

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова

Кораблебудівний навчально-науковий інститут  
(повне найменування інституту, назва факультету )

Кафедра матеріалознавства і технології металів  
(повна назва кафедри)

«Допущений до захисту»



Завідувач кафедри  
Юлія КАЗИМИРЕНКО

« 10 » 06 2026 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на здобуття вищої освіти «бакалавр»  
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Дослідження і вибір технології  
для виготовлення пористої бронзової втулки»

Виконала: студент 4 курсу, групи 4131



Ігор СТАРОВОЙТ

Керівник: д.т.н., проф. кафедри



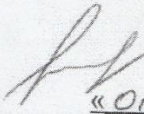
Юлія КАЗИМИРЕНКО

м. Миколаїв — 2026 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова

Інститут, факультет кораблебудівний навчально-науковий інститут  
Кафедра матеріалознавства і технології металів  
Освітньо-кваліфікаційний рівень перший (ступінь бакалавра)  
Спеціальність 132 матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ

 Гарант освітньої програми  
к.т.н., доцент Лебедева Н.Ю.

«01» 04 2026р.

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Старовойт Ігор Олександрович

1. Тема роботи «Дослідження і вибір технології для виготовлення пористої бронзової втулки»

керівник проекту (роботи) д.т.н., доцент, професор каф. М і ТМ  
Казимиренко Юлія Олексіївна

затверджені наказом вищого навчального закладу від 09.06.2026 № 391

2. Термін подання роботи 10.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи літературні джерела, інструкції та методики, ТУ на матеріали

4. Перелік питань, що належать розробці (найменування розділів)

1. Сучасний стан і проблемні питання порошкових технологій виготовлення пористих бронзових деталей

2. Розробка технологічних операцій виготовлення пористої бронзової втулки

3. Організацій виробництва на дільниці з виготовлення бронзових втулок  
Висновки.

Список використаних джерел.

Додатки

5. Перелік презентаційних матеріалів

1. Актуальність тематики дослідження.

2. Мета, завдання, об'єкт, методи досліджень.

3. Аналіз порошкових технологій виготовлення пористих бронзових деталей.

4. Теоретичні передумови вибору технології.

5. Технологічна схема виготовлення бронзової втулки.

6. Організацій виробництва на дільниці.

7. Висновки

#### 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|--------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|        |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
| 1      | проф. Казимиренко Ю. О.                   | 01.04.2026     | 01.04.2026       |
| 2      | проф. Казимиренко Ю. О.                   | 15.04.2026     | 15.04.2026       |
| 3      | проф. Казимиренко Ю. О.                   | 01.05.2026     | 01.05.2026       |

#### 7. Дата видачі завдання 01.04.2026

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів магістерської роботи                                                               | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | Сучасний стан і проблемні питання порошкових технологій виготовлення пористих бронзових деталей | 01.05.2026                    | вик      |
| 2     | Розробка технологічних операцій виготовлення пористої бронзової втулки                          | 15.05.2026                    | вик      |
| 3     | Організація виробництва на ділянці з виготовлення бронзових втулок                              | 01.06.2026                    | вик      |
| 4     | Складання висновків та списку літератури                                                        | 05.06.2026                    | вик      |
| 5     | Підготовка слайд-презентації                                                                    | 08.06.2026                    | вик      |
| 6     | Підготовка доповіді                                                                             | 08.06.2026                    | вик      |
| 7     | Перевірка на плагіат                                                                            | 08.06.2026                    | вик      |
| 8     | Попередній захист                                                                               | 10.06.2026                    | вик      |

Здобувач освіти



Ігор СТАРОВОЙТ

Керівник



Юлія КАЗИМИРЕНКО  
д.т.н., проф. каф. М і ТМ

## АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота «Дослідження і вибір технології для виготовлення пористої бронзової втулки» на здобуття вищої освіти «бакалавр» за спеціальністю 132— Матеріалознавство. Освітня програма — «Композиційні а порошкові матеріали, покриття».

Робота присвячена обґрунтованому вибору технології виготовлення пористої втулки.

**Мета роботи** — на підставі ґрунтовного аналізу перспективних методів отримання порошкових деталей простої конфігурації обрати і дослідити раціональну технологію для виготовлення пористої бронзової втулки

**Об'єктом дослідження** є процеси формування структури бронзової пористої втулки.

**Методи досліджень:** мікроструктурний аналіз, аналіз деформаційних процесів порошків і контролю за розміром зерна, аналіз діаграм стану.

**Апробація результатів роботи** — за темою «Дослідження і вибір технології для виготовлення пористої бронзової втулки» підготовлено наукову роботу для участі у Всеукраїнському конкурсі студентських наукових робіт 2025/2026 н.р. у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова.

Дипломна робота викладена на 67 сторінках друкованого тексту, містить 10 таблиць, 12 рисунків. Список використаних джерел складається з 17 найменувань.

**Ключові слова:** пориста структура, механічне легування, пресування, спікання, металеві порошки

## ANNOTATION

Qualification work «Research and selection of technology for the manufacture of a porous bronze sleeve» is obtaining a higher education «Bachelor degree» in the specialty 132-Science of the Materials. Educational program - «Composite and powder materials, coatings».

This study is devoted to the rational selection of a manufacturing process for a porous sleeve.

The objective of this study is to select and investigate a rational manufacturing process for a porous bronze sleeve based on a thorough analysis of promising methods for producing powder parts with simple geometries.

The object of the study is the processes of forming the structure of a porous bronze sleeve.

Research methods: microstructural analysis, analysis of powder deformation processes and grain size control, phase diagram analysis.

Validation of the results: a research paper on the topic “Investigation and Selection of a Technology for Manufacturing a Porous Bronze Bushing” was prepared for submission to the All-Ukrainian Student Research Competition for the 2025/2026 academic year at the Admiral Makarov National University of Shipbuilding.

The thesis consists of 67 pages of printed text, contains 10 tables, and 12 figures. The list of references consists of 17 titles.

Keywords: porous structure, mechanical alloying, pressing, sintering, metal powders

## ЗМІСТ

### ВСТУП

### РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН І ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ПОРОШКОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОРИСТИХ БРОНЗОВИХ ДЕТАЛЕЙ

- 1.1. Призначення та умови експлуатації бронзової втулки
- 1.2. Аналіз конструкції деталі
- 1.3. Аналіз існуючих технологій виготовлення виробів з порошку бронзи
  - 1.3.1. Легування порошку міді оловом
  - 1.3.2. Віброформування порошку бронзи з наступним спіканням
  - 1.3.3. Гаряче пресування порошку бронзи
  - 1.3.4. Можливості застосування адитивних технологій, пошарового напікання та селективного лазерного спікання металевих порошків
- 1.4. Характеристика порошку бронзи (матеріалу)
  - 1.4.1. Характеристика порошку бронзи
  - 1.4.2. Склад та властивості порошкової бронзи ПАБ 90-10
  - 1.4.3. Характеристика пористих антифрикційних бронз
  - 1.4.4. Обґрунтування застосування самозмащувальних матеріалів у втулках
  - 1.4.5. Порівняння ПАБ 90-10 з альтернативними матеріалами
- 1.5. Аналіз невирішених питань та постановка завдань досліджень

### РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОРИСТОЇ БРОНЗОВОЇ ВТУЛКИ

- 2.1. Загальний опис технологічного процесу.
- 2.2. Вибір і дослідження сировинних компонентів
  - 2.2.1. Особливості процесів механічного легування порошків
  - 2.2.2. Отримання та підготовка порошків
  - 2.2.3. Змішування та легування порошків
- 2.3. Підготовчі та основні технологічні операції
  - 2.3.1. Пресування та спікання заготовки
  - 2.3.2. Ущільнення порошку бронзи марки БрОФ-10-1 при вібраційному формуванні
  - 2.3.3. Ущільнення порошку бронзи марки БрОФ-10-1 при статичному пресуванні

|                                                 |                                                                 |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 2.3.4.                                          | Аналіз процесів спікання порошку бронзи БрОФ-10-1               |
| 2.4.                                            | Технологічний цикл і процеси структуроутворення                 |
| 2.4.1.                                          | Головні цілі термічної обробки                                  |
| 2.4.2.                                          | Режими відпалу та стабілізації втулки ПАБ 90-10                 |
| 2.4.3.                                          | Вплив термообробки на структуру і властивості сплаву            |
| 2.4.4.                                          | Необхідна пористість та щільність заготовки                     |
| 2.5.                                            | Калібрування та просочування мастилом                           |
| 2.6.                                            | Висновки до розділу 2                                           |
| РОЗДІЛ 3. ОРГАНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА НА ДІЛЬНИЦІ З |                                                                 |
| ВИГОТОВЛЕННЯ БРОНЗОВИХ ВТУЛОК                   |                                                                 |
| 3.1.                                            | Вибір і характеристика технологічного обладнання                |
| 3.1.1.                                          | Обладнання для підготовки та дозування порошків                 |
| 3.1.2.                                          | Обладнання для змішування                                       |
| 3.1.3.                                          | Обладнання для пресування                                       |
| 3.1.4.                                          | Обладнання для спікання                                         |
| 3.1.5.                                          | Обладнання для калібрування та просочування                     |
| 3.1.6.                                          | Обладнання для контролю якості                                  |
| 3.2.                                            | Структура технологічної ділянки                                 |
| 3.3.                                            | Заходи щодо охорони праці, пожежної безпеки та захисту довкілля |
| 3.4.                                            | Техніко-економічні показники виготовлення бронзової втулки      |
| 3.4.1.                                          | Норма витрат матеріалу                                          |
| 3.4.2.                                          | Розрахунок собівартості однієї втулки                           |
| 3.4.3.                                          | Порівняння з альтернативними методами                           |
| 3.5.                                            | Висновки до розділу 3                                           |
| ВИСНОВКИ                                        |                                                                 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ                      |                                                                 |
| ДОДАТКИ                                         |                                                                 |

## ВСТУП

Перевагами технологій порошкової металургії є безвідходність та енергоефективність процесу виготовлення універсальних деталей простої конфігурації. Бронзові втулки, які використовуються у автомобіле- авіа-, суднобудуванні, характеризуються високою зносостійкістю, корозійною стійкістю. Для їх виготовлення можна застосовувати методи одно- і двобічного статичного пресування, механічного легування, віброформування, гарячого пресування, а також адитивні технології з пошаровим напіканням і селективним лазерним спіканням. Проте кожен з методів забезпечує певні фізико-хімічні процеси формування пористої структури і експлуатаційних властивостей. Проблемними технологічними питанням вважаються забезпечення рівномірної щільності порошкового матеріалу, контролювання та управління деформаційними процесами під час спікання порошкового тіла, пригнічення процесів росту зерен, скорочення часу консолідації порошків. Вирішення цих завдань вимагатиме ґрунтовного аналізу альтернативних технологій, які можуть бути використані для виготовлення виробів циліндричної форми типу втулки з порошків бронзи.

**Мета роботи** — на підставі ґрунтовного аналізу перспективних методів отримання порошкових деталей простої конфігурації обрати і дослідити раціональну технологію для виготовлення пористої бронзової втулки.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

- 1) проаналізувати сучасний стан і проблемні питання порошкових технологій, які застосовуються для виготовлення пористих бронзових деталей;
- 2) розробити технологічні операції виготовлення пористої бронзової втулки;
- 3) Розробити організаційні заходи з виготовлення бронзових втулок: скласти план ділянки з розміщенням на неї обладнанням, розрахувати техніко-економічні показники, розглянути заходи щодо охорони праці і навколишнього середовища.

**Об'єктом дослідження** є процеси формування структури бронзової пористої втулки.

**Методи досліджень:** мікроструктурний аналіз, аналіз деформаційних процесів порошків і контролю за розміром зерна.

# **РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН І ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ПОРОШКОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОРИСТИХ БРОНЗОВИХ ДЕТАЛЕЙ**

## **1.1 Призначення та умови експлуатації бронзової втулки**

Сучасне машинобудування висуває підвищені вимоги до надійності, довговічності та економічності деталей тертя. Особливе місце серед таких деталей займають втулки підшипників ковзання (рис. 1.1), які широко застосовуються у вузлах машин і механізмів для підтримання валів та зменшення втрат на тертя. У процесі експлуатації втулки працюють в умовах значних навантажень, підвищених температур і постійного контакту з валом, що зумовлює необхідність застосування матеріалів з високими антифрикційними властивостями.



Рис. 1.1 Втулка підшипників ковзання [1]

Однією з ефективних технологій виготовлення втулок є порошкова металургія [2]. Цей метод дозволяє отримувати деталі з керованою пористою структурою, яка забезпечує самозмашування під час роботи. Завдяки цьому зменшується знос контактних поверхонь, підвищується ресурс роботи вузла та знижується потреба у зовнішніх системах змащення.

Крім того, порошкова металургія характеризується високим коефіцієнтом використання матеріалу, мінімальними відходами та доцільністю застосування у серійному та масовому виробництві.

*Таблиця. 1.1*

Функціональне призначення і умови експлуатації втулки підшипників  
ковзання

| Складові і критерії                                                        | Умови експлуатації                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Призначення                                                                | використовується для забезпечення осьового та радіального підтримання валу під час його обертання                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Функція                                                                    | зменшення тертя та рівномірний розподіл навантаження між валом і корпусом вузлом                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Конструкція                                                                | Втулка має просту конструкцію у вигляді циліндричної трубчастої деталі з внутрішнім та зовнішнім діаметрами                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Умови роботи                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• високе радіальне навантаження (важкий режим роботи);</li> <li>• роботу в умовах тертя зі змащенням, де мастило або подається в систему, або зберігається у матеріалі втулки;</li> <li>• підвищену температуру, яка може виникати внаслідок тертя;</li> <li>• неперервні або циклічні навантаження;</li> <li>• потребу у стабільній роботі при мінімальному обслуговуванні</li> </ul> |
| Вимоги до властивостей та обґрунтування застосування порошкової металургії | Через інтенсивне тертя втулка повинна мати високі антифрикційні властивості, добру теплопровідність і стійкість до сухого контакту. Саме тому порошкова бронза використовується у вузлах, де неможливе регулярне змазування зовнішніми засобами.                                                                                                                                                                              |

*Джерело: складено автором за літературними джерелами [1, 2]*

У таблиці 1.1 систематизовано основні відомості про призначення, конструкцію, умови роботи та вимоги до втулки підшипника ковзання.

Наведені дані обґрунтовують необхідність застосування матеріалів з високими антифрикційними властивостями та доцільність використання порошкової металургії для виготовлення таких деталей.

