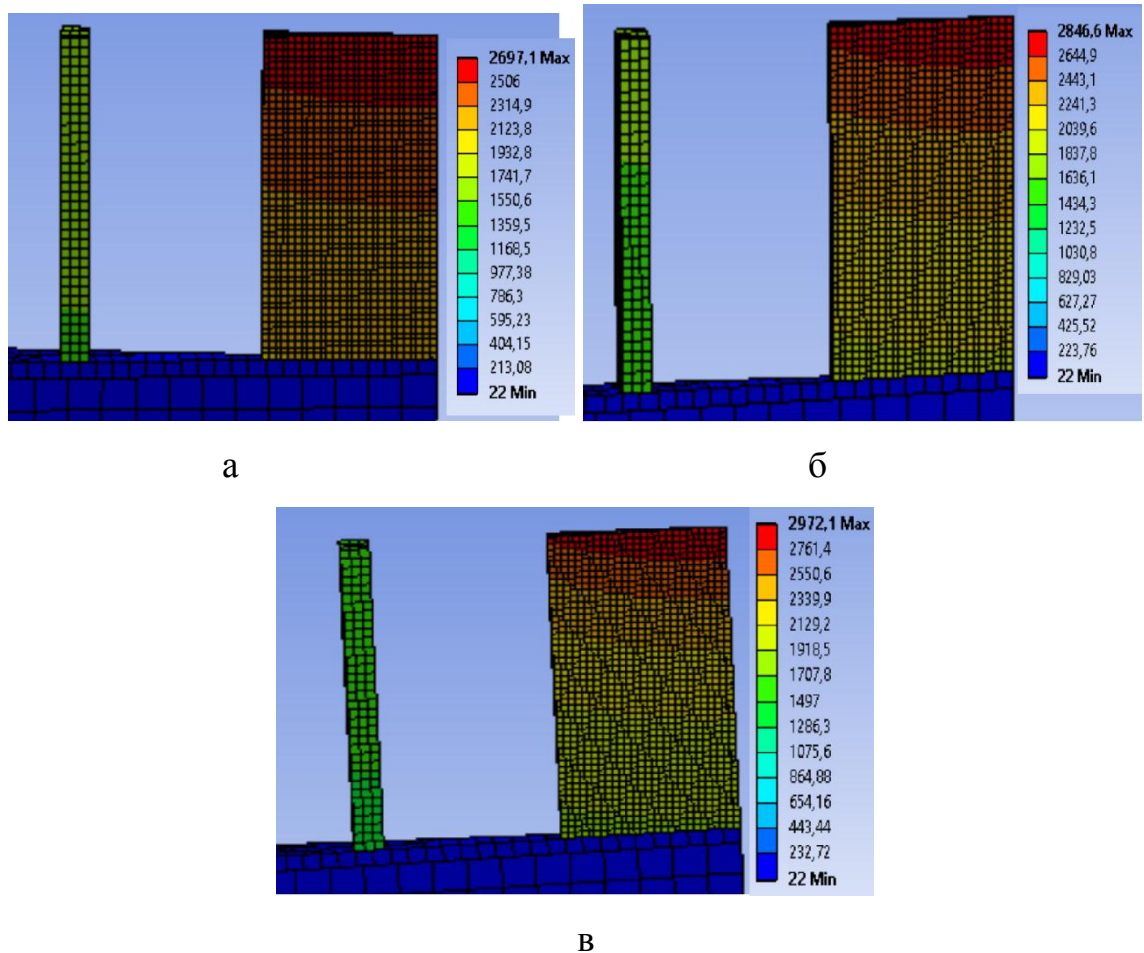
Потужність нагріву електронним променем визначали як добуток прискорюючої напруги та струму електронного променя. Діаграма збільшення потужності нагрівання від часу відображена на рисунку 3.5.



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

Рисунок 3.5 – Діаграма потужності нагрівання

На рисунку 3.6 Зображений розподіл температур по зразкам різної пористості за 200 секунд за потужності нагріву  $7,6 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, отриманий по результатах моделювання.



а – Мо 25%П; б – Мо 31%П; в – Мо 41%П

Рисунок 3.6 – Розподіл температур по досліджуваних зразках із температурною шкалою

В результаті моделювання зафіксовано зміну температури від часу у 6 точках, які знаходяться на різних відстанях від верхнього зрізу зразка (0 мм, 2 мм, 4 мм, 6 мм, 8 мм, 10 мм). Приклад зміни температури з часом нагрівання у вказаних точках показано на рисунку 3.7.

