

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Український державний університет
науки і технологій**

Кафедра «Покриттів, композиційних
матеріалів та захисту металів»

В авторській редакції

**СПЕЧЕНІ МАТЕРІАЛИ
НА ОСНОВІ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ**

Навчально-методичні рекомендації
до виконання лабораторного практикуму

Електронне видання

ДНІПРО
2025

Упорядники:

О. А. Носко, А. М. Ковзік, Т. А. Аюпова, І. В. Голуб, С. К. Духновський

Електронне видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми

132 «Матеріалознавство»

Протокол № 11 від 22.04.2025 р.

С 71 Спечені матеріали на основі кольорових металів та сплавів: навчально-методичні рекомендації до виконання лабораторного практикуму / упоряд. О. А. Носко, А. М. Ковзік, Т. А. Аюпова, І. В. Голуб, С. К. Духновський ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро : УДУНТ, 2025. – 41 с.

Викладено загальні навчально - методичні рекомендації щодо виконання, оформлення, змісту і послідовності виконання лабораторного практикуму.

Призначені для студентів спеціальності 132 – матеріалознавство ОПП «Композиційні та порошкові матеріали, покриття» (магістерський рівень).

ЗМІСТ

| | |
|------------------------------------|-----------|
| ВСТУП | 4 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 | 5 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 | 8 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 | 16 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 | 19 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 | 23 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 | 26 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7 | 30 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8 | 34 |
| ЛІТЕРАТУРА | 39 |
| ДОДАТКИ..... | 40 |

ВСТУП

Порошкова металургія є однією із найперспективніших областей з отримання виробів з металевих порошоків. Нею навіть можна замінити інші способи виробництва металевих виробів (наприклад, лиття, штампування, кування).

Цим методом отримують спечені порошкові вироби з особливими властивостями, яких іншими способами досягти неможливо, йдеться про псевдосплави, тверді сплави на основі танталу і вольфраму, пористі сплави, для виготовлення підшипників і фільтрів.

До переваг порошкової металургії можна віднести дуже високі показники продуктивності. А саме:

- можливість задавати широкий діапазон одержуваних властивостей виробів;
- широкий спектр застосування порошкової металургії від машинобудування до нафтової сфери;
- високий ККД порошкової металургії (97%) у порівнянні з литтям (60%);

Сучасна порошкова металургія завдяки високоякісному обладнанню практично не має тих перешкод для виробництва виробів, з якими вона стикалася раніше. Особливо це стосувалося великих деталей та металевих заготовок. Сьогодні єдиним мінусом порошкової металургії можна назвати високу собівартість продукції, що виготовляється.

Виконання лабораторного практикуму дисципліни «Спечені матеріали на основі кольорових металів та сплавів» для студентів спеціальності 132 – Матеріалознавство має за мету вирішення задач вибору технології порошкового спеченого виробу відповідно до заданих умов експлуатації на основі глибокого розуміння процесів формування його структури та властивостей підчас основних операцій порошкової металургії.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛЕВИХ ПОРОШКІВ

1.1 Мета проведення лабораторного заняття: вивчити технологічні властивості металевих порошків та способи їх визначення.

Завдання проведення лабораторного заняття.

В результаті проведення заняття студенти повинні:

- знати: методи визначення технологічних властивостей металевих порошків;
- вміти: самостійно провести визначення насипної щільності, щільності після утрушування та плинності (текучість) металевих порошків.

1.2 Основні теоретичні положення

Насипною щільністю порошків характеризується маса порошку, що припадає на одиницю об'єму у вільно-насипному стані [1-3]. Величина насипної щільності визначає об'ємне дозування порошку при пресуванні, впливає на величину усадки пресування при спіканні і тому є важливим технологічним параметром.

З фізичної точки зору насипна щільність визначається трьома факторами: істинною щільністю матеріалу, щільністю укладання частинок порошку в об'ємі та станом поверхні частинок. За інших рівних умов сферичні частинки укладаються щільніше, ніж частинки осколкового або дендритного типу [2].

Щільність порошку після утрушування характеризує здатність порошку до ущільнення при утрясці, що є важливим технологічним фактором при конструюванні прес-форм. Як правило, щільність порошків після утрушування на 20-50% більша за насипну щільність.

Плинність характеризує здатність порошку ссипатися під дією сили тяжкості та зчеплення частинок між собою [3]. Плинність визначає швидкість заповнення прес-форми порошком, що є дуже важливим при організації процесу пресування порошкових виробів. Плинність кількісно оцінюється

часом повного витікання 50 г маси порошку через воронку з каліброваним вихідним отвором.

$$K_{\tau} = \frac{r^n}{F} \quad (1.1)$$

де τ – час витікання порошку, с;

r – радіус вихідного отвору воронки, мм;

F – навішування порошку, г;

n – коефіцієнт пропорційності, дорівнює 2,58 – 3,80.

1.3 Обладнання, приладдя, матеріали

1.3.1 Обладнання: волюмометр, терези.

1.3.2 Приладдя: склянка металева ємністю 25 см³, пластина для зняття збиткової кількості порошку, циліндр мірний скляний об'ємом 100 см³, воронка з каліброваним отвором, штатив, секундомір.

1.3.3 Матеріали: порошки заліза, міді.

1.4 Порядок проведення досліджень

1.4.1 Визначення насипної щільності

- встановити волюмометр у вертикальному положенні;
- зважити склянку металеву ємністю 25 см³;
- встановити склянку на підставі корпусу волюмометра, забезпечивши співвісність склянки та воронки волюмометра;
- пробу порошку досипати у воронку волюмометра до заповнення склянки;
- після повного витікання порошку з волюмометра надлишкову кількість порошку видалити одноразовим рухом пластинки, повернутої ребром до верхнього торця склянки;
- зважити склянку із порошком.

1.4.2 Визначення щільності після утрушування

- засипати порошок у скляний мірний циліндр ємністю 100 см³;
- помістити циліндр у гніздо струшувача та включити струшувач;
- вимірювати об'єм порошку з інтервалом 5 хв до припинення зміни об'єму;
- вимкнути струшувач і зважити порошок.

1.4.3. Визначення текучості

- встановити воронку у штативі у вертикальному положенні;
- знежирити внутрішню поверхню воронки;
- зважити 5 проб порошку по 50 г;
- закрити пальцем вихідний отвір воронки і насипати у воронку пробу порошку;
- відкрити вихідний отвір воронки і одночасно включити секундомір;
- вимкнути секундомір при повному витіканні порошку з воронки.

1.5 Обробка експериментальних даних та порядок оформлення звіту

1.5.1 Розрахувати насипну щільність після утрушування за формулою:

$$\gamma = \frac{m_2 - m_1}{25}, \quad (1.2)$$

де m_2 – маса стакана з порошком, г;

m_1 – маса стакана, г.

1.5.2 Розрахувати щільність після утрушування за формулою:

$$\rho = \frac{m_3}{V}, \quad (1.3)$$

1.5.3 Розрахувати коефіцієнт $K_{\text{текучості}}$ порошку (K_T)

У звіті навести отримані експериментальні данні та матеріали розрахунків.

1.6 Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальним посібникам вивчити методики насипної щільності, щільності після утрушування і текучості порошків та підготуватися до виконання роботи.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Назвіть найважливіші технологічні властивості порошків.
2. Що Ви розумієте під насипною щільністю порошків?
3. Що таке волюмометр та опишіть його будову?
4. Дайте визначення щільності порошку після утрушування.
5. Що Ви розумієте під текучістю металевих порошків?
6. Поясніть технологічне значення насипної щільності, щільності після утрушування та текучості.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛЕВИХ ПОРОШКІВ

2.1. Мета проведення лабораторного заняття

Вивчити фізичні властивості металевих порошків та способи їх визначення.

Завдання проведення лабораторного заняття:

Внаслідок проведення лабораторного заняття студенти повинні:

- знати: методи визначення фізичних властивостей металевих порошків;
- вміти: самостійно провести визначення гранулометричного складу, пікнометричної щільності та кута природного укосу частинок.

2.2. Основні теоретичні положення

Визначення гранулометричного складу частинок є обов'язковою вимогою, що пред'являється до порошку [1-3]. Порошки умовно класифікуються наступним чином:

- ультратонкі – менше 0,5 мкм
- дуже тонкі – 0,5 – 10 мкм;
- тонкі – 10 – 40 мкм;
- середні – 40 – 150 мкм;
- крупні – 150 – 500 мкм.