Таблицю складено автором за літературними джерелами [1,2]. До готової втулки з порошкової бронзи висуваються такі вимоги [3, 15]:

- пористість: 18-22% (залежно від режиму спікання);
- просочування маслом: 18-22% від маси деталі;
- твердість: HB 25-45.
- розмірні допуски після калібрування: внутрішній  $\varnothing$  - IT7-IT8; зовнішній  $\varnothing$  - IT8-IT9;
- шорсткість: внутрішня поверхня Ra - 0,8...1,6; зовнішня поверхня Ra - 1,6...3,2%;
- круглість і співвісність повинні відповідати вимогам підшипникових вузлів;
- відсутність тріщин, відкритих пор і дефектів спікання.

Оскільки деталь працює в умовах значного тертя та навантажень, матеріал повинен відповідати вимогам високої зносостійкості при ковзанні під навантаженням, мати низький коефіцієнт тертя для зменшення нагріву та механічну міцність, достатню для роботи під навантаженням при спеченій структурі. Пористість матеріалу повинна бути 10...25% для утримання мастила, що забезпечує самозмащувальні властивості, тобто можливість роботи без зовнішньої подачі масла; теплопровідність повинна бути достатньою для відведення тепла від зони контакту. Виріб повинен відрізнятися стабільністю розмірів після спікання і калібрування. [5, 15]

## **1.2 Аналіз конструкції деталі**

Втулка підшипника ковзання, яка є об'єктом дослідження в даній роботі, має просту циліндричну трубчасту конструкцію (рис. 1.1).

Основними геометричними елементами деталі є [1] :

- зовнішній циліндричний діаметр - призначений для взаємодії з корпусом підшипникового вузла;
- внутрішній циліндричний діаметр - є контактною поверхнею, по якій ковзає вал під час роботи;
- фаски на внутрішніх та зовнішніх крайках - полегшують монтаж деталі у корпус та запобігають утворенню задирів при запресовуванні;
- циліндричні торці - забезпечують правильне осьове позиціонування втулки відносно вала та корпусу.

Типорозмір втулки, прийнятий у роботі, відноситься до середніх конструктивних розмірів, які широко застосовуються у вузлах загального машинобудування (редуктори, двигуни, насоси тощо). Простота форми (суцільна циліндрична геометрія) дозволяє виготовляти деталь методом одновісного холодного пресування у сталевій прес-формі без застосування складного інструменту. Крім того, відсутність додаткових конструктивних елементів (отворів, пазів, виступів) позитивно впливає на рівномірність розподілу порошку при заповненні прес-форми та забезпечує стабільність ущільнення по всьому об'єму заготовки [2].

## **1.3 Аналіз існуючих технологій виготовлення виробів з порошку бронзи**

### **1.3.1 Легування порошку міді оловом**

Традиційна технологія виготовлення порошкових деталей типу втулок ґрунтується на спіканні [2] попередньо спресованої суміші порошків Cu-Sn-C,

тобто механічному легуванні, для чого, як правило, застосовується порошок електролітичної міді. В роботі [3] авторами проаналізовано процес подрібнення порошку електролітичної міді у млинах вібраційного, атриторного, планетарного типів.

Процесам холодного пресування мідних порошків присвячено роботи [4, 5], у яких виявлено механізми деформування частинок та зміни їх механічних властивостей. Відмічено [5], що при нагріванні до температури 150...200 °C у холодно деформованій міді відбуваються рекристалізаційні процеси, що пригнічує ефект зміцнення. Процес легування порошком олова співпадає з етапом спікання і відбувається у відповідності з діаграмою стану Cu-Sn (рис. 1.2).

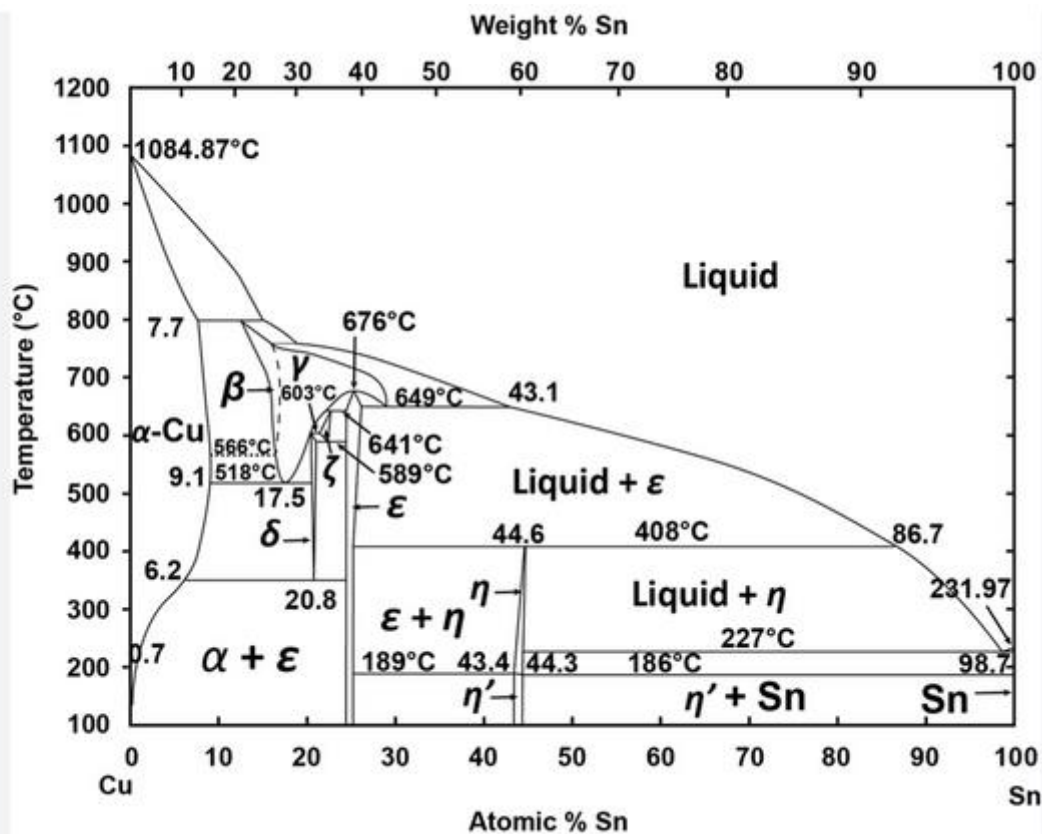


Рис. 1.2 Діаграма стану Cu-Sn (мідь-олово)

[URL:[https://www.researchgate.net/figure/The-Cu-Sn-phase-diagram-This-phase-diagram-will-be-very-relevant-for-the-rest-of-this\\_fig16\\_316317422i](https://www.researchgate.net/figure/The-Cu-Sn-phase-diagram-This-phase-diagram-will-be-very-relevant-for-the-rest-of-this_fig16_316317422i)]

Відповідно діаграми у системі утворюються тверді розчини та інтерметалідні фази як результат перитектичних і евтектоїдних реакцій. Збільшення концентрації олова до 30...40 % сприятливо впливає на підвищення антифрикційних властивостей матеріалів. У технології механічного легування як базовий компонент застосовується порошок міді, який змішується з порошком олова з додаванням порошку графіту.

Перед приготуванням суміші порошки обов'язково просіюються і просушуються. Пресування здійснюється холодним способом у сталевій прес-формі, конфігурація якої відповідатиме конфігурації майбутній втулки. Тиск 200...400 МПа забезпечує достатнє ущільнення порошку, але при цьому не руйнує пористу структуру. Спінання проводиться у захисному середовищі, щоб уникнути окиснення. Наявність оксидів погіршує міцність та ускладнює подальше просочування оливою. Задля запобігання пружних деформацій заготовка зазнає калібрування обтиснення, що покращує точність та геометрію деталі, зокрема круглості і внутрішній діаметр заготовки, забезпечує певну щільність поверхневого шару виробу, що дозволяє суттєво зменшити припуски, що вигідно у порівнянні з обробкою різанням. Фізико-хімічний процес легування відбувається під час спікання у відповідності з діаграмою стану Cu-Sn (рис. 1.2).

### **1.3.2 Віброформування порошку бронзи з наступним спіканням**

Метод вібраційного формування застосовується задля одержання заготовок складної конфігурації і полягає у дії вібрацій на вільно засипаний у форму порошок, який ущільнюється завдяки зовнішнім коливанням вібропресів [8]. Процес забезпечує рівномірну щільність, високу текучість та усуває прес-залишок і пористість заготовки за рахунок кращого укладання частинок. Накладання вібрації зменшує як міжчастинове тертя, так тертя та тиск порошку о стінки прес-форми, що сприятиме формуванню щільних заготовок, які ладі зазнають пресування або спікання. Між частинками та між порошком і

стілками прес-форми, що веде до вищої щільності. Віброформування порошків може застосовуватися як проміжні технологічна операція перед пресуванням задля забезпечення рівномірної щільності та міцності порошкового тіла. На формування заготовок з рівномірною щільністю впливатимуть такі властивості порошку як сипкість. Накладання вібрацій порушує первинні зв'язки між частинками.

Критерієм оцінки ефективності віброформування є коефіцієнт ущільнення

$$K_y = (\Theta_n - \Theta_y) / \Theta_n^3, \quad (1.1)$$

де  $\Theta_n$  - пористість вільної насипки;  $\Theta$  - пористість після віброутрушування.

Встановлено, що зі зменшенням розміру частинок порошку для досягнення максимальних значень  $K_y$  необхідно підвищувати частоту коливань. При цьому кожній частоті відповідає своя амплітуда коливань, при якій  $K_y$  максимальний. Застосування вібрації сприяє отриманню пористих заготовок з більш високою стабільністю властивостей, ніж просто засипка порошку в форму. На практиці застосовуються два види віброформування, які відрізняються один від одного характером передачі вібраційного впливу на порошок: формування за схемою вібруючого контейнера і формування за схемою вібруючих пуансонів. Формування порошкових заготовок за різними схемами накладання вібрацій наведено на рис. 1.3.

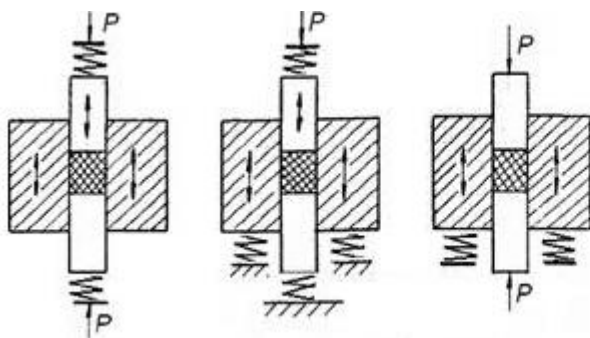


Рис. 1.3. Схема накладання вібрацій при вібраційному формуванні порошків [9]

У першій схемі (режим з нежорсткою амплітудною характеристикою) вібрації піддається форма (контейнер), в якій порошок ущільнюється під дією сил гравітації; у другій схемі (режим з жорсткою амплітудною характеристикою) ущільнення відбувається під дією вібрації обох або одного з пуансонів. Механізм вібраційного ущільнення за другою схемою відрізняється від такого за першою, оскільки в ньому розвиваються тиски, порівнянні з тиском статичного пресування, і метод вібруючих пуансонів вже не можна віднести до недеформаційних методів ущільнення.

### **1.3.3 Гаряче пресування порошку бронзи**

Одним з перспективних методів, який застосовується для формування порошкових заготовок і виробів, є метод гарячого пресування порошків та їх сумішей. Перевага його полягатиме у тому, що у одному технологічному циклі реалізується процес термічної консолідації порошкових компонентів під дією температури та зусилля. Існуючі конкурентоспроможні технології, які є розвинутими модифікованими напрямками гарячого пресування, ґрунтуються на пропусканні електричного струму крізь прес-форму та заготівку, забезпечують швидке попереднє нагрівання та короткочасний технологічний цикл, проте обмежуються діапазонами електропровідності порошків.

Гарячим називають пресування металевого порошку або порошкової формовки при температурі, яка перевищує температуру рекристалізації основного компонента. Загальний принцип одержання зразків шляхом спікання порошків під тиском складається із засипки формувальної суміші у прес-форму, прикладання тиску та встановлення температурних режимів. Поєднання операції формування заготовки із порошку з її нагріванням при температурі  $0,5...0,9 T_{пл}$  основного компонента дозволяє реалізувати при ущільненні підвищення текучості пресувального матеріалу. Сили тиску підсумовуються із зусиллями всередині порошкового тіла, що призводить до більш інтенсивного ущільнення. За допомогою гарячого пресування отримують матеріали з мінімальною пористістю при використанні порівняно малих значень тиску пресування. Ця методика використовується для виготовлення щільних виробів

з малопластичних або крихких металів, сплавів та з'єднань типу карбідів, боридів, силіцидів та інших.

Механізм ущільнення порошкового тіла при гарячому пресуванні ідентичний механізму спікання у вільному стані: утворення міжчасткового контакту, зростання щільності та зменшення пористості. Властивості гарячепресованих виробів суттєво залежать від умов проведення процесу. На відміну від матеріалів, які отримані в результаті статичного пресування з наступним спіканням, гарячепресовані вироби характеризуються підвищеною міцністю, твердістю, електропровідністю та більш точними розмірами і відрізняються більш дисперсною структурою, витримка при температурі пресування складає від 1...3 до 15...20 хв, а при звичайному спіканні порошкових формовок - більш 30...60 хв. Гарячим може бути будь-який із відомих способів формування; найбільш розповсюдженим є пресування нагрітого порошку або заготовки у прес-формі. В роботі [10] авторами розглянуто обладнання і матеріали прес-форм для гарячого пресування металевих і неметалевих порошків. Досвід застосування гарячого пресування для формування матеріалів з порошку бронзи розглянуто в роботах [10-12]. Метод гарячого пресування дає можливість здійснювати процес напикання порошкової суміші на поверхні сталевих виробів.

#### **1.3.4 Можливості застосування адитивних технологій, пошарового напикання та селективного лазерного спікання металевих порошків**

Пошарове напикання (3D-технологія спікання) металевих порошків є одним із основних методів адитивного виробництва, який дозволяє створювати металеві деталі шляхом послідовного формування та з'єднання тонких шарів порошкового матеріалу [13]. Процес полягатиме в тому, що на робочу платформу наноситься тонкий шар (товщиною 100...200 мкм) металевого порошку, після чого відбувається його локальне нагрівання до температури спікання або плавлення. У результаті цього частинки порошку з'єднуються між собою за рахунок дифузійних процесів і утворюють твердий шар. Після цього платформа опускається на товщину одного шару, наноситься новий шар

порошку, і процес повторюється до повного формування виробу. Цей метод забезпечує високу точність виготовлення та можливість отримання деталей складної геометричної форми, які важко або неможливо виготовити традиційними методами. Якість виробу значною мірою залежить від розміру частинок порошку, їх форми, рівномірності нанесення шару, а також температурного режиму процесу. Найкращі результати досягаються при використанні порошків сферичної форми з високою текучістю та однорідним гранулометричним складом.