Обчислювальний експеримент дозволяє стверджувати, що температура (в кожній контрольній точці) зростає зі зростанням потужності нагрівання. При цьому витримка деякий час при одній потужності променю не

призводить до підвищення температури, що, ймовірно, пов'язано з тим, що тепловий баланс системи в такому випадку знаходиться у рівновазі: кількість енергії підведена електронним променем дорівнює сумі усіх теплових втрат зразка – відведення випромінюванням та через контакти. Такий результат виглядає закономірним, оскільки час експерименту є недостатнім для суттєвої зміни зовнішніх теплових умов – нагрівання масивної плити та стінок камери.

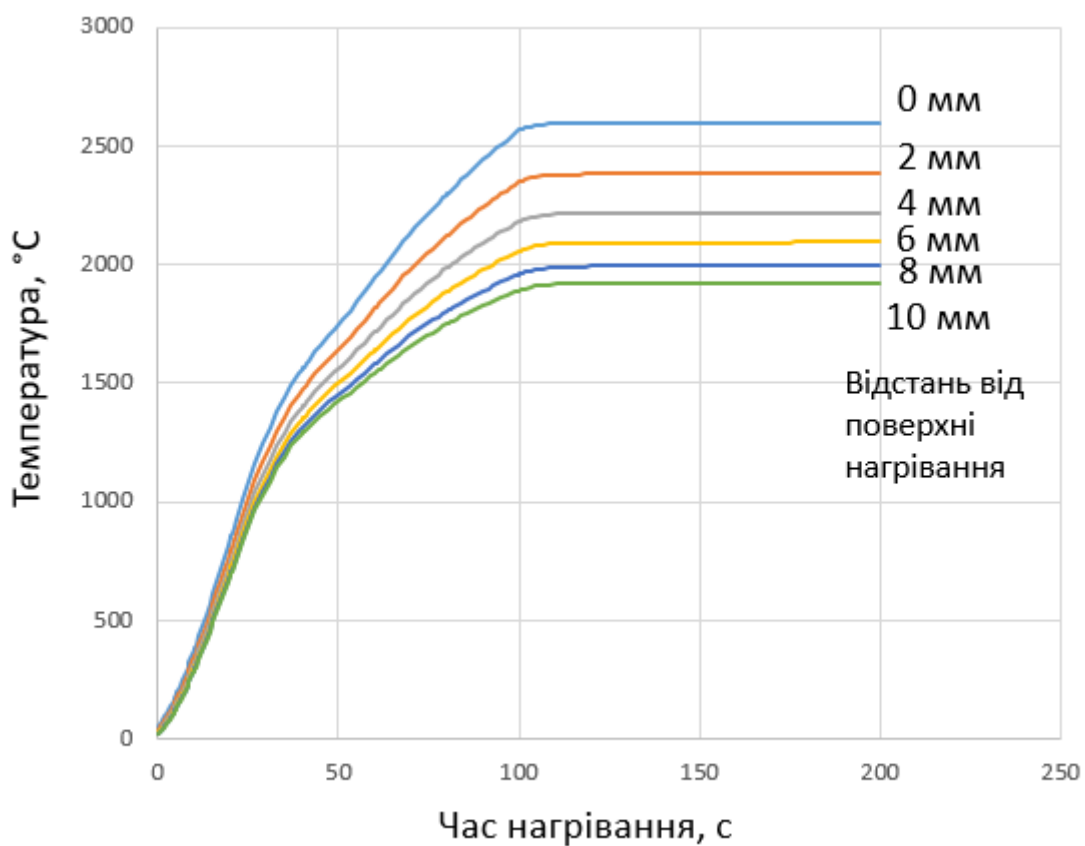
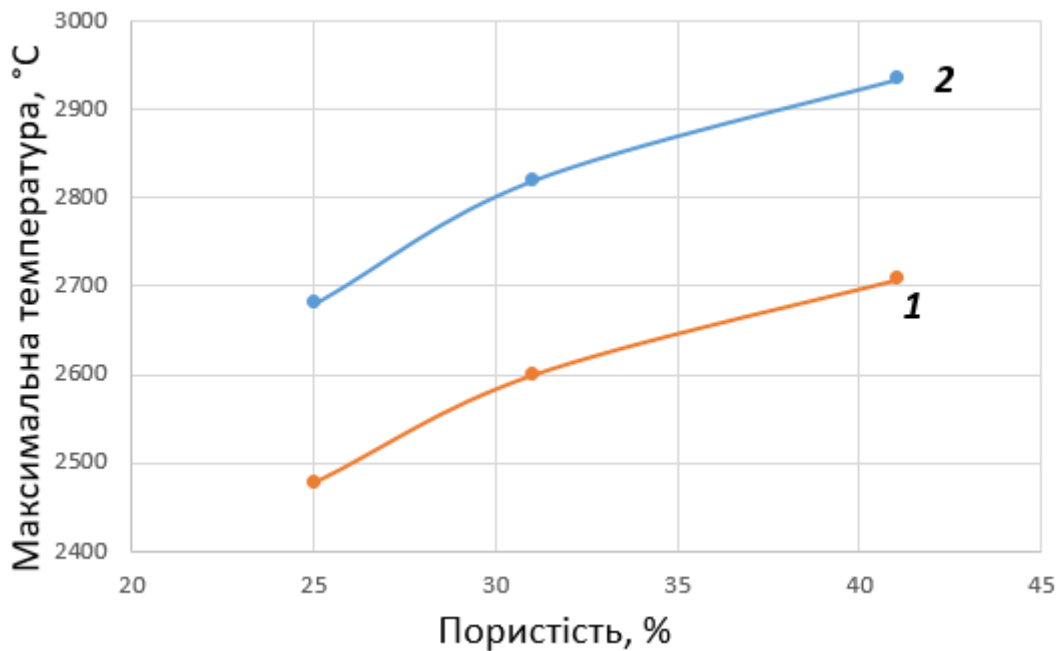