У зв'язку з широким діапазоном розмірів частинок є кілька методів дослідження гранулометричного складу: ситовий, седиментаційний, мікроскопічний, кондуктометричний, електростатичний, радіаційний та ін.

Діапазон визначення гранулометричного складу порошоків різними методами наведено на рисунку 2.1 [1].

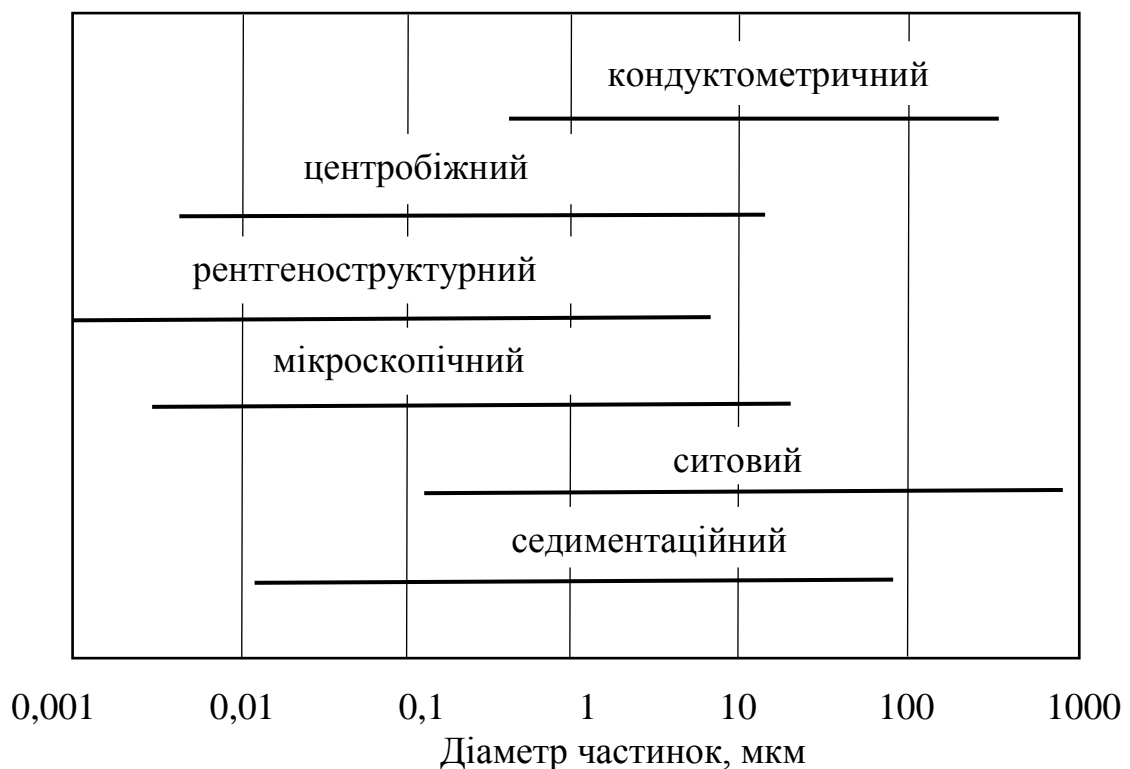


Рисунок 2.1 - Діапазон застосування методів аналізу гранулометричного складу

Середній розмір частинки визначається як середньогармонічна величина за формулою (2.1):

$$d_{\text{сеп}} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{d_i}} = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{d_i}} \quad (2.1)$$

де

де n - число фракцій

a_i - вміст фракції з розміром частинок d_i ;

d_i - середній розмір частинок кожної фракції, мкм, розрахований з урахуванням верхньої та нижньої межі фракції;

або як середньозважена величина за формулою (2.2):

$$d_{\text{сеп}} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \cdot d_i}{100} \quad (2.2)$$

Отримані ситовим аналізом дані можуть бути представлені графічно [3]:

– рисунок 2.2, а

1 – у вигляді частинної кривої розподілу, що виражає залежності кількісного вмісту фракцій порошку від значення середнього лінійного розміру частинок у межах кожної фракції;

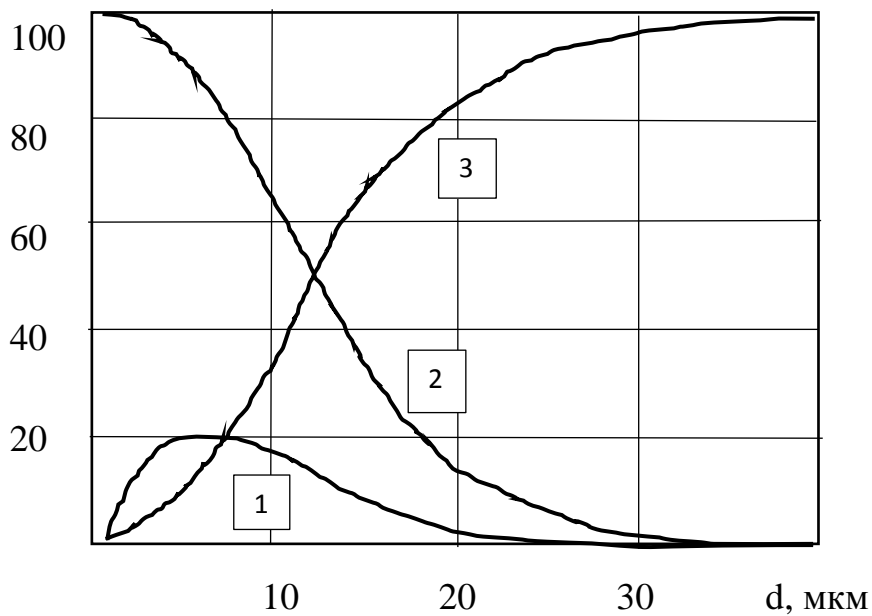
2, 3 - у вигляді інтегральних (кумулятивних) кривих розподілу, приплюсовуючи вміст кожної наступної за величиною фракції до суми попередніх; кожна точка кривих відповідає сумарному вмісту частинок великих (крива за плюсом 2) або менших (крива за мінусом 3) даного розміру;

- рисунок 2.2, б: у вигляді диференціальної кривої розподілу або у вигляді гістограми, що відображає порівняльний вміст кожної фракції у вигляді площі прямокутника, де висота – це кількісний вміст частинок, віднесених до інтервалу розмірів даної фракції, а основа - величина інтервалу.

У практиці порошкової металургії важливе значення має справжня, пікнометрична щільність металевих порошоків. Однак справжня щільність

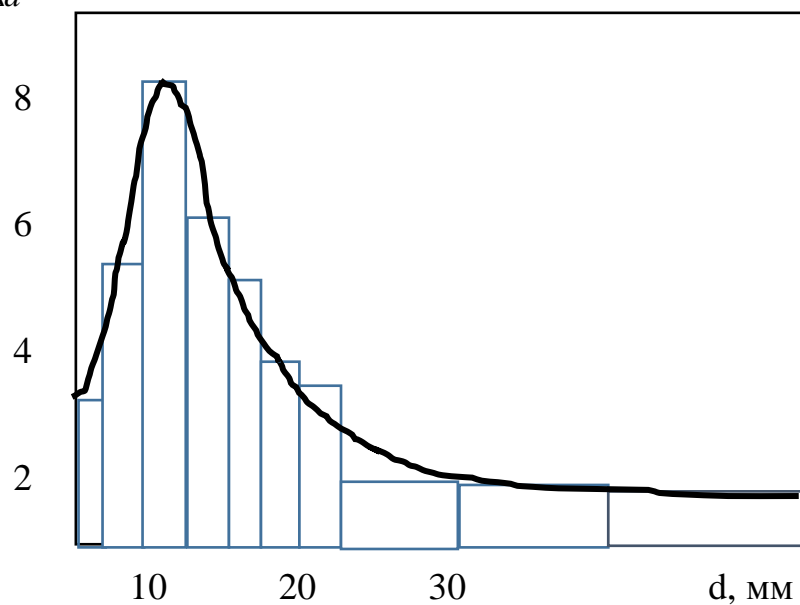
порошків відрізняється від щільності (щільності) компактних матеріалів внаслідок наявності внутрішньої пористості, дефектів кристалічної решітки, присутності оксидів тощо.