Найпоширенішими технологіями 3D-спікання металів є *Selective Laser Sintering (SLS)*, *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)* та *Selective Laser Melting (SLM)*. У цих процесах використовується високопотужний лазер, який забезпечує спікання або плавлення металевого порошку без використання додаткових зв'язувальних матеріалів. Це дозволяє отримувати деталі з високою щільністю, міцністю та точністю. Для цього використовують порошки різних металів і сплавів, зокрема сталі, титану, алюмінію та кобальт-хромових сплавів. Частинки порошку для повинні мати сферичну форму та малий розмір, що забезпечує рівномірне нанесення шару і якісне формування деталі. До недоліків технології можна віднести високу вартість обладнання, відносно низьку продуктивність і необхідність додаткової обробки поверхні після виготовлення. Незважаючи на це, 3D-спікання металевих порошків широко застосовується в авіаційній, медичній, машинобудівній і автомобільній промисловості для виготовлення складних та відповідальних деталей.

Одним із найбільш поширених методів пошарового напікання є селективне лазерне спікання (*Selective Laser Sintering, SLS*). У цьому процесі використовується високопотужний лазер, який вибірково нагріває окремі ділянки порошкового шару відповідно до заданої 3D-моделі. Лазерний промінь переміщується по поверхні порошку та спікає частинки лише в тих місцях, де має формуватися деталь [14]. Частинки порошку, які не піддаються впливу лазера, залишаються незмінними та виконують роль підтримуючого матеріалу. Селективне лазерне спікання дозволяє отримувати деталі з високою точністю зі

сталей, титанових, алюмінієвих та інших сплавів. Далі вироби можуть зазнавати додатковій термічній і механічній обробці для покращення їх властивостей.

Основними перевагами селективного лазерного спікання є можливість виготовлення складних деталей без використання форм і штампів, висока точність, економія матеріалу та автоматизація процесу. До недоліків належать висока вартість обладнання, необхідність контролю параметрів процесу та можливість утворення пористості у виробах. Переваги і недоліки технології наведено у табл. 1.2

Таблиця 1.2

#### Аналіз і вибір альтернативних технологій

[складено автором]

| Технологія                                  | Переваги технології для виготовлення втулки з порошку БрОФ-10-1                                                                                                          | Недоліки технології для виготовлення втулки з порошку БрОФ-10-1                                                                           |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Вібраційне формування з наступним спіканням | <ul style="list-style-type: none"> <li>Технологія може бути застосована для деталей простої конфігурації</li> <li>Невисока вартість обладнання і устаткування</li> </ul> | Через зростання об'єму формовки на початкових етапах спікання заготівка вимагатиме повторного спікання, що суттєво підвищує енерговитрати |
| Статичне пресування з наступним спіканням   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Порошок має широкий діапазон за гранулометричним складом, що гарантує його ущільнення</li> </ul>                                  |                                                                                                                                           |
| 3D-технологія (пошарове напікання порошку)  | Технологія є енергоефективною та раціональною, але її впровадження є доцільним для виготовлення деталей складної конфігурації                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Висока вартість обладнання</li> <li>Застосування тонкодисперсних сферичних порошків</li> </ul>     |

|                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Гаряче пресування                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>● Суміщення технологічних етапів пресування і спікання</li> <li>● Можливість допресування порошкової формовки від час одного технологічного циклу</li> <li>● Можливість застосування технології для виробів циліндричної конфігурації</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● Складне апаратне і технологічне оформлення</li> <li>● Високі енерговитрати</li> <li>● Неможливість застосування до виготовлення виробів складної конфігурації</li> </ul>                                                    |
| Механічне легування композиції Cu-Sn | <ul style="list-style-type: none"> <li>● Доступність і невисока вартість обладнання і устаткування</li> <li>● Багатокомпонентність порошкової суміші розширює можливості заміни дефіцитної сировини</li> </ul>                                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>● Агломерація порошків з утворенням грудок</li> <li>● Нерівномірне ущільнення порошкової суміші</li> <li>● ймовірність надмірного подрібнення частинок протягом змішування у барабанних або планетарних змішувачах</li> </ul> |

У таблиці 1.3 наведено порівняльний аналіз альтернативних технологій виготовлення втулок з порошку бронзи: вібраційного формування, статичного пресування, 3D-технології, гарячого пресування та механічного легування. Для кожної технології зазначено переваги та недоліки стосовно деталей простої циліндричної конфігурації. Таблицю складено автором

Таблиця. 1.3

#### Переваги і недоліки технології механічного легування порошків

| Переваги технології                                                                                                                                                                        | Недоліки технології                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● доступність і невисока вартість обладнання і устаткування</li> <li>● багатокомпонентність порошкової суміші розширює можливості заміни</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● агломерація порошків з утворенням грудок</li> <li>● нерівномірне ущільнення порошкової суміші</li> </ul> |

|                     |                                                                                                                                                           |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| дефіцитної сировини | <ul style="list-style-type: none"> <li>ймовірність надмірного подрібнення частинок протягом змішування у барабанних або планетарних змішувачах</li> </ul> |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

*Джерело: складено автором за аналізом літератури [5-7]*

У таблиці 1.3 узагальнено основні переваги (доступність обладнання, багатокomпонентність суміші) та недоліки (агломерація, нерівномірне ущільнення, ризик надмірного подрібнення) технології механічного легування порошків системи Cu–Sn. Таблицю складено автором за аналізом літературних джерел [5–7].

## 1.4 Характеристика порошку бронзи (матеріалу)

### 1.4.1 Характеристика порошку бронзи

Для досліджень в роботі обрано порошок марки БрОФ-10-1 - олов'янисто-фосфористої бронзи мідно-червоного кольору наступного хімічного складу, мас.% : 87...90 % Cu; 9...11 % Sn; 0,4...1,1 % P. Насипна щільність порошку складатиме 3,0...3,8 г/см<sup>3</sup>, дисперсність порошку належить широкому діапазону: розмір фракції може бути від 45 мкм до 250...500 мкм й так само як і фактор форми залежить від методу отримання (табл. 1.4).

*Таблиця 1.4*

Властивості порошку бронзи БрОФ 10-1

| Метод отримання порошку   | Середній розмір частинок, мкм | Середній фактор форми | Насипна пористість, % |
|---------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Розпилення повітря у воді | 63...100                      | 0,9...0,96            | 41                    |
|                           | 100...125                     |                       |                       |
|                           | 125...160                     |                       |                       |
| Розпилення водою у воду   | 63...100                      | 0,65...0,67           | 36                    |
|                           | 100...160                     |                       |                       |
|                           | 160...200                     |                       |                       |

*Складено за аналізом джерела [15]*

Оптимальний діапазон пористості 18–22% для самозмащувальних бронзових втулок обраний із компромісу між двома взаємопов'язаними факторами.

При пористості менше 18% об'єм пор недостатній для утримання необхідної кількості мастила (18–22% від маси деталі), що призводить до швидкого виснаження змащувального запасу та сухого тертя.

При пористості більше 22% різко знижується механічна міцність матеріалу (особливо границя витривалості при циклічних навантаженнях) і зростає ризик руйнування втулки під робочим навантаженням.

Крім того, у діапазоні 18–22% пори залишаються переважно відкритими та з'єднаними капілярними каналами, що забезпечує ефективну циркуляцію мастила між об'ємом пор та робочою поверхнею тертя.

Оптичну мікрофотографію порошку, зроблену за допомогою оптичного мікроскопу ММР-2Р, наведено на рис. 1.4

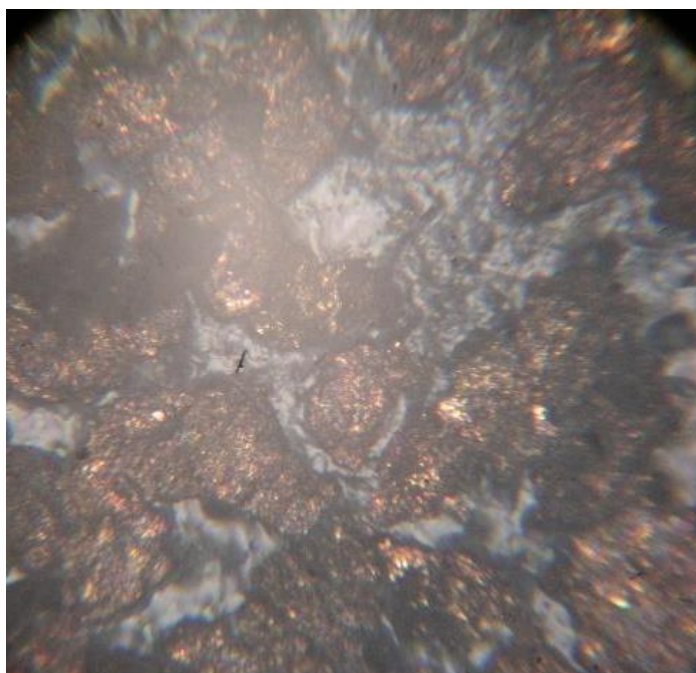


Рис. 1.4 Оптична мікрофотографія порошку бронзи,  $\times 300$  [зроблено автором]

Результати досліджень морфологічних характеристик порошку бронзи марки БрОФ 10-1 наведено у вигляді гістограм розподілу їх за розміром і фактором форми (рис. 1.5).

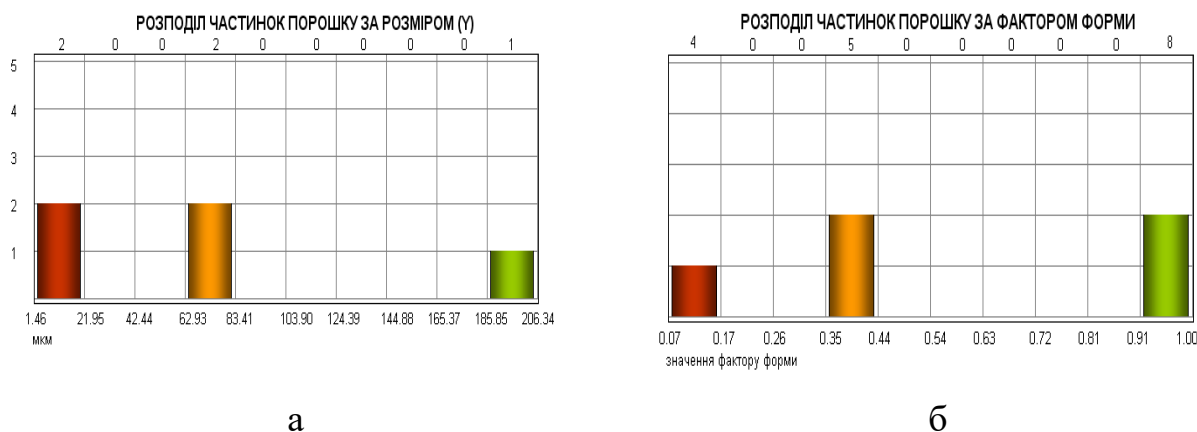


Рис. 1.5 Гістограми розподілу порошку бронзи:

а - за розміром; б - за фактором форми

[складено автором]

Дослідна фракція порошоків має сферичну форму частинок і широкий діапазон за розміром: від 40 мкм до 1250 мкм.

#### 1.4.2 Склад та властивості порошкової бронзи ПАБ 90-10

Матеріал ПАБ 90-10 належить до групи пористих антифрикційних бронз, які спеціально розроблені для виготовлення самозмащувальних підшипникових втулок. Типовий хімічний склад сплаву:

- мідь (Cu) - 85-90%,
- олово (Sn) - 8-10%,
- графіт (C) - 1-3%.

У порошковій металургії такий матеріал формується із суміші порошоків міді, олова та графіту шляхом пресування і подальшого спікання.

Після спікання утворюється пориста бронза, яка частково заповнюється маслом.

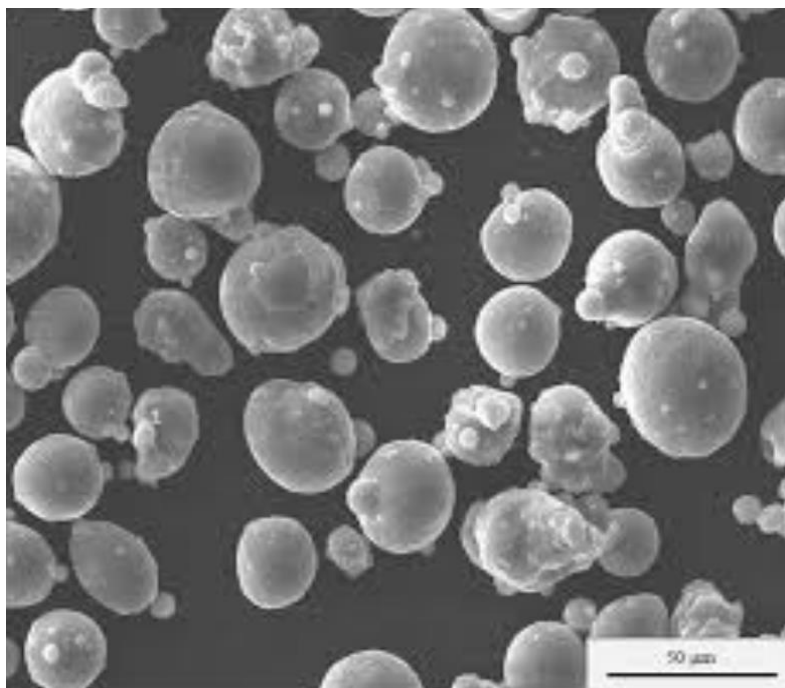


Рис. 1.6 Металевий порошок (мікрофото): різні фракції частинок перед пресуванням, отримана за допомогою оптичного мікроскопа ММР-2Р ( $\times 300$ , масштабна лінійка 50 мкм) [зроблено автором].

Порошок складається з частинок переважно сферичної та огранованої форми. Згідно з масштабною лінійкою, розмір більшості частинок не перевищує 80–100 мкм, при цьому присутні як дрібні фракції (10–30 мкм), так і окремі великі частинки (до 100 мкм). Така полідисперсність сприяє кращому упаковуванню при пресуванні: дрібні частинки заповнюють проміжки між великими, підвищуючи насипну щільність. Відсутність пластинчастих частинок із гострими краями позитивно впливає на сипкість порошку та стабільність заповнення прес-форми, що важливо для отримання рівномірної пористості [15].

