

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**Інженерно-фізичний факультет**  
**Кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії**

«На правах рукопису»

УДК 621.762

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ В.І. Мазур  
(підпис) (ініціали, прізвище)  
“ ” \_\_\_\_\_ 2019 р.

## Магістерська дисертація

### за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 132 МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Спеціалізація Матеріалознавство порошкових композитів і покриттів

на тему: Закономірності отримання матеріалів з порошків нікелю для випаровувачів теплообмінників

Виконав: магістрант II курсу, групи ФК-71мн

Гришкевич Таїсія Євгенівна  
(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник \_\_\_\_\_ професор, к.т.н. Степанчук А. М.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант з охорони праці та безпеки  
в надзвичайних ситуаціях \_\_\_\_\_ доцент, к.т.н. Зацарний В. В.  
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

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

Магістрант \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2019 року



- формулювання об’єктів дослідження та задач роботи;
- б) матеріали та методи дослідження;
  - отримати високопористі матеріали з порошків нікелю;
  - дослідити характеристики пористої структури матеріалів залежно від умов їх отримання та властивостей вихідних порошків;
- в) результати дослідження та їх обговорення;
  - провести аналіз та обговорення отриманих результатів з точки зору сучасних уявлень теорії і технології отримання високо пористих матеріалів методами порошкової металургії.
- г) розділ охорони праці та безпеки в надзвичайній ситуації;
  - провести аналіз площі та об’єму лабораторії;
  - провести аналіз мікроклімату в лабораторії;
  - визначити шкідливі та небезпечні фактори;
  - розробити заходи протипожежної безпеки та захисту навколишнього середовища;
- д) розробка стартап-проекту:
  - провести маркетинговий аналіз для виявлення ринкової можливості використання результатів магістерської дисертації.
- 6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу:
  - задачі та методи дослідження;
  - характеристики вихідних порошків;
  - методика отримання та методи дослідження високопористих виробів на основі порошків нікеля для випаровувачів теплообмінників;
  - властивості отриманих зразків;
  - мікроструктури поверхні матеріалів.
- 7. Орієнтовний перелік публікацій:
  - Оптимізація умов отримання високопористих пресовок з порошків нікеля.
  - Про взаємозв’язок пористості компактованих порошкових пресовок з насипною та щільністю утруски вихідних порошків.
    - Закономірності формування структури та пористості високопористих матеріалів з порошків нікелю при їх вільному спіканні.
    - Закономірності формування структури високопористих матеріалів з порошків нікелю при їх вільному спіканні та шлікерному литті.

8. Консультанти розділів дисертації:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	Зацарний В. В., доц.		

9. Дата видачі завдання: 28.01.19.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Літературний огляд. Проведення аналізу стану проблеми отримання високопористих матеріалів з порошків нікелю	12.03.19	
2.	Розробка методики експерименту	02.04.19	
3.	Проведення необхідних експериментальних досліджень: отримання зразків методами пресування з наступним спіканням, спіканням вільно насипаного порошку та шлікерним литтям	09.04.2019	
4.	Дослідження мікроструктури та властивостей матеріалів	22.04.19	
5.	Обробка експериментальних даних та їх обговорення	29.04.19	
6.	Розробка розділу охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	06.05.19	
7.	Розробка стартап-проекту	08.05.18	
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	09.05.19	
9.	Попередній захист	11.05.19	

Магістрант

Гришкевич Т. Є.

Науковий керівник

Степанчук А. М.

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація вміщує: 124 с., 35 рис., 29 табл., 64 джерела.

ВІЛЬНА НАСИПКА, ЗАЛІЗО, КАРБАМІД, КОЕФІЦІЄНТ КОРЕЛЯЦІЇ, МІКРОСТРУКТУРА, НІКЕЛЬ, ПАРАФІН, ПОРИСТІСТЬ, ПРЕСУВАННЯ, СПІКАННЯ, ШЛІКЕРНЕ ЛИТТЯ.

Метою роботи є дослідження закономірностей отримання високопористих матеріалів з порошків нікелю. Для досягнення поставленої мети необхідно такі завдання:

- визначити характеристики вихідного порошку, зокрема насипну пористість та пористість утруски;
- дослідити отримання високопористих виробів різними методами;
- дослідити мікроструктуру та властивості отриманих матеріалів.

Об'єкт дослідження – процеси отримання високопористих матеріалів з порошків нікелю методом статичного пресування та наступним спіканням, спіканням вільно насипаного порошку та шлікерним литтям.

Предмет дослідження – закономірності формування пористої структури (розміру пор, рівномірності їх розподілу в об'ємі матеріалу) та властивостей високопористих матеріалів отриманих за різних умов.

Методи дослідження та апаратура: зразки отримувалися на гідравлічному пресі, засипкою до керамічних форм та виливанням шлікера, отриманого розмолотом на кульовому млині, з подальшим спіканням в муфельній печі в середовищі водню, структура матеріалів досліджувалась на оптичному мікроскопі НЕОРНОТ 21 та на скануючому електронному мікроскопі РЕМ 106И.

Наукова новизна отриманих результатів:

- а) показано, що найбільша пористість досягається при отримванні методом спікання вільно насипаних порошків;
- б) встановлено, що рівномірний розподіл пористості з мінімальним розміром пор може отримуватися при формуванні методом шлікерного лиття для запобігання зонального уособлення.

## ABSTRACT

The master work contains: 124 p., 35 fig., 29 tab., 64 sources.

CARBAMIDE, CORRELATION COEFFICIENT, FREE POURING, IRON, MICROSTRUCTURE, NICKEL, POROSITY, PRESSING, SINTERING, WAX, WIRING CASTING,

The purpose of the work is to study the patterns of obtaining high-porosity materials from nickel powders. To achieve the goal one need the following tasks:

- to determine the characteristics of the initial powder, in particular the bulk porosity and porosity of the brush;
- to study the production of high-porous products by different methods;
- to study the microstructure and properties of the materials obtained.

The object of the study is the processes of obtaining high-porosity materials from nickel powders by the method of static pressing and subsequent sintering, sintering of freely poured powder and casting molding.

The subject of research is the patterns of formation of the porous structure (the pore size, the uniformity of their distribution in the volume of the material) and the properties of high-porous materials obtained under different conditions.

Research methods and equipment: samples were obtained on a hydraulic press, pouring into ceramic molds and pouring a slitter obtained by grinding on a ball mill, followed by sintering in a muffle furnace in hydrogen, and the structure of the materials was investigated by an optical microscope NEOPHOT 21 and on a scanning electron microscope REM 106I.

Scientific novelty of the obtained results:

- a) it is shown that the greatest porosity is achieved by the method of sintering of freely poured powders;
- b) it has been established that a uniform distribution of porosity with a minimum pore size can be obtained by forming a cast-in-place casting method to prevent zonal formation.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	8
1.1 Характеристика та класифікація високопористих матеріалів.....	8
1.2 Матеріали, що застосовуються для отримання пористих виробів.....	13
1.3 Методи отримання високопористих матеріалів.....	15
1.3.1 Статичне пресування.....	17
1.3.2 Ізостатичне пресування.....	19
1.3.3 Отримання виробів прокаткою.....	21
1.3.4 Формування екструзією.....	22
1.3.5 Шлікерне лиття.....	25
1.3.6 Спікання вільно насипаних порошків.....	26
1.3.7 Інші методи.....	27
1.4 Загальні застави компактування порошкових матеріалів.....	30
1.4.1 Загальні застави пресування порошкових виробів.....	30
1.4.2 Закономірності спікання порошкових виробів.....	32
1.4.3 Особливості пресування та спікання високопористих виробів.....	36
1.5 Висновки та постановка завдання дослідження.....	42
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	44
2.1 Матеріали та методи дослідження.....	44
2.2 Методика проведення експерименту.....	46
2.2.1 Визначення властивостей порошків.....	46
2.2.2 Дослідження процесів статичного пресування.....	49
2.2.3 Дослідження процесів спікання.....	54
2.2.4 Дослідження процесів спікання вільно насипаних порошків.....	58
2.2.5 Дослідження процесів при отриманні матеріалів шлікерним литтям.....	60
2.3 Дослідження мікроструктури отриманих зразків.....	63

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....	72
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	83
Вступ.....	83
4.1 Аналіз умов праці, небезпечних та шкідливих факторів.....	84
4.1.1 Мікроклімат.....	86
4.1.2 Освітлення виробничого приміщення.....	88
4.1.3 Рівень шуму.....	93
4.1.4 Небезпека ураження електричним струмом.....	94
4.1.5 Виробниче випромінювання.....	98
4.1.6 Пожежна безпека.....	99
4.1.7 Підсумковий аналіз умов праці, небезпечних та шкідливих чинників.....	101
4.2 Забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях.....	102
4.3 Висновки до розділу охорони праці.....	104
5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	105
ВИСНОВКИ .....	114
CONCLUSIONS .....	116
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	118

## ВСТУП

Високопористі матеріали є багатофункціональними, оскільки використовуються в металургії, будівництві, машинобудуванні, медицині, хімічній та інших галузях в якості фільтрів, каталізаторів, мембран, заміників кісткової тканини, електродів хімічних джерел струму та інше [1] – [3].

Тепер для створення таких матеріалів перспективними є методи порошкової металургії, які передбачають використання як вихідної сировини порошків металів, сплавів, кераміки тощо [4]. За допомогою них можна отримувати вироби з заданими характеристиками та розмірами, оскільки широкий спектр порошків металів дозволяє обирати вихідні властивості порошків та передбачати кінцеві. Сучасний етап розвитку порошкової металургії супроводжується появою ідей для створення нових та удосконалення традиційних технологій отримання високопористих порошкових матеріалів, які, в першу чергу, направлені на досягнення високих експлуатаційних характеристик та заданих властивостей. Широке застосування знаходять технології порошкової металургії також завдяки тому, що можуть забезпечувати отримання високопористих матеріалів з розвинутою поверхнею пор, що має важливе значення при створенні електродів паливних комірок, акумуляторів, створенні теплових труб, випаровувачів, носіїв каталізаторів хімічних реакцій тощо [5] – [8].

Широке застосування знаходять порошкові високопористі матеріали для виготовлення фільтрів для очищення масел, пального, кислот та лугів, газів, які виготовляють з порошків заліза, бронзи, нікелю та їх сплавів залежно від їх стійкості в середовищі, яке фільтрується. Для роботи в агресивних середовища та при високих температурах високопористі матеріали виготовляють з керамічних матеріалів, у тому числі з тугоплавких сполук [9] – [12].

Розширюється використання пористих металічних матеріалів для звукопоглинання та демпфування коливань елементів конструкцій в літаках, поглиначів звуку, вогнегасників тощо [7].

Перспективним є створення нових високопористих матеріалів на основі металів та кераміки для аерокосмічної техніки як конструкційних елементів в пристроях для охолодження елементів конструкцій, регулювання температури космічних апаратів у теплових трубах як випаровувачі («гніти»). Зокрема, отримання високопористих матеріалів на основі нікелю є перспективним, оскільки даний матеріал має багатофункціональне призначення, а отже є досить перспективним для розробки в цій галузі. Так, високопористі вироби з нікелю, які мають рівномірно розподілені пори з розміром біля 5 мкм перспективно будуть застосовуватись у космічних апаратах як випаровувачі в теплообмінниках.

## 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Характеристика та класифікація високопористих матеріалів

До високопористих порошкових матеріалів відносять такі, що мають пористість від 30 % до 70 % і більше. Вони поділяються на декілька груп: пористі матеріали із сферичних частинок різного розміру, з частинок неправильної форми, з пакетів сіток, з волокон, пористі матеріали з спіненою структурою та інші [13].

Властивості високопористих порошкових матеріалів поділяють на дві великі групи: структурні та каркасні.

Структурні властивості – це пористість (та її розподіл), розмір пор (та їх розподіл), форма пор та ступінь їх розгалуженості [13].

До структурно-залежних властивостей відносять властивості проникності (власне проникність та розподіл локальної проникності), фільтруючі можливості (тонкість фільтрації та ступінь очищення), а також фільтруючу здатність (капілярний тиск).

До каркасних властивостей відносять щільність (та її розподіл) та характеристики міжчастинкових контактів.

Від цієї групи залежать властивості електро- та теплопровідності, механічні (межа міцності, текучості, відносне подовження) та властивості, які визначають корозійну стійкість матеріалу [14].

Загальний вигляд класифікації властивостей був розроблений Вітязем П. А. та представлений на рисунку 1.1 [13].

Структуроутворюючий елемент, його вид, хімічний склад, форма, питома поверхня є основою для специфічних властивостей пористих матеріалів, оскільки структурні та каркасні властивості нерозривно пов'язані між собою.

Характеристика пор є основним параметром, що класифікує пористі вироби. Була зроблена спроба класифікувати пори на основі їх походження, структури, розміру та доступності для оточуючого середовища (рис. 1.2). Якщо розглядати походження та структуру, пори поділяються на дві основні категорії.

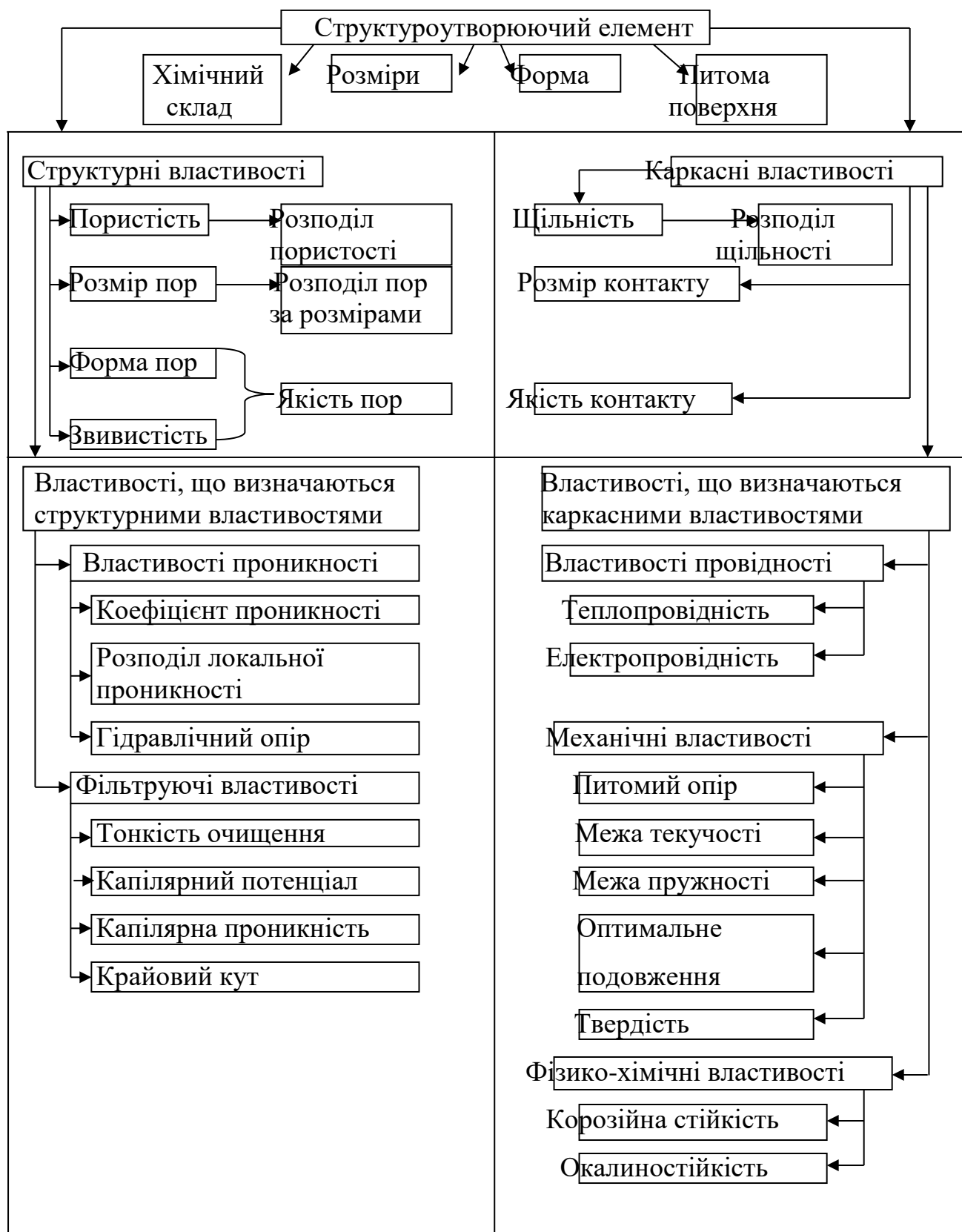


Рисунок 1.1 – Класифікація властивостей пористих матеріалів [13]

Міжчастинкові пори знаходяться між окремими частинками та загалом визначаються як структурно власні пори. В наслідок таких процесів, як

вилуговування, специфічна еволюція чи поверхнева реакція може створюватись новий пористий матеріал. Знову створені пори класифікуються як ін'єкційовані внутрішні пори [15].