Q,%



а

$$F(d) = \frac{\Delta Q}{\Delta d}$$



б

Рисунок 2.2 – Гранулометричні криві

Пікнометрична щільність визначається пікнометричним методом. В якості рідини використовуються гас, бензол, бензиловий спирт, що добре змочують порошок і інертні до нього.

Кут природного укосу є характеристикою сипкості металевих порошоків. Він визначається як кут нахилу вільно насипаного порошку до горизонтальної площини. Чим більш сипучим є порошок, тим менший кут природного укосу. Цей кут характеризує рівноважний стан маси насипаного на горизонтальній поверхні порошку за відсутності примусового впливу на нього. Фізичний зміст цього параметра тотожний куту внутрішнього тертя між частинками поверхневого шару порошку.

2.3. Обладнання, приладдя, матеріали

2.3.1. Обладнання: механічний струшувач, ваги технічні.

2.3.2. Приладдя: набір сит, пікнометр, лійка, штатив.

2.3.3. Матеріали: порошки заліза, міді, бензол, розчинник.

2.4. Порядок проведення досліджень

2.4.1. Визначення гранулометричного складу.

2.4.1.1. Встановити набір сит на механічний струшувач.

2.4.1.2. Зважити пробу порошку масою $100 \pm 0,01$ г.

2.4.1.3. Висипати пробу порошку верхнє сито.

2.4.1.4. Вімкнути струшувач на 15-20 хв.

2.4.1.5. Вимкнути струшувач і зважити окремі фракції порошку.

2.4.2. Визначення пікнометричної щільності

2.4.2.1. Зважити сухий чистий пікнометр.

2.4.2.2. Залити в пікнометр бензол або іншу пікнометричну рідину до мірної риски.

2.4.2.3. Зважити пікнометр із рідиною.

2.4.2.4. Промийте пікнометр розчинником і висушити.

2.4.2.5. Заповнити чистий сухий пікнометр на $1/2 - 2/3$ об'єму сухим порошком.

2.4.2.6. Зважити пікнометр із порошком.

2.4.2.7. Залити вільний остаточний об'єм пікнометра рідиною до мірної риски, провакуувувати пікнометр і долити рідину до риски.

2.4.2.8. Зважити пікнометр із порошком та рідиною.

2.4.3. Визначення кута природного укосу

2.4.3.1. Встановити штатив та лійку у вертикальному положенні.

2.4.3.2. Закрити вихідний отвір лійки та засипати пробу порошку масою 50-60 г.

2.4.3.3. Відкрити вихідний отвір лійки та висипати порошок на аркуш паперу.

2.4.3.4. Виміряти діаметр і довжину бічної утворюючої конуса порошку.

2.5. Обробка експериментальних даних

2.5.1. Занести дослідні дані до таблиць 2.1, 2.2, 2.3.

Таблиця 2.1 – Визначення гранулометричного складу порошку

| Фракція, мкм | Середній розмір частинок фракції, d_i , мкм | Маса фракції, m_i , Г | Вміст фракції, a_i , % | Середній розмір частинок порошку, $d_{сер}$, мкм | Сумарний вміст фракції, Σm_i , Г |
|-----------------|---|-------------------------------|--------------------------------|---|---|
| | | | | | |
| | | | | | |

Таблиця 2.2 – Визначення пікнометричної щільності порошку

| № вимір | Маса пікно- метру, m_1 , Г | Маса пікнометру з рідиною, m_2 , Г | Маса пікнометру з порошком, m_3 , Г | Маса пікнометру з порошком та рідиною, m_4 , Г | Пікнометрична щільність порошку, ρ , г/см ³ |
|------------|---------------------------------------|---|--|--|--|
| | | | | | |
| | | | | | |

Таблиця 2.3 – Визначення кута природного укосу

| Діаметр конусу, мм | Бічна утворююча конусу, мм | Тангенс кута укосу | Косинус кута укосу | Кут природного укосу, град | Середнє значення кута природного укосу, град |
|--------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|--|
| | | | | | |
| | | | | | |

2.5.2. Визначити сумарний вміст фракцій $\sum_{i=1}^n m_i$ та порівняти з вихідною масою проби порошку. Має виконуватися умова:

$$(100 - \sum_{i=1}^n m_i) \cdot 100\% / 100 \leq 2\% \quad (2.3)$$

2.5.3. Обчислити вміст окремих фракцій порошку за формулою (2.4):

$$a_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

2.5.4. Обчислити середньогармонічну чи середньозважену величину розміру частинок за формулами (2.1) або (2.2).

2.5.5. Побудувати графік розподілу частинок порошку в координатах $a_i=f(d_i)$ у вигляді частинної, інтегральної або диференційної кривих.

2.5.6. Обчислити величину середньоквадратичного відхилення розмірів частинок порошку від середнього значення за формулою (2.5):

$$\sigma = \left(\frac{\sum (d_i - d_{cep})^2 \cdot a_i}{100} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

2.5.7. Обчислити коефіцієнт варіації за формулою (2.6):

$$\eta = \frac{\sigma}{d_{cep}} \cdot 100 \quad (2.6)$$

2.6.8. Визначити щільність пікнометричної рідини за формулою

$$\rho_p = \frac{m_2 - m_1}{V_n} \quad (2.7)$$

де m_2 - маса пікнометра з рідиною, г;

m_1 - маса пікнометра, г;

V_n - об'єм пікнометра, см³.

2.5.9. Обчислити пікнометричну щільність порошку

$$\rho = \frac{m_3 - m_1}{V_n - \frac{m_4 - m_3}{\rho_p}} \quad (2.8)$$

де m_4 - маса пікнометра з порошком та рідиною, г;

m_3 - маса пікнометра з порошком, г.

2.5.10. Обчислити тангенс кута природного укосу за формулою (2.9)

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{D/2} \quad (2.9)$$

де H – висота конуса, мм;

D - Діаметр конуса, мм.

2.5.11. Обчислити косинус кута природного укосу за формулою (2.10)

$$\operatorname{Cos} \alpha = \frac{D/2}{L} \quad (2.10)$$

де L - бокова утворююча конуса, мм.

2.5.12. Обчислити кут природного укосу за формулою

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{H}{D/2} \quad \text{або} \quad \alpha = \operatorname{arccos} \frac{D/2}{L} \quad (2.11)$$

2.5.1. У звіті навести розрахунки характеристик фізичних властивостей порошку та графіки.

2.6. Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальним посібникам вивчити методики визначення гранулометричного складу, пікнометричної щільності та кута природного укосу та підготуватися до виконання роботи.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що розуміють під гранулометричним складом порошків?
2. Назвіть методи визначення гранулометричного складу та області застосування.
3. Що таке пікнометрична щільність порошку?
4. Що таке кут природного укосу порошку?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ВПЛИВ ТИСКУ ПРЕСУВАННЯ НА ЩІЛЬНІСТЬ БРИКЕТУ

3.1. Мета проведення лабораторного заняття

Вивчити вплив тиску пресування на рівень ущільнення металевих порошків.

Завдання проведення лабораторного заняття:

Внаслідок проведення лабораторного заняття студенти повинні:

- знати: методику визначення та аналітичного опису впливу тиску пресування на ступінь ущільнення пресувань з металевих порошків;
- вміти: самостійно провести дослідження з визначення ступеня ущільнення пресувань в залежності від прикладеного тиску; скласти аналітичне рівняння для опису зв'язку між щільністю пресувань та тиском пресування.

3.2. Основні теоретичні положення

Пресування порошків є однією з основних технологічних операцій у процесі виробництва спечених деталей [3-5]. У процесі пресування порошків ущільнення порошку протікає в декілька стадій. У початковий момент тиск, що прикладається, руйнує мостики і арки між частинками, що утворилися при вільному засипанні порошку в прес-форму. У цей період відбувається найбільша зміна щільності пресувань. Подальше ущільнення відбувається шляхом деформації частинок. На другій стадії ущільнення відбувається пружна деформація, а потім пластична деформація або крихке руйнування частинок порошку. При пластичній деформації збільшується контактна поверхня, механічне зчеплення, адгезія між частинками [4].

Ущільнення металевих порошків залежить від форм і розмірів частинок, наявності домішок і оксидних плівок на поверхні частинки, природи металу, наявності мастила і т.д.