Рисунок 3.7 – Зміна температури в контрольних точках від часу нагрівання, пористість зразка 31%, режим нагрівання 1, згідно рисунка 3.5

Максимальні значення температури, які досягаються на верхньому зрізі зразка залежать також від пористості. Характер їх залежності показано на рисунку 3.8.

Вплив пористості на максимальну температуру пояснюється різницею тепловідведення по зразку: чим вище значення теплопровідності, тим більше тепла відводиться зразком на підкладку та основу, і, відповідно, знижується максимальна температура поверхні.

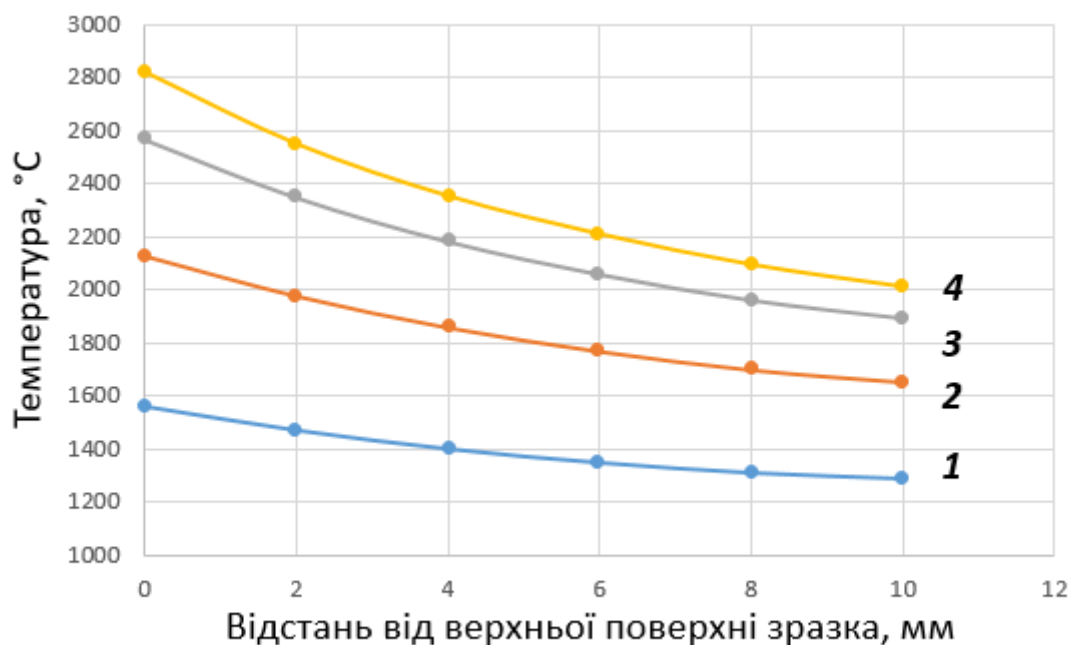


1 – режим нагрівання 1 (до 480 Вт); 2 – режим нагрівання 2 (до 600 Вт)

Рисунок 3.8 – Залежність максимальної температури нагрівання зразка від пористості

Окремо показані на рисунку 3.7 максимальні значення температури перевищують температуру плавлення молібдену. З одного боку, це опосередковано підтверджує правильність застосованої моделі, оскільки при досягненні потужності 600 Вт дійсно спостерігається оплавлення зразків. З іншого боку, вказані значення температур (2900 °C і вище) в системі не досягаються, оскільки при плавленні змінюється пористість і питома теплопровідність, що суттєво впливає на теплопередачу. Особливо це може бути помітним при спіканні високопористих зразків за режимом нагрівання 1 (до 480 Вт) (рис. 3.5).