Основні властивості ПАБ 90-10:

1. Низький коефіцієнт тертя (0,05-0,12 при роботі з маслом).

2. Пористість 18-22%, завдяки якій втулка працює як “масляна губка”.
3. Висока зносостійкість за рахунок олова в складі.
4. Стабільна робота при значних навантаженнях.
5. Добра теплопровідність, що важливо для відведення тепла від вала.
6. Можливість роботи без подачі зовнішнього мастила.

Такі властивості є оптимальними для деталей, які працюють у важкому режимі ковзання.

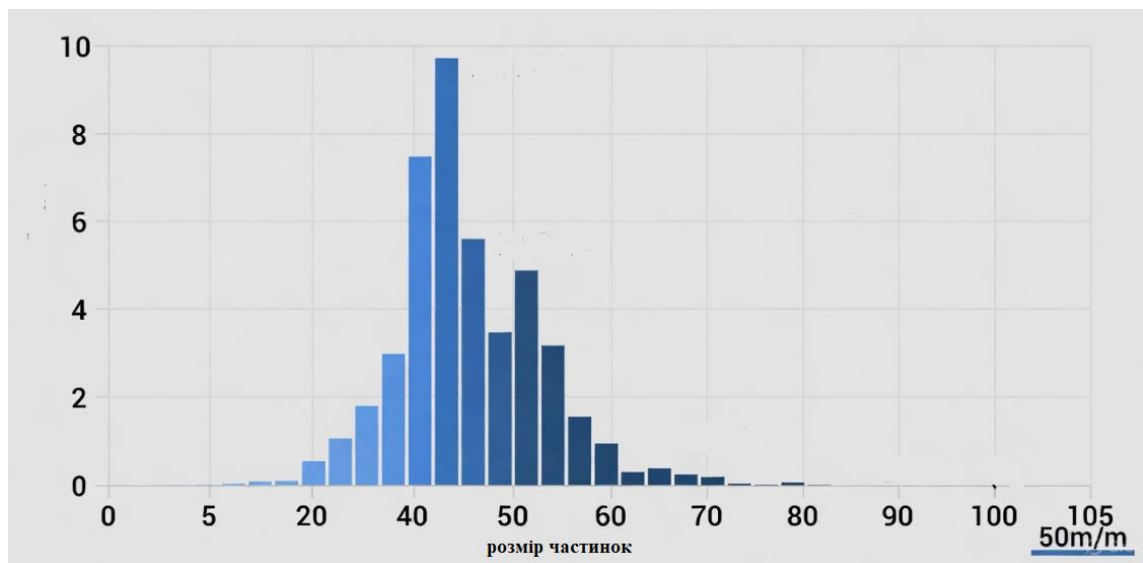


Рис. 1.7 Оцінковий розподіл частинок порошку за розміром, побудований на основі аналізу SEM-зображення [складено автором]

Гістограма показує, що основна маса частинок має розмір у діапазоні 10–80 мкм, з максимумом у фракції 30–50 мкм. Дрібні частинки (менше 20 мкм) становлять близько 20% загальної кількості. Такий полідисперсний склад забезпечує високу насипну щільність та рівномірне ущільнення при пресуванні.

#### 1.4.3 Характеристика пористих антифрикційних бронз

Пористі бронзи утворюються в результаті неповного ущільнення порошків під час спікання. Наявність керованої пористості є ключовою перевагою порошкової металургії. Основні характеристики пористих бронз:

- пористість формується технологічно, а не випадково, як при литті чи механічній обробці;

- пори рівномірно розподілені у структурі, що забезпечує рівномірне мастильне змащення;
- маслонаповнення від 18% до 25% від маси деталі дає можливість довгої безперервної роботи.
- розмір пор контролюється технологічно (0,02-0,2 мм);
- пориста структура створює демпфувальний ефект, зменшуючи шум і вібрації.

Антифрикційні пористі бронзи найкраще підходять для вузлів, де потрібні: довгий ресурс роботи, мінімальне технічне обслуговування, робота на середніх і важких навантаженнях.

#### **1.4.4 Обґрунтування застосування самозмащувальних матеріалів у втулках**

Втулки ковзання працюють у режимі постійного або періодичного контакту з валом. Під час роботи змащення повинно надходити в зону тертя без перебоїв. Традиційні бронзи потребують подачі масла ззовні (через маслянки, системи змащення), що ускладнює конструкцію. У пористих бронзах мастило зберігається всередині структури, видавлюється в зону тертя при нагріві, повертається назад при охолодженні, автоматично компенсує його витрату.

Це дозволяє втулці працювати навіть у випадках недостатнього зовнішнього змащення, короткочасних пікових навантажень, тривалого сухого запуску.

#### **1.4.5 Порівняння ПАБ 90-10 з альтернативними матеріалами**

##### **1) Порівняння з Fe-Cu-C порошковими матеріалами**

Табл 1.5 Порівняння характеристик порошкових антифрикційних матеріалів ПАБ 90-10 та Fe-Cu-C

| Параметр     | ПАБ 90-10 | Fe-Cu-C |
|--------------|-----------|---------|
| Тертя        | Низьке    | вище    |
| Навантаження | Високі    | середні |

|                  |         |          |
|------------------|---------|----------|
| Самозмащення     | Чудове  | обмежене |
| Теплопровідність | Висока  | низька   |
| Знос             | Низький | вищий    |

Як видно з даних таблиці 1.5, порошкова бронза ПАБ 90-10 має кращі антифрикційні властивості (нижчий коефіцієнт тертя) та вищу теплопровідність, що робить її більш ефективною для роботи в умовах високих навантажень. Матеріал Fe-Cu-C є дешевшою альтернативою, але поступається за низкою експлуатаційних параметрів, насамперед через нижчу здатність до самозмащування. Fe-Cu-C дешевший, але гірше підходить для важких режимів.

## 2) Порівняння з литою бронзою (БрАЖ, БрОФ, БрОЦС)

Переваги ПАБ 90-10:

- самозмащення, чого литі бронзи не мають;
- пористість забезпечує кращий розподіл масла;
- точність геометрії після калібрування;
- нижча собівартість при серійному виробництві.

Недолік литих бронз у тому, що вони не можуть утримувати мастило всередині структури, тому потребують систем змащення.

## 3) Порівняння з полімерними самозмащувальними втулками

Полімерами часто замінюють бронзи у легких вузлах, але для важкого режиму вони не витримують:

- високого навантаження,
- нагріву,
- швидкого зносу.

ПАБ 90-10 є оптимальним матеріалом для важких умов.

## 1.5 Аналіз невирішених питань та постановка завдань досліджень

Проведений у попередніх підрозділах аналіз літературних джерел та існуючих технологій виготовлення пористих бронзових втулок дозволяє виявити низку проблемних питань, які на сьогодні залишаються недостатньо вирішеними.

Невирішені питання технології:

1. Нерівномірна щільність заготовки після пресування. При одновісному холодному пресуванні спостерігається перепад щільності по висоті та радіусу втулки (у центральних зонах щільність нижча, ніж у периферійних). Це призводить до нерівномірної усадки при спіканні та погіршення геометричної точності.

2. Контроль деформацій порошкового тіла під час спікання. На початкових етапах спікання відбувається об'ємне зростання заготовки (явище, характерне для порошків на основі міді), яке потім змінюється усадкою. Відсутність методик прогнозування цих деформацій ускладнює призначення припусків на розміри.

3. Ріст зерен при високотемпературному спіканні. Збільшення тривалості або температури спікання, необхідне для підвищення міцності, спричиняє рекристалізацію та ріст зерен, що знижує пластичність і втомну міцність втулки.

4. Високі енерговитрати процесу. Спікання бронзових заготовок при 750-800°C протягом 30-60 хв є енергоємною операцією, особливо при роботі в захисній атмосфері. Пошук шляхів скорочення тривалості або зниження температури спікання (наприклад, застосування активованого спікання) є актуальним завданням.

5. Нестабільність пористості та проникності мастила. Відкрита пористість після спікання може коливатися в межах 15-25% залежно від партії порошку, тиску пресування та реальної температури в печі. Це впливає на здатність втулки утримувати масло та стабільність антифрикційних властивостей.

6. Відсутність єдиних рекомендацій щодо вибору технології для деталей простої конфігурації. У літературі описано багато методів (віброформування, гаряче пресування, адитивні технології), але не наведено чітких критеріїв, який з них є найбільш раціональним для серійного виготовлення втулок з порошку бронзи.

#### Постановка завдань досліджень

Відповідно до сформульованої мети роботи («на підставі ґрунтовного аналізу перспективних методів отримання порошкових деталей простої конфігурації обрати і дослідити раціональну технологію для виготовлення пористої бронзової втулки») та з урахуванням виявлених невирішених питань, у кваліфікаційній роботі необхідно виконати такі завдання:

1. проаналізувати існуючі технології формування порошкових бронзових втулок (механічне легування з холодним пресуванням, віброформування, гаряче пресування, адитивні методи), виявити їх переваги та недоліки стосовно деталей простої циліндричної конфігурації;

2. дослідити морфологічні характеристики (розподіл за розмірами, фактор форми, насипну густину) та технологічні властивості порошку бронзи марки БрОФ-10-1 (ПАБ 90-10), який є типовою сировиною для антифрикційних пористих деталей;

3. розробити технологічну схему виготовлення пористої бронзової втулки, що включає підготовку порошків, дозування, змішування, холодне пресування, спікання, калібрування та просочування мастилом, з обґрунтуванням режимів кожної операції;

4. обґрунтувати вибір технологічного обладнання для реалізації розробленої схеми в умовах серійного виробництва, а також запропонувати заходи з організації виробничої ділянки, охорони праці, пожежної безпеки та захисту довкілля;

5. виконати оцінку техніко-економічних показників виготовлення втулок за обраною технологією (собівартість, трудомісткість,

матеріаломісткість) у порівнянні з традиційними методами (лиття, механічна обробка).

## **РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОРИСТОЇ БРОНЗОВОЇ ВТУЛКИ**

### **2.1 Загальний опис технологічного процесу**

Виготовлення втулок методом порошкової металургії є сучасним та ефективним способом отримання деталей, які не лише мають потрібні геометричні розміри, але й володіють унікальною пористою структурою. Ця структура забезпечує властивість самозмашування - ключову перевагу порошкових бронзових втулок перед литими та обробленими різанням аналогами. Нижче наведено повний технологічний процес виготовлення втулки з порошкової бронзи ПАБ 90-10, який застосовується на більшості підприємств даного профілю.

### **Розробка технологічної інструкції виготовлення втулки**

Для виготовлення деталі методом порошкової металургії використовується пресована заготовка, яку називають «зеленою» (неспеченою). Це циліндрична втулка, отримана шляхом одновісного пресування суміші порошків ПАБ 90-10 у металевій прес-формі.

Основні причини вибору саме заготовки:

- можливість формування майже готової геометрії, без значних припусків;
- низька витрата матеріалу, бо порошок ущільнюється тільки в необхідному об'ємі;
- відсутність литєвих дефектів, таких як усадкові раковини чи газові пори;
- точність розмірів після калібрування спеченої заготовки.

Зелена заготовка має відносно низьку міцність, але після спікання отримує потрібну щільність та механічні властивості.

Структура та властивості заготовки після пресування

Після одновісного пресування порошків ПАБ 90-10 формується заготовка з такими характеристиками:

- Щільність 70-85% від теоретичної - це нормальна величина, яка забезпечує необхідну подальшу пористість.
- Наявність мікропор між частинками порошку - майбутні капіляри для масла.
- Низька тимчасова міцність (деталь крихка до спікання).
- Геометрія максимально наближена до кінцевої - допускається похибка 0,1-0,3 мм, яка буде виправлена калібруванням.

Структура пресовки є нерівномірною: у центрі ущільнення трохи нижче, ніж на периферії, що враховується у технологічних розрахунках. Цей стан є нормальним, тому що основне ущільнення відбувається на етапі спікання

Таблиця 2.1

Основні технологічні операції виготовлення пористої бронзової втулки (складено автором)



Технологічний процес виготовлення пористої бронзової втулки методом порошкової металургії включає наступні основні етапи (табл. 2.1):

1. Підготовка порошків – просіювання, сушіння, дозування компонентів (Cu, Sn, графіт).
2. Змішування – отримання однорідної суміші заданого складу.

3. Пресування – холодне одновісне формування «зеленої» заготовки в прес-формі.
4. Спінання – високотемпературна обробка в захисній атмосфері для формування міцних міжчастинкових зв'язків.
5. Калібрування – холодне допресування для досягнення точних розмірів.
6. Просочування мастилом – вакуумне або гаряче просочення для надання самозмащувальних властивостей.
7. Контроль якості – перевірка геометрії, пористості, твердості та маслонаповнення.

## **2.2 Вибір і дослідження сировинних компонентів**

### **2.2.1 Особливості процесів механічного легування порошків**

Матеріал ПАБ 90-10 являє собою порошкову бронзу на основі міді з вмістом олова близько 10% та додаванням графіту (1-3%). Такий склад забезпечує:

- високу антифрикційну здатність завдяки мідній основі;
- зносостійкість та жорсткість, які забезпечує олово;
- самозмащення, оскільки графіт є природним твердим мастилом;
- необхідну пористість, що утворюється після пресування та спінання;
- стійкість до задира і заклинювання, що важливо при важкому навантаженні;
- можливість просочування оливою, яке забезпечує тривалу роботу без зовнішнього змазування.
- мідь має хорошу теплопровідність, що дозволяє відводити тепло від контактної пари “вал-втулка”.

### **2.2.2 Отримання та підготовка порошків**

Виготовлення втулок методом порошкової металургії є сучасним та ефективним способом отримання деталей, які не лише мають потрібні геометричні розміри, але й володіють унікальною пористою структурою. Ця структура забезпечує властивість самозмащування - ключову перевагу порошкових бронзових втулок перед литими та обробленими різанням аналогами. Нижче наведено повний технологічний процес виготовлення втулки з порошкової бронзи ПАБ 90-10, який застосовується на більшості підприємств даного профілю.