Для опису залежності щільності пресувань від тиску пресування запропоновано цілу низку аналітичних рівнянь, серед яких найбільшого поширення набули рівняння Бальшина [5]. Перше рівняння має вигляд:

$$\lg p = -L \cdot (\beta - 1) + C \quad (3.1)$$

де L - константа (фактор пресування), чисельно рівна тангенсу кута нахилу прямої до осі абсцис графіка:

$$\lg P = f(\beta - 1)$$

β - відносний об'єм пресування,

C - константа, що дорівнює $\lg P_{max}$, при якому досягається $\beta = 1$.

Друге рівняння Бальшина має вигляд:

$$\lg P = -m \cdot \lg \beta + C \quad (3.2)$$

або

$$\lg P = -m \cdot \lg \theta + C$$

де m -показник пресування.

Реальна діаграма пресування $\lg P = f(\lg \beta)$ в більшості випадків не збігається з теоретичною прямою внаслідок ряду припущень, прийнятих М.Ю. Бальшиним, при виведенні рівняння:

- деформування порошкового матеріалу, подібне до деформування компактного /литого/матеріалу;
- поширення закону Гука на пластичну деформацію;
- відсутність зміцнення при пластичних деформаціях;
- утворення контактної поверхні є результатом лише пластичної деформації частинок металу.

У разі відхилення експериментальних даних від прямих Бальшина у бік більш високих значень відбувається наклеп (збільшення твердості) поверхні частинок порошку (через окислення або з інших причин). Якщо $\lg P$ збільшується швидше, ніж $\lg \beta$, відбувається гальмування деформації частинок внаслідок ефекту тертя між частинками.

3.3. Обладнання, приладдя, матеріали

3.3.1. Обладнання: гідравлічний прес, ваги технічні.

3.3.2. Приладдя: мікрометр, прес-форма.

3.3.3. Матеріали: порошки: заліза, міді.

3.4. Порядок проведення досліджень

3.4.1. Ознайомитись з конструкцією та експлуатацією гідравлічного пресу.

3.4.2. Зважити 5-6 наважок порошку масою 7-8 г.

3.4.3. Засипати пробу порошку в прес-форму і встановити верхній пуансон.

3.4.4. Відпресувати 5-6 брикетів при різних тисках в діапазоні 200-800 МПа.

3.4.5. Визначити масу, діаметр та висоту кожного пресування.

3.5. Обробка експериментальних даних

3.5.1. Занести отримані дані до табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Експериментальні дані $\beta = \frac{1}{\theta}$, $\theta = \frac{\rho}{\rho_k}$, $\Pi = 1 - \theta$

| № | Тиск пресування | Розміри пресовок | | Маса пресовок, г | Щільність пресовок, г/см ³ | Відносний об'єм β | Відносна щільність θ | Пористість, % | $lg\theta$ |
|---|-----------------|------------------|-------|------------------|---------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------|------------|
| | | H, мм | D, мм | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

3.5.2. Визначити щільність пресування за формулою

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.4)$$

де

m - маса пресування, г;

V - об'єм пресування, см³.

3.5.3. Визначити відносну щільність та об'єм пресувань за формулами:

$$\theta = \frac{\rho}{\rho_k} ; \beta = \frac{1}{\theta} \quad (3.5)$$

де

θ - відносна щільність;

ρ_k - щільність компактного матеріалу, г/см³;

β - відносний об'єм.

3.5.4. Побудувати графіки ависимості. $\lg P = f(\beta - 1)$, $\lg P = f(\lg \theta)$ і зробити висновки про відповідність отриманих даних рівнянням Бальшина.

3.6. Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальним посібником вивчити питання впливу тиску пресування на ущільнюваність пресувань та підготуватися до виконання лабораторної роботи.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Переваги та недоліки існуючих рівнянь пресування.
2. Від чого залежить пресуємість порошків?
3. Чим пояснюється відхилення реальних діаграм від рівнянь Бальшина?
4. Дайте визначення відносної щільності та пористості пресувань.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

РОЗПОДІЛ ЩІЛЬНОСТІ ЗА ВИСОТОЮ ПРЕСУВАННЯ

4.1. Мета проведення лабораторного заняття

Вивчити вплив тиску пресування на розподіл щільності за висотою пресування.

Завдання проведення лабораторного заняття:

Внаслідок проведення лабораторного заняття студенти повинні:

- знати: методику оцінки розподілу щільності за висотою пресування;

- вміти: самостійно провести дослідження з оцінки розподілу щільності за висотою пресування.

4.2. Основні теоретичні положення

Пресування є формуванням металевго порошку в прес-формі під впливом тиску.

Якщо піддати пресуванню засипані в циліндричну прес-форму однакові за масою і висотою шари порошку, розділені прокладками з тонкої фольги, то після ущільнення окремі шари відрізняться один від одного за товщиною і формою (рисунок 4.1) [4-5].

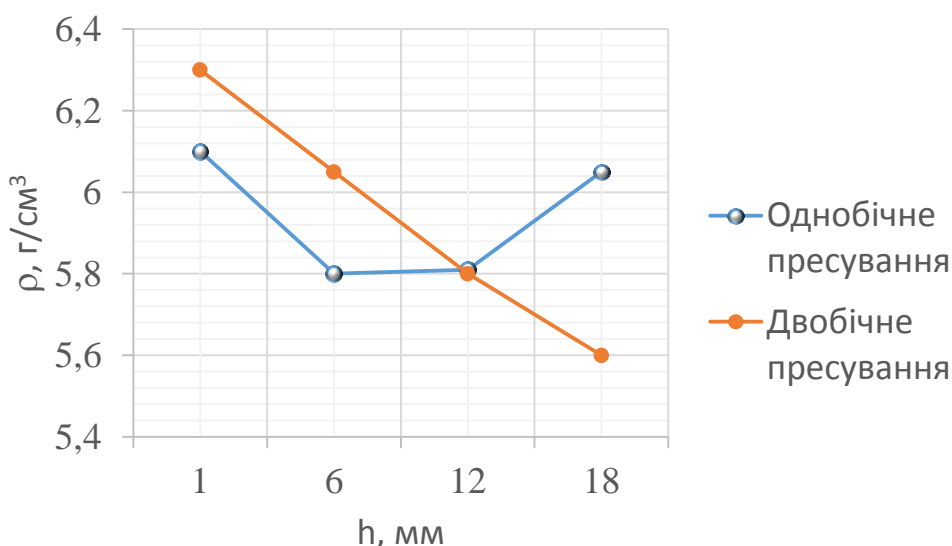


Рисунок 4.1 - Розподіл щільності у брикеті залежно від висоти

По вертикалі в бік від місця прикладання тиску кожен верхній шар виявляється тоншим за нижчележачою, тобто щільність брикету поступово зменшується. У горизонтальному напрямі у верхньому шарі під пресуючим пуансоном густина наростає від центру до периферії, а в нижньому шарі, навпаки, від периферії до центру. Неоднорідний розподіл щільності за об'ємом брикету обумовлений витратою зусилля пресування на подолання зовнішнього тертя порошку об поверхні елементів пресформи, що контактують з ним (стілки внутрішньої порожнини матриці і торцеві поверхні верхнього і нижнього пуансонів). Міжчастинкове тертя не викликає

появи градієнта щільності за висотою та перерізом брикету. Причинами виникнення в середній частині брикету зони підвищеного ущільнення є поширення вогнища деформації при прикладанні тиску та видавлювання порошку з кутів порожнини матриці в напрямку результуючих сил тертя порошку об стінки матриці. При двосторонньому пресуванні більш щільними виявляються верхня і нижня частини брикету, тоді як у середині зберігається зона зниженої щільності, яка називається нейтральною (рисунок 4.1).

Нерівномірність щільності брикету може вплинути на спотворення форми і розмірів пресування при спіканні, короблення, що є небажаним технологічним фактором.

Існує кілька способів усунення нерівнощільності: введення мастила, пошарове пресування, зміна схеми пресування [3]. Застосування мастила при пресуванні один із кращих способів зменшення тертя та покращення процесу ущільнення порошку. Мастила, що знижують тертя між порошком і стінками прес-форми і не надають будь-якого суттєвого впливу на порошок, називаються інертними на відміну від активних мастил, що впливають на тертя між частинками і викликають руйнування їх за рахунок адсорбційного зниження міцності. В якості мастил застосовують стеарат цинку, стеротекс, акравакс, дисульфід молібдену, парафін, олеїнову кислоту та інші речовини. Кількість мастила, що вводиться, становить 0,5-1,5% від маси порошку.