По мірі нагрівання, формується градієнт температури по висоті пресовки. Так на рисунку 3.9 показано зміну градієнта температур від потужності променю для зразків з пористістю 31%.



1 –  $1.9 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>; 2 –  $3.82 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>; 3 –  $6.1 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>; 4 –  $7.64 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>

Рисунок 3.9 – Залежність температури в контрольних точках від відстані від верхньої поверхні для різних потужностей теплового потоку

Градієнт температур збільшується 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 за своєю сумарною здатністю поступаються потужності джерела теплової енергії. Максимальний розрахований градієнт температур для зразка з пористістю 41% потужністю нагрівання до 600 Вт ( $7.64 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>) складає більше 1000°C на зразок, або більше 100 °C/мм.

## 4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 4.1 Науково-технічна актуальність НДР

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

Розвиток і удосконалювання 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 матеріал з особливими властивостями.

Молібден 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 молібдену.

Використання молібдену надає можливість позбутися ряду ефектів нестабільності, а виготовлення молібдену 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 молібденових виробів.

В галузі літакобудування молібден 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 молібдену дозволить збільшити ефективність виробництва, за рахунок зменшення часу та витрат на виготовлення деталей з молібдену.

Тому дослідження технології і закономірностей отримання молібдену 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; моделювання процесу теплопередачі у пористих молібденових зразках.

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 пресовок 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 теми. Планування забезпечує зниження трудових і матеріальних витрат з метою отримання найкращих результатів за найменших витрат.

Планова собівартість визначається за наступними статтями витрат:

- заробітна плата науково-дослідницького персоналу;
- єдиний соціальний внесок;
- вартість спеціального обладнання для виконання МД;
- вартість матеріалів, необхідних для проведення МД;

- витрати на службові відрядження;
- інші прямі невраховані витрати по темі;
- 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                 | -        |

Продовження таблиці 4.1



|                                 |    |    |    |    |
|---------------------------------|----|----|----|----|
| Проведення експерименту         | 15 | 7  | 35 | 34 |
| Написання записки               | 7  | -  | 5  | -  |
| Оформлення, перевірка та захист | 5  | -  | 5  | -  |
| Разом                           | 33 | 10 | 50 | 34 |

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

Таблиця 4.2 – Розрахунок фонду заробітної плати виконавців теми

| Посада  | Трудомісткість<br>людино-днів | Місячний<br>оклад,<br>грн. | Денна<br>заробітна<br>плата,<br>грн. | Сумарна<br>заробітна<br>плата за<br>виконавцями,<br>грн. |
|---|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|--|
| Відповідальний виконавець теми, старший науковий співробітник | 33                            | 12 612                     | 600,57                               | 19818,86   |
| Молодший науковий співробітник                                | 10                            | 4689                       | 223,28                               | 2232,85  |

## Продовження таблиці 4.2

|                   |    |      |        |          |
|-------------------|----|------|--------|----------|
| Інженер-дослідник | 50 | 6474 | 308,28 | 15414,29 |
| Лаборант          | 30 | 4489 | 213,76 | 6412,85  |
| Разом             |    |      |        | 43818,86 |

**4.3.2 Єдиний соціальний внесок**

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

Таким чином, єдиний соціальний внесок складе:

$$V_C = 43818,86 * 0,22 = 9653,34 \text{ грн.}$$

**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        |

## Продовження таблиці 4.3

|               |   |    |      |     |       |
|---------------|---|----|------|-----|-------|
| 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:

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

**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 НДР не закуповувалось.

**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.

$$I_B = (43878,86 + 9653,34 + 135,85) * 0,1 = 5366,72 \text{ грн.}$$

#### **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.

$$H_B = (43878,86 + 9653,34 + 135,85 + 5366,72) * 0,20 = 11806,95 \text{ грн.}$$

#### **4.4 Планова кошторисна вартість НДР**

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                | 43878,86   | 61      | За розрахунками                       |
| Єдиний соціальний внесок                 | В <sub>С</sub>    | 9653,34    | 14      | 22% від ЗП                            |
| Вартість основних матеріалів             | В <sub>М</sub>    | 135,85     | 0,3     | 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>    | 5366,72    | 7,7     | 10% від суми врахованих прямих витрат |
| Накладні витрати                         | Н <sub>В</sub>    | 11806,95   | 17      | 20% від усіх прямих витрат по темі    |
| Разом                                    | В <sub>ДР</sub>   | 70841,72   | 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, що 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 К4:

- 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 1млн.грн.– 9.