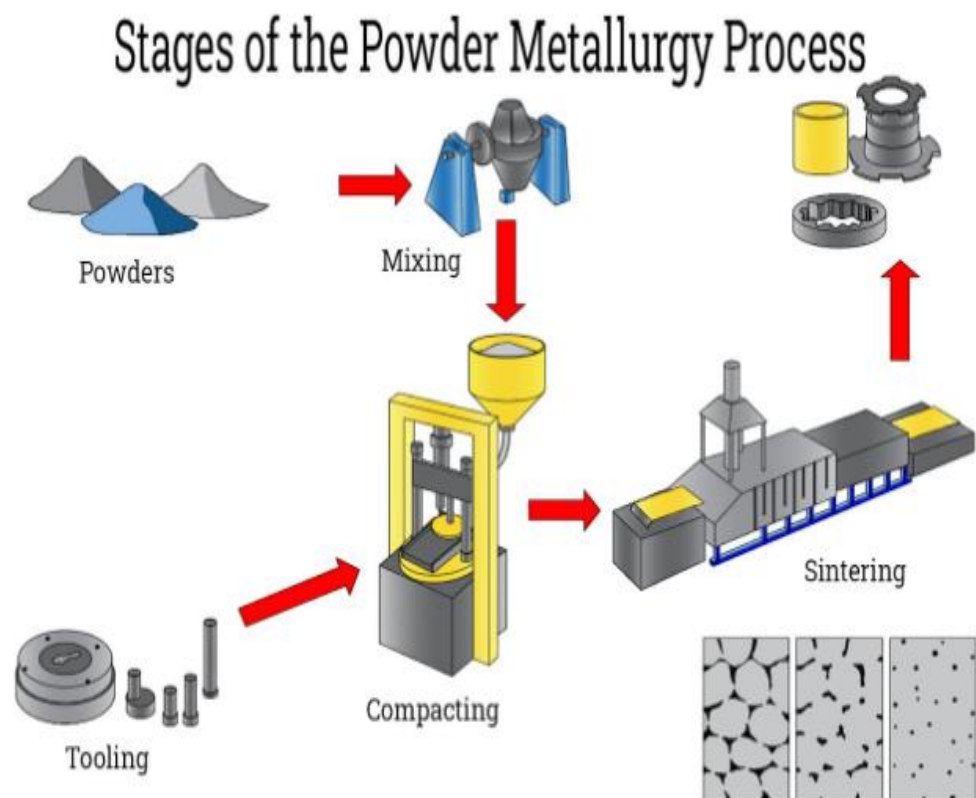


Рис 2.1 Основні стадії процесу порошкової металургії: від порошку до готової деталі (розроблено автором на основі аналізу літературних джерел [2, 5, 15]).

На рис. 2.1 схематично зображено послідовність основних технологічних операцій, що становлять класичний цикл порошкової металургії для виробництва пористих антифрикційних деталей. Процес починається з отримання та підготовки вихідних порошків (мідь, олово, графіт), які після дозування та змішування надходять на операцію холодного пресування. На цьому етапі формується «зелена» заготовка, що має необхідну геометрію, але

ще не володіє достатньою міцністю. Вирішальним етапом є спікання — високотемпературна обробка (750–800 °C) у захисній атмосфері, в результаті якої між частинками порошку утворюються дифузійні зв'язки, і заготовка набуває кінцевих механічних властивостей при збереженні заданого рівня пористості (18–22%). Фінальними операціями є калібрування для досягнення точних розмірів (IT7–IT8) та просочування мастилом, яке забезпечує самозмащувальні властивості готового виробу.

Таким чином, наведена схема відображає всі ключові перетворення, які відбуваються з порошковим матеріалом у процесі виробництва [2, 5, 15].

Першим кроком технологічного процесу є отримання вихідних порошкових матеріалів. Від якості порошків залежить подальша пористість, міцність, однорідність структури та експлуатаційні характеристики готової втулки. Тому підготовці порошків приділяють значну увагу.

### **Отримання порошків міді, олова та графіту**

Для виготовлення антифрикційних втулок використовується порошок міді як основа бронзового сплаву та порошок олова як легувальний компонент. Найпоширеніші методи отримання:

1. Електролітичний спосіб дає мідні порошки високої чистоти з розвиненою поверхнею частинок.

Такі частинки добре з'єднуються під час спікання, формуючи міцний каркас.

2. Газове або водне розпилення розплаву дозволяє отримати порошки з рівнішою формою частинок.

Перевага методу - хороша сипкість і передбачувана пористість.

Механічне подрібнення традиційно використовується для графіту, оскільки він є відносно м'яким матеріалом.

### **Вимоги до порошків**

Порошки повинні відповідати низці критеріїв:

- вузький гранулометричний склад;

- мінімальні домішки;
- стабільна сипкість;
- відповідна форма частинок (чітко впливає на пористість).

Відхилення у параметрах порошків можуть призвести до нерівномірної структури втулки, зміни пористості та порушення розмірів після спікання.

### **Підготовка порошків до змішування**

Порошки перед змішуванням обов'язково просушуються, оскільки наявність вологи може викликати спікання агломератів або нерівномірне ущільнення. Просіювання дозволяє позбутися великих частинок та грудок, які можуть негативно вплинути на заповнення прес-форми.

### **2.2.3 Змішування та легування порошків**

Змішування порошків - це етап, під час якого формується майбутній склад бронзи. Суміш повинна бути однорідною, інакше в різних частинах втулки можуть утворюватися ділянки з підвищеною твердістю або, навпаки, зниженою міцністю.

#### **Мета змішування**

Процес змішування спрямований на те, щоб частинки міді, олова та графіту рівномірно розподілились по всьому об'єму суміші. Це забезпечує стабільні механічні та антифрикційні властивості втулки.

#### **Технологія змішування**

Змішування проводять у барабанних або планетарних змішувачах. Важливо не допускати надмірного подрібнення частинок, тому режим змішування обирають помірним, з достатньою тривалістю для досягнення гомогенності суміші.

#### **Контроль суміші**

Після змішування відбирають проби для контролю параметрів - сипкості, насипної густини та візуальної однорідності. Недостатнє змішування може призвести до нерівномірної пористості та зниження міцності виробу.

## 2.3 Підготовчі та основні технологічні операції

### 2.3.1 Пресування та спікання заготовки

Пресування формує «зелену» заготовку - деталь, яка ще не має достатньої міцності, але вже повторює кінцеву геометрію втулки. Пресування здійснюється в сталевій пресформі, форма якої відповідає майбутній втулці. Важливо забезпечити рівномірний тиск по всій площі деталі, щоб уникнути зон підвищеної або зниженої щільності. Параметри пресування. Тиск 200-400 МПа забезпечує достатнє ущільнення порошку, але при цьому не руйнує порову структуру. Від якості пресування залежить точність внутрішнього діаметра, що особливо важливо для підшипникових втулок.

Спікання - ключовий етап, на якому порошкова заготовка набуває міцності та перетворюється на монолітний матеріал із заданою пористістю.

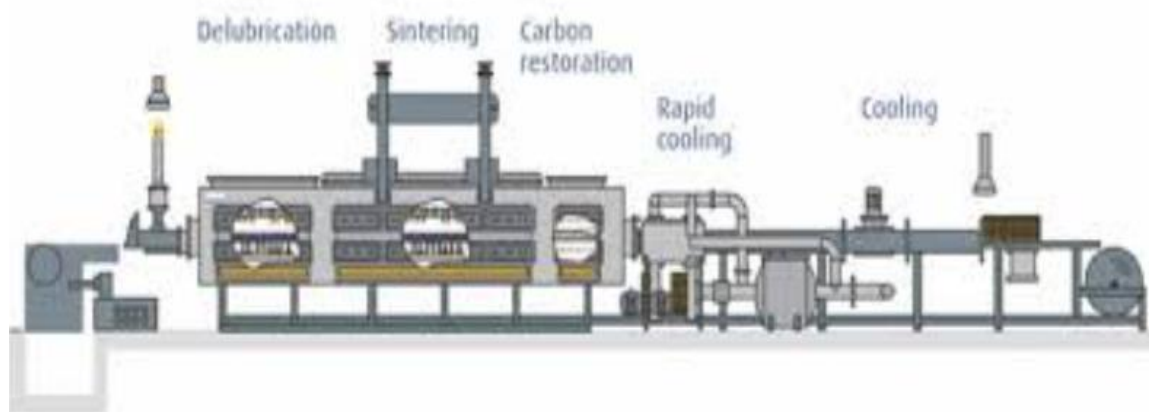


Рис. 2.2 Спікальна піч високотемпературної обробки порошкових заготовок.

[URL:<https://www.metal-powder.tech/wp-content/uploads/2016/07/sintering.png>]

Спікальна піч призначена для високотемпературної обробки (спікання) попередньо спресованих «зелених» заготовок. Піч забезпечує рівномірне нагрівання до температури 750–800 °С у захисній атмосфері (аргон або дисоційований аміак), що необхідно для формування дифузійних міжчастинкових зв'язків без окиснення матеріалу. Конструкція печі дозволяє розміщувати одночасно до 10–15 втулок на спеціальному піддоні [8, 15]. При

нагріванні до 750-800 °С між частинками порошку починаються дифузійні процеси. Частинки металу з'єднуються між собою, утворюючи міцну каркасну структуру. На цьому етапі формується більшість фізико-механічних властивостей втулки. Спикання проводиться у захисному середовищі, щоб уникнути окиснення. Наявність оксидів погіршує міцність та ускладнює подальше просочування оливою.

### **2.3.2 Ущільнення порошку бронзи марки БрОФ-10-1 при вібраційному формуванні**

В роботі [15] доведено, що інтенсивність вібраційного ущільнення не є постійною. Інтенсивність ущільнення зростатиме з частотою вібрацій і в перші 5...20 с досягає максимуму, а потім знижується (табл. 2.2). Проте зі збільшенням тривалості віброформування вплив частоти на його інтенсивність нівелюється. Авторами було встановлено, що для кожного розміру частинок порошку існує область оптимальних амплітуд і частот, при яких відбувається найбільш ефективно віброущільнення: зі зростанням частоти вібрації величина оптимальної амплітуди зменшується. При одних і тих же параметрах вібрації інтенсивність ущільнення великих порошків вища, а оптимальні амплітуди мають меншу величину, ніж це необхідно для більш дисперсних частинок. Вібраційне ущільнення з амплітудами, вищими за оптимальні, призводить до розпушення системи.

*Таблиця 2.2*

**Характеристики режиму віброформування зразків  
з порошку бронзи БрОФ-10-1 (складено автором за даними джерела [15])**

| Розмір частинок,<br>мкм | Прискорення, м/с <sup>2</sup> | Частота, Гц | Пористість після<br>віброформування, % |
|-------------------------|-------------------------------|-------------|----------------------------------------|
| 63                      | 1,63                          | 20          | 49.5                                   |
| 63                      | 1,89                          | 50          | 47.9                                   |
| 63                      | 2,73                          | 100         | 46.9                                   |
| 63                      | 2.61                          | 200         | 47.1                                   |
| 300                     | 1.61                          | 20          | 53.8                                   |
| 300                     | 1.89                          | 50          | 51.3                                   |

| Розмір частинок, мкм | Прискорення, м/с <sup>2</sup> | Частота, Гц | Пористість після віброформування, % |
|----------------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------------|
| 300                  | 2.73                          | 100         | 50.8                                |
| 300                  | 2.61                          | 200         | 51.4                                |
| 600                  | 1.67                          | 20          | 55.3                                |
| 600                  | 1.41                          | 50          | 53.3                                |
| 600                  | 2.73                          | 100         | 52.1                                |
| 600                  | 2.67                          | 200         | 52.7                                |

Як видно з таблиці, після накладення вібрації на засипку з порошку бронзи БрОФ-10-1 з частинками розміром 200...315 мкм діапазон зміни розмірів пор в заготовках звузився від 27... 157 мкм до 23...114 мкм при істотному збільшенні кількості пор середнього розміру. Розкид значень максимального розміру пор скоротився від 118...141 мкм до 95... 104 мкм.

### 2.3.3 Ущільнення порошку бронзи марки БрОФ-10-1 при статичному пресуванні

Експериментальні роботи щодо холодного пресування порошку бронзи виконувались на пресувальному обладнанні FR1000/2 [5], деформацію вимірювали індикатором годинного типу із ціною ділення 0,01. Час до руйнування і досягнення заданої деформації фіксували секундоміром. Діаграма деформації наведена на рис. 2.3.

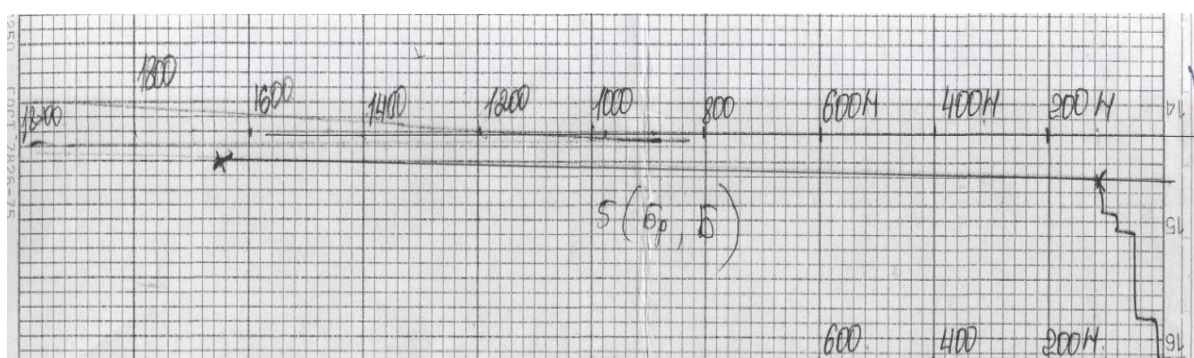


Рис. 2.3. Діаграма деформації [зроблено автором]

Холодне пресування крупнозернистого порошку бронзи пов'язано з деформуванням частинок на 15...20 %, як це показано на рис. 2.4. Проте порошки на основі міді швидко втрачають придбану міцність після нагрівання

у діапазоні температур 150...200 °С, що пояснюється рекристалізаційними процесами.



Рис. 2.4 Вmр\*-редакція оптичної світлин порошку бронзи  
[зроблено автором]

На рисунку 2.4 представлено мікроструктуру порошку бронзи БрОФ-10-1 після холодного пресування. Видно деформовані частинки, які набули сплющеної форми внаслідок пластичної деформації під тиском. Така зміна морфології сприяє утворенню розвиненої поверхні контакту між частинками, що позитивно впливає на міцність «зеленої» заготовки та подальше спікання [5, 15].

#### **2.3.4 Аналіз процесів спікання порошку бронзи БрОФ-10-1**

Спікання є обов'язковою технологічною операцією, результат якої полягає у перетворенні неміцного порошкового тіла у міцно спечений виріб зі властивостями, наближеними до властивостей литого металу. Таке перетворення здійснюється внаслідок зміни характеру міжчасткових контактів та заповнення об'єму відкритих пор розм'якшеною речовиною. Основною задачею теорії спікання є встановлення зв'язку між геометричними параметрами та структурою частинок порошкового тіла у вихідному стані та кінетики зміни міжчасткових контактів, ущільнення та формування структури спеченого матеріалу. В роботі [15] викладено рекомендації щодо вибору температури спікання в залежності від розмірів порошку (табл. 2.3.); тривалість процесу зазвичай становить 30...60 хв.