4.3. Обладнання, приладдя, матеріали

4.3.1. Обладнання: гідравлічний прес, ваги технічні.

4.3.2. Приладдя: мікрометр, прес-форма, прокладки.

4.3.3. Матеріали: порошки заліза, міді.

4.4. Порядок проведення досліджень

4.4.1. Ознайомитись з конструкцією та експлуатацією гідравлічного пресу.

4.4.2. Зважити 3 проби масою 2,0 г.

4.4.3. Засипати в прес-форму три шари порошку, перекладаючи шари прокладками.

4.4.4. Відпресувати приготовлені таким чином зразки при тиску, вказаному викладачем.

4.4.5. Вилучити з прес-форми зразок і розділити його на три частини за прокладками.

4.4.6. Зважити кожну частину зразка та визначити їх розміри.

4.5. Обробка експериментальних даних

4.5.1. Занести отримані дані до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати експерименту

| Номер зразка по висоті брикету | Тиск пресування, Р, МПа | Розмір пресування | | Об'єм пресування, см ³ | Маса пресування, г | Щільність зразка, г/см ³ |
|--------------------------------|-------------------------|-------------------|-------|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| | | Н, мм | Д, мм | | | |
| | | | | | | |

4.5.2. Розрахувати щільність верхньої, середньої та нижньої частин пресування.

4.5.3. Побудувати графік розподілу щільності за висотою брикету.

4.6. Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальних посібників вивчити питання впливу тиску на розподіл щільності за висотою брикету та підготуватися до виконання лабораторної роботи.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Назвіть причини нерівнощільності пресування.
2. Перерахуйте способи зниження нерівнощільності пресувань.
3. Від яких факторів залежить розподіл щільності в об'ємі брикета?
4. Як розподіляється щільність при одно- та двосторонньому пресуванні?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

ІЗОСТАТИЧНЕ ФОРМУВАННЯ В ТОВСТОСТІННИХ ОБОЛОНКАХ /ВТУЛКАХ/

5.1. Мета проведення лабораторного заняття

Вивчити процес ізостатичного формування порошків.

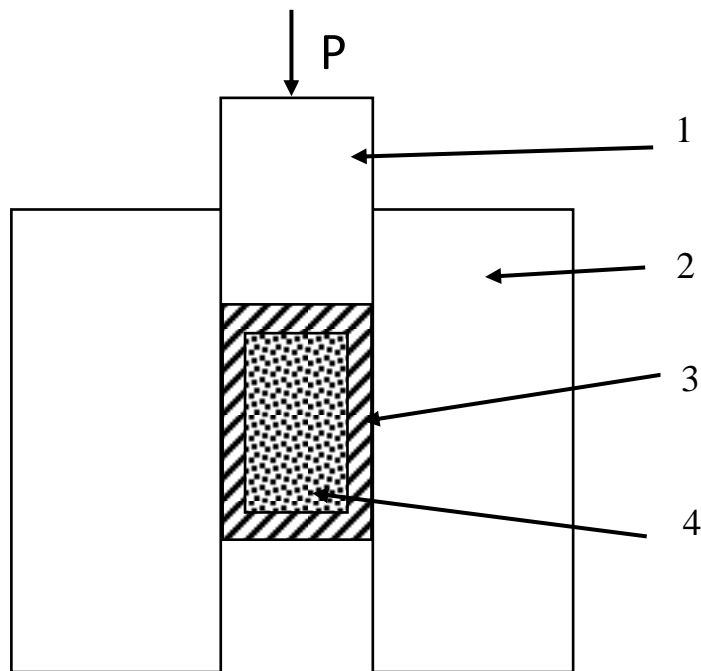
Завдання лабораторного заняття. В результаті проведення лабораторного заняття студенти повинні:

- знати: теоретичні основи та практичне втілення методу ізостатичного формування;
- вміти: самостійно провести дослідження з отримання формування в товстостінних втулках.

5.2. Основні теоретичні положення

Сутність ізостатичного формування полягає в ущільненні металевого порошку в еластичній або деформованій оболонці в умовах всебічного стиснення [4-5]. В результаті одержують великогабаритні пресування, пресування з великим відношенням довжини до діаметра, з тонкими стінками та рівномірною у всіх напрямках щільністю. Порошок засипають в еластичну (наприклад, гумову) оболонку, яку поміщають в робочу камеру пресування апарату і створюють необхідний тиск. Рідина (масло, вода, гліцерин тощо) всебічно і рівномірно стискає порошок, забезпечуючи формування виробу. Порівняно із звичайним пресуванням у даному випадку тертя частинок порошку об стінки оболонки невелике. Так, при гідростатичному пресуванні забезпечується не тільки рівномірна щільність пресувань, але усувається також анізотропія структури. Оскільки при гідростатичному і пресуванні повітря не має виходу з герметично закритої оболонки, застосовують попередню дегазацію (вакуумування) ущільнюваного порошку. Гідростатичним пресуванням отримують циліндри, штабики, труби, кулі та інші вироби простої та складної форми масою до кількох сотень кілограмів

[1]. У сучасних гідростатах створюють тиск від 100 до 1200 МПа. Іншим варіантом формування при всебічному обтисненні є пресування під дією газу (гелію, аргон та ін), яке називають газостатичним. Ще одним варіантом ізостатичного пресування служить формування в еластичних оболонках, поміщених у прес-формах, що піддаються одно- або двобічному тиску ... (рисунок 5.1).



1 - пуансон, 2 - матриця, 3 - втулки, 4 - порошок

Рисунок 5.1 - Схема ізостатичного формування в товстостінних оболонках (втулках):

У цьому випадку роль середовища, що передає всебічний тиск, виконує оболонка, яку виготовляють з парафіну, воску, епоксидних смол і гумової маси. Основні вимоги до матеріалу оболонки:

- під тиском матеріал має вести себе аналогічно рідині, щоб забезпечувати рівномірну передачу тиску на порошок;
- залишкова деформація матеріалу має дорівнювати нулю;
- матеріал повинен мати здатність приймати і зберігати необхідну геометричну форму, відповідну формі готового виробу;
- матеріал повинен мати достатню міцність і здатність легко відокремлюватися від виробу, що пресується.

5.3. Обладнання, приладдя, матеріали

5.3.1. Обладнання: гідравлічний прес, ваги технічні.

5.3.2. Приладдя: прес-форма, гумові втулки, підвіска, склянка, підставка.

5.3.3. Матеріали: порошок міді, порошок заліза,

5.4. Порядок проведення досліджень

5.4.1. Закласти еластичну втулку з нижньою торцевою кришкою у внутрішню порожнину прес-форми і встановити нижній пуансон.

5.4.2. Засипати порошок в еластичну втулку та легким струшуванням ущільнити порошок.

5.4.3. Встановити верхню торцеву кришку і верхній пуансон.

5.4.4. Провести пресування при 100-800 МПа (за вказівкою викладача).

5.4.5. Витягти пресування з еластичної оболонки та зважити його.

5.4.6. Покрити пресування захисною плівкою парафіну.

5.4.7. Зважити зразок на повітрі та у воді.

5.5. Обробка експериментальних даних

5.5.1. Занести отримані дані до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1- Результати експерименту

| Тиск пресування, Р, МПа | Маса зразка, m_1 , г | Маса зразка парафіном, m_2 , г | Маса зразка з парафіном у воді, m_3 , г | Щільність зразка, ρ , г/см | Пористість зразка, П, % |
|-------------------------|------------------------|----------------------------------|---|---------------------------------|-------------------------|
| | | | | | |
| | | | | | |

5.5.2. Розрахувати щільність зразка за формулою:

$$\rho = \frac{m_1 \cdot \rho_p}{m_2 - m_3}, \text{ г/см}^3, \quad (5.1)$$

де $\rho_p = 1 \text{ г/см}^3$ (для води).

5.5.3. Розрахувати пористість зразка за формулою

$$P = \frac{\rho}{\rho_k} \cdot 100\%, \quad (5.2)$$

де $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$ (для заліза).