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

Таблиця 4.5 – Бальна оцінка ефективності НДР

| Показник оцінки ефективності НДР                | Умовне позначення показника | Характеристики даної роботи                                 | Кількість балів |
|---|-----------------------------|---|-----------------|
| 1.Важливість розробки                           | К <sub>1</sub>              | робота є частиною міжнародної комплексної програми          | 8               |
| 2. Можливість використання результатів розробки | К <sub>2</sub>              | результатами розробки можуть користуватися у різних галузях | 10              |

Продовження таблиці 4.5

|  |       |  |   |
|--|-------|--|---|
| 3.Теоретична значимість та рівень новизни розробки | $K_3$ | внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики тощо          | 6 |
| 4.Складність дослідження                           | $K_4$ | роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень | 3 |

Загальна оцінка вираховується перемноженням коефіцієнтів. Умовний ефект на кожен бал становить 500 грн.

$$E_o^y = 500 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4$$

де  $K_1$  – коефіцієнт важливості розробки;

$K_2$  – коефіцієнт можливості використання результатів розробки;

$K_3$  – коефіцієнт теоретичного значення та рівня новизни;

$K_4$  – коефіцієнт складності розробки.

$$E_o^y = 500 \cdot 8 \cdot 10 \cdot 6 \cdot 3 = 720000 \text{ грн}$$

Умовний ефект НДР:

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

де  $E_o^y$  – умовний оціночний ефект;

$E_n$  – коефіцієнт ефективності;



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

$$E_{\text{НДР}}^y = 720000 - 0,25 \cdot 70841,72 = 702289,57 \text{ грн.}$$

Тоді коефіцієнт умовної економічної ефективності:

$$E = \frac{E_{\text{НДР}}^y}{Z_{\text{НДР}}}$$

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

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

$$E = \frac{702289,57}{70841,72} = 9,91$$

Коефіцієнт умовної ефективності нашої роботи дорівнює 9,91, що свідчить про доцільність її виконання.

Розрахований показник свідчить про доцільність виконання НДР по даній темі.

#### **4.6 Висновки**

Обґрунтована науково-технічна актуальність виконання досліджень по даній темі. Розраховано планово-кошторисну собівартість проведення НДР з урахуванням витрат всіх видів ресурсів.

Розраховано показник умовної економічної ефективності проведення роботи.

## 5 РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ

Метою даного розділу є аналіз виробничих умов та факторів, бо вони можуть призвести до травматизму в процесі електронно-променевого спікання молібдену.

Пил молібдену та його з'єднань, таких як триокис молібдену і молібдатів, що розчинюються у воді, можуть мати незначну токсичність при вдиханні або потраплянні всередину. Є ризик накопичення молібдену в організмах працюючих в видобувній промисловості та на збагаченні руд, в хімічній промисловості.

Робота з тугоплавкими металами є досить небезпечна, тому дотримання правил техніки безпеки – запорука успіху при проведенні експериментів. На кожному етапі виконання експерименту існують свої фактори ризику, такі як: шкідливий вплив на слизові оболонки та легеневі тканини; можна отримати опіки та різні травми при роботі на пресах та з електричним обладнанням; 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 [25].

### 5.1 Характеристика об'єкту та умови його експлуатації

Технологічний процес електронно-променевого спікання відбувається за такого обладнання:

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

Дані щодо технологічного обладнання та оснащення вибраного приміщення наведені у таблиці 5.1.