*Таблиця 2.3*

Рекомендовані температурні режими  
для спікання порошку бронзи БрОФ-10-1 [15]

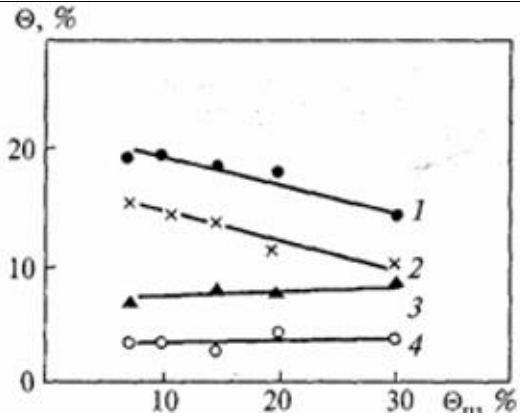
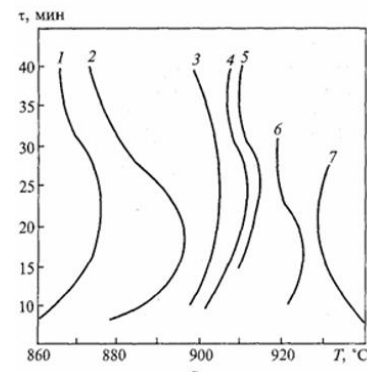
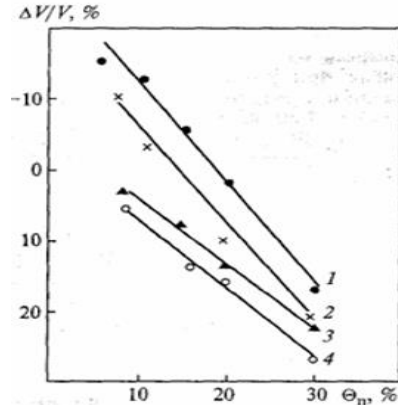
| Розмір частинок порошку, мкм | Температура спікання, °С | Розмір частинок порошку, мкм | Температура спікання, °С |
|------------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 40...50                      | 750...760                | 250...315                    | 825...835                |
| 50...63                      | 760...770                | 315...400                    | 835...845                |
| 63...80                      | 770...780                | 400...500                    | 845...855                |
| 80...100                     | 775...785                | 500...680                    | 855...865                |
| 100...125                    | 785...795                | 680...800                    | 865...875                |
| 125...160                    | 795...805                | 800...1000                   | 875...885                |
| 160...200                    | 805...815                | 1000...1250                  | 880...890                |
| 200...250                    | 815...825                |                              |                          |

В табл. 2.4 проаналізовано особливості процесу спікання порошку бронзи: проаналізовано характерні явища, визначено причини їх виникнення, у графічні формі наведено інтерпретацію процесу. Наведені температурні режими демонструють пряму залежність необхідної температури спікання від розміру частинок порошку. Зі збільшенням розміру часток з 40–50 мкм до 1000...1250 мкм рекомендована температура спікання підвищується з 750...760 °С до 880...890 °С. Це зумовлено тим, що для повноцінного формування дифузійних контактів між більшими частинками потрібна вища температура для активації процесів масоперенесення [15].

*Таблиця 2.4*

Особливості спікання порошку бронзи

| Характерні явища | Причина | Графічна інтерпретація процесу |
|------------------|---------|--------------------------------|
|                  |         |                                |

| Характерні явища                                                                                                 | Причина                                                                                                               | Графічна інтерпретація процесу                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Високошвидкісне зменшення пористості на початку спікання з наступним уповільненням під час ізотермічної витримки | Зумовлено дефектністю кристалічної будови порошку                                                                     |    |
| При спіканні спостерігається об'ємне зростання пресовок, яке усувається повторним спіканням                      | Об'ємне зростання пресовки можна пригнітити шляхом використання відновлювального середовища та дисоційованого аміаку. |  |
| Для високопористих виробів застосовується активоване спікання або гаряче пресування                              | Введення домішок і застосування захисних середовищ пригнічують окиснювальні і усадочні процеси                        |  |

Джерело: складено автором за аналізом джерела [15]

У таблиці 2.4 узагальнено ключові явища, що відбуваються під час спікання бронзового порошку. Високошвидкісне зменшення пористості на початку процесу зумовлене високою дефектністю кристалічної будови частинок після пресування, що прискорює дифузію. Об'ємне зростання пресовок, яке спостерігається на проміжних стадіях, пояснюється дією капілярних сил та може бути мінімізоване використанням відновлювального

середовища. Для усунення цього ефекту у високопористих виробів застосовують активоване спікання або гаряче пресування, які забезпечують кращу консолідацію матеріалу [15].

Проаналізовано особливості процесів деформування і спікання порошку бронзи марки БрОФ-10-1. Визначені особливості покладено в основу вибору технології виготовлення циліндричних деталей типу втулки підшипнику ковзання.

## **2.4. Технологічний цикл і процеси структуроутворення**

### **2.4.1 Головні цілі термічної обробки**

Головні цілі термічної обробки:

1. Зняття внутрішніх напружень після механічних впливів. При пресуванні порошку під високим тиском у структурі заготовки виникають локальні напруження. Під час спікання більшість з них знімається, але деякі залишаються, впливаючи на точність та стабільність розмірів. Незняті напруження можуть призвести до деформації втулки під час експлуатації, особливо при нагріванні.

2. Підвищення структурної однорідності. Після спікання структура бронзи може бути нерівномірною через різну температуру у різних зонах печі. Невелика додаткова термообробка допомагає вирівняти структуру.

3. Стабілізація порової системи. Пористість є ключовою властивістю порошкової бронзи. Неправильний режим спікання або швидке охолодження можуть порушити їх відкритість. Термообробка допомагає закріпити стабільну геометрію та кількість пор.

4. Підготовка матеріалу до просочування мастилом. Якщо пори частково закриті продуктами окиснення або залишковими напруженнями, мастило буде проникати нерівномірно. Нагрівання дає змогу відкрити пори та забезпечити їх рівну проникність.

5. Покращення експлуатаційних властивостей. Після правильно проведеної термообробки втулка отримує - стабільнішу геометрію, менший коефіцієнт тертя, більшу зносостійкість, підвищену здатність утримувати мастило.

#### **2.4.2 Режими відпалу та стабілізації втулки ПАБ 90-10**

Для порошкових бронз не застосовують гартування чи старіння, оскільки такі методи ущільнять структуру, зменшать пористість і зроблять втулку непридатною для роботи як самозмащувальний підшипник. Натомість використовується м'який стабілізаційний відпал - найбільш ефективний спосіб поліпшення структури порошкової бронзи.

Режим стабілізаційного відпалу

- Температура: 450...500 °C
- Тривалість: 0,5-1 година
- Середовище: інертний газ (аргон) або відновлювальне середовище (дисоційований аміак)
- Охолодження: разом із піччю для уникнення термічних деформацій
- Температура менша за температуру спікання (750-800 °C), тому структура не руйнується.
- Відпал достатньо теплий, щоб зменшити внутрішні напруження, але недостатній, щоб «розплавити» міжзернові сполучення порошкових частинок. Повільне охолодження дозволяє стабілізувати внутрішню геометрію пор.

#### **2.4.3 Вплив термообробки на структуру і властивості сплаву**

Правильно проведений стабілізаційний відпал позитивно впливає на робочі параметри втулки, забезпечуючи їй довший ресурс і кращі трибологічні властивості.

Основні зміни у структурі після відпалу

1. Вирівнювання мікроструктури

Дифузія на межах частинок робить структуру більш рівномірною, що позитивно впливає на міцність.

2. Покращення міцнісних характеристик

Хоча твердість змінюється незначно, загальна міцність зростає через поліпшення міжчастинкових зв'язків.

3. Підвищення зносостійкості

Однорідна структура краще витримує циклічні навантаження без руйнування та викришування.

4. Оптимізація відкритості пор

Після відпалу пори стають більш стабільними та рівномірно розподіленими, що дозволяє мастилу краще проникати.

5. Покращення самозмащувальних властивостей

Масло більш ефективно утримується матеріалом, рівномірно виділяється на поверхню і знижує тертя під час роботи втулки.

**2.4.4 Необхідна пористість та щільність заготовки**

Для втулок підшипників ковзання з порошкової бронзи оптимальними є такі значення:

- Пористість після спікання: 18-22%.  
Це забезпечує достатній об'єм пор для утримання масла.
- Щільність після пресування: 70-85%.
- Вона залежить від тиску пресування (100-350 МПа) та характеристик порошків.
- Щільність після спікання: 80-90%.

- Спикання зменшує пористість, але не повністю, що є необхідною умовою для роботи втулки.

Пористість повинна бути переважно відкритою, з капілярною системою, що забезпечує утримання та циркуляцію мастила. Надто висока пористість - зменшує міцність.

Заданий діапазон пористості 18–22% у готовій бронзовій втулці досягається не випадково, а є результатом керованого поєднання трьох основних технологічних груп факторів:

### **1. Склад і морфологія порошкової суміші [15]**

- Фракційний склад – використання порошку з розміром частинок переважно 63–160 мкм (див. табл. 1.4) забезпечує оптимальну насипну густину ( $\approx 3,0\text{--}3,8 \text{ г/см}^3$ ) та утворення системи відкритих пор після пресування. Частинки сферичної форми (фактор форми 0,9–0,96) дають більш рівномірну укладку та стабільну пористість.

- Вміст графіту (1–3%) – графіт не спікається при 750–800 °С, залишається у вигляді окремих включень або вигоряє, створюючи додаткові мікропори, що підвищує відкриту пористість на 2–4% порівняно з безграфітовою бронзою.

### **2. Режими холодного пресування [2,5]**

- Тиск пресування 200–400 МПа (оптимально  $\approx 300 \text{ МПа}$ ) – формує «зелену» заготовку з щільністю 70–85% від теоретичної. При нижчому тиску ( $< 200 \text{ МПа}$ ) пористість перевищує 25%, що після спикання дає  $> 25\%$  – зниження міцності. При вищому тиску ( $> 400 \text{ МПа}$ ) ущільнення занадто велике, пористість падає нижче 15%, і канали пор можуть закриватися, погіршуючи маслонаповнення.

- Одновісне пресування – забезпечує відносно рівномірне ущільнення по висоті та радіусу, що важливо для циліндричних втулок. Градієнт щільності (центр – периферія) не перевищує 5–7%, що після спикання дає рівномірну пористість.

### 3. Режими спікання

- Температура спікання 750–800 °С – вибрана з діаграми стану Cu–Sn для забезпечення рідкофазного спікання (при 798 °С утворюється евтектика). Рідка фаза сприяє усадці, але не повному закриттю пор.
- Підвищення температури >800 °С веде до надмірної усадки та зниження пористості до <15%, а зниження <750 °С – до недостатнього спікання, збереження первинної пористості >25% та низької міцності.
- Час спікання 30–60 хв – оптимальний для формування дифузійних контактів без заростання пор. Коротший час (<30 хв) – пористість >25%, довший (>60 хв) – пористість може впасти до 15–18% через переусадку.
- Захисна атмосфера (аргон або дисоційований аміак) – запобігає окисненню поверхні частинок. Оксидна плівка перешкоджає зварюванню, може збільшити пористість на 3–5%, але робить її нерівномірною. Тому чиста атмосфера обов'язкова для стабільного досягнення 18–22%.

Результат: дотримання зазначених діапазонів параметрів забезпечує після спікання відкриту, капілярно-зв'язану пористість 18–22%, яка одночасно дає достатню міцність (межа міцності при стиску  $\approx 150\text{--}250$  МПа) та здатність утримувати мастило в об'ємі 18–22% від маси деталі.

### 2.5 Калібрування та просочування мастилом

Після спікання втулка має стабільну структуру, але її розміри можуть дещо змінитися. Тому виконується калібрування - операція обтиснення, яка покращує точність та геометрію деталі.

Мета калібрування

- досягнення необхідного внутрішнього діаметра;
- покращення круглості;

- підвищення щільності поверхневого шару.

Калібрування дозволяє суттєво зменшити припуски, що вигідно у порівнянні з обробкою різанням.

Просочування мастилом/ Це один із найважливіших етапів, що забезпечує роботу втулки без зовнішнього мастила протягом тривалого часу.

Суть процесу. Висока пористість матеріалу дозволяє поглинати мастило, яке при роботі валу виходить на поверхню, утворюючи змащувальну плівку. Таким чином втулка фактично «змащує себе сама».

Технологія просочування. Просочування виконується в гарячій ванні або у вакуумі, що забезпечує проникнення мастила у всі капілярні пори матеріалу.

На фінальному етапі втулку оглядають, перевіряють її розміри, форму, шорсткість поверхонь, ступінь просочування оливою та відповідність вимогам креслення. Це гарантує, що виріб буде працювати надійно та довго.

## **2.6 Висновки до розділу 2**

У розділі 2 розроблено технологічні операції виготовлення пористої бронзової втулки з порошку ПАБ 90-10 (БрОФ-10-1). На основі проведених досліджень та аналізу літературних джерел отримано такі основні результати:

1. Обґрунтовано загальну технологічну схему, яка включає підготовку порошків (просіювання, сушіння), дозування, змішування, холодне пресування, спікання, калібрування та просочування мастилом. Схему побудовано за принципом «зеленої» заготовки, що дозволяє мінімізувати відходи (коефіцієнт використання матеріалу 95-98%) та забезпечити високу точність після калібрування.

2. Встановлено раціональний склад порошкової суміші для отримання антифрикційної бронзи: Cu - 85-90%, Sn - 8-10%, графіт - 1-3% (середнє значення Cu  $\approx$  88%, Sn  $\approx$  10%, C  $\approx$  2%). Морфологічний аналіз показав, що частинки порошку мають переважно сферичну форму, розмір від 40 до 1250 мкм, що забезпечує добру сипкість і ущільнюваність.