5.6. Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальних посібників вивчити теорію ізостатичного формування та підготуватися до виконання лабораторної роботи.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що таке ізостатичне формування
2. Технологія ізостатичного формування. Гідро- та газостатичне формування.
3. Формування у товстостінних оболонках.
4. Вимоги, що пред'являються до матеріалу еластичної оболонки.
5. Переваги та недоліки ізостатичного формування.
6. Сутність гідростатичного методу визначення щільності пресувань.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6 РІДКОФАЗНЕ СПІКАННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СИСТЕМ

6.1. Мета проведення лабораторного заняття

Набуття навичок рідкофазного ізотермічного спікання багатокомпонентних систем.

Завдання проведення лабораторного заняття. В результаті проведення заняття студенти повинні:

- знати: основи теорії рідкофазного спікання;

- вміти: самостійно провести дослідження з отримання спечених матеріалів методом рідкофазного спікання, вміти визначати лінійну та об'ємну усадку зразків.

6.2. Основні теоретичні положення

Спікання порошку називають рідкофазним, якщо його проводять при температурі, що забезпечує появу рідкої фази.

Рідка фаза, що утворюється при розплавленні легкоплавкого компонента, забезпечує розвиток сил зчеплення між окремими частинками порошку в тому випадку, якщо вона їх змочує. При поганому змочуванні (крайовий кут змочуванні більше 90°) рідка фаза гальмує спікання, перешкоджаючи ущільненню. У присутності рідкої фази суттєво збільшується швидкість дифузії компонентів, полегшується переміщення твердих частинок одна відносно одної.

Розрізняють три стадії рідкофазного спікання:

- в'язкий перебіг рідини перегрупування частинок;
- розчинення-осадження;
- утворення жорсткого скелета.

У реальному процесі рідкофазного спікання в залежності від природи фаз та кількості рідкої фази переважає та чи інша стадія спікання. В загальному випадку швидкість і ступінь ущільнення збільшуються при зростанні вмісту рідкої фази. Перегрупування частинок найбільш виразно проявляється в системах, у яких практично відсутня розчинність компонентів (системи W-Cu, W-Ag, Mo-Cu). У процесі перегрупування ущільнення здійснюється внаслідок переміщення частинок твердої фази під дією сил поверхневого натягу.

Цей процес протікає дуже швидко і робить основний внесок у усадку, забезпечуючи високе ущільнення.

Процес розчинення-осадження має місце в системах з досить високою взаємною розчинністю (системи Fe-Cu, Ni-Nb WC-Co, TiC-N). Для здійснення цього механізму спікання необхідно виконання таких умов:

- значна різниця температур плавлення компонентів;

- нерозчинність металу з низькою температурою плавлення в металі з високою температурою плавлення;
- розчинність тугоплавкого компонента в більш легкоплавкому.

Механізм процесу розчинення-осадження обумовлений зростанням зерен внаслідок розчинення дрібних частинок у рідині з подальшим осадженням речовини на великих частинках. При цьому спостерігається яскраво виражене пристосування зерен до форми один одного, а частинки набувають форми, доцільної до створення більш щільної упаковки. При певному співвідношенні між поверхневими енергіями на межі розділу тверде- тверде та тверде - рідке рідина не затікає в зазор між частинками, і сусідні частинки твердої фази зростаються. Іноді таких зв'язків утворюється стільки, що майже всі частинки твердої фази зростаються між собою і виникає жорсткий скелет, у порах якого міститься рідка фаза [4, 6].

Усадка зразків при рідкофазному спіканні залежить від кількості рідини, розміру частинок, тиску пресування та середовища спікання. У загальному випадку швидкість і ступінь ущільнення зростають при збільшенні кількості рідкої фази, проте в деяких системах внаслідок значної розчинності компонентів і переважної дифузії одного компонента в інший спостерігається значне зростання зразків [5, 6]. Ступінь ущільнення обернено пропорційна розмірам частинок. У більшості випадків збільшення тиску пресування позитивно впливає на спікання зразків, крім тих випадків, де воно є причиною утворення великої кількості замкнених пір. Середовище спікання є одним з найважливіших факторів, що впливають на ступінь ущільнення зразка, причому його вплив на спікання зразків у присутності рідкої фази і при твердофазному спіканні мало відрізняється.

6.3. Обладнання, приладдя, матеріали

6.3.1. Обладнання: прес гідравлічний, ваги технічні, змішувач лабораторний.

6.3.2. Приладдя: прес-форма на ущільнення, штангенциркуль.

6.3.3. Матеріали: порошки заліза, міді.

6.4. Порядок проведення досліджень

6.4.1. Зважити порошки заліза та міді з розрахунку 0-20% вмісту міді у шихті (за вказівкою викладача).

6.4.2. Провести змішування компонентів в лабораторному змішувачі протягом 15-20 хв.

6.4.3. Відпресувати зразки при тиску 400-700 МПа (за вказівкою викладача).

6.4.4. Визначити геометричні розміри відпресованих зразків.

6.4.5 Зважити відпресовані зразки.

6.4.6. Здійснити спікання зразків у вакуумі при 1150°C протягом 0,5-1 години, допускається спікання в H_2 .

6.4.7. Зважити спечені зразки та визначити їх геометричні розміри, визначити твердість зразків.

6.5. Обробка експериментальних даних

6.5.1. Занести отримані дані до табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Експериментальні дані

| Склад шихти | Маса пресування, m_1 , г | Розміри пресування, мм | | Маса спеченого зразка m_2 , г | Розміри спеченого зразка, мм | | Щільність зразка, ρ , г/см ³ | Об'ємна усадка, $\Delta V/V$, % | Лінійна усадка, $\Delta H/H$, % | Твердість, HB |
|-------------|----------------------------|------------------------|-------|---------------------------------|------------------------------|---|--|----------------------------------|----------------------------------|---------------|
| | | H_0 | D_0 | | H | D | | | | |
| | | | | | | | | | | |

6.5.2. Розрахувати щільність, спеченого зразка, лінійну та об'ємну усадки у процесі спікання за формулами: 3.3, 6.1.

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V_0 - V}{V_0} \cdot 100\%; \quad \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{H_0 - H}{H_0} \cdot 100\% \quad (6.1)$$

де V_0, H_0 - початкові об'єм і висота пресування до спікання;
 V, H - об'єм та висота зразка після спікання.

6.6 Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальних посібників вивчити теорію рідкофазного спікання та підготуватися до виконання лабораторної роботи.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Перерахуйте стадії процесу спікання за участю рідкої фази.
2. Поясніть механізм ущільнення під час рідкофазного спікання.
3. Вкажіть джерела появи рідкої фази при спіканні.
4. Поясніть роль рідкої фази під час спікання.
5. Особливості спікання систем з обмеженою розчинністю компонентів.
6. Від яких факторів залежить усадка зразків при рідкофазному спіканні?
7. За яких умов здійснюється механізм рідкофазного спікання за схемою розчинення-осадження?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

ОТРИМАННЯ ДИСПЕРСНОЗМІЩЕНИХ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

7.1. Мета проведення лабораторного заняття

Дослідження впливу вмісту дисперснозміцнювальної добавки Al_2O_3 на властивості міцності спечених матеріалів.

Завдання проведення лабораторного заняття. В результаті проведення заняття студенти повинні:

- знати: призначення та технології отримання дисперснозміцнених матеріалів та механізм зміцнення металевої матриці дисперсними добавками;
- вміти: самостійно отримувати спечені дисперснозміцнені матеріали.

7.2. Основні теоретичні положення

Дисперснозміцненими матеріалами називаються спечені матеріали, що містять штучно введені в них високодисперсні рівномірно розподілені частинки тугоплавких сполук [6-8]. Механізм зміцнення металевої матриці дисперсними добавками полягає в тому, що за наявності в матриці тугоплавкої фази блокується рух дислокацій в зернах металу і загальмовується зростання зерен практично до температури плавлення матриці.

При створенні дисперснозміцненого матеріалу обирають:

- фазу-зміцнювач та її об'ємний вміст;
- спосіб введення дисперсної добавки до матриці;
- спосіб одержання спеченого матеріалу;
- раціональні режими деформації та термічної обробки спеченого матеріалу.

До дисперсної добавки висувають такі вимоги: висока термодинамічна стійкість, мала розчинність складових дисперсної фази в матриці; висока чистота і велика питома поверхня частинок дисперсної фази [7]. В якості дисперсних добавок найчастіше використовують: Al_2O_3 , SiO_2 , ThO_2 , HfO_2 , ZrO_2 ; Cr_2O_3 , а також інші оксиди, карбіди та нітриди перехідних металів.