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 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                  |

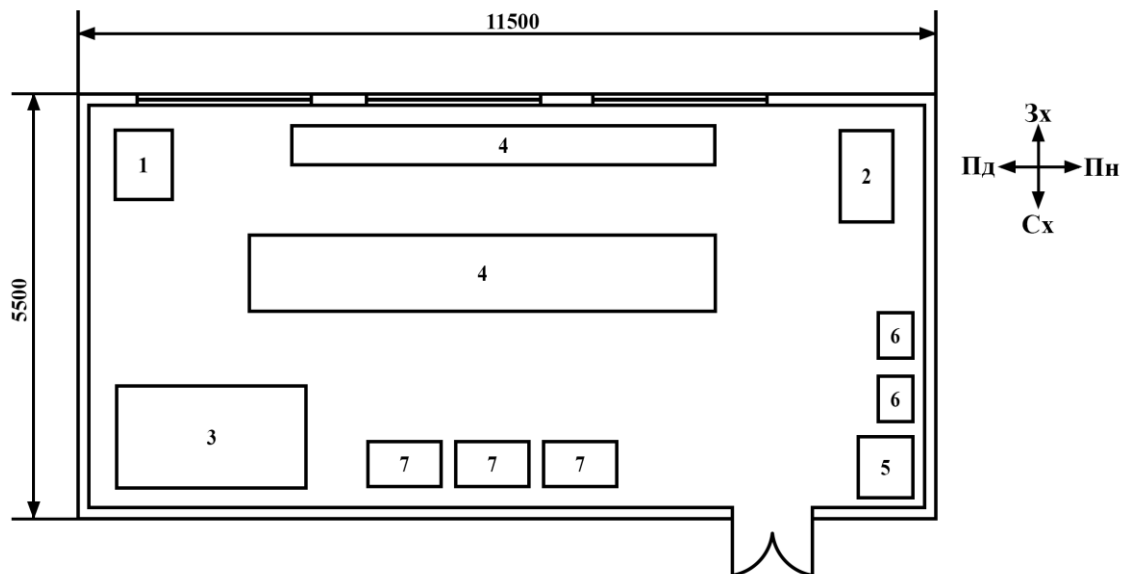
Гідравлічний прес RP-L023 під час пресування досягає тиску до 1,2 ГПа. За такого високого тиску існує можливість розколу прес-форми та нанесення тяжких тілесних ушкоджень. Для унеможливлення отримання травм під час пресування на робочу частину преса накладений та закріплений металевий заслін. Оскільки 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 [26], 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 [27].

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, електробезпека є крайні важливою. 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 [28].

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 до основних вимог 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.

В нашому 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 –  $V_{\text{ч}} = 284,625/4 = 71,16 \text{ м}^3/\text{чол.}$

У таблиці 5.2 наведені реальні та нормативні значення приміщення і розміщення технологічного обладнання.

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

| № | Параметр приміщення       | Реальне значення лабораторії | Нормативні значення |
|---|---------------------------|------------------------------|---------------------|
| 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. Розглянемо більш детально процес отримання молібдену методом електронно-променевого спікання згідно технологічної схеми (рис. 2.1).

Основні процеси, що несуть потенційну небезпеку при виконанні НДР:

- дозування порошку;
- змішування порошку з пластифікатором;
- пресування заготовок;
- відпал;
- 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  $3,5 \text{ мг/м}^3$  [28].

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.

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.

Фінальною операцією отримання молібдену є спікання, у НДР спікання проводилось електронно-променевим методом. 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 створюють такі шкідливі виробничі фактори як: випромінювання в оптичному діапазоні видиме та ультрафіолетове та іонізуюче випромінювання, а також створюється небезпека ураження електричним струмом.

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

Оскільки в процесі отримання молібдену методом електронно-променевого спікання на етапі відновлення використовується трубчаста відновлювальна піч Siemens, що працювала за температур 750-1100°C – то вона суттєво впливає на мікроклімат. 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 «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 [26], а також окуляри, та захисні килимки.



Один з небезпечний факторів – пи́л, що виникає на етапі змішування пластифікатора з порошком молібдену. Вдихання пилу молібдену викликає подразнення очей, слизистих оболонок носу, горла, призводить до тяжких легеневих хвороб.

Для попередження потрапляння шкідливих речовин в організм та отруєння шкідливими речовинами проводиться у витяжній шафі безпосередньо у джерела випарів. Лабораторія добре провітрюється. Використовуються захисні скла (окуляри), спецодяг і досить надійні респіратори, що дозволяють знизити рівень контакту з сухими молібденовмістними інгредієнтами. Для додаткового захисту під час проведення даної технологічної операції використовувалися лабораторні сита та керамічні ступки, що не становлять небезпеки.

### **5.2.2 Освітленість**

Відповідно до ДБН В.2.5.28-2006 «Природне та штучне освітлення» 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 пресування присутній гідравлічний прес. Він не виділяє шум та вібрацію, бо він ручний.