3. Визначено оптимальні параметри підготовчих операцій:
- просіювання - фракція 63-160 мкм;
  - сушіння - 80 °С, витримка 2 год;
  - змішування в барабанному змішувачі - 20-30 хв для досягнення гомогенності.
4. Обґрунтовано режими формування та спікання:
- холодне одновісне пресування - тиск 200-400 МПа (оптимально  $\approx 300$  МПа), що забезпечує щільність пресовки 70-85%;
  - спікання - температура 750-800 °С, час 30-60 хв, захисна атмосфера (аргон або дисоційований аміак). Такі умови забезпечують утворення міцних міжчастинкових дифузійних контактів згідно з діаграмою стану Cu-Sn при збереженні відкритої пористості.
5. Визначено цільову структуру готового виробу: пористість після спікання 18-22%, щільність 80-90%, твердість НВ 25-45. Така пористість є відкритою, капілярною, що забезпечує здатність утримувати мастило (18-22% від маси деталі) та самозмащування під час експлуатації.
6. Розглянуто особливості вібраційного та статичного ущільнення. Встановлено, що вібраційне формування зменшує розкид розмірів пор і підвищує рівномірність структури, але для деталей простої циліндричної конфігурації (втулок) достатньо холодного статичного пресування, яке є простішим і дешевшим. Експериментально підтверджено, що деформація частинок при пресуванні становить 15-20%.
7. Запропоновано стабілізаційний відпал (температура 450-500 °С, тривалість 0,5-1 год, охолодження з піччю) для зняття залишкових напружень, вирівнювання мікроструктури, стабілізації порової системи та підготовки до просочування мастилом.

8. Наголошено, що класичне гартування або старіння для порошкових бронз не застосовують, оскільки вони ущільнюють структуру та погіршують самозмащувальні властивості.

9. **Визначено необхідність калібрування** (холодне допресування з зусиллям  $\approx 300$  кН) для досягнення допусків внутрішнього діаметра IT7-IT8, зовнішнього - IT8-IT9, а також підвищення круглості та щільності поверхневого шару. Просочування мастилом рекомендовано виконувати у вакуумі або гарячій ванні, що гарантує заповнення пор мастилом на 80-98%.

Таким чином, розроблені в розділі 2 технологічні операції та їх режими забезпечують отримання пористої бронзової втулки із заданими антифрикційними властивостями, необхідною точністю та стабільною структурою. Обрана технологія холодного пресування з наступним спіканням є раціональною для серійного виробництва деталей простої циліндричної конфігурації.

## **РОЗДІЛ 3. ОРГАНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА НА ДІЛЬНИЦІ З ВИГОТОВЛЕННЯ БРОНЗОВИХ ВТУЛОК**

### **3.1. Вибір і характеристика технологічного обладнання**

Для реалізації розробленої технології виготовлення пористих бронзових втулок необхідне спеціалізоване обладнання, яке забезпечує виконання всіх технологічних операцій: підготовку порошків, дозування, змішування, пресування, спікання, калібрування, просочування мастилом та контроль якості. Нижче наведено характеристику основного обладнання.

#### **3.1.1. Обладнання для підготовки та дозування порошків**

- Ваги аналітичні Radwag AS 60/220.R2 - призначені для точного дозування компонентів порошкової суміші (Cu, Sn, графіт). Клас точності 1, максимальне навантаження 220 г, дискретність 0,1 мг. Забезпечують похибку дозування не більше  $\pm 0,1\%$ .
- Сушильна шафа СП-50С - використовується для просушування порошків перед змішуванням з метою видалення вологи, яка може спричинити агломерацію або нерівномірне ущільнення. Робоча температура 50-100 °С (режим сушіння для порошків - 80 °С, витримка 2 год). Об'єм камери 50 л, рівномірність температури  $\pm 2$  °С.

#### **3.1.2. Обладнання для змішування**

- Змішувач лабораторний порошковий УК-100 - призначений для змішування порошків міді, олова та графіту в сухому стані. Тип - барабанний (або планетарний) з регульованою частотою обертання. Об'єм робочої камери 100 л, завантаження 50-70% об'єму. Час змішування 20-30 хв забезпечує високу однорідність суміші без руйнування форми частинок.
- Дозатор пневматичний А02 - використовується для автоматизованого засипання відваженої суміші в прес-форму. Забезпечує рівномірне заповнення матриці з точністю  $\pm 1\%$  за масою.

### **3.1.3. Обладнання для пресування**

- Прес гідравлічний FR1000/2 [10, 15] - призначений для холодного одновісного пресування порошкової суміші у сталевій прес-формі. Технічні характеристики:

- максимальне зусилля - 1000 кН (100 т);
- робочий тиск - до 25 МПа;
- хід плунжера - 250 мм;
- габарити столу - 400×500 мм.

Прес оснащений манометром для контролю тиску, дворучним пуском та світловим бар'єром для безпеки. Забезпечує отримання «зелених» заготовок із пористістю 70-85% при тиску 200...400 МПа.

### **3.1.4. Обладнання для спікання**

- Трубчаста піч STG-100-12Q - призначена для спікання порошкових заготовок у захисній атмосфері (аргон або дисоційований аміак). Технічні характеристики:

- максимальна температура - 1200 °С (робоча температура 750-800 °С);
- робоча зона - діаметр 100 мм, довжина 600 мм;
- швидкість нагріву - до 20 °С/хв;
- герметична камера з подачею газу;
- система автоматичного регулювання температури (ПД-контролер).

Піч дозволяє розміщувати одночасно до 10-15 заготовок втулок на спеціальному піддоні.

### **3.1.5. Обладнання для калібрування та просочування**

- Прес калібрувальний гідравлічний (аналог FR1000/2, але з меншим зусиллям  $\sim 300$  кН) - використовується для холодного допресування спечених втулок з метою досягнення точних розмірів (IT7-IT8). Обладнаний спеціальною калібрувальною матрицею.
- Вакуумна ванна для просочування - складається з герметичної камери об'ємом 50 л, вакуумного насоса (залишковий тиск  $< 1$  кПа) та нагрівального елемента для підігріву мастила до 60-80 °С. Забезпечує глибоке проникнення масла в пори матеріалу.

### **3.1.6. Обладнання для контролю якості**

- Мікроскоп оптичний ММР-2Р - для металографічних досліджень мікроструктури, оцінки розміру пор та рівномірності розподілу фаз.
- Твердомір (наприклад, ТШ-2) - для вимірювання твердості за Брінеллем (НВ) після спікання та калібрування.
- Нутромір індикаторний (діапазон 10-50 мм, ціна поділки 0,01 мм) - для контролю внутрішнього діаметра втулок.
- Мікрометр (0-25 мм) - для контролю зовнішнього діаметра.

## **3.2. Структура технологічної дільниці**

Для серійного виготовлення бронзових втулок методом порошкової металургії пропонується дільниця, яка складається з окремих функціональних зон (приміщень).

Розташування приміщень виконано з урахуванням технологічного маршруту, вимог пожежної безпеки (віддалення зон високотемпературної обробки від зон зберігання легкозаймистих матеріалів) та санітарних норм.

|                       |                           |                                 |                        |                           |                                 |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| [1]<br>Склад сировини | [2]<br>Кімната відпочинку | [3]<br>Зона підготовки порошків | [4]<br>Зона змішування | [5]<br>Зона пресування    | [6]<br>Зона спікання            |
| Коридор               |                           |                                 |                        |                           |                                 |
| [7]<br>Зона колювання | [8]<br>Зона просочування  | [9]<br>Зона контролю якості     | [10]<br>Зона пакування | [11]<br>Зона стерилізації | [12]<br>Склад готової продукції |

Рис. 3.1. План ділянки для серійного виготовлення бронзових втулок (розроблено автором): 1 – склад сировини; 2 – кімната відпочинку; 3 – зона підготовки порошків; 4 – зона змішування; 5 – пресування; 6 – спікання; 7 – калібрування; 8 – просочування мастилом; 9 – контролю якості; 10 – пакування; 11 – стерилізації; 12 – склад готової продукції (12)

На рисунку 3.1 представлено планування виробничої ділянки, яка включає 12 функціональних зон: склад сировини (1), кімнату відпочинку (2), зону підготовки порошків (3), зону змішування (4), пресування (5), спікання (6), калібрування (7), просочування мастилом (8), контролю якості (9), пакування (10), стерилізації (11) та склад готової продукції (12). Розташування приміщень виконано з урахуванням технологічного маршруту, вимог пожежної безпеки (зони 6 та 8 віддалені від зберігання порошків) та санітарних норм.

Характеристика функціональних зон ділянки з виготовлення бронзових втулок наведена на рис. 3.1.

Таблиця 3.1

Характеристика функціональних зон дільниці з виготовлення бронзових втулок [складено автором]

| № приміщення | Назва зони                 | Призначення та обладнання                                                                                               |
|--------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1            | Склад сировини             | Зберігання порошків міді, олова, графіту в герметичних контейнерах. Контроль температури (18-25°C) та вологості (<50%). |
| 2            | Кімната відпочинку         | Для перерв персоналу. Розташована окремо від виробничих зон.                                                            |
| 3            | Зона підготовки порошків   | Просіювання (сито 160 мкм), сушіння в шафі СП-50С, дозування на вагах Radwag AS 60/220.R2.                              |
| 4            | Зона змішування            | Змішувач УК-100. Приготування однорідної суміші Cu-Sn-C (20-30 хв).                                                     |
| 5            | Зона пресування            | Прес FR1000/2, прес-форми для втулок. Отримання «зелених» заготовок.                                                    |
| 6            | Зона спікання              | Трубчаста піч STG-100-12Q. Подача аргону або дисоційованого аміаку.                                                     |
| 7            | Зона калібрування          | Калібрувальний прес. Допресування спечених втулок до розмірів ІТ7-ІТ8.                                                  |
| 8            | Зона просочування мастилом | Вакуумна ванна. Просочення втулок маслом (вакуум + нагрів).                                                             |
| 9            | Зона контролю якості       | Мікроскоп ММР-2Р, твердомір, нутромір, мікромметр. Перевірка розмірів, пористості, твердості.                           |
| 10           | Зона пакування             | Упаковка готових втулок в антикорозійний папір або поліетиленові пакети                                                 |

| № приміщення | Назва зони              | Призначення та обладнання                                                      |
|--------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 11           | Зона стерилізації       | Для медичних або харчових застосувань - стерилізація гама-опроміненням або УФ. |
| 12           | Склад готової продукції | Зберігання готових втулок перед відвантаженням.                                |

У таблиці наведено перелік та призначення 12 виробничих зон, які забезпечують повний технологічний цикл виготовлення пористих бронзових втулок – від складування сировини до пакування готової продукції. Розташування зон враховує послідовність технологічних операцій, а також вимоги пожежної безпеки (віддалення зон спікання та просочування від місць зберігання порошків і легкозаймистих матеріалів).

#### **Особливості розташування:**

- Зони 6 (спікання) та 8 (просочування) розміщені на відстані не менше 10 м від зон зберігання порошків (приміщення 1) та пакувальних матеріалів (приміщення 10) згідно з вимогами пожежної безпеки.
  - Між зонами 5 (пресування), 6 (спікання) та 7 (калібрування) передбачено коридор для транспортування заготовок на візках.
  - Усі виробничі зони обладнані припливно-витяжною вентиляцією, а зони роботи з порошками (3, 4) - додатковими місцевими пиловідсмоктувачами.
  - Підлога в зонах 3-5 заземлена для відведення статичної електрики.
- Така структура ділянки забезпечує неперервний технологічний потік, мінімізує переміщення матеріалів та створює безпечні умови праці.

### **3.3 Заходи щодо охорони праці, пожежної безпеки та захисту довкілля**

Процеси порошкової металургії пов'язані з дією підвищених температур, застосуванням дрібнодисперсних металевих порошків, використанням пресів та

печей для спікання. Це створює ряд потенційних небезпек, яких необхідно враховувати під час організації технологічного процесу. Безпека працівників та мінімізація негативного впливу на навколишнє середовище є обов'язковими складовими сучасного виробництва.

Нижче наведено основні небезпечні фактори та заходи запобігання їм у контексті виготовлення втулки з порошкової бронзи ПАБ 90-10.

На відміну від лиття бронзи, порошкова металургія має зовсім інший набір ризиків. Основні з них пов'язані з використанням дрібнодисперсних порошків.

#### 1. Пил металевих порошків

Мідні та бронзові порошки мають високий ступінь дисперсності. Потрапляння металевого пилу в дихальні шляхи може викликати подразнення або хронічні респіраторні захворювання. Також порошковий пил провокує алергічні реакції та подразнення слизових оболонок.

#### 2. Пиловибухонебезпечність

Дрібнодисперсний порошок у повітрі здатний утворювати вибухонебезпечні суміші при наявності джерела займання. Особливо небезпечними є сухі, погано вентильовані приміщення.

#### 3. Ризики при змішуванні та просіюванні порошків

Під час змішування порошки електризуються, можуть прилипати до обладнання або утворювати згустки, які при ударі або терті здатні запалатись.

#### 4. Високі температури при спіканні

Піч працює при 750 - 800 °С, тому робота з нею пов'язана з ризиками опіки, ураження гарячими поверхнями, перегрів робочої зони.

#### 5. Газові середовища печей

Спікання часто проводиться в інертних або відновлювальних атмосферах (аргон, дисоційований аміак). Порушення герметичності системи може призвести до витоку газу, що є небезпечним.

Щоб забезпечити безпечні умови праці, на підприємстві запроваджують комплекс організаційних та технічних заходів.

### 1. Організація робочого місця:

- Робочі зони обладнують місцевою витяжною вентиляцією.
- Підлога має бути гладкою, зручнішою для прибирання пилу.
- Поверхні заземлюють для зняття статичної електрики.

### 2. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

Працівники мають використовувати:

- респіратори або маски для захисту від металевого пилу;
- захисні окуляри;
- бавовняні рукавиці або рукавиці зі спеціальним покриттям;
- спецодяг, що не накопичує статичної електрики.

### 3. Безпечна робота з пресом:

- заборонено втручатися руками у робочу зону преса.
- використовуються дворуки пускачі, світлові бар'єри або

огороження.

- заборонено працювати при порушеній геометрії прес-форми - це може призвести до викиду порошків під тиском.

### 4. Робота зі спікальними печами:

- навантаження проводиться спеціальними щипцями або механізованими системами.

- працівники використовують термостійкі рукавиці.
- не допускається відкривання печі при високому тиску газу всередині.

### 5. Контроль атмосфери печі:

- Необхідно постійно контролювати подачу відновлювального газу, тиск та герметичність трубок.

- Витік аміаку або інертного газу повинен негайно локалізуватися.

### **Захист від шкідливих випарів та газів при спіканні**

Хоча порошкова металургія не використовує розплавів, під час високотемпературного спікання можуть виділятися - оксиди міді; газы атмосфери печі; продукти розкладу мастил при відпалі або сушінні.

#### **Заходи захисту:**

- Печі оснащують ефективними системами відведення газів.
- Приміщення повинно мати приточно-витяжну вентиляцію.
- Заборонено перебувати близько до зони виходу газів без ЗІЗ.
- Проводиться регулярний контроль концентрації шкідливих речовин.