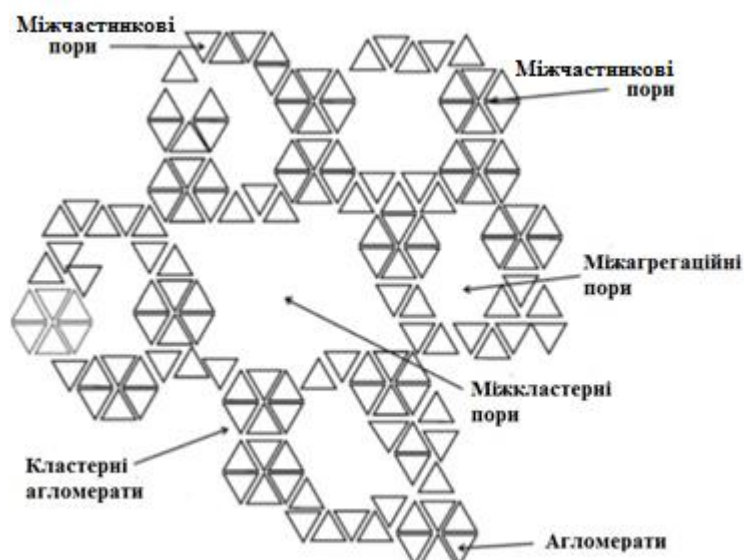
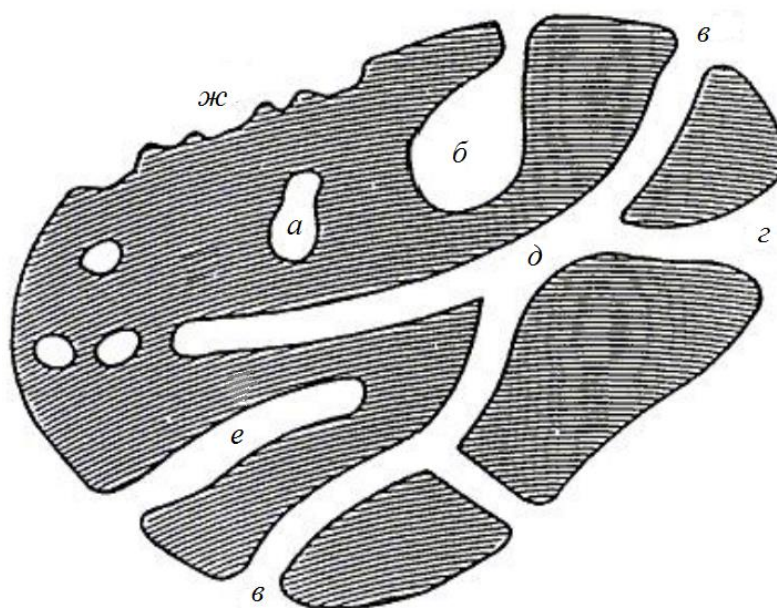


Рисунок 1.2 – Структурні елементи і типи форм [15]

Деякі пористі тіла консолідовані, існують як відносно жорсткі макроскопічні тіла, розміри яких на багато порядків перевищують пори. Їх називають агломератами. Інші неконсолідовані, більш-менш вільно упаковані, не жорсткі і вони можуть називатися агрегатами. Самі частинки можуть бути не пористими, наприклад, у піску, і тому оточені мережею міжчастинкових порожнин. Ці порожнини мають властивості, що залежать тільки від розміру, форми і способу упаковки частинок. В інших випадках самі частинки можуть містити пори. Це означає, що необхідно проводити різницю між внутрішніми або внутрішньочастинковими порами та міжчастинковими порами. Загалом, внутрішні пори будуть меншими, як за розміром, так і в загальному обсязі, ніж пори між частинками [16].

В залежності від розташування частинок можуть виникати різні типи пор в структурі матеріалу. Вони можуть бути класифіковані як міжагрегаційні та міжкластерні пори, про що згадував Кодікара [17].

Пори також можуть бути класифіковані в залежності від їх доступності для оточуючого середовища (рис. 1.3). Пори, що виходять назовні, називаються відкритими порами, подібними до *б*, *в*, *г*, *д*, *е*. Деякі з них можуть бути відкритими тільки з однієї сторони (рис. 1.3 *б*, *е*). Також пори можуть описуватися як тупикові. Інші можуть бути відкриті з обох сторін (*д*). Якщо ж пористий матеріал недостатньо підігрітий, наприклад, під час спікання, частинки навколо зовнішньої оболонки обрушуються, утворюючи тим самим закриті пори (*а*), які не мають виходу назовні.



*а* – закриті пори; *б*, *д* – пори, відкриті тільки на одному кінці (тупикові пори);  
*в*, *г*, *ж* – відкриті пори; *д* – відкриті пори з двох сторін

Рисунок 1.3 – Схематична класифікація пор, відповідно до їх доступності до оточуючого середовища (модифікована з IUPAC) [16]

Розмір пор є основною властивістю пористих матеріалів, проте він ще менш точно визначений, ніж розглянуті вище характеристики. В літературі розглянуто різні категорії розмірів пор. Класифікації розмірів пор наведено у таблиці 1.1 [15].

Таблиця 1.1 – Класифікації розмірів пор [15]

Класифікація	Вказані розміри пор $d$ , нм					
	Макро-	Мезо-	Мікро-	Супермікро-	Ультра-мікро-	Субмікро-
ІУРАС	>50	2 ÷ 50	< 2; (0,4 ÷ 2)	0,7 ÷ 2	< 0,7	< 0,4
Дубінін [18]	> 200 ÷ 400	200 ÷ 400 > d > 3 ÷ 3,2	< 1,2 ÷ 1,4	3 ÷ 3,2 > d > 1,2 ÷ 1,4	–	–
Черемський [19]	> 2000	–	2000 > d > 200	–	< 2 ÷ 4	< 200
Кодікара [17]	10 <sup>4</sup> ÷ 10 <sup>6</sup>	–	10 <sup>3</sup> ÷ 3 × 10 <sup>4</sup>	25 ÷ 10 <sup>3</sup>	< 3 ÷ 4	–

Для високопористих матеріалів, які використовуються в якості фільтрів, визначальною властивістю є газопроникність. Так, якість і проникність матеріалів буде визначатися лише зовнішньою наскрізною пористістю. Вона і буде визначати газопроникність фільтру та швидкість фільтрації, тобто кількість речовини, що проходить крізь фільтр. Найбільшого впливу на дану характеристику завдають характеристики порошку, а також метод отримання. Таким чином, проникність фільтру дорівнює [20]:

$$k = \frac{V}{F \tau},$$

де  $V$  – кількість рідини, що пройшла крізь фільтр, м<sup>3</sup>;

$F$  – площа фільтру, м<sup>2</sup>;

$\tau$  – час фільтрації, хв.

Для вимірювання швидкості фільтрації застосовують рівняння Дарсі:

$$u = - \frac{k}{\mu} * \frac{dP}{dL},$$

де  $k$  – абсолютна проникність за Дарсі,  $m^2$ ;

$\mu$  – динамічна в'язкість рідини,  $Pa \cdot s$ ;

$\frac{dP}{dL}$  – градієнт тиску.

Як зазначалось вище, фільтруючу можливість оцінюють за ступенем очищення, тобто за здатністю затримувати частинки, та за тонкістю фільтрації, тобто за розміром цих частинок. Тонкість фільтрації буде тим вище, чим менше розмір пор. Найкращі властивості будуть мати фільтри з декількох шарів, що відрізняються між собою розміром та формою порових каналів [20].

## 1.2 Матеріали, що застосовуються для отримання пористих виробів

Існує багато матеріалів, які застосовуються для виготовлення пористих виробів. Вибір того чи іншого матеріалу обумовлений, перед усім, вимогами до його застосування та економічним фактором. Пористість визначається розподілом частинок за розмірами, формою частинок, морфологією поверхні порошку та іншими характеристиками, які залежать від методів отримання виробу. Оскільки порошкові характеристики є одним з основних факторів для визначення пористих властивостей виробу, вибір порошкових характеристик та метод виготовлення є критичним для отримання виробу [21].

Бронзи, нікель та нікелеві сплави є найпоширенішими матеріалами в порошковій металургії. Інші кольорові метали, такі як алюміній, мідь, золото, ніобій, срібло, тантал, титан і цирконій використовують у вигляді порошків для отримання виробів [22]. Використання тугоплавких сполук для створення високопористих матеріалів значно розширює область використання таких виробів, оскільки дозволяє застосовувати їх при підвищених температурах, що знову ж таки залежить від області застосування готових виробів.

Так, пористі бронзові деталі, такі як фільтри та самозмащувальні підшипники, виготовляють з порошків, що містять від 89 % до 90 % Cu, від 10 %

до 11 % Sn та від 0,1 % до 0,5 % P. Невелике додавання фосфору покращує міцність виробу [21].

Для отримання електродів нікель-кадмієвих акумуляторів, пористість яких повинна складати від 70 % до 90 %, використовують перфоровану металеву полосу, з обох боків якої передбачено шар пористого матеріалу. Вихідним матеріалом слугує нікелевий порошок, в який додають від 15 до 20 % карбонату амонію для підвищення пористості [7].

Пластини з високою поверхневою активністю отримують також із суміші нікелевого (2/3) та нікель-алюмінієвого (1/3) порошку. Спечені матеріали на основі нікелю надійно працюють в якості гідрованих каталізаторів в хімічній промисловості та мають пористість від 60 % до 80 % [7].

Конус вихідного сопла реактивного двигуна покривають шаром пористої спеченої тканини з високоякісної сталі.

Пористі пластини зі спечених аустенітних хромонікелевих сталей пористістю від 65 % до 70 % встановлюються у простір між лопатками, що обертаються, та корпусом турбіни [7].

Так, додаючи мідні волокна до спресованого брикету з порошку заліза, отримують фільтри з пористістю до 45 %, міцність яких більше в 8 разів, ніж міцність фільтрів без додавання волокон міді. Такі фільтри знаходять застосування в металургії легких сплавів та резиновій промисловості для дегазації ливарних форм [7].

Відомо про отримання високопористих матеріалів з порошоків заліза та порошку бікарбонату амонію. Пористість отриманих виробів складала від 60 % до 64 %, а така суміш дозволяє отримати вироби з більшою міцністю [23].

Відомо про використання карбіду титану для отримання тиглів та стержнів, пористість яких складала від 50 % до 60 %. Для підвищення пористості використовували 2,5 %-вий розчин карбометілцеллюлози в воді [7].

Жаростійкі турбінні лопатки з охолоджуючими каналами отримували додаванням волокон з кадмію з подальшим їх випаровуванням. Отримували

трубчасті фільтри з сферичних порошків довжиною до 500 мм. Було відзначено, що пори в таких виробках розподілені досить рівномірно [24].

Досліджується можливість застосування пористих деталей для кісткової трансплантації. Сплави на основі CrCoMo та CrCoW (віталіуми), титан та його сплави з 6 % Al та 4 % V, група нержавіючих хромонікелевих сталей мають високу фізичну сумісність та хімічну стійкість. Загальна пористість таких виробів має становити 30 % при товщині шару від 0,5 мм до 1,5 мм. Пори мають бути з'єднані одна з одною та мати ліycopодібну форму з розширенням назовні.

Пористі пластини з спечених жароміцних нікель-молібденових сплавів та аустенітних хромонікелевих сталей пористістю від 65 % до 70 % встановлюються у просторі між обертовими лопатками та корпусом турбіни та слугують для її ущільнення [7].

Таким чином в якості матеріалів для отримання високопористих виробів використовується широкий спектр металів та сплавів.

### **1.3 Методи отримання високопористих матеріалів**

Порошкова металургія – це процес, за допомогою якого метали, композити та інші матеріали можна приготувати шляхом змішування порошків, їх формування та спікання [25].

Співвідношення пор, їх радіус та розподіл у матеріалах можна ефективно контролювати. Ці характеристики залежать від вимог, які пред'являються до пористих матеріалів та від застосування отриманих виробів.

Сферичні порошки широко використовуються для виготовлення пористих матеріалів за допомогою типового процесу порошкової металургії. Відповідно, для приготування пористих матеріалів з великим радіусом пор і великими вимогами по проникності необхідно видаляти порошки неправильної форми. Однак існує спосіб, коли до порошків несферичної форми додають пороутворюючі агенти, такі як карбонат амонієвої кислоти, сечовина і метилцелюлоза для збільшення пористості і проникності.

Існують 3 групи формування пористого тіла [25]:

а) формування під тиском: порошки можуть формуватися під тиском, ущільнення відбувається шляхом пресування, екструзії чи прокатки;

б) формування без тиску: порошки можуть формуватися без тиску за допомогою різних методів, зокрема, виливання порошкової суспензії чи вільне спікання;

в) інші методи: до цієї категорії відносяться такі методи, як розпилення, вакуумне напилення та інші методи.

Вибір способу формування, який буде використовуватися, залежить від форми і розміру кінцевого продукту, а також від властивостей вихідних матеріалів. Пресування у прес-формах дозволяє отримувати дрібні деталі з простими формами, які потрібно виготовляти у великих кількостях. Екструзійне формування більш підходить для безперервного виробництва труб, прутків, стрижнів з однорідним розподілом пор. Ізостатичне пресування може використовуватись для отримання заготовок з однорідною структурою з домішками, після чого піддаватися механічній обробці, і, нарешті, буде отримано виріб складної форми і великого розміру. Прокаткою порошків можливо виготовляти пористі пластини і стрічки безперервно. Шлікерне лиття використовують, коли сировиною є металеві волокна або дисперсні сферичні і несферичні порошки. Так отримують великі вироби з рівномірним розподілом пор, а для формування сферичних порошків можна використовувати вільне спікання [25].

Процес спікання є ключовим етапом отримання пористих виробів. Вибір режиму відіграє ключову роль у отриманні високопористих виробів. Температура та швидкість нагріву можуть як збільшити пористість, так і зменшити її. Наприклад, заготовка з пороутворювачем під час спікання повільно нагрівається для того, щоб уникнути розтріскування від випаровування домішок [25].

### 1.3.1 Статичне пресування

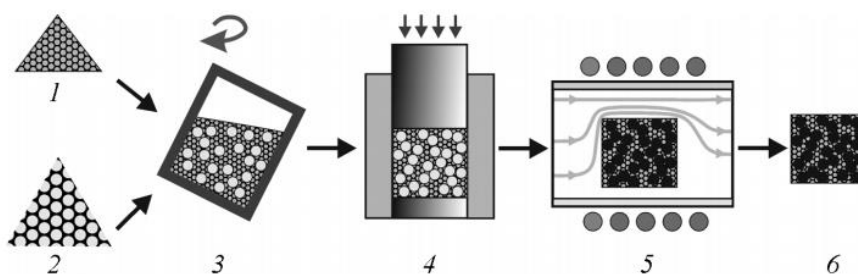
Цей вид пресування є досить поширеним, оскільки він забезпечує отримання деталей, які майже не піддаються механічній обробці. Його застосовують для виробництва простих за формою і невеликих за розмірами виробів, наприклад, дисків, пластин, втулок. Для досягнення достатньої пористості отримуваних виробів важливим є прикладений тиск, який має бути в межах від 200 МПа до 300 МПа. Таким чином може бути отримана пористість до 60 %.