При виготовленні дисперснозміцнених матеріалів використовують такі способи змішування вихідних компонентів: механічне змішування, поверхневе окислення, хімічне осадження з розчинів, водневе відновлення і термічне розкладання солей.

Механічне змішування є найпростішим та економічним способом одержання сумішей. Поверхневе відновлення використовують у тих випадках, коли в якості зміцнювача використовують оксиди основного металу. Хімічне осадження з розчинів дозволяє досягти рівномірного

розподілу компонентів дисперсної фази в об'ємі металевої матриці. Водневе відновлення можливе при використанні в якості матриці металів, що утворюють легковідновлювані оксиди (мідь, нікель, залізо) [1,7]. Термічним розкладанням суміші солей досягається рівномірний розподіл компонентів.

Після отримання однорідної суміші порошки піддаються пресуванню і спіканню у вакуумі або нейтральному середовищі. Особливістю пресування даних виробів є використання більш високих тисків, оскільки зміцнююча добавка впливає на технологічні характеристики шихти (насіпну щільність, формуємість). Спіканням дисперснозміцнених матеріалів не вдається отримувати безпористі вироби, оскільки наявність в об'ємі металевої матриці інертних частинок гальмує процес спікання. Тому з метою покращення структури та властивостей виробів дисперснозміцнені матеріали піддають деформації та термічній обробці.

В якості дисперснозміцнених матеріалів використовують алюмінієві, берилієві, вольфрамові, залізні, кобальтові, мідні, молібденові, нікелеві, платинові та хромові сплави.

7.3. Обладнання, приладдя, матеріали

7.3.1. Обладнання: прес гідравлічний, піч спікання, розривна машина, лабораторний змішувач, твердомір.

7.3.2. Приладдя: прес-форма, ваги технічні.

7.3.3. Матеріали: порошки заліза та Al_2O_3 .

7.4. Порядок проведення досліджень

7.4.1. Зважити порошки заліза та Al_2O_3 із розрахунку 0-2% Al_2O_3 в шихті (за вказівкою викладача).

7.4.2. Провести змішування вихідних компонентів в лабораторному змішувачі протягом 15-20 хв.

7.4.3. Відпресувати зразки з чисто заліза і суміші з Al_2O_3 при питомому тиску 400-700 МПа.

7.4.4. Здійснити спікання зразків у вакуумі при 1150°C протягом 0,5-1 год., допускається спікання в H_2 .

7.4.5. Виконати випробування спечених зразків на розрив, твердість.

7.5. Обробка експериментальних даних

7.5.1. Отримані дані занести до таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Експериментальні дані

| № з/п | % Al ₂ O ₃ | Межа міцності, σ, МПа | Твердість, НВ |
|-------|----------------------------------|--------------------------|------------------|
| | | | |

7.5.2. За отриманими даними побудувати графік залежності $\sigma_B=f(\%Al_2O_3)$ та $HB=f(\%Al_2O_3)$

7.6. Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальних посібників вивчити технології отримання дисперснозміцнених матеріалів та механізм зміцнення металевої матриці дисперсними добавками.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Призначень дисперенозміцнених матеріалів.
2. Механізм зміцнення металевої матриці дисперсними добавками.
3. Основні вимоги до матеріалу зміцнювача.
4. Основні способи введення дисперсної добавки в об'єм матеріалу.
5. Технологічні особливості отримання дисперснозміцнених матеріалів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

ТВЕРДОФАЗНЕ СПІКАННЯ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ У СЕРЕДОВИЩІ ВОДНЮ

8.1. Мета проведення лабораторного заняття

Дослідження впливу тиску пресування та температури на процес твердофазного спікання порошкових матеріалів

Завдання проведення лабораторного заняття. В результаті проведення заняття студенти мають:

- знати: теорію процесу твердофазного спікання порошкових матеріалів;
- вміти: самостійно дослідити вплив різних технологічних факторів на процес спікання порошкових матеріалів.

8.2. Основні теоретичні положення

Спікання є одним з найважливіших технологічних процесів порошкової металургії, що у вирішальній мірі визначає кінцеві властивості отримуваних порошкових матеріалів і виробів [1-3].

Воно є складним комплексом фізико-хімічних явищ, що протікають при нагріванні порошкового формування. Відповідно до сучасної теорії порошкове тіло, що спікається, протягом усього процесу нагрівання характеризується трьома принципово відмінними станами, кожен з яких відповідає певній стадії:

- на початковій стадії відбувається припікання частинок порошку одна до одної, що супроводжується збільшенням поверхні контакту між ними;
- на другій стадії тіло, що спікається, представляє сукупність двох фаз, що перемежаються неупорядковано - речовини і порожнин. На цій стадії зникають контакти між частинками, але ще не формуються замкнуті пори;

- на третій стадії в тілі, що спікається, в основному наявні лише замкнуті ізольовані пори, число і обсяг яких зменшується, що призводить до ущільнення порошкового матеріалу.

Часто виділяють такі стадії спікання [2, 4-6]:

- розвиток та виникнення зв'язків між частинками;
- утворення та зростання "шийок" контактів;
- закриття наскрізної пористості,
- сфероїдизація пір;
- ущільнення за рахунок усадки пір;
- укрупнення (коалесценція) пір.

Розвиток зв'язків між частинками спостерігається на самому ранньому етапі спікання. Це дифузійний процес, що призводить до утворення та розвитку межзеренних меж. Результат цієї стадії - виникнення "шийки", яка є по суті межеренною межею. Зростання "шийки" здійснюється за рахунок перенесення речовини в результаті поверхневої та об'ємної дифузії, транспортування через газову фазу та в'язкої течії. Закриття наскрізної пористості (порових каналів) характеризує значні зміни в природі пористості тіла, що спікається: криволінійні порові канали перетворюються на ізольовані, закриті межі пор або окремі пори. При цьому загальний об'єм пір у матеріалі, що спікається, зменшується і відбувається усадка. У той час як матеріал переходить в область "шийки" з поверхні пор, самі пори округляються, стають сферичними.

Процес усадки пір, що призводить до зменшення обсягу тіла, що спікається, здійснюється шляхом руху матеріалу в область пір, а газ, що міститься в порах, шляхом дифузії виходить до зовнішньої поверхні тіла. Укрупнення (коалесценція) пір полягає у зменшенні розмірів та зникненні дрібних, ізольованих пір та зростанні великих. Загальна пористість при цьому зберігається незмінною, а кількість пір зменшується зі збільшенням їх середнього розміру.

Рушійними силами спікання є великий надлишок вільної енергії, пов'язаної з наявністю високої внутрішньої міжфазної поверхні поділу частинка-пора; наявність різниці в тиску парів речовини над поверхнями різної кривизни; наявність відмінності концентрацій вакансій на ділянках поверхні частинок різної кривизни.

На процес твердофазного спікання порошкових матеріалів впливають: властивості вихідних порошоків, тиск пресування, температура та тривалість спікання, середовище спікання.

Зі збільшенням дисперсності порошку процес спікання прискорюється, тому що наявність виступів та западин на поверхні частинок активує усадку за рахунок підвищення вмісту дефектів поблизу западин та утворення мікропор з малим радіусом кривизни на стиках частинок. Інтенсифікації спікання сприяють оксиди, що містяться у великій кількості у дрібних порошках і відновлюються в процесі спікання.

Зі збільшенням тиску пресування об'ємна та лінійна усадки зменшуються, тобто відносне збільшення щільності при спіканні спостерігається у брикетів, отриманих при меншому тиску. Збільшення тиску пресування призводить до підвищення міцносних властивостей спечених матеріалів - твердості, опору розриву та стисканню та ін.

З підвищенням температури спікання щільність спечених матеріалів зростає тим швидше, чим нижчим був тиск пресування порошку. При низьких температурах усадка матеріалу незначна, оскільки відбувається випаровування вологи, видалення сорбованих газів та зняття напружень пресування. В області високих температур відбувається значне кількісне зростання металевих контактів, ущільнення пір під дією сил поверхневого натягу. Витримка спресованих брикетів при постійній температурі спікання викликає спочатку різке, а потім повільніше зростання їх щільності та інших властивостей. Максимальна міцність досягається за досить короткий час і при подальшому збільшенні ізотермічної витримки вона залишається на тому рівні. Порівняння результатів спікання, проведеного в різних середовищах, свідчить про те, що при спіканні у відновному середовищі (водень, ендогаз) досягається більша щільність, ніж при спіканні в нейтральному середовищі (аргон, гелій). Це пояснюється хімічним впливом відновного середовища на оксидні плівки завдяки чому активізується міграція атомів металу і контактним ділянцям не тільки по поверхні, а й в об'ємі.