### **5.2.4 Виробничі випромінювання**

Під час відпалу співробітник піддається впливу інфрачервоного випромінювання. При тривалому перебуванні в зоні ІЧ випромінювань відбувається порушення теплового балансу в організмі. Порушується робота

терморегулюючого апарату, посилюється діяльність серцево-судинної і дихальної систем, потовиділення, відбувається втрата потрібних організму солей. Для запобігання, гарячі поверхні екрановані, а співробітники мають відповідний захисний одяг: маски захисні з прозорим екраном, окуляри захисні козиркові з світлофільтрами, повстяний костюм, каска з полікарбонату.

Відповідно до електронно-променевої технології створюють такі шкідливі виробничі фактори як: видиме ультрафіолетове та іонізуюче випромінювання в оптичному діапазоні. Оскільки установка модифікована захисним склом, то дія випромінювання зводиться до мінімуму, за необхідності є можливість додати перерви у роботі оператора електронного променю.

### **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 Siemens.

Під час роботи за установкою СВ-112 існує небезпека ураження електричним струмом оскільки для роботи електронного променю використовуються струми високої потужності, електробезпека є крайньо важливою. 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 СВ112 обладнана пристроєм захисного вимикання – високонадійною швидкодіючою системою захисту, яка застосовується в електроустановках, які потребують високого рівня безпеки. Струмopровідні кабелі установки ізолювані по всій довжині та захищені від механічних ушкоджень та екрановані, що частково запобігає електромагнітному випромінюванню. За способом захисту людини від ураження електричним

струмом установка СВ112 відносить до I класу електротехнічних виробів, що мають робочу ізоляцію та елемент для заземлення, виріб має провід для приєднання до джерела живлення, та має заземлюючу жилу і вилку із заземлюючим контактом.

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

Весь персонал, що обслуговує спеціальне обладнання періодично проходить інструктаж про небезпеку, 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 НАПБ Б.03.002-2007 «Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою», 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 одними з причин можуть бути коротке замикання та перегрів установок.

Для запобігання займання легкозаймистих матеріалів є такі правила їх зберігання та використання: 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 відповідають нормам. 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 виділення місця для нагляду за обладнанням. Частина процесів повністю автоматизована. Устаткування виконане з якісних матеріалів. Самі технологічні процеси максимально знижують можливий контакт із небезпечними речовинами.

## ВИСНОВКИ

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

Обґрунтовано застосування методу скінчених елементів для розрахунку питомої теплопровідності пористого середовища. Одержано коефіцієнти лінійної залежності відносної теплопровідності пористого тіла від пористості.

Розроблено та застосовано скінченно-елементну модель формування температурного поля в пористій заготовці в умовах електронно-променевого нагрівання. Показано, що градієнт температурного поля залежить від пористості та потужності нагрівання і може досягати значень більше 100 °С/мм для високопористих зразків і за великих потужностей нагрівання.

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, the regularities of compaction during the pressing of molybdenum powder were investigated. It has been shown that an increase in the pressing pressure naturally leads to an increase in the relative density of the samples.

Application of finite element method for calculation of specific thermal conductivity of porous medium is justified. Coefficients of linear dependence of relative thermal conductivity of porous body on porosity are obtained.

A finite element model for forming a temperature field in a porous workpiece under electron beam heating conditions has been developed and applied. It is shown that the temperature field gradient depends on porosity and heating power and can reach values more than 100 °C/mm for highly porous samples and at high heating powers.

Sound scientific and technical relevance of research on this topic. The planned and estimated cost costs and economic efficiency of carrying out research work taking into account the costs of all types of resources were analyzed.

Production conditions were analyzed and the main requirements for labor protection were formulated when performing research work on a given topic.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (II частина)  
Г.О. Андрощук // Наука, технології, інновації. — 2017. — № 2 (2). — С. 29-36. — Бібліогр.: 17 назв. — укр.
2. Вольфрам и молибден [Текст] : Пер. с чешского / К. Агте, И. Вацек ; Под ред. А. А. Котляра. - Москва ; Ленинград : Энергия, 1964. - 455 с. : ил.; 20 см.
3. Металлургия редких металлов. Зеликман А.Н. , Коршунов Б. Г. : Учебник для вузов . 2-е изд. , перераб . и доп . — М. : Металлургия 1991 .
4. USGS, 2017. Molybdenum Statistics. (January 2017)
5. Halada, K., Shimada, M., & Ijima, K. (2008). Decoupling Status of Metal Consumption from Economic Growth. MATERIALS TRANSACTIONS, 49(3), 411–418. doi:10.2320/matertrans.ml200705
6. Галевский Г.В., Руднева В.В. Металлургия молибдена. Конспект лекций // Издательский центр СибГИУ, Новокузнецк, 2018. – 52 с.
7. Молибден [Электронный ресурс] // Википедия: свободная энциклопедия [официальный вебсайт]. – Электронные 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: 05.04.2020
8. Зеликман А.Н. Молибден [Текст] / А.Н. Зеликман – М. : Металлургия, 1970. – 320 с.
9. Parish, R. V. (1977). The Metallic Elements. New York: Longman. pp. 112, 133. ISBN 978-0-582-44278-8.
10. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа. Справочник / Под ред. О.А. Банных, М.Е. Дрица. М.: Металлургия, 1986. - 440 с.