Під час формування для підвищення пористості можуть додавати добавки, які повинні володіти наступними ознаками: належна в'язкість для досягнення необхідної міцності; достатня пороутворююча здатність для задоволення вимог розподілення пор по об'єму матеріалу; після спікання не залишають шкідливі домішки; здатність до замішування із вихідною сировиною, перебуваючи в твердому чи рідкому стані з низькою температурою плавлення; відсутність реакції з порошками та відсутність пошкодження основних компонентів при спіканні. Залежно від їх ролі у формуванні, добавки можуть бути змашувальними речовинами, зв'язуючим, пороутворювачем чи пластифікатором [25].

Так, наприклад, пороутворювачами є карбонат амонієвої кислоти, карбонат амонію, карбонат натрію, органічні волокна, гранули вуглецю, нафталін, сечовина, волокно, пластик і тирса. Пластифікатори – олеїн і бджолиний віск. Добавки вибираються на основі характеристик порошків і вимог до формування, і вони зазвичай розчиняються в органічному розчині (наприклад, бензині, бензолі, ацетоні, спирті або чотирихлористому вуглецю) і потім змішуються з порошками [25].

При виготовленні пористого вольфраму додають до суміші від 2 % до 15 % фториду йоду в якості пороутворювача для забезпечення рівномірного розподілу пор та збільшення відсотку відкритої пористості. При спіканні вольфраму чи молібдену пороутворювачем може бути азотна кислота. Іноді додають кам'яну сіль для видалення води та кислотного вилугування після спікання [26].

Відомо [27] про створення високопористого матеріалу з ієрархічною структурою методом спікання нанопорошку нікелю з використанням бікарбонату амонію в якості пороутворювача, схема отримання якого наведена на рисунку 1.4.



1 – нанопорошок Ni; 2 – порошок пороутворювача NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>;  
3 – перемішування порошків; 4 – пресування; 5 – розкладення та відгонка пороутворювача та спікання пресовки; 6 – пористий зразок

Рисунок 1.4 – Схема процесу випаровування-спікання [27]

Для отримання пористих зразків використовували нанопорошок нікелю з середнім розміром сферичних частинок 68 нм. В якості пороутворювача обирали бікарбонат амонію NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>, оскільки він термічно нестійкий та при нагріванні розкладається. Тиск пресування складав 300 МПа, стадія розкладання та відгонки пороутворювача з наступним спіканням проводилась шляхом переключення газового потоку з аргону на водень та зміни температури обробки з 120 °С до 900 °С. Таким чином пористість при співвідношенні порошку до пороутворювача 40/60 склала 52 %, при 30/70 – 66 %, а при 20/80 – 65,8 % [27].

Також відомо про отримання високопористого виробу на основі порошку заліза. В якості вихідних матеріалів використовували порошок заліза, отриманий розпиленням розплаву водою та порошок бікарбонату амонію, які брали у співвідношенні 40 % до 60 % відповідно. Для запобігання сегрегації до суміші додавали керосин в кількості 1 %. Пресували проводили за тиску від 100 МПа до 800 МПа. Для видалення бікарбонату амонію зразки нагрівали в сушильній шафі при 150 °С протягом 30 хвилин. Спікання проводили при температурі 1150 °С

протягом 1 години у відновлювальному середовищі CO. Нагрівання здійснювали зі швидкістю 7 °C/хв та витримкою при 850 °C протягом 30 хвилин. Зразки охолоджували спочатку разом з піччю до 300 °C, а потім поза робочою зоною печі до кімнатної температури. Пористість зразків практично повністю визначалась об'ємним вмістом пороутворювача та складала від 60 % до 64 % [23].

Відомо про отримання пористих танталових матеріалів [28]. В якості вихідних порошків було обрано тонкодисперсний порошок танталу з середнім розміром частинок 0,45 мкм. Порошок, змішаний з октадекановою кислотою пресували в диски розміром 10 мм × 3 мм, після чого спікали, нагріваючи зі швидкістю 10 °C/хв до 1250 °C та витримували від 10 хв до 50 хв з шагом 10 хв у вакуумі для створення пористості. Отримана пористість зменшувалась від 55 % для витримки 10 хв до 47 % для 50 хв.

В роботі [29] пористі вироби отримували з порошків міді з середнім розміром 5 нм та 45 нм. Вихідна суміш замішувалась з полімером поліметилметакрилатом в горизонтальному змішувачі. Також додавали 0,6 % стеарату цинку в якості мастила та 2 % розчину силікату натрію в якості зв'язки. Формування проводили шляхом холодного пресування при різних тисках: 125 МПа, 150 МПа, 200 МПа та 300 МПа. Заготівки нагрівали для видалення полімеру до температур від 260 °C до 400 °C, після чого спікали у середовищі водню при температурі 960 °C протягом години, щоб уникнути окиснення. З огляду на біомедичну сферу застосування, кращими виявилися зразки з порошків міді діаметром 45 нм, хоча пористість в обох випадках знаходилась в межах від 55 % до 60 %.

### **1.3.2 Ізостатичне пресування**

Може бути як холодне, так і гаряче ізостатичне пресування, проте зазвичай формування пористих виробів проводять першим методом. Для холодного пресування ущільнення відбувається під дією тиску води чи масла. Рідке середовище подається в герметичний сталевий контейнер за допомогою насоса

високого тиску. До порошоків, які знаходяться в еластичній оболонці, результуючий тиск буде прикладатися рівномірно з усіх боків. У зв'язку з тим, що при цьому методі формування має місце мале внутрішнє та зовнішнє тертя, заготовки будуть отримані з досить однорідною щільністю [25].

Такий метод пресування можна застосовувати для отримання великих металокерамічних виробів з рівномірним розподілом пористості по перетину за рахунок відсутності зовнішнього тертя, а також для важко-пресованих композицій. Можна отримувати компактні вироби самої різної форми (кулі, тиглі, труби, стержні) вагою від 300 кг до 500 кг.

Застосовують цей метод також для порошоків титану, кадмію. Відомо про отримання пористої трубки з порошку карбїду титану [30]. Було використано монокристалічний порошок карбїду титану фракцією 56 мкм з додаванням 5 % полівінілового спирту. В даній роботі використали метод гідростатичного пресування, тиск був обраний рівним 138 МПа. Спикання проводили в декілька етапів. Спочатку при 500 °С на повітрі випалювали ПВС, далі зразок спікали у вакуумі за режимом: нагрів до 950 °С 2 години та витримка 10 хвилин, охолодження з піччю. Останній етап спикання був проведений таким чином: нагрів до 450 °С протягом 15 хв, нагрів від 450 °С до 1250 °С протягом 2 годин, охолодження до 450 °С протягом 2 годин та наступне охолодження з піччю. Пористість кінцевого виробу склала 33 %.

Відомо про спечений пористий виріб з псевдосплаву на основі вольфраму [31]. Вихідна шихта складається з вольфраму з середнім розміром частинок 3,9 мкм (94 % – 98 %), та нікелю з залізом у співвідношенні 7 : 3, з додаванням пороутворювача NaBr дисперсністю менше 0,071 мм у кількості 40 %. Формування відбувається гідростатичним пресуванням під тиском не більше 150 Н/мм<sup>2</sup> в еластичній прес-формі в нейтральній атмосфері. Подальшим етапом є видалення пороутворювача в середовищі водню за режимом: нагрів зі швидкістю не більше 5 °С/хв від 1000 °С до 1200 °С та витримка не більше 1 години. Спикання заготовки відбувається в середовищі водню за режимом: нагрів від 1200 °С до 1250 °С до температури від 1300 °С до 1320 °С зі швидкістю не більше

5 °C/хв та витримка при даній температурі не більше 1 години. Охолодження проводиться в середовищі водню разом з піччю. Отриманий виріб має пористість від 50 % до 60 %, високу міцність на стиск та рівномірну дрібнодисперсну структуру при відсутності тріщиноутворення в спечених крупних заготовках.

### 1.3.3 Отримання виробів прокаткою

Заготовки таким методом можуть бути отримані, коли металевий порошок безперервно проходить між парою валків, що обертаються в протилежному напрямку і стискають вихідну сировину. Остаточний виріб буде отримано після того як заготовлена стрічка буде спечена, пройде процес механічної обробки та термообробки. По суті, металеві порошки з можливістю прокатки завантажують у спеціально розроблену воронку до необхідної висоти і потім безперервно подають до валиків, які формують виріб за рахунок дії зовнішнього і внутрішнього тертя між порошком і валиком, порошком і порошком.

Таким методом формування можна отримувати дуже тонкі смуги та стрічки. Контроль пористості та товщини смуг забезпечується зміною режиму прокатки [25].

Відомо про отримання пористих брусків з порошоків магнію з орієнтованими циліндричними порами методом безперервного лиття та прокаткою. Схематичне зображення апарату для такого отримання виробів показано на рисунку 1.5. Чистий магній (99,99 %) розплавляли при 973 К в тиглі радіочастотним індукційним нагрівом в середовищі водню при тиску 3 МПа. Розплав магнію проходив через матрицю крізь прутки та одночасно охолоджувався в змішаному середовищі водню та аргону. Таким чином матеріал мав циліндричні пори, які розташовані в напрямку затвердіння. Стискаючі ролики дали можливість отримати циліндричні зразки діаметром 6 мм. Пористість таких виробів складала 44 % [33].

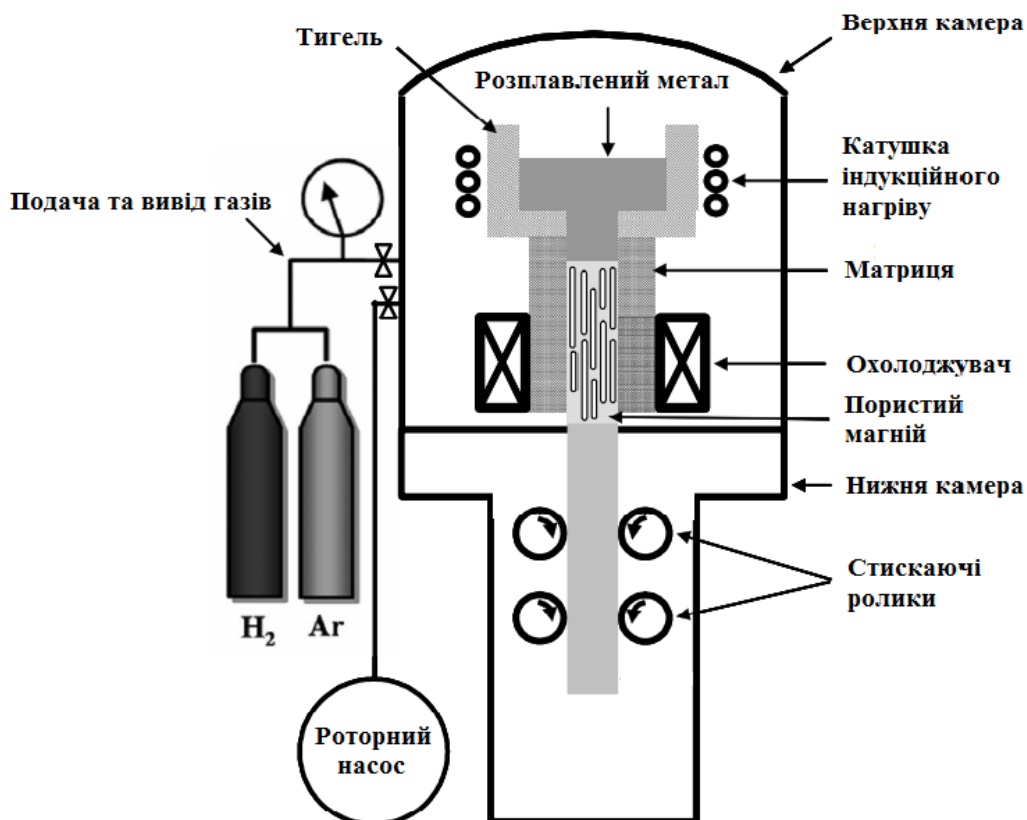


Рисунок 1.5 – Схематичне зображення апарату [32]

### 1.3.4 Формування екструзією

Екструзійне формування – це процес, при якому порошки або суміш в матриці виштовхують для надання форми під тисками. Процес холодного екструдювання використовують для сумішей металевих порошоків і органічних сполучних речовин, а екструзія здійснюється при низьких температурах (від 40 °С до 200 °С) для утворення заготовки. Це ефективний спосіб отримання довгої пористої трубки з малим діаметром. Попередня обробка суміші під тиском може проводитися для забезпечення повного контакту між пластифікатором і поверхнею частинок, що забезпечує рівномірну щільність виробу.

Пластифікатори мають великий вплив на властивості матеріалу. Тому до них висуваються певні вимоги, зокрема, під час спікання не повинно бути ніякої реакції з пористими матеріалами, і вони повинні мати низьку температуру

плавлення, бути клейкими і мати велику пороутворюючу здатність. Найбільш широко використовується олефіновий, поліетиленовий спирти [25].

В роботі отримували пористі вироби з порошку алюмінію [34]. Основний метал чи суміш змішували з пороутворювачем, після чого ущільнювали шляхом екструдювання або прокатки. Після цього заготовки піддавали термічній обробці при температурах, близьких до температур плавлення основних компонентів. Під час цього процесу рівномірно розподілений пороутворювач розкладається, виділяючи газ, який створює пористий виріб. Щільність пористих виробів можна регулювати, змінюючи вміст пороутворювачів, температуру та швидкість нагрівання. Цей процес широко використовується для приготування пористих Al, Sn, Zn, Pb, латуні та бронзи за допомогою відповідних пороутворювачів.

Крім того, може бути виготовлено структуроване тіло шляхом екструдювання суміші порошоків Al і гідридних частинок. Пористе тіло з закритою пористістю можна отримати, нагріваючи суміш до тієї ж температури, до якої нагрівався б чистий основний компонент. Так, щільний продукт готували екструзією суміші Al порошоків та  $TiH_2$  при певній температурі, а потім нагрівали, щоб вивільнити газ для утворення алюмінієвої піни [35].

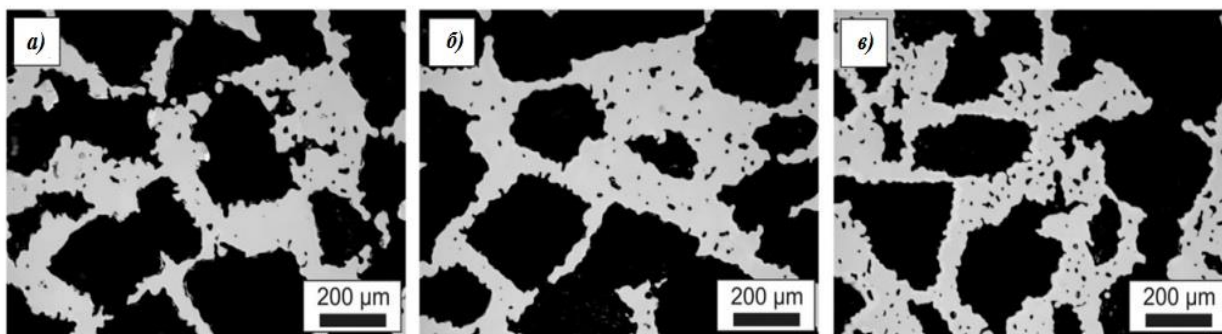
У роботі [36] повідомляється про отримання високопористого титану у прес-формах та екструзійним формуванням. Так, сферичні порошки титану, отримані розпиленням в аргоні, з розміром частинок 20 нм та порошки титану з розміром 35 нм нерівновісної форми замішували з NaCl в якості пороутворювача. В межах експерименту досліджували 3 типи зразків:

а) порошок сферичної форми та пороутворювач змішували у відношенні 50 : 50 (об. %) протягом 2 годин та ущільнювали шляхом пресування при 350 МПа;

б) порошок нерівновісної форми замішували за тими ж самими пропорціями та формували шляхом пресування;

в) порошок сферичної форми з пороутворювачем формували за допомогою екструзії.

В останньому випадку вихідну сировину нагрівали у фільтрі до 150 °С для розплавлення домішки. Всі зразки спікали в середовищі аргону при 1300 °С протягом 3 годин. Середня пористість для кожного з 3 типів зразків склала 65,1 % (а), 64,7 % (б) та 61,0 % (в). Мікроструктури отриманих виробів наведено на рисунку 1.6.