### **Екологічні аспекти переробки та утилізації відходів порошкової бронзи**

Порошкова металургія загалом є більш екологічним методом, ніж лиття або механічна обробка. Проте важливо правильно поводитися з відходами.

#### **1. Металеві порошки**

Відходи порошку збираються окремо та повністю переробляються. Вони не повинні потрапляти в ґрунт чи каналізацію.

#### **2. Повітряні викиди**

Оксиди металів та газы від печей очищуються системами фільтрації перед ви-кидом в атмосферу.

#### **3. Відходи мастил**

Після просочування залишки оливи утилізують як небезпечні відходи класу Б.

Категорично заборонено зливати масло у водостоки.

#### **4. Енергоефективність**

Порошкова металургія використовує менше енергії, ніж лиття, що знижує загальне екологічне навантаження.

## 5. Утилізація деталей, що відслужили.

### 3.4 Техніко-економічні показники виготовлення бронзової втулки

Економічна оцінка процесу виготовлення втулки є важливою складовою організації виробництва, оскільки дозволяє визначити ефективність обраного технологічного маршруту та оцінити раціональність застосування порошкової металургії. У цьому підрозділі наведено розрахунок витрат матеріалу, собівартості виготовлення однієї втулки, а також порівняння економічних показників порошкового методу з альтернативними способами виробництва.

#### 3.4.1 Норма витрат матеріалу

Для виготовлення втулки з порошкової бронзи ПАБ 90-10 використовується суміш порошків наступного складу:

- мідь (Cu) - 88-90%;
- олово (Sn) - 8-10%;
- графіт (C) - 1-2%.

Маса готової втулки після спікання становить **35-50 г** (залежно від типорозміру та пористості). З урахуванням:

- пористості 18-22%;
- технологічних втрат при пресуванні (до 2%);
- втрат при змішуванні (0,5-1%);

**норма витрати порошку на одну втулку становить приблизно 40-55 г.**

Коефіцієнт використання матеріалу досягає **95-98%**, що є дуже високим показником.

Для порівняння, при виготовленні втулки з бронзового прокату методом механічної обробки від 40 до 75% матеріалу перетворюється на стружку, що значно збільшує собівартість.

### **3.4.2 Розрахунок собівартості однієї втулки**

Собівартість формується з наступних складових: матеріальні витрати, енерговитрати, оплата праці, амортизація обладнання та витрати на контроль якості.

Матеріальні витрати. Вартість порошку бронзи ПАБ 90-10 станом на 2024-2025 рр. становить 450-900 грн за 1 кг (залежно від виробника, чистоти та фракції). На одну втулку витрачається 40-55 г порошку, отже вартість матеріалу на одну втулку становить 18-50 грн.

Енергетичні витрати. Основну частку енерговитрат складає спікання (температура 750-800 °С, цикл 60-120 хв). Енерговитрати на пресування та змішування незначні. У середньому енерговитрати становлять 5-12 грн на одну втулку.

Витрати на оплату праці та амортизацію. Більшість процесів автоматизовані, персонал виконує контроль, завантаження порошків та підтримку обладнання. Амортизація печей спікання є значною, але розподіляється на великий обсяг продукції. Середня вартість цих витрат - 7-15 грн на одну втулку. Загальна собівартість виготовлення однієї втулки порошковим методом становить 30-77 грн за штуку (залежно від розміру, маси та обсягів виробництва).

### **3.4.3 Порівняння з альтернативними методами**

Порошковий метод є найбільш економічно доцільним для виготовлення:

- малих та середніх втулок;
- деталей серійного та масового виробництва;
- виробів, що повинні мати самозмащувальні властивості.

Завдяки мінімальним відходам (коефіцієнт використання матеріалу 95-98%) та високому рівню автоматизації порошкова металургія дозволяє отримати дешевший і технічно кращий виріб у порівнянні з литтям або механічною обробкою. Розрахунки підтверджують економічну доцільність обраної технології. Низька норма витрати матеріалу, високий коефіцієнт його використання та помірні енерговитрати забезпечують собівартість втулки на рівні 30-77 грн, що є конкурентоздатним для серійного виробництва.

### **3.5 Висновки до розділу 3**

У розділі 3 розглянуто організаційні питання виробництва бронзових втулок методом порошкової металургії. На основі проведених досліджень та технологічних розробок можна зробити такі висновки:

1. Вибір технологічного обладнання. Для реалізації розробленої технології виготовлення пористих бронзових втулок обрано комплекс обладнання, що забезпечує всі етапи виробничого циклу: підготовку порошків (сушильна шафа СП-50С, ваги Radwag AS 60/220.R2), змішування (змішувач УК-100), пресування (гідравлічний прес FR1000/2), спікання (трубчаста піч STG-100-12Q), калібрування, просочування мастилом (вакуумна ванна) та контроль якості (мікроскоп, твердомір, вимірювальні інструменти). Обране обладнання є серійним, доступним та відповідає вимогам сучасного виробництва.

2. Структура технологічної дільниці. Розроблено планування виробничої дільниці, що включає окремі функціональні зони: склад сировини, зону підготовки порошків, зону змішування, пресування, спікання, калібрування, просочування, контролю якості, пакування та склад готової продукції. Розташування зон враховує технологічний маршрут, вимоги пожежної безпеки та санітарні норми.

3. Охорона праці та безпека. Проаналізовано основні небезпечні фактори (металевий пил, вибухонебезпечність, високі температури, газові середовища) та запропоновано комплекс заходів для їх усунення: місцева

втяжна вентиляція, заземлення обладнання, використання засобів індивідуального захисту (респіратори, окуляри, термостійкі рукавиці), дворучні пускачі на пресах, герметизація печей та контроль газової атмосфери. Розглянуто екологічні аспекти: утилізація металевих порошоків, очищення газових викидів та збирання відпрацьованих мастил.

4. Техніко-економічні показники. Виконано розрахунок норми витрат матеріалів (40-55 г порошку на одну втулку) та собівартості виготовлення (30-77 грн за одну втулку залежно від типорозміру). Коефіцієнт використання матеріалу становить 95-98%, що значно перевищує показники механічної обробки (25-60%) та лиття (70-85%). Підтверджено економічну доцільність застосування порошкової металургії для серійного виробництва втулок.

Таким чином, організація виробничої ділянки за розробленою структурою, оснащення її сучасним обладнанням та дотримання вимог охорони праці і техніки безпеки забезпечують ефективне та безпечне виготовлення пористих бронзових втулок із заданими властивостями.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне *науково-технічне завдання*: на підставі ґрунтовного аналізу перспективних методів порошкової металургії обрано та досліджено раціональну технологію виготовлення пористої бронзової втулки з антифрикційними властивостями.

1. Аналіз сучасного стану показав, що основними технологіями виготовлення пористих бронзових деталей є механічне легування, віброформування, гаряче пресування та адитивні методи. Визначено перспективу застосування класичної схеми: «холодне статичне пресування – спікання – калібрування – просочування мастилом», що забезпечує високий коефіцієнт використання матеріалу (95–98%), стабільну пористість та мінімальні виробничі витрати порівняно з гарячим пресуванням або 3D-технологіями.

2. Досліджено морфологічні характеристики суміші порошку бронзи БрОФ-10-1 (ПАБ 90-10) з домішками графіту 1–3%: гранулометричний склад для пресування – це фракція 63...160 мкм, форма частинок переважно сферична, насипна пористість – 36...41%. Така морфологія забезпечує добру сипкість, рівномірне ущільнення та формування відкритої капілярної пористості.

3. Розроблено технологічну схему, що включає: підготовку порошків (сушіння при 80 °С, 2 год, просіювання 160 мкм), дозування (похибка  $\pm 0,1\%$ ), змішування (20–30 хв у барабанному змішувачі), холодне одновісне пресування (тиск 200–400 МПа, оптимально  $\approx 300$  МПа), спікання (температура 750–800 °С, витримка 30–60 хв у захисній атмосфері – аргон або дисоційований аміак), стабілізаційний відпал (450...500 °С, 0,5...1 год, охолодження з піччю), калібрування (холодне допресування з зусиллям  $\approx 300$  кН) та вакуумне просочування мастилом.

4. Визначено раціональні параметри структури готової втулки: пористість 18–22% (відкрита, капілярна), щільність 80–90% від теоретичної, твердість НВ

25...45, маслонаповнення 18–22% від маси деталі. Така пористість забезпечує самозмащувальні властивості (робота без зовнішньої подачі масла), достатню міцність (границя міцності при стиску  $\approx 150\text{--}250$  МПа) та низький коефіцієнт тертя (0,05–0,12).

5. Організовано виробничу дільницю (розділ 3): обрано серійне обладнання (прес FR1000/2, трубчаста піч STG-100-12Q, вакуумна ванна, мікроскоп ММР-2Р тощо), розроблено планування з 12 функціональних зон із дотриманням технологічного маршруту, пожежних та санітарних норм. Запропоновано заходи з охорони праці (місцева витяжна вентиляція, заземлення, ЗІЗ, дворучні пускачі) та захисту довкілля (утилізація відходів порошків, очищення газових викидів, збирання відпрацьованих мастил). Розглянуто заходи щодо охорони праці і навколишнього середовища.

6. Виконано техніко-економічну оцінку: норма витрати порошку на одну втулку – 40–55 г, собівартість – 30–77 грн (залежно від типорозміру та обсягу виробництва). Коефіцієнт використання матеріалу 95–98% значно перевищує показники механічної обробки (25–60%) та лиття (70–85%), що підтверджує економічну доцільність обраної технології для серійного та масового виробництва.

**Практичне значення роботи** полягає у створенні завершеної технологічної інструкції виготовлення пористої бронзової втулки, яка може бути впроваджена на підприємствах машинобудування, суднобудування та автомобілебудування. Результати роботи апробовано участю у Всеукраїнському конкурсі студентських наукових робіт 2025/2026 н.р. у НУК імені адмірала Макарова.

Отже, мету роботи досягнуто, поставлені завдання виконано. Обрана технологія холодного пресування з наступним спіканням є раціональною, економічно вигідною та технологічно реалізованою для виготовлення пористих бронзових втулок простої циліндричної конфігурації.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Яйчук О.О., Поворотній В.В. Конструкційні особливості та новітні технології підшипників ковзання в сучасній промисловості. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2024. Вип. 49. Т.1. С. 127-142. doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321228
2. Степанчук А.М. Теорія і технологія пресування порошкових матеріалів : навч. посібник. - Київ. Центр учбової літератури. 2017. - 336 с.
3. Яковенко І.Е., Пермяков О.А. Технологічна оснастка. Конструкції. Перспективи.: навчальний посібник. - Харків: НТУ «ХПІ», 2024. - 312с.
4. Гончарук А.О., Хоменко О.В., Найда Ю.І. Особливості розмелу порошку електролітичної міді у млинах різного типу. *Електричні контакти і електроди. Серія: Композиційні, шаруваті, градієнтні матеріали, покриття.* 2024. С. 55-64.
5. Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю., Довженко Д. В., Риженко М. С., Баюнов А. О. Формування каркасної структури пресовок з порошку та стружки міді. *Вчені записки Таврійського університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2024. Том 35 (74). № 4. С. 8-12. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/02>
6. Ліхацький Р.Ф. Спеціальні сплави і композити на основі міді та методи їх одержання. *Процеси лиття.* 2020. № 1 (139). С. 61-68.
7. Гапонова О.В., Говорун Т.В. Інженерне матеріалознавство : навч. посібник. - Суми : Сумський державний університет, 2024. - 403 с.
8. Іцкович-Лотоцький Р.Д., Міськов В.П. Вібраційне формування порошків вібропрес-молотом з електрогідравлічним керуванням. Збірник наук. праць Полтавського НТУ ім. Ю. Кондратюка. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. 2014. Вип. 2. С. 2-14.
9. Libenson G.A. *Osnovy powder metallurgy* 2nd ed., add. Moscow, Metallurgiya Publ.,1987.208 p.

10. Казимиренко Ю. О., Матюшин В. О. Вибір матеріалів технологічного устаткування для виготовлення гарячепресованих порошкових виробів. *Вчені записки Таврійського університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35 (74). № 3, частина 1. С. 1-8. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/01>

11. Казимиренко Ю.О. Пат. 97311 Україна, МПК В22F3/14. Спосіб формування порошкового покриття на поверхні виробу ; заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. - № 2014819 ; заявл. 08.09.2014 ; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 5.

12. Казимиренко Ю.О. Дослідження процесу отримання псевдосплаву з порошків бронзи і бабіту. Збірник наук. праць НУК. Миколаїв: НУК. 2005. № 5 (404). С. 29-33.

13. Пупань Л.І. Процеси адитивних технологій: навч. посібник. - Харків: НТУ «ХП». 2023. 91 с.

14. Ключихін В.В., Касай П.А., Наумик В.В. Структура та властивості матеріалу зразків, вирощених методом селективного лазерного сплавлення з порошку сплаву In718 після гарячого ізостататичного пресування та наступної термообробки. *Процеси лиття*. 147 (1). С. 19-29. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2022.01.019>.

15. Косторнов А.Г. Матеріалознавство дисперсних пористих металів і сплавів : монографія у двох томах. Том1. - Київ: Наукова думка, 2002. - 569 с.

16. Келемеш А.О., Бурлака О.А., Ляшенко С.В., Лавренко В.В. Дослідження впливу пластичного деформування на зносостійкість бронзових втулок в автомобільних двигунах. *Вісник ХНТУ: Інженерні науки*. 2024. № 4. С. 42-51. DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.5>

17. Жигуц Ю.Ю., Лазар В.Ф., Хомяк Б.Я. Технологія покращення службових властивостей бронзових деталей. *Міжнародний науковий журнал «Освіта і наука»*. 2023. Вип. 1(34). С. 21-36.

18. Казимиренко Ю.О., Карпеченко А.А., Лебедева Н.Ю. Методичні вказівки до написання випускних кваліфікаційних робіт зі спеціальності G8

Матеріалознавство для здобувачів освітньо-кваліфікаційного ступеня «бакалавр» і «магістр» за освітньо-професійною програмою «Композиційні та порошкові матеріали, покриття». Миколаїв : НУК, 2025.-53 с. URL: <https://eir.nuos.edu.ua/handle/123456789/11406>

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ  
імені адмірала Макарова



# ДИПЛОМ

## нагороджується

переможець I туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових  
робіт з галузей знань і спеціальностей у 2025/2026 навчальному році  
Національного університету кораблебудування  
імені адмірала Макарова

# СТАРОВОЙТ

# Ігор Олександрович

Голова галузевої конкурсної комісії,  
проректор з наукової роботи,  
доктор технічних наук, професор



Геннадій ПАВЛОВ

Миколаїв - 2026