Дуже повно і швидко проходить спікання у вакуумі, яке у порівнянні зі спіканням у нейтральному середовищі в більшості випадків починається при більш низьких температурах і дає підвищену щільність виробів.

8.3. Обладнання, приладдя, матеріали

8.3.1. Обладнання: гідравлічний прес, піч для спікання.

8.3.2. Приладдя: ваги технічні, прес-форма, штангенциркуль.

8.3.3. Матеріали: порошки заліза, міді, просочувальна рідина.

8.4. Порядок проведення досліджень

8.4.1. Заповнити прес-форму порошком,

8.4.2. Виконати пресування зразків при 200-800 МПа,

8.4.3. Зважити зразки та виміряти геометричні розміри зразків.

8.4.4. Здійснити спікання зразків у водні при заданій температурі (відповідно до інструкції з експлуатації печі спікання).

8.4.5. Зважити зразки та визначити їх геометричні розміри після спікання.

8.4.6. Провести просочення спечених зразків протягом 2-3 годин олією або іншою рідиною (за вказівкою викладача).

8.4.7. Зважити просочені зразки на повітрі.

8.5. Обробка експериментальних даних

8.5.1. Занести отримані дані до таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 – Експериментальні дані

| Тиск пресування, МПа | Маса зразка, г | | Розміри зразків, мм | | | | Щільність зразків, г/см ³ | | Маса зразка після просочування, m ₂ , г | Пористість спечених зразків, % | | |
|----------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|----------------|----------------|---|--------------------------------------|--------------------------------|--|--------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | До спікання, m ₀ | Після спікання, | До спікання | | Після спікання | | До спікання ρ ₀ | Після спікання ρ _{сп} | | Загальна, P _{заг} | Відкрита, P _{відкр} | Закрита, P _{закр} |
| | | | H ₀ | D ₀ | H | D | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

8.5.2. Розрахувати щільність зразків до та після спікання за формулою (3.4).

8.5.3. Розрахувати загальну, відкриту та закриту пористість за формулою:

$$P_{заг} = \frac{\rho_k - \rho}{\rho_k} \cdot 100\% \quad (8.1)$$

$$P_{відкр} = \frac{m_2 - m_1}{\rho_p \cdot V} \cdot 100\% \quad (8.2)$$

$$P_{закр} = P_{заг} - P_{відкр} \quad (8.3)$$

ρ_k - щільність компактного матеріалу, г/см³;

$\rho_{сп}$ - щільність зразків після спікання, г/см³;

ρ_p - щільність просочувальної рідини, г/см³;

V об'єм спеченого зразка, см³.

8.5.4. Побудувати графіки залежності $\rho = f(P)$, $P_{відкр} = f(P)$, $P_{закр} = f(P)$ та зробити висновки про вплив тиску пресування на процес спікання порошкових матеріалів.

8.6. Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальних посібників вивчити теорію твердо-фазного спікання та підготуватися до виконання лабораторної роботи.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

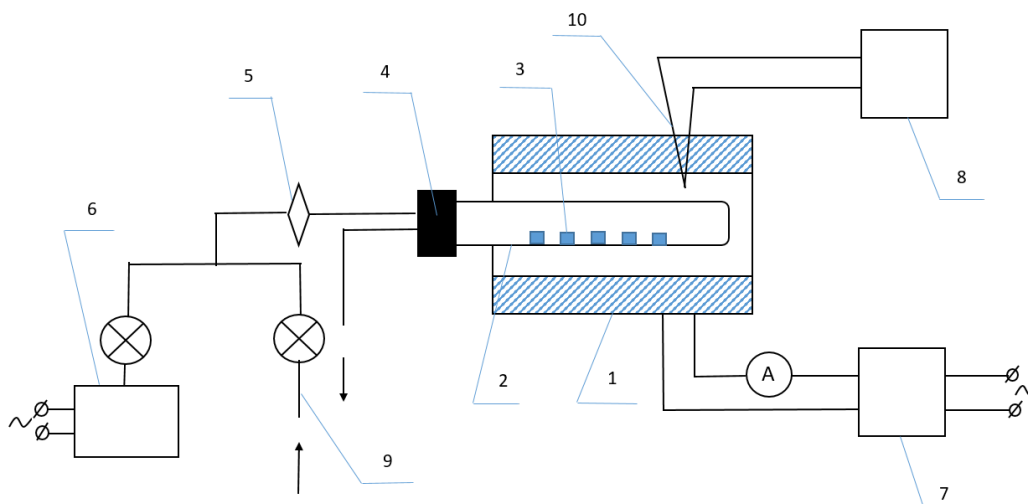
1. Якими є рушійні сили спікання порошкових матеріалів?
2. Якими є основні стани порошкового тіла при твердофазному спіканні?
3. Перелічіть основні стадії твердофазного спікання.
4. Від яких факторів залежить процес твердофазного спікання порошкові матеріали.

ЛІТЕРАТУРА

1. Носко О.А., Ковзík А.М., Аюпова Т.А., Ковзель М.А., Нікітіна І.П. Спечені матеріали на основі кольорових металів та сплавів // Д.: ВИДАВНИЦТВО. – 2024 р. 400 с.
2. Композиційні та порошкові матеріали: навчальний посібник / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, М.Д. Мельничук, О.Л. Садова. Луцьк. Вид. ФОП Тепліцин О.В. – 2017. – 368 с.
3. Баглюк Г. А. Металеві порошкові матеріали // Енциклопедія Сучасної України : енциклопедія [електронна версія] / ред.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк та ін.; НАН України, НТШ. Київ: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2018. Т. 20.
4. Степанчук А.Н.,. Технологія порошкової металургії. А.Н Степанчук Билік І.І., Бойко Л.А. – К.: Вища школа, 1989. – 416 с.
5. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения. Справочник / И.М. Федорченко, И.Н. Францевич, И.Д. Радомыслельский и др. – Киев, Наукова думка, 1985. – 624 с.
- 6 Буренніков, Ю. А. Б91 Нові матеріали та композити : навчальний посібник / Ю.А.Буренніков, І. О. Сивак, С. І. Сухоруков – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 161с.
7. Копань В.С. Композиційні матеріали: навч. пос. / Василь Копань – К.: Пульсари, 2004. – 196 с. ISBN 966-7671-81.
8. Производство изделий из порошков цветных металлов / Г.Е. Мажарова, Г.А. Баглюк, А.В. Давыденкова. – К.: Техника, 1989. – 120 с.

ІНСТРУКЦІЯ з експлуатації печі для спікання

Схема печі для спікання представлена на рисунку А.1.



1 - піч опору, 2 - реактор, 3 - зразки, 4 ущільнення, 5 - поглинач H_2 O, 6 генератор водню, 7 автотрансформатор, 8 - потенціометр, 9 балон з інертним газом, 10 - термопара

Рисунок А.1 - Схема печі для спікання

Методика проведення експерименту складається з виконання таких операцій:

1. Завантажити в реактор зразки та провести герметизацію реактора.
2. Провести продування реактора інертним газом протягом 5-10 хв.
3. Включити генератор водню та подати водень у реактор.
4. Встановити реактор у піч опору.
5. Включити піч опору і нагріти до заданої температури.
6. Після закінчення експерименту провести продування реактора інертним газом до повного видалення водню.
7. Розгерметизувати реактор і витягти зразки.

Навчально-методичні рекомендації

**Носко Ольга Анатоліївна,
Ковзік Анатолій Миколайович,
Аюпова Тетяна Анатоліївна,
Голуб Ірина Валеріївна,
Духновський Сергій Костянтинович**

**СПЕЧЕНІ МАТЕРІАЛИ
НА ОСНОВІ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ**

до виконання лабораторного практикуму
для студентів спеціальності 132 – матеріалознавство
ОПШ «Композиційні та порошкові матеріали, покриття»
(магістерський рівень)

Електронне видання

Комп'ютерна верстка Т. А. Аюпова

Експертний висновок склав канд. техн. наук, доц. Олена БІЛА

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 52 від 16.06.2025)

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 2,38. Обл.-вид. арк. 2,41.
Зам. № 77.

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010