*а* – 65,1 %; *б* – 64,7 %; *в* – 61 %

Рисунок 1.6 – Мікроструктури зразків з порошків титану з різною пористістю [36]

У роботі [37] отримували титанові імплантати, кінцева пористість для яких повинна дорівнювати від 60 % до 65 %. Так, вихідна сировина складалась з 80 об. % порошку та 20 об. % зв'язки (70 % парафіну, 25 % поліетилену, 5 % стеаринової кислоти). Сировину отримували шляхом змішування порошків і зв'язки у Нааке НКD-Т 0,6D, після чого формували. Отримані зразки занурювали у ванну на 24 години з постійною температурою 40 °С для видалення парафіну та стеаринової кислоти та проводили знесолення у воді при температурі 60 °С протягом 24 годин. Зразки обробляли в мікрохвильовому плазмовому пристрої в атмосфері аргону при 75 Па від 30 хв до 240 хв та спікали при 1300 °С протягом 3 годин у вакуумі. Кінцева пористість сягала 56 % для необроблених зразків та 66,8 % для оброблених.

### 1.3.5 Шлікерне лиття

Шлікерне формування представляє собою виготовлення виробів шляхом заливки шлікера (однорідна концентрована наважка порошку в рідині) в пористу форму з наступною сушкою. Для отримання хорошої суспензії до порошоків різних металів додають воду, альгінат натрію, акрилову кислоту [38].

Вироби, отримані таким методом, можуть мати пористість близько 70 %. Цей метод застосовують в основному для лиття порожнистих тонкостінних виробів, проте можливе виготовлення виробів складних форм (труби, тиглі, турбінні лопатки), які важко отримати традиційними методами пресування [25].

Відомо про отримання пористих титанових виробів шлікерним литтям [39]. Вихідним є порошок титану чистотою 99,95 %. Dolapix SE64, виготовлений з карбонової кислоти, використовували в якості диспергатора. Полівініловий спирт та поліетиленгліколь 400 використовували в якості зв'язки та пластифікатора відповідно. Оптимізована титанова суспензія була отримана з 43 об. % титанового порошку, 0,3 мас. % диспергатора, 0,8 мас. % пластифікатора та 0,8 мас. % зв'язки. Шлікер отримували в декілька етапів. Спочатку проводили змішування дистильованої води з диспергатором протягом 2 годин з наступним додаванням порошку титану, після чого перемішували протягом 24 години. Наступним етапом було додавання зв'язки і диспергатора та перемішування отриманої суспензії ще 16 годин. Останнім етапом була дегазація суспензії шляхом перемішування на низьких швидкостях менше 10 об/хв протягом 6 годин. Добре замішану суспензію заливали в гіпсову форму з співвідношенням гіпсу до води 1,53. Сушка відбувалась протягом ночі при кімнатній температурі, після чого зразки підігрівали в печі при 40 °C протягом одного дня. Отримані зразки розміщували на молібденовій пластині з тонким шаром покриття VN та спікали у високому вакуумі. Спікали за температур 1000 °C та 1200 °C з витримкою 30 хв, охолодження проводили до 650 °C у печі і подальшим до кімнатної температури, зберігаючи при цьому високий вакуум. Отримана пористість складала 70,7 % та 83,2 % для різних температур спікання відповідно.

Для виготовлення пористих виробів із титана методом шлікерного лиття застосовували неводневий шлікер, який складався з декількох систем розчинників. Так, для порівняння характеристик готового виробу використовували циклогексанон, циклогексанон/бутиловий спирт, етаноловий спирт/бутиловий спирт, диметилбензен/бутиловий спирт. В якості диспергатора використовували гліцерин тріолеат, зв'язкою був полівінілбутил, пластифікатор – поліетиленгліколь 400. На 100 г суміші використовували 50 г карбонільного нікелевого порошку, 41 г розчинників, 1 г гліцерилу тріолеат, 4 г поліетиленгліколю та полівінілбутилу. Шлікер готували в 2 етапи. На першому порошок, розчинник та диспергатор змішували один з одним за допомогою кульового розмолу протягом 2 годин. На другому етапі додавали полімери (зв'язка і пластифікатор) та розмелювали ще 4 години. В усіх випадках використовували кульовий млин з нейлоновими банками та кульками із агата. Повідомляється, що використання циклогексанону/бутилового спирту збільшує кінцеву пористість виробів [40].

### **1.3.6 Сікання вільно насипаних порошків**

Такий метод формування є досить поширеним для формування високопористих виробів, оскільки дозволяє збільшити їх проникність та пропускну здатність.

Пористість готових виробів значною мірою залежить від властивостей вихідного порошку, зокрема від розміру частинок, фрикційного складу, і коливається в межах від 30 % до 60 %, хоча теоретично при щільному укладанні частинок вона не повинна перевищувати 30 %. Це відбувається за рахунок утворення містків або «арок» при насипанні порошку. При наявності поряд з великими дрібніших сферичних частинок, за рахунок розміщення останніх в проміжках між великими, сильно знижується пористість і проникність фільтра [41].

Бронзові (Cu-Sn) фільтри виготовляються, як правило, таким методом. Він також може бути використаний для виготовлення фільтрів з міді (Cu-Zn), а також порошоків Ni, які використовуються для отримання електродів лужних батарей і твердопаливних комірок, які мають пористість від 40 % до 60 %. Більш висока пористість може бути досягнута при додаванні пороутворювачів. Фільтри також виготовляють з порошоків Fe, Ni, Cu та їх сплавів. У деяких випадках пористість може бути від 70 % до 90 %, якщо в якості пороутворювачів використовується хлорид амонію та метилцелюлоза [6].

Було отримано вироби з порошоків заліза, отриманих карбонільним методом та розпилених порошоків алюмінію без етапу ущільнення. Суміш Fe – 40 ат.% Al було замішано та завантажено в матрицю. Щільність перед спіканням становила 38 %. Іскроплазмове спікання проводили за температури 900 °C з різними швидкостями, зокрема 100 °C/хв, 70 °C/хв та 30 °C/хв. Для порівняння також було отримано зразки, що отримали гарячим пресуванням при тиску 0,75 МПа та спекли в середовищі аргону при 900 °C. Результати показали, що було отримано відкриту пористість від 41 % до 51 %, при чому зразки, отримані не методом СПС мали меншу відкриту пористість. Зазначено, що зміна швидкості спікання не вплинула значним чином на пористість отриманих зразків [42].

### 1.3.7 Інші методи

Розглянемо інші методи отримання високопористих матеріалів, які не підходять жодній з розглянутих вище категорій.

Так, відомо про виготовлення пористої міді односпрямованим охолодженням під дією водню. Мідь високої чистоти (99,99 %) розплавляли у високочастотній індукційній нагрівальній печі у середовищі вакууму. Гази водню та аргону при контрольованих тисках були введені в посудину під час плавлення. Потім розплав виливали в форму морозильного агрегату та охолоджували, завдяки чому розчин однонаправлено затвердівав. Водень, який додавали при розплавленні, утворював витягнуті пори, вирівняні паралельно до напрямку

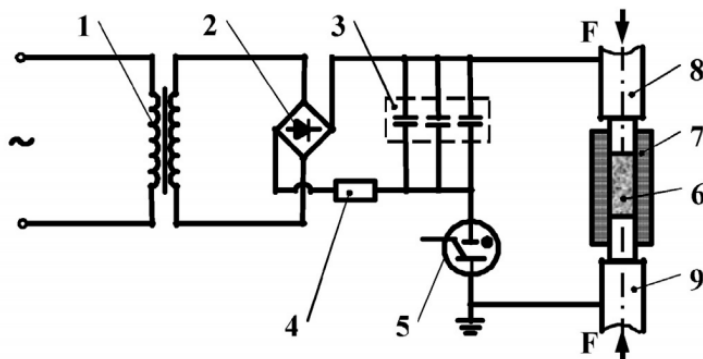
затвердіння. Було отримано зразки діаметром 35 мм та висотою максимум 80 мм з максимальною пористістю 75 % [43].

Також відомо [44] про отримання пористого NiTi-Nb, який містить трьохмірну матрицю ортогонально пов'язаних мікроканалів за допомогою нового процесу порошкової металургії: конструювання каркасу з магнієвої стрічки, створення шлікера з вихідних порошків, вакуумне випаровування каркасу із магнію та рідкофазне спікання. Так, порошки NiTi з номінальним вмістом 51,4 ат. % Ti змішуються з 5,3 мас. % порошків Nb протягом 2 годин. В якості просторового утримувача було обрано магнієву стрічку з перерізом 0,3 мм, яку укладали в гіпсову прес-форму. Прес форма була вилита з співвідношенням гіпсу до води 2 : 1 з канавками для стрічки. Було створено зразки з низькою та високою пористістю. В першому випадку стрічка займала 15 об. % зразка, в другому – 30 об. %. Вихідна суміш складалася з полівінілового спирту, який додавали в якості зв'язки в кількості 0,8 %, 75 % порошку та деіонізованої води. Суспензію в гіпсовій формі суши при температурі 130 °C протягом ночі. Отримані зразки спікали у високовакуумній печі спочатку при температурі 330 °C протягом 2 годин для видалення зв'язки, потім випарювали магнієві стрічки, підвищуючи температуру до 1100 °C зі швидкістю 10 °C/хв, після чого відбувалось часткове твердофазне спікання порошків NiTi-Nb при 1100 °C протягом години. Отриману структуру піддавали спіканню в рідкій фазі при 1180 °C протягом 30 хвилин та охолоджували в печі зі швидкістю 7 °C/хв. Отримані зразки мали загальну пористість від 35 % до 53 %.

Пористий титановий виріб отримували поєднанням декількох методів. Так, вихідним був титановий порошок з нерівновісною формою частинок розміром 45 мкм та сферичні кульки NaCl розміром від 0,5 мм до 1,0 мм. Порошок та кульки об'єднували, використовуючи метод на основі постукування. У цьому процесі 4,3 г кульок було поміщено у форму діаметром 22 мм, порошок титану засипали зверху. Апарат використовував просту дію підйому та спуску форми, її постукування з частотою приблизно 4 Гц. Дана машина зупинялась після проходження певної кількості циклів. Після постукування ущільнення проводили

пресуванням за тиску 450 МПа для отримання міцної заготовки. NaCl видаляли шляхом занурення заготовки у теплу воду на 4 години, сушку проводили при 90 °С протягом мінімум 3 годин. Отримані заготовки спікали в середовищі аргону. Піч з зразками нагрівали до 120 °С зі швидкістю 5 °С/хв і витримували пів години, після цього температуру підвищували до 1250 °С з тією ж швидкістю і витримували протягом 3 годин. Зразки охолоджувались поступово із піччю до кімнатної температури. Таким чином отримували вироби з відкритою пористістю від 70 % до 80 % [45].

Відомо про отримання виробів з тугоплавких металів, зокрема пористих титанових зубних імплантатів, імплантатів для з'єднання суглобів та ендокардіального електрода пористої головки з порошків титану, ніобію та танталу. Для отримання готових виробів використовували експериментальну установку, яка дозволяє одночасно спресувати та спекти виріб електричним розрядом (рис. 1.7) [46].



1 – трансформатор; 2 – випрямляч струму; 3 – накопичувач енергії; 4 – обмежувальний резистор; 5 – запальний розрядник; 6 – порошок; 7 – матриця-діелектрик; 8 – верхній електрод-пуансон; 9 – нижній електрод-пуансон

Рисунок 1.7 – Схема експериментальної установки [46]

Так, порошок поміщали до матриці з кварцового скла між двома електродами і під дією зовнішнього тиску проводили ущільнення та одночасно спікали електричним розрядом. Провели 3 серії випробувань з тиском, що

дорівнював 0, сталим тиском та з кінцевим тиском, більшим за початковий. Зазначено, що 2 метод є найбільш придатним. Для титану найбільша пористість склала 38 %, для ніобію – 43 %, для танталу – 50 % [46].

## **1.4 Загальні застави компактування порошкових матеріалів**

Як вже було зазначено вище, технологія отримання порошкових матеріалів складається з процесу отримання порошків, їх пресування та спікання. Розглянемо докладніше засади пресування та спікання для з'ясування процесів, що відбуваються з порошками під час цих операцій.

### **1.4.1 Загальні застави пресування порошкових виробів**

Пресування є однією з основних технологічних операцій при виготовленні порошкових виробів з заданими характеристиками. Під час пресування порошок, який є сипучим тілом, перетворюється на компактне тіло з кінцевою формою виробу та близькими до вихідних властивостями. Також дана операція необхідна для проведення подальших маніпуляцій, наприклад, для спікання.

Вище було розглянуто методи пресування пористих порошкових матеріалів. Кожен з розглянутих методів має свої особливості, проте процеси, які відбуваються з порошками під час пресування, де в чому схожі.

Загалом формування пористих виробів з прикладенням тиску відбувається в декілька етапів. Перед безпосереднім пресуванням при вільній насипці порошку до прес-форми частинки укладаються хаотично та утворюють містки та арки, між якими є пустоти. Під час пресування ці містки та арки руйнуються, а пустоти заповнюються частинками порошку, що сприяє збільшенню щільності матеріалу. Наступним етапом при подальшому навантаженні є структурна деформація, для якої характерне більш щільне укладання частинок внаслідок їх переміщення та заповнення ними порожнин. Подальше прикладення тиску призводить до деформації частинок, пружної та пластичної. Відомо, що деформація сприяє

зміцненню матеріалу, тому при збільшенні прикладеного навантаження пластична деформація буде відбуватись в прошарках, що знаходяться поряд із зміцненими шарами. Після того, як це відбудеться у всьому об'ємі порошку, зміцнений матеріал деформується, що вимагає більших зовнішніх зусиль. Останній етап – стискання контактного матеріалу, проте для реальних порошкових тіл він не досягається. Залежно від властивостей порошку процес ущільнення має свої особливості. Відомо, що порошки з частинками неправильної форми легше ущільнюються, тому отримуються більш щільні пресовки [47].

Структуру матеріалу можна охарактеризувати, використовуючи найвірогідніше координаційне число –  $\lambda$ , тобто число контактів окремої частинки із сусідніми за умови, що під час формування виконуються однакові умови міжчастинкового ковзання для всього матеріалу і зберігається однакова структура. Дане значення теоретично може змінюватися від 0 до 12 для тіла, що складається з недеформованих частинок однакового розміру. Середнє координаційне число може бути не цілим числом. Так, для його визначення у реальних порошкових тіл зазвичай використовують таку залежність:  $\lambda = -20,49 \times \lg(f)$  (рис. 1.8) [48].

Відповідно до зазначеного вище, розглядаються 3 стадії пресування порошкових виробів [47]:

а) стадія утворення нестабільних просторових структур;

Дана стадія характерна для вільної насипки порошку, коли діють невеликі зовнішні та внутрішні сили. Координаційне число в даному випадку складає  $\lambda \leq 4$  і структура матеріалу є нестійкою.

б) стадія утворення стійких просторових структур;

В даному випадку матеріал отримано при прикладенні значного тиску. Ущільнення матеріалу супроводжується переміщенням частинок та їх щільним укладанням так, що координаційне число  $\lambda = 12$ . Також на даному етапі спостерігається локальна пластична деформація або руйнування виступів на поверхні частинок.

в) стадія макродеформації об'єму частинок порошку.

Характеризується інтенсивною деформацією частинок у зонах контакту з прилеглими частинками порошку та деформацією по об'єму. На даному етапі може відбуватися направлена пластична деформація матеріалу частинок із зон контакту в пори, що призведе до зміни форми частинок порошку.

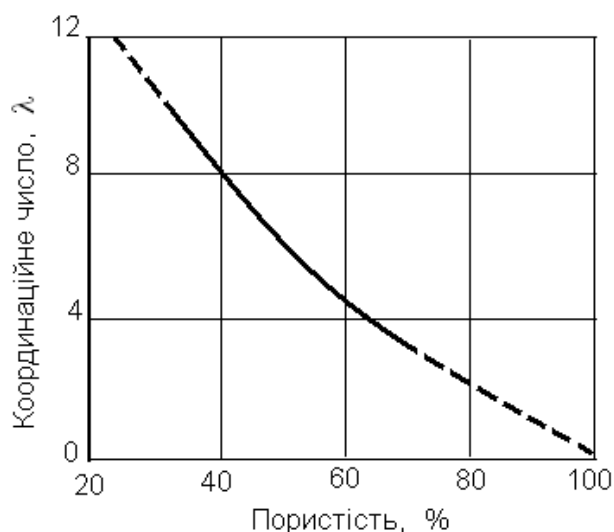


Рисунок 1.8 – Залежність координаційного числа структури порошкового тіла від пористості [48]

#### 1.4.2 Закономірності спікання порошкових виробів

Метою спікання є контроль мікроструктури і властивостей продукту. Технічно це можна розглядати як термічну обробку, тобто заготовка нагрівається до температури нижче точки плавлення основних матеріалів та витримується протягом певного часу, а потім охолоджується до кімнатної температури. Після спікання агломерація частинок зміниться на агломерацію кристалів. Нарешті, отримаємо матеріали або вироби з бажаними фізико-механічними властивостями. Під час спікання може мати місце певна хімічна реакція.