11. Lunk, H.-J., & Hartl, H. (2017). Discovery, properties and applications of molybdenum and its compounds. *ChemTexts*, 3(3). doi:10.1007/s40828-017-0048
12. Никонов Н.В. Молибден. Свойства, применение, производство, продукция [Текст] / Н.В. Никонов. – М. : Метотехника, 2014. – 31 с.
13. Лыкасов А.А. Металлургия вольфрама и молибдена / А.А. Лыкасов, Г.М. Рысс, В.М. Жихарев. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 80 с.
14. Глинка Н. Л. Общая химия: [Учеб. пособ. для вузов / Н. Л. Глинка; Под ред. А. И. Ермакова. – 28-е. изд., перераб. и доп. – М.: Интеграл-Пресс, 2000. – 727 с.: ил. –
15. Электротехнологические промышленные установки: Учебник для вузов/ И. П. Евтюкова, Л. С. Кацевич, Н. М. Некрасова, А. Д. Свенчанский; Под редакцией А. Д. Свенчанского. - М.: Энергоиздат, 1982. - с. ил.
16. Пилипенко, О.С. Аналіз методів та обладнання для 3D друку будівель [Текст] / О.С. Пилипенко, Д.О. Варуха, В.А. Смирнов ; кер. О.О. Ляпощенко // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фак-ту техн. систем та енергоефективних технологій, м. Суми, 18–21 квітня 2017р.: у 2-х ч. / Ред.кол.: О.Г. Гусак, В.Г. Євтухов. – Суми : СумДУ, 2017. – Ч.2. – С. 91.
17. Wang, Xin; Jiang, Man; Zhou, Zuowan; Gou, Jihua; Hui, David (2017). "3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective". *Composites Part B: Engineering*. 110: 442–458. doi:10.1016/j.compositesb.2016.11.034.
18. Гречко А.М. Ресурсозберігаючі й екологічнобезпечні технології. Конспект лекцій. // Харків, 2016. – 20 с.
19. Чередниченко, В. С. Электротехнические и конструкционные материалы / В. А. Филиков.-4-е изд.-М.: Академия, 2008.-280 с.



20. Суворин, А. В. Электротехнологические установки [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. В. Суворин. - Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. - 376 с. - ISBN 978-5-7638-2226-7.
21. Y.S.Choi, R.A.Brockman Representation of Materials Constitutive Responses in Finite Element-Based Design Codes // Computational Methods for Microstructure-Property Relationships. Editors S.Ghosh, D.Dimiduk. Springer. 2011. P. 199-238.
22. Методичні вказівки і контрольні завдання з дисципліни «Основи теплотехніки» для студентів напрямів підготовки 6.090202 «Інженерна механіка» та 6.050503 «Машинобудування» заочної форми навчання. /Укладачі: Чухно С.І., Музичка Д.Г. - Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2016р. 40 стор.
23. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учеб. Пособ. / В.А. Бруйка, В.Г. Солдусова, Н.А. Глазунова, И.Е. Адеянов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.: ил.
24. Нестационарна теплопровідність: навч. посіб./ С. В. Юшко, О. Є. Борщ, Г. І. Токар – Х. : НТУ «ХП», 2012.– 112 с.
25. Про затвердження Вимог безпеки та захисту здоров'я під час використання виробничого обладнання працівниками [Текст] : Z0097-18. – [Чинний від 2017-12-28]. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 9 с.
26. Рукавички захисні. Загальні вимоги та методи випробування [Текст] : ДСТУ EN 420:2017. – [Чинний від 2018-02-01]. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 35 с.
27. Правила улаштування електроустановок [Текст] : ПУЕ-2017. – К. : Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.
28. Система стандартів безпеки труда. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам [Текст] : ДСТУ ГОСТ 12.2.061:2009. – [Чинний від 2009-02-01]. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2009. – 65 с.