Існує багато типів міграційних процесів, які відбуваються під час спікання. Наступні фази міграції під час спікання пресованого тіла можуть бути описані з точки зору зміни пор в пористих матеріалах: початкова комбінація між частинками (адгезія і з'єднання ненасичених зв'язків на поверхні частинок),

зростання спеченої шийки, звуження і скорочення пор. Процес можна розділити на однофазне спікання, багатофазне тверде спікання і багатофазне спікання в присутності рідкої фази [25].

Однофазне спікання визначається зміною енергетичного стану системи. На багатофазне спікання впливає термодинаміка сплаву. Обидва процеси спікання демонструють зменшення вільної енергії системи, включаючи зменшення загальної площі поверхні і загальної вільної енергії поверхні, обумовленої збільшенням зони спікання порошку і поверхнею порошку; зменшення загального обсягу і загальної площі поверхні пор в спеченому тілі; усунення спотворення решітки в порошок, що є рушійною силою процесу спікання. Границі зерен можуть рухатися шляхом перекристалізації або полікристалізації, а кількість меж зерен буде зменшуватися.

Загальна площа поверхні пор має тенденцію до зменшення внаслідок сфероїдизації порошку та пор незалежно від зміни загальної пористості. Закриті пори припиняють зменшуватись, коли внутрішній тиск перевищує поверхневий натяг.

Для пояснення процесів, що відбуваються під час спікання, використовують такі основні процеси [25]:

а) в'язка течія: згідно з даним механізмом, процес спікання включає в себе 2 етапи, зокрема, збільшення площі контактної поверхні між сусідніми частинками та поступове зменшення розміру закритих пор. Атоми в кристалі переважно рухаються вздовж напрямку поверхневого натягу, а центри частинок зближаються;

б) випаровування і конденсація: всередині порошку тиск пари речовини на опуклій ділянці великий, в той же час на увігнутій ділянці малий. Атоми випаровуються з опуклої ділянки і конденсуються на увігнутій завдяки різниці тисків. Тиск пари на опуклій та вигнутій поверхнях має наступну залежність від радіуса кривизни (рівняння Кельвіна):

$$\ln \frac{p}{p_0} = \frac{M\gamma}{\rho RT} \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right),$$

де  $p$  – тиск пари на опуклій та увігнутій поверхнях;

$p_0$  – тиск пари на плоскій поверхні;

$\gamma$  – поверхневий натяг;

$r_1$  та  $r_2$  – два основних радіуси кривизни поверхонь (позитивний на опуклій, негативний на увігнутій, нескінчений на плоскій);

$\rho$  – щільність твердого тіла;

$M$  – молекулярна маса;

$R$  – молярна константа газу.

в) об'ємна дифузія: при високій щільності атомів біля перешийку на контактній поверхні частинок атоми мігрують у бік контактної поверхні шляхом обміну вакансій з перешийком, щоб збільшити контактну поверхню;

г) поверхнева самодифузія: міграція атомів на поверхні частинок збільшує контактну поверхню, увігнута поверхня буде запливати. По суті, спікання порошків є термодинамічним явищем через надзвичайно високу площу поверхні і високу поверхневу енергію. При низьких і середніх температурах спікання переважає поверхнева самодифузія, а при більш високих – об'ємна. Гладкість і округлість замкнутої пори буде збільшуватись за рахунок поверхневої дифузії. Дифузія атомів вздовж поверхні частинок або пор переважно і є вакансійним механізмом, оскільки її енергія активації набагато менша, ніж енергія перенесення атомів. Вакансія переміщається від увігнутої до опуклої ділянки, а атоми мігрують у увігнуту область і до контактного перешийку, це відбувається через велику кількість вакансій та різницю потенціалів на поверхнях з різною кривизною;

д) пластичний плин: ряд атомів буде рухатись або кристалічні площини скорочуються з утворенням дислокацій в кристалі внаслідок поверхневого натягу. Спікання відбувається аналогічно дифузійній повзучості металу.

Високотемпературний плин є процесом безперервної мікродеформації для металів при постійному малому напруженні. Поверхневий натяг (рушійна сила) буде зменшуватись під час спікання, а потім відповідно буде сповільнюватись швидкість спікання;

е) гранична дифузія зерна: границя зерна може утримати вакансії під час їх міграції. Енергія активації для дифузії границі зерна становить лише половину від обсягу дифузії, і вона буде значно менша при зниженні температури. Пори, близькі до границі зерен, завжди зникають або зменшуються, а зростання зерна у металах під час спікання супроводжується рухом границь зерен та зникненням пор. Границя зерна рухається від увігнутої поверхні з високою поверхневою енергією до центру кривизни з низькою енергією. Надлишок поверхневої енергії на границі зерна також є рушійною силою зростання зерна;

ж) комбінована теорія спікання: насправді вищезазначені механізми будуть відбуватись одночасно чи по черзі в одному процесі спікання. Спікання порошоків з високим тиском пари здійснюється шляхом механізму випаровування і конденсації. Механізм поверхневої та граничної дифузій найбільше проявляється при спіканні при більш низьких температурах або при спіканні ультрадисперсних порошоків. Для ізотермічного спікання поверхнева дифузія сприяє лише формуванню і зростанню перешийка, а також сфероїдизації пор, але не усадці матеріалу. Гранична дифузія завжди супроводжує об'ємну дифузію і сприяє ущільненню матеріалу. При набагато більших температурах спікання об'ємна дифузія є переважною для більшості порошоків металів та сплавів. Її результатом є усадка.

На ранній стадії спікання необхідна низька енергія активації, оскільки Ван-дер-Ваальсові сили існують серед порошоків і не потрібні явні зміщення атома. Інші міграційні процеси, такі як дифузія, випаровування-конденсація, а також в'язка течія можуть відбуватися тільки при досить високих температурах або при досить високих зовнішніх силах, оскільки необхідна висока енергія активації [25].

На спікання мають вплив багато факторів, зокрема [25]:

а) матеріал: початкова температура спікання зростає зі зменшенням симетрії кристалічної решітки;

б) активність порошку: збільшення дисперсності порошоків сприяє збільшенню дифузії. Більш висока активність для частинок, що мають менший розмір, обумовлена наявністю дефектів кристалів, зменшенням розміру частинок і збільшенням загальної площі поверхні;

в) оксиди на поверхні порошку: коли на поверхні утворюється тонкий шар оксидів (меншої товщини), він схильний до спікання за рахунок швидкого відновлення оксидів до металів і підвищення активності. Крім того, дифузія і спікання будуть ускладнені наявністю більш товстого шару оксидів або його відсутністю;

г) добавки: дифузія і спікання можуть бути прискорені, якщо добавки можуть утворювати твердий розчин з порошками для зниження температури спікання внаслідок активації спотворення кристалічної решітки;

д) середовище спікання: вакуумне спікання можна проводити з більшістю металів, однак це призведе до більшої втрати металів внаслідок випаровування та деформації кінцевих продуктів. Деякі добавки можуть бути введені для активації порошоків в середовищі спікання. Фізичний вплив середовища полягає в тому, що газові композиції і властивості в порах різні і демонструють різні дифузії і розчинність в твердих речовинах в різних середовищах спікання. Хімічний ефект відноситься до хімічної реакції між газом і матеріалом. У процесі спікання, керованого дифузиею позитивних іонів, наприклад, вигідно, щоб він проходив в середовищі кисню або при підвищеному порціальному тиску кисню; це пояснюється підвищеною кількістю вакансій позитивних іонів від надмірних негативних іонів кисню. Це збільшує дифузію та прискорює спікання.

### **1.4.3 Особливості пресування та спікання пористих виробів**

Процес отримання пористих виробів має особливості з погляду на пресування та спікання, оскільки для забезпечення необхідної пористості виробу з

одночасною достатньою міцністю треба врахувати всі особливості процесів. Звичайно, при пресуванні та спікання таких виробів відбуваються ті ж самі процеси, як і для звичайних порошкових матеріалів, але є деякі відмінності.

Для отримання пористих виробів тиск пресування повинен бути мінімально допустимим, оскільки при прикладанні великих тисків пори будуть заповнюватись частинками та отриманий виріб не буде володіти необхідними характеристиками. Зокрема, передбачається, що для отримання високої пористості в заготівках тиск має бути таким, щоб відбулась структурна деформація заготівки без пружної та пластичної. Для різних матеріалів мінімально допустимі тиски відрізняються. Передбачається, що координаційне число при формуванні заготівок має бути  $\lambda \leq 4$ .

Додавання пороутворювачів з'єднує частинки і збільшує пористість. Пороутворювачі розкладаються при нагріванні і не мають залишати шкідливих домішок після випаровування в основних металах.

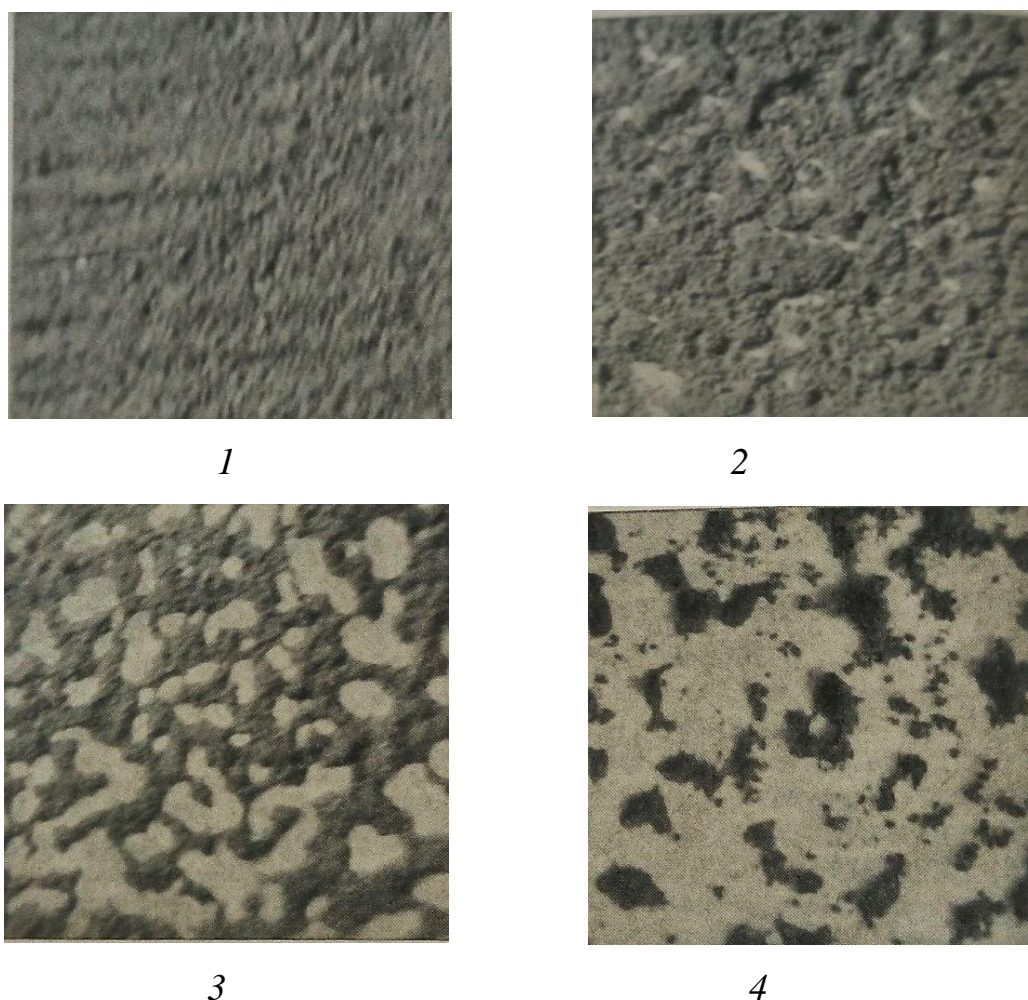
Пористі матеріали вимагають певної пористості і міцності. Тому для їх приготування використовують порошки з вузькими діапазонами розмірів і сферичними або близькими до сферичних формами. Відсутність усадки очікується для слабо ущільнених зразків після спікання, тобто відсутність змін пористості або розмірів пор після спікання. Як вказується в моделі спікання пористих матеріалів, атоми в зоні контакту порошоків залишають свої кристалічні решітки, а потім дифундують, утворюючи первинний зв'язок при температурі  $0,4 T_{пл}$ . При температурі  $0,5 T_{пл}$  атоми з опуклих ділянок мігрують у бік сусідніх порошоків для формування арок спікання. Зростання арок потребує більшої кількості атомів, що мігрують, при цьому не змінюючи на пористість (тобто не відбувається усадки спеченого тіла). Зростання арок призводить лише до гладкості каналів пор. Отже, ідеальне пористе тіло з круглими каналами може бути отримано при низьких температурах (близько  $0,5 T_{пл}$ ) і протягом тривалого періоду спікання [25].

Спікання пористих тіл – це важке фізичне явище, в якому закономірності, які спостерігаються на рівні макроструктури не завжди дозволяють вірно та

однозначно інтерпретувати процеси, що відбуваються в матеріалі на мікроструктурному рівні. Зональне уособлення при спіканні полягає в тому, що усадка при спіканні відбувається в межах не однієї, а багатьох зон. В кожній області частинки стягуються всередину, якби к геометричному центру зони, що призводить до утворення конгломератів, їх уособленню та росту між групової пористості. Цей ефект пов'язаний з гальмуванням загальної усадки зразка та збільшенням розмірів пор. Можна виділити 3 фактори, що обумовлюють локалізацію усадки в системі, що спікається: нерегулярний просторовий розподіл центрів частинок, полідисперсність та швидкість усадки. В реальних системах перші два фактори присутні завжди, а отже, можна стверджувати, що в будь-якій дисперсній системі відбувається зональне уособлення. Можна сказати, що для будь-якої системи дискретних частинок існує критична швидкість спікання, нижче якої геометричні недосконалості структури релаксують протягом процесу, а вище якої їх існування призводить до накопичення флуктуацій недосконалостей та локалізації ущільнення. Залежність швидкість спікання – нерегулярність структури – зональне уособлення, з одного боку, визначається топологічними характеристиками структури, пов'язаними з відхиленням системи від геометричної симетрії, і з іншої – фізико-хімічними процесами, що відбуваються при спіканні частинок [49].

Так, в роботі [50] для отримання інформації щодо зонального уособлення використовували порошок нікелю дисперсністю 60 нм, який володіє досить низькою насипною щільністю –  $0,45 \text{ г/см}^3$ . Порошок насипали шаром від 0,5 мм до 1 мм на поліровану фарфорову підкладку (рис. 1.9, а), яку нагрівали в вакуумі в нагрітій печі з вимкненим нагрівачем для запобігання впливу електромагнітних полів на частинки нікелю. При досягненні температури від  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  в порошковому шарі спостерігалось неоднорідне утворення макропор (рис. 1.9, б), розміри яких інтенсивно збільшуються, досягаючи від 2 мм до 4 мм при температурі від  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис 1.9, в). Подальший нагрів призводив до повного розриву суцільності шару порошку та розпаду його на окремі «острівці» (рис. 1.9, г).

Дана стаття [50] наглядно ілюструє, що на початковому етапі спікання роль переміщення частинок як цілого може бути досить велика. Судячи з рисунка 1.9 (в та г), переміщення окремих частинок досягає декілька міліметрів або десятки тисяч діаметрів частинок, що неможливо описати дифузійними процесами. Тому основним механізмом «активності» на початковому етапі спікання варто вважати механічне ковзання частинок як цілого під дією капілярного тиску.



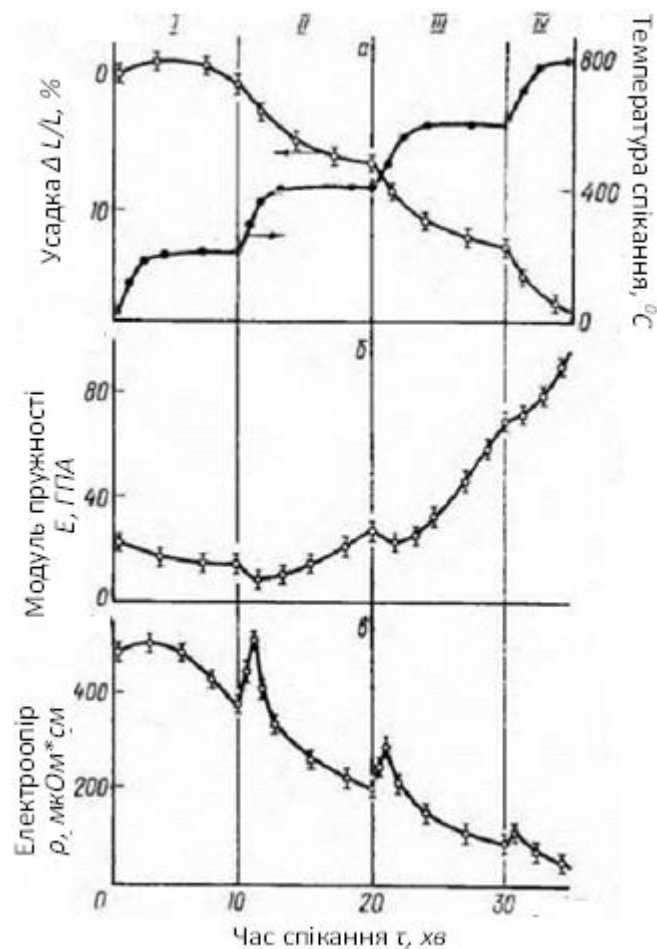
1 – вихідна модель; 2 – 250 °С; 3 – 500 °С; 4 – 750 °С

Рисунок 1.9 – Зональне уособлення при нагріванні тонкого шару ультрадисперсного нікелю зі швидкістю 50 °С/хв [50]

При вільній насипці порошку, коли майже відсутній зв'язок між частинками, можливість переміщення частинок максимальна. В пресовках

частинки менш рухомі, і візуально спостерігати їх рух при спіканні важко. Проте наглядну картину цього процесу дають методи, чуттєві до контактних явищ, наприклад вимір електроопору та модуля пружності.

Спікання проводили в режимі ступінчатого нагріву (рис. 1.10).



1 – 200 °С; 2, 3 – 600 °С; 4 – 800 °С

Рисунок 1.10 – Зміна усадки (а), модуля пружності (б) та електроопору (в) при спіканні ультрадисперсного порошку нікелю в режимі ступінчатого нагріву з середньою швидкістю від 80 °С/хв до 100 °С/хв [50]

На стадії 1 процеси температурного розширення або переважають над усадкою, або значною мірою компенсують її, величина модуля навіть трохи

падає. Інтенсивна усадка, що фіксується при переході від 200 °С до 400 °С, супроводжується більш значним падінням модуля пружності в період нагріву, проте природнім його подальшим підвищенням за рахунок ущільнення. Аналогічна ситуація спостерігається при переході від стадії 2 до стадії 3 та менш виражена на стадіях 3 та 4.

Таким чином, зміна модуля пружності, електроопору та усадки в процесі спікання ультрадисперсних порошоків нікелю показує, що початкова стадія ущільнення пов'язана з розривом міжчастинних контактів, тобто усадку в цей період можна трактувати як переміщення та переукладання частинок. Таким чином, просторова локалізація ущільнення при спіканні високодисперсних порошоків є фактором, що значною мірою визначає кінетику спікання та властивості кінцевого матеріалу.

Спікання пористих заготовок проводять в середовищі захисного газу чи вакууму (табл. 1.2) [22].

Застосування захисних середовищ необхідно для захисту матеріалів, що спікаються, від окислення в процесі термічної обробки, а також відновлення оксидних плівок, які знаходяться на поверхні частинок. Матеріал не окислюється в захисному газі, якщо парціальний тиск кисню менше, ніж пружність дисоціації оксидів спеченого матеріалу в інтервалі температур спікання. В якості захисних середовищ при спіканні застосовують водень, генераторний газ, дисоційований аміак, інертні гази та інше.

Для зниження температур та зменшення часу спікання використовують методи активування цього процесу. Їх застосування дозволяє збільшити проникність пористих матеріалів з несферичних порошоків за рахунок більш інтенсивного зглажування рельєфу пор та їх сфероїдизації, а при використанні сферичних часток знизити температуру спікання за рахунок легування шихти з метою отримати рідкофазне спікання. Її наявність дозволяє знизити усадку пористих матеріалів при спіканні.

Таблиця 1.2 – Захисні середовища для спікання пористих порошкових матеріалів [22]

Захисні середовища	Матеріали, що захищуються
Водень	Залізо; сталь, легована міддю; корозійностійка сталь; вуглеродні сталі; мідь; бронза; вольфрам
Дисоційований аміак	Залізо; легована сталь; бронза; вольфрам
Ендотермічний газ	Залізо; сплави Fe-Cu; сплави Fe-Ni; вуглецева сталь; мідь; бронза; нікель; срібло
Екзотермічний газ	Залізо; сплави Fe-Cu; маловуглецева сталь; мідь та її сплави; сплави нікелю та срібла
Аргон	Мідь; бронза; алюміній
Вакуум	Сплави C-Ni; титан; корозійностійка сталь; алюміній

Для збереження високої пористості готових виробів найкращими механізмами спікання є поверхнева самодифузія та перенос через газову фазу, оскільки ці механізми забезпечують збільшення площі та якості контакту частинок, а також зменшується усадка.

### 1.5 Висновки та постановка завдання дослідження

Аналіз наведених вище даних літературних джерел дозволяє зробити висновок, що отримання високопористих випаровувачів для теплообмінників методами порошкової металургії з наперед заданими властивостями багато в чому залежить від властивостей вихідних матеріалів (порошків), технології їх

виготовлення, використання пороутворювачів, технологічних режимів на кожній операції та багато іншого. Тому створення нових високопористих матеріалів вимагає детального вивчення впливу цих факторів на кінцеві властивості виробів і технологічні режими на кожній технологічній операції.

Також можна відмітити, що отримання високопористих матеріалів з малим розміром пор і рівномірним їх розподілом по об'єму виробу в основному залежить від розміру частинок вихідного порошку, зменшення якого сприяє отриманню меншого розміру пор. Виходячи з наведених вище даних, при отриманні високопористих зразків може спостерігатися явище зонального уособлення, що призводить до значної дисперсії по розміру пор та нерівномірності їх розподілу, що відбувається внаслідок нерівномірності розподілу пористості при формуванні заготовок. Таким чином, придатними методами для формування високопористих заготовок є методи, при яких відбувається щільне укладання частинок в об'єму пресовки та рівномірний розподіл пористості.

Виходячи з викладеного, відповідно до поставленої мети роботи, яка передбачає дослідження умов отримання високопористих випаровувачів для теплообмінників з порошку нікелю була поставлена задача вивчити взаємозв'язок між пористістю компактованих матеріалів з порошків нікелю з їх насипною щільністю та щільністю утруски та дослідження методів отримання високопористих матеріалів, що дозволять уникнути зонального уособлення після спікання і, відповідно, отримати матеріали з рівномірним розподілом пор з розміром близько 5 мкм.

## 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Матеріали та методи дослідження

Як зазначалось вище, в роботі передбачається отримання випаровувачів в теплообмінниках з порошків нікелю. Для цього необхідно забезпечити високу пористість виробу, мінімальний розмір пор та рівномірний їх розподіл по об'єму пресовки.

Для отримання таких порошкових матеріалів може використовуватися декілька методів порошкової металургії, найбільш перспективними є формування з прикладенням тиску та спікання, спікання вільно насипаних порошків та шлікерне лиття. Так, загальна технологічна схема методу формування під тиском та спіканням наведена на рисунку 2.1. Як видно з рисунку, вона складається з декількох операцій.

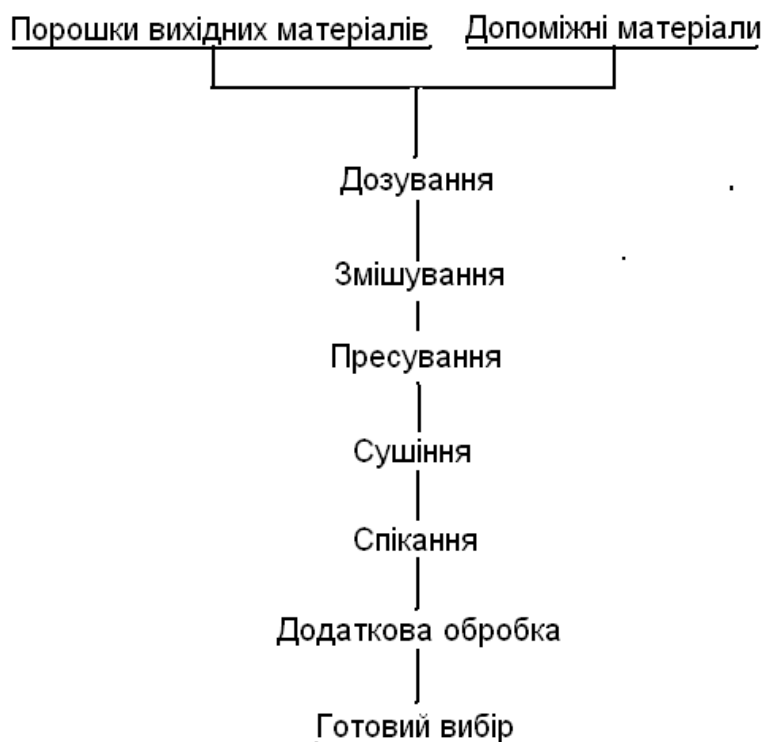


Рисунок 2.1 – Загальна технологічна схема отримання порошкових виробів

Так, в роботі були проведені дослідження відповідно до технологічної схеми, що зображена на рисунку 2.2.

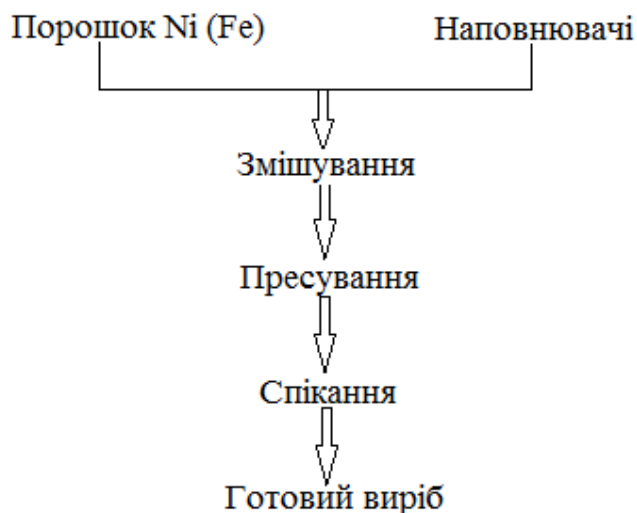


Рисунок 2.2 – Технологічна схема виготовлення високопористих виробів з порошків нікеля та заліза методом пресування та спікання

Спінання вільно насипаних порошків складається з змішування вихідної суміші, засипки її у форму та спікання, як показано на технологічній схемі на рисунку 2.3.

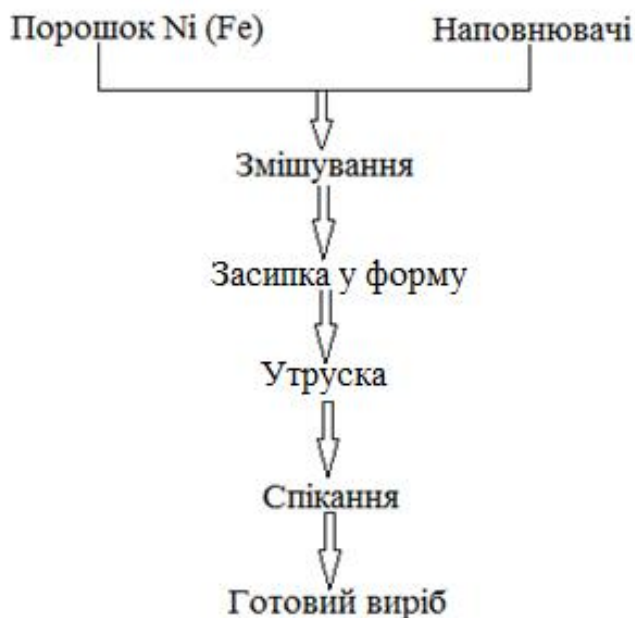


Рисунок 2.3 – Технологічна схема виготовлення високопористих виробів з порошків нікеля та заліза методом спікання вільно насипаних порошків

Отримання високопористих виробів методом шлікерного лиття передбачає отримання шлікера, який заливають до пористої форми, сушку та спікання отриманої заготовки.

При розробці технологічних процесів отримання виробів з нових матеріалів важливим є визначення оптимальних умов проведення кожної операції для того, щоб отримати вироби з наперед заданими властивостями. Тому в роботі були проведені дослідження відповідно до технологічних схем, наведених вище, які можуть бути застосовані для отримання високопористих матеріалів з порошоків нікелю, що будуть використовуватися в якості випаровувачів в теплообмінниках.

## **2.2 Методика проведення експерименту**

### **2.2.1 Визначення властивостей порошоків**

Як вихідні матеріали в роботі використовували порошки нікелю, отримані електролізом водного розчину сульфату нікелю та карбонільним методом. Використовували порошок нікелю, отриманий з електролітів, які вміщували  $\text{NiSO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{NaCl}$  48, 5 г/л та 200 г/л. Лужність електроліту складала  $\text{pH} = 6,2 - 6,5$ . Щільність струму при електролізі складала від  $2500 \text{ A/m}^2$  до  $3000 \text{ A/m}^2$ , температура була від  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ . Як анод використовували нікель, що забезпечувало високу чистоту отриманого порошку. Також використовували порошок нікелю, який отриманий розкладанням карбонілу  $\text{Ni}(\text{CO})_4$  за температури  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ .

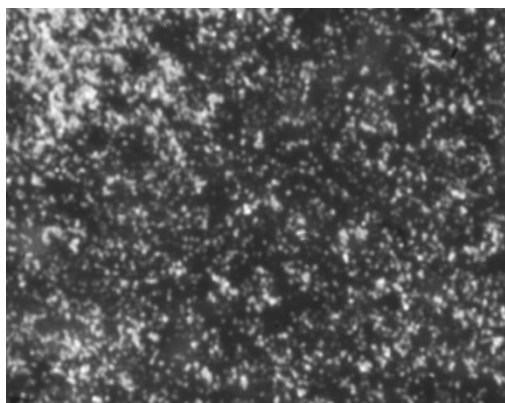
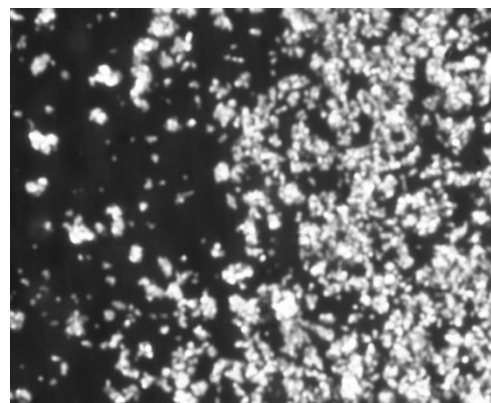
Для оптимізації процесу отримання високопористих матеріалів з даних матеріалів, спочатку треба визначити їх вихідні властивості, оскільки саме вони впливають на технологічну схему отримання готових виробів та кінцеві властивості. Важливим є те, що форма частинок, їх розмір визначають пористість кінцевого виробу.

Визначення властивостей порошку розпочали з дослідження гранулометричного складу порошоків. Для цього використали ситовий аналіз для отримання уявлення про склад порошку заліза (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Результати ситового аналізу порошку заліза

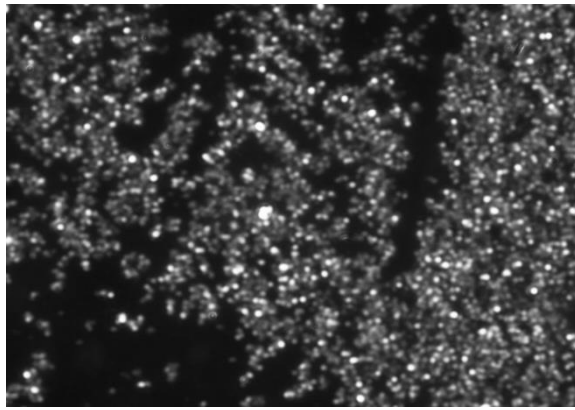
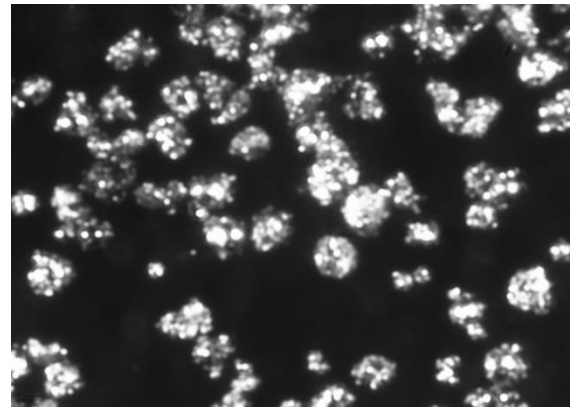
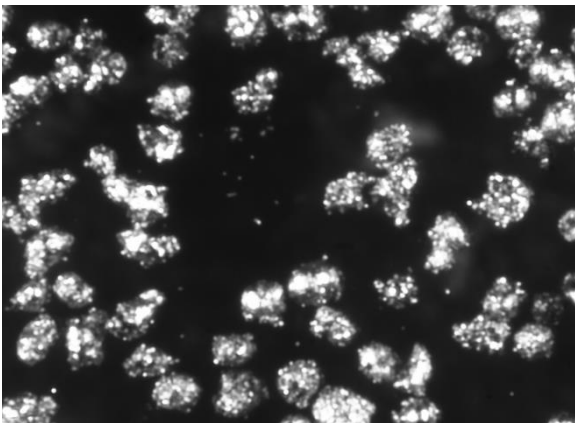
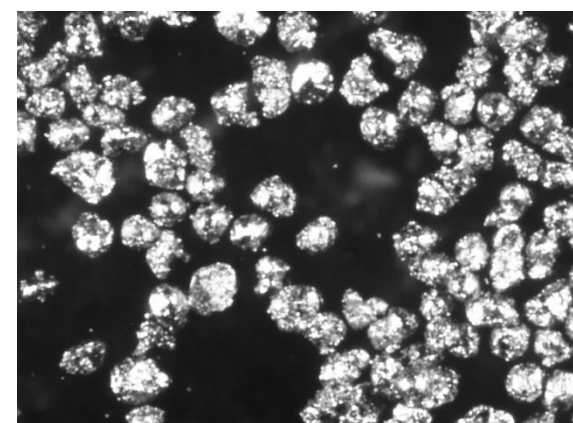
Фракція	Вміст фракції		Середній розмір частинок, мкм
	<i>g</i>	%	
-0,2	4,72	1,89	200
-0,2+0,16	21,7	8,68	180
-0,16+0,1	59,2	23,68	130
-0,1+0,05	97,32	38,93	75
+0,05	67,06	26,82	50

Для з'ясування розмірів частинок порошку та їх форми було проведено дослідження вихідних матеріалів, а саме порошки карбонільного та електролітичного нікелю та порошок заліза помістили до стерео мікроскопу Meiji techno RZ та отримали уявлення про форму та розмір частинок, а також морфологію поверхні (рис. 2.4 – 2.5).

*a**б*

*a* – нікель карбонільний; *б* – нікель електролітичний

Рисунок 2.4 – Мікроструктура частинок порошків нікелю карбонільного та електролітичного (x75)

*a (x75)**б (x75)**в (x50)**г (x35)*

*a* – 50 мкм; *б* – 75 мкм; *в* – 130 мкм; *г* – 180 мкм

Рисунок 2.5 – Мікроструктура частинок порошків заліза з різним середнім розміром частинок при різному збільшенні

Характеристики вихідних порошків мають значний вплив на характеристики отримуваних зразків. Так, важливими є насипна щільність та щільність утруски, оскільки саме вони визначатимуть пористість кінцевого продукту. Було проведено серію досліджень для визначення насипної щільності, щільності утруски, початкової відносної насипної щільності, початкової відносної щільності утруски, пористості вільної насипки та утруски порошків. Для визначення цих властивостей використовували волюмометр з вимірним стаканом з розмірами 29 мм × 29 мм × 26 мм. Отримані дані наведено у таблиці 2.2.

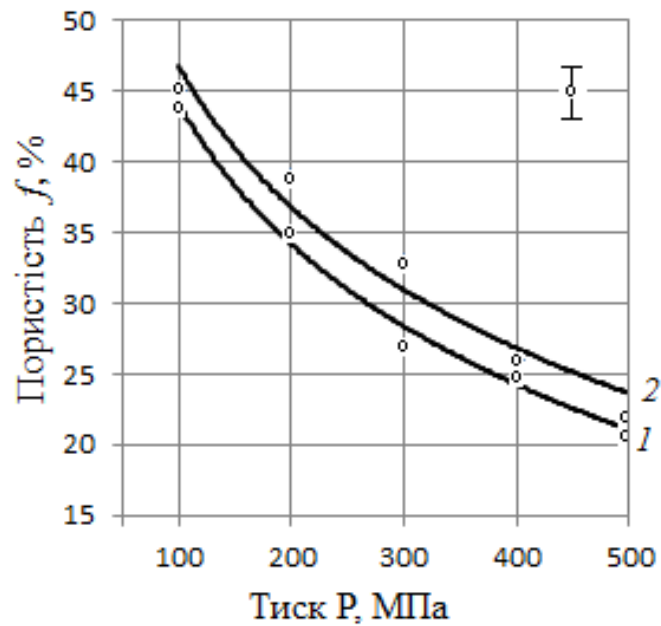
Таблиця 2.2 – Характеристики порошоків заліза та нікелю

Порошок	Середній розмір частинок, мкм	Насипна щільність, г/см <sup>3</sup>	Щільність утруски, г/см <sup>3</sup>	Початкова відносна насипна щільність, %	Початкова відносна щільність утруски, %	Пористість вільної насипки порошку, %	Пористість утруски порошку, %
Залізо	200	2,38	2,51	30,50	32,18	69,50	67,82
	180	2,34	2,44	30,00	31,28	70,00	68,72
	130	2,33	2,42	29,89	31,02	70,11	68,98
	75	2,16	2,52	27,69	32,30	72,31	67,70
	≤50	2,14	2,73	27,43	35,00	72,57	65,00
Нікель карбонільний	6,4	1,48	2,09	16,63	23,48	83,37	76,63
Нікель електролітичний	32	2,03	2,73	25,05	30,67	74,95	69,33

### 2.2.2 Дослідження процесів статичного пресування

Метою проведення даної операції є формування порошоків заліза та нікелю для подальшого спікання.

Для того, щоб з'ясувати, який тиск необхідно прикладати до порошоків з наповнювачами, було проведено пресування чистих порошоків заліза розміром 50 мкм та 75 мкм при різних тисках. Отримані залежності наведено на рисунку 2.6. При прикладанні менших тисків зразки розсипались та не тримали форму.



1 – 75 мкм; 2 – 50 мкм

Рисунок 2.6 – Залежність пористості пресовок з порошків заліза з різним середнім розміром частинок від тиску пресування

Подальшою метою нашого дослідження було з'ясування необхідного вмісту парафіну для отримання високопористих виробів, а також мінімально допустимих тисків для їх формування.

На початку дослідження експериментальним чином було з'ясовано спосіб отримання порошків заліза з парафіном в якості наповнювача та його вміст. Для цього було проведено декілька експериментів з замішування порошку заліза та парафіну. Спочатку парафін розплавляли до початку його випаровування, після чого замішали вручну з нагрівом порошків в сушильній шафі та без нього. Було помічено, що більш рівномірний розподіл наповнювача спостерігається при замішуванні з одночасним нагрівом, в іншому випадку парафін швидко остигав та не покривав частинки заліза належним чином, до того ж утворювались частинки чистого парафіну. Дана операція була проведена декілька разів для різного вмісту парафіну. Отриманий порошок охолоджували при кімнатній температурі та протирали через сито з розміром отворів 1 мм, після чого було проведено пресування.

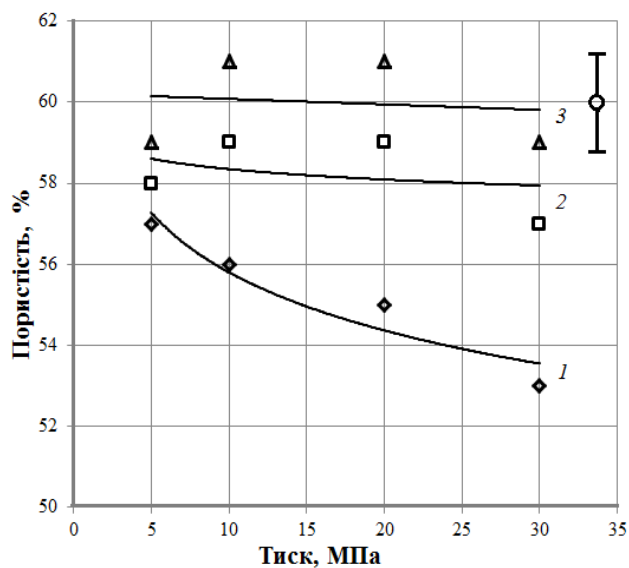
Для з'ясування точного вмісту парафіну отримані пресовки зважували, після чого поміщували в сушильну шафу на фільтруваній бумазі та нагрівали, поки весь парафін не випарується. При цьому слідкували, щоб порошок не окислився. Після проведення даної операції отриманий порошок зважували та отримували відсотковий вміст парафіну в пресовках. Експериментально було визначено, що вміст 5 %, 10 % та 15 % парафіну є досить перспективним для отримання високопористих виробів.

Пресовки з порошків заліза з різним середнім розміром частинок та різним вмістом парафіну було отримано при різних тисках для уточнення мінімально допустимих навантажень та визначення щільності та пористості отриманих виробів.

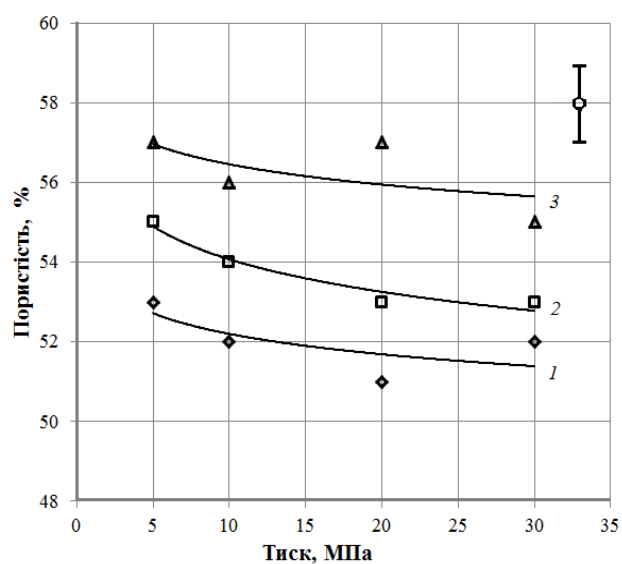
Порошок заліза з середнім розміром частинок 50 мкм та 75 мкм формували при тисках від 5 МПа. Порошок заліза з середнім розміром частинок 130 мкм та 180 мкм при навантаженні 5 МПа не формується, мінімально допустимим тиском для такої фракції для вмісту парафіну 5 % є 25 МПа, для 10 % та 15 % – 15 МПа.

Залежність пористості отриманих пресовок від тиску пресування зображено на рисунку 2.7. Легко бачити, що на пористість отриманих виробів впливає також вміст парафіну, при чому найбільша пористість досягається при додаванні 15 %. Для всіх фракцій зі збільшенням тиску пресування пористість зменшується.

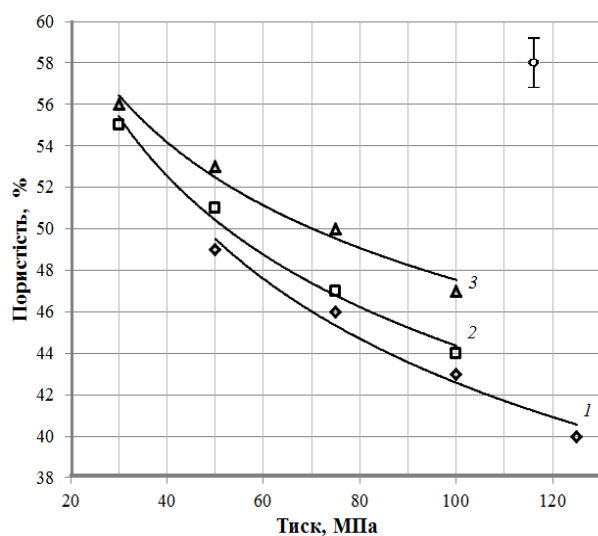
Для порошків нікелю електролітичного та карбонільного були проведені аналогічні міркування, проте з огляду на те, що середній розмір частинок цих порошків складав 6,4 мкм та 34 мкм, вміст парафіну в якості наповнювача склав 5 %, 7 % та 10 %. Як видно з таблиці 2.3, для нікелю карбонільного з різним вмістом парафіну мінімально допустимим навантаженням є 30 МПа, а для нікелю електролітичного в залежності від вмісту парафіну мінімальним тиском пресування було 30 МПа, а зі збільшенням вмісту парафіну тиск, при якому зразки ущільнювались, зростав до 100 МПа.



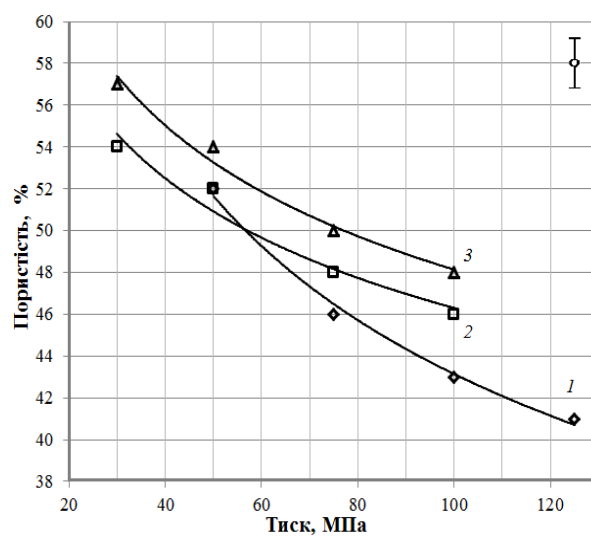
а



б



в



г

а – 50 мкм; б – 75 мкм; в – 130 мкм; г – 180 мкм

1 – вміст парафіну 5 %; 2 – вміст парафіну 10 %; 3 – вміст парафіну 15 %

Рисунок 2.7 – Залежність пористості від тиску пресування порошків заліза з різним середнім розміром частинок при різному вмісті парафіну

Пористість після ущільнення не відрізнялась значним чином від пористості пресовок для порошків заліза з малим середнім розміром частинок, а для нікелю електролітичного навіть була менша.

Таблиця 2.3 – Розрахунок щільності та пористості пресовок з порошоків нікелю карбонільного та електролітичного з різним вмістом парафіну

Матеріал	Вміст парафіну, %	Тиск P, МПа	Вага m, г	Об'єм V, см <sup>3</sup>	Щільність $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Пористість f, %
Ni карбонільний	5	30	5,20	1,36	3,82	57
	7		5,09	1,35	3,77	58
	10		5,00	1,29	3,87	56
Ni електролітичний	5	30	5,21	1,08	4,82	46
	7	75	4,91	1,11	4,42	50
	10	100	4,9	1,25	3,92	56

У подальших експериментах було досліджено формування порошоків заліза з різним середнім розміром частинок при додаванні карбаміду в якості наповнювача. Оскільки передбачалось, що карбамід під час спікання має випаровуватись з пресовок, було зроблено припущення, при якому вміст карбаміду повинен дорівнювати об'єму пор пресовок.

Для з'ясування мінімально допустимого тиску пресування для утворення найкращої пористості формування виробів проводилось з додаванням полівінілового спирту та без нього. Використовували 2,5 %-вий розчин полівінілового спирту, вміст якого склав 1 мл на 4 пресовки. Замішування проводилося вручну без нагріву. Отриману суміш протирали через сито з отвором 1 мм та піддавали формуванню при різних тисках (табл. 2.4).

Загалом при формуванні порошоків саме при додаванні карбаміду пористість вища. Зі збільшенням тиску пресування пористість отриманих пресовок зменшується, а щільність збільшується. Пресовки, отримані без додавання полівінілового спирту мали трохи вищу пористість.

Таблиця 2.4 – Розрахунок щільності та пористості пресовок з порошку заліза з середнім розміром частинок 50 мкм з карбамідом без додавання ПВС (1) та з ним (2)

Тиск P, МПа	Вага m, г		Об'єм V, см <sup>3</sup>		Щільність $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>		Пористість f, %	
	1	2	1	2	1	2	1	2
30	5,01	5,29	1,97	2	2,54	2,64	68	67
50	5,14	5,31	2,04	1,9	2,52	2,80	68	65
75	4,84	5,27	1,71	1,76	2,83	2,99	64	62
100	5,21	5,48	1,83	1,71	2,85	3,21	64	59

### 2.2.3 Дослідження процесів спікання

Дана операція проводилась з метою отримання кінцевого виробу з більшою міцністю.

Спікання проводиться при температурі від 0,7 °С до 0,8 °С від температури плавлення металу, проте оскільки кінцевий виріб має бути високопористим, було проведено спікання при різних температурах для з'ясування оптимальної, щоб отримати необхідні характеристики кінцевого продукту.

Для порошоків заліза з різним середнім розміром частинок при додаванні парафіну спікання проводили в печі без захисного середовища. Спікали при 1000 °С та витримці 30 хв в матриці з плавким затвором (табл. 2.5).

Як видно з таблиці 2.5, зі збільшенням середнього розміру частинок, пористість отриманих виробів зменшується. Також вміст парафіну впливає на кінцеву пористість і його вплив не є однозначним.

Залежність після пресування для пористості та після спікання не однакова, пористість не збільшується при збільшенні вмісту парафіну.

Таблиця 2.5 – Результати розрахунків щільності, пористості та усадки при спіканні порошків заліза з різним середнім розміром частинок при різному вмісті парафіну без захисного середовища при 1000 °С

Середній розмір частинок, мкм	Тиск Р, МПа	Вміст парафіну, %	Щільність $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>		Пористість $f$ , %		Усадка $\Delta V/V$ , %
			Після пресування	Після спікання	Після пресування	Після спікання	
50	30	5	3,63	3,73	54	53	-1,39
		10	3,32	3,59	58	54	0
		15	3,18	3,79	60	55	-1,35
75	30	5	3,85	4,05	51	48	1,15
		10	3,51	4,02	55	49	5,63
		15	3,50	3,94	56	51	-1,80
130	50	5	4,01	3,99	49	49	-2,34
	30	10	3,33	3,71	58	53	5,15
	30	15	3,31	3,76	58	54	1,41
180	50	5	3,89	4,28	51	46	-2,33
	30	10	3,41	3,84	57	51	-3,50
	30	15	3,36	3,88	57	53	-5,49

Для тих самих порошків проводили спікання в захисному середовищі водню при 1000 °С для середнього розміру частинок 200 мкм та при 800 °С для порошків з середнім розміром частинок 50 мкм, 75 мкм, 130 мкм та витримці 30 хв (табл. 2.6).

Як видно, залежність пористості від середнього розміру частинок спечених виробів з порошків заліза з різним вмістом парафіну є різною та суттєво відрізняється. Для порошків великих фракцій пористість збільшується при спіканні без захисного середовища, середовищі водню зі збільшенням середнього розміру частинок пористість зменшується.

Найбільша пористість спостерігається у виробів, зформованих з додаванням 10 % парафіну. Дана залежність зберігається при спіканні в середовищі водню та без захисного середовища.

Таблиця 2.6 – Результати розрахунків щільності, пористості та усадки після спікання порошоків заліза з різним середнім розміром частинок при різному вмісті парафіну в середовищі водню

Середній розмір частинок, <i>мкм</i>	Тиск <i>P</i> , <i>МПа</i>	Вміст парафіну, %	Щільність $\gamma$ , <i>г/см<sup>3</sup></i>		Пористість <i>f</i> , %		Усадка $\Delta V/V$ , %
			Після пресування	Після спікання	Після пресування	Після спікання	
50	30	5	3,54	4,26	55,10	45,95	16,21
		10	3,18	4,02	59,65	48,99	16,03
		15	3,04	3,98	61,45	50,01	14,08
75	30	5	3,71	4,47	52,83	43,26	14,80
		10	3,70	4,67	53,07	40,75	16,41
		15	3,28	4,21	58,33	46,55	14,32
130	50	5	4,25	5,07	46,07	38,03	13,92
	30	10	4,16	5,13	47,21	36,89	14,07
	30	15	4,00	5,26	49,22	35,13	15,73
180	50	5	3,80	3,86	51,77	41,04	-0,31
	30	10	3,42	3,42	56,58	42,5	-5,37
	30	15	3,35	3,64	57,40	39,45	-1,43

Була проведена спроба спекти порошки нікелю електролітного та карбонільного з додаванням парафіну без захисного середовища при 1000 °С з витримкою 30 хв. Після спікання отримали не спечені пресовки, які розпадалися і являли собою порошки нікелю з розплавленим парафіном. Вдалося отримати

лише спечений виріб з нікелю електролітного з вмістом парафіну 5 % за такої технології спікання. Пористість такого виробу складала 42 %.

Проте порошки нікелю електролітного та карбонільного спеклися у захисному середовищі водню при 800 °С та при 1000 °С з витримкою 30 хв. Розрахункові дані наведено в таблицях 2.7, 2.8.

Таблиця 2.7 – Розрахунок щільності, пористості та усадки після спікання порошків нікелю з різним вмістом парафіну в середовищі водню при 1000 °С

Матеріал	Тиск P, МПа	Вміст парафіну, %	Щільність $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>		Пористість f, %		Усадка $\Delta V/V$ , %
			Після пресування	Після спікання	Після пресування	Після спікання	
Нікель карбонільний	30	5	3,86	6,23	57	30	36,54
		7	3,78	6,23	58	30	36,23
		10	3,88	6,41	56	28	36,56
Нікель електролітичний	100	5	4,79	5,36	46	40	7,88
	75	7	4,47	5,25	50	41	10,83
	30	10	3,89	4,28	56	52	2,29

Таблиця 2.8 – Розрахунок щільності, пористості та усадки після спікання порошків нікелю з різним вмістом парафіну в середовищі водню при 800 °С

Матеріал	Тиск P, МПа	Вміст парафіну, %	Щільність $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>		Пористість f, %		Усадка $\Delta V/V$ , %
			Після пресування	Після спікання	Після пресування	Після спікання	
Нікель карбонільний	30	5	3,77	7,81	58	12	50,18
		7	3,81	7,99	57	10	50,36
		10	3,84	7,31	57	18	44,30
Нікель електролітичний	100	5	4,72	5,92	47	34	17,90
	75	7	4,42	5,74	50	36	22,27
	30	10	3,86	4,94	57	45	16,19

Як видно з таблиць 2.7 та 2.8, при спіканні порошків нікелю карбонільного та електролітичного спостерігається значна усадка, внаслідок чого пористість отриманих виробів досить низька. Як видно, при спіканні при температурі 800 °С спостерігається більша усадка, ніж при більшій температурі.

Також були проведені дослідження спікання пресовок з карбамідом в якості наповнювача в захисному середовищі водню (табл. 2.9). Спікання проводилося при температурі 1000 °С та 800 °С.

Таблиця 2.9 – Розрахунок щільності, пористості та усадки після спікання пресовок з порошків заліза з середнім розміром частинок 50 мкм з додаванням карбаміду

Темпера- тура спікання	Тиск P, МПа	ПВС	Щільність $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>		Пористість $f$ , %		Усадка $\Delta V/V$ , %
			Після пресуван- ня	Після спікан- ня	Після пресуван- ня	Після спікан- ня	
1000	300	+	3,09	2,29	61	71	-14,21
		-	2,97	2,90	62	63	10,04
	500	+	3,26	2,65	59	66	-3,83
		-	2,94	2,96	63	62	12,29
800	750	+	3,50	3,51	55	55	15,97
		-	3,32	3,79	58	52	23,70

Як видно з таблиці 2.8, після спікання вироби, сформовані за наявності карбаміду мають вищу пористість, ніж вироби, сформовані за наявності парафіну.

#### 2.2.4 Дослідження процесів спікання вільно насипаних порошків

З огляду на вищеотримані результати було проведено дослідження отримання високопористих зразків спіканням вільно насипаних порошків з метою підвищення пористості кінцевого виробу. Передбачається, що отримання матеріалів з використанням такого методу дозволить збільшити пористість за

рахунок відсутності тиску та використання пороутворювачів, які після спікання дозволять отримати достатню міцність матеріалу при високій пористості.

Спікання проводилося для чистих порошоків нікелю карбонільного та при наявності наповнювачів, оскільки передбачається отримати кінцеву пористість зразків, що наближено дорівнює пористості вільної насипки чи утруски вихідних порошоків. Для порошоків нікелю карбонільного ці дані мали найвищий показник.

В якості наповнювачів використовували парафін та карбамід з додаванням ПВС та без нього. З огляду на отримані результати парафін додавали у кількості 7%, карбамід вводили із розрахунку стовідсоткового заповнення пор, які має утрушений порошок. Вміст ПВС склав 1 мл на 25 г порошку.

Замішування порошоків з наповнювачами проводилося аналогічно замішуванню порошоків для формування під тиском. Отриману суміш завантажували до керамічних форм з високотемпературного цементу, які потім утрушували вібрацією до постійного об'єму для більш щільного укладання частинок та утворення більшої кількості контактів для кращого спікання.

Спікання проводиться при температурі від 0,6 °С до 0,8 °С від температури плавлення металу, проте оскільки кінцевий виріб має бути високопористим, було проведено серію спікань з мінімальною температурою спікання 800 °С. Спікання проводилося у муфельній печі в середовищі водню з витримкою 40 хв. Отримані результати наведено у таблиці 2.10.

Було отримано матеріали зі значеннями пористості, що перевищують аналогічні при використанні методу формування з прикладенням тиску. Так, найбільша пористість спостерігається для матеріалів, отриманих з додаванням парафіну, що відрізняється від залежностей, отриманих при формуванні пресовок під тиском та спіканні. Найбільша пористість для всіх сумішей спостерігається при найменшій температурі. Усадка зі збільшенням температури збільшується, при чому вибір пороутворювача також має значний вплив. Так, при додаванні карбаміду спостерігається найменша зміна зразка за розмірами, а при додаванні розчину полівінілового спирту – найбільша.

Таблиця 2.10 – Розрахунок пористості спечених вільно насипкою матеріалів з порошку нікеля карбонільного з додаванням пороутворювачів за різних температур спікання з витримкою 40 хв

Пороутворювач	Температура спікання, °C	Пористість $f$ , %	Лінійна усадка $\Delta D/D$ , %
Карбамід	800	75	2
	850	69	10,2
	900	68	14,3
	1000	63	20,7
Парафін	800	76	5,5
	850	74	11,7
	900	71	15,2
	1000	68	20,4
ПВС	800	70	5,6
	850	65	8,8
	900	65	15,5
	1000	56	20,9
Без пороутворювача	800	60	8,4
	850	56	11,2
	900	50	14,5
	1000	43	20,2

### 2.2.5 Дослідження процесів при отриманні матеріалів шлікерним литтям

Для отримання більш рівномірного розподілу пористості по об'єму пресовки було проведено виготовлення високопористих матеріалів шлікерним литтям. Передбачається, що використання даного методу дозволить отримати матеріали з достатньою міцністю та високими значеннями пористості при

рівномірному її розподілі за рахунок рівномірного укладання частинок під час висихання шлікера. Додавання до суміші зв'язки дозволить отримати не спечені заготівки з достатньою міцністю, а дефлокулятор забезпечить рівномірне укладання частинок без утворення конгломератів.

В якості модельного порошку використовували порошок заліза з розміром частинок 50 мкм. Шлікер отримували замішуванням вихідного порошку з додаванням зв'язки та дефлокулятора. В якості зв'язки використовували полівініловий спирт, дефлокулятор – NaOH. Так, дефлокулятор розчиняли у 2,5 %-вому розчині полівінілового спирту, після чого додавали порошок нікелю карбонільного. Кількісні характеристики шлікеру наведено у таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Склад шлікеру

Порошок Fe, %	ПВС, %	NaOH, %	Дистильована вода, %
68	1,5	0,6	29,9

Також було використано порошок нікелю, отриманий карбонільним методом. Шлікер отримували аналогічно замішуванням вихідного порошку з додаванням зв'язки та дефлокулятора. В якості зв'язки також використовували полівініловий спирт, дефлокулятор – NaOH. Кількісні характеристики шлікеру наведено у таблиці 2.12.

Пористі форми для шлікера було отримано замішуванням гіпсу та води з співвідношенням 1 : 0,53, отриману суміш заливали у картонні форми та пуансоном видавлювали отвір для шлікера. Форми сушили при кімнатній температурі протягом ночі та у сушильній шафі протягом 8 годин при температурі 50 °С.

Таблиця 2.12 – Склад шлікеру

Порошок Ni, %	ПВС, %	NaOH, %	Дистильована вода, %
77	0,8	0,3	21,9

Шлікер замішували у скляній банці з додаванням сталєних кульок. Замішування проводилось у кульовому млинї протягом 6 годин. Отриману суміш заливали у форми та сушили при кїмнатнїй температурї протягом ночї, пїсля чого загрузали до сушильної шафи на 6 годин для видалення зв'язки та дефлокулятора для запобїгання розтрїскування зразкїв пїд час спїкання.

Спїкання отриманих заготївок проводили разом з формами для запобїгання руйнуванню зразкїв. Так, було проведено серїю спїкань для з'ясування оптимальних умов. Для модельних порошокїв залїза спїкання провели за температури 1000 °C з витримкою 30 хв. Отриманї результати дозволили змоделювати спїкання порошокїв залїза та визначити оптимальнї температури. Так, пористїсть отриманих спечених матерїалїв для модельних порошокїв склала 52 %. Отриманий зразок був достатньо мїцний при високих значеннях пористостї, тому подальшї дослїдження проводили для порошокїв нїкеля карбонїльного.

Спїкання для порошокїв нїкеля карбонїльного проводили за температур 800 °C, 850 °C та 900 °C з витримкою 40 хв. Отриманї результати наведено у таблицї 2.13. Зразки, що були отриманї при спїканнї за температури 800 °C мали найбільшу пористїсть, проте були недостатньо мїцними та розкрошувались при прикладеннї тиску. Отриманї результати показують, що зї збїльшенням температури спїкання зменшується пористїсть та вїзуально спостерїгається бїльша усадка.

Таблиця 2.13 – Пористїсть матерїалїв, отриманих спїканням за рїзних температур

Температура спїкання, °C	Пористїсть $f$ , %
800	69
850	59
900	42

### 2.3 Дослідження мікроструктури отриманих зразків

Для дослідження мікроструктури матеріалів з отриманих після спікання зразків, сформованих з прикладенням тиску, з порошків нікелю та заліза, а також отриманих після спікання зразків, отриманих шлікерним литтям, готували шліфи за стандартними методиками. Для зразків, отриманих методом вільної насипки порошків матеріали спочатку просочували епоксидною смолою для запобігання розкришуванню. Вивчення мікроструктури проводили з використанням оптичного мікроскопу НЕОРНОТ 21.

Мікроструктуру спечених пористих матеріалів з порошку заліза з додаванням карбаміду з розміром частинок менше 50 мкм наведено на рисунку 2.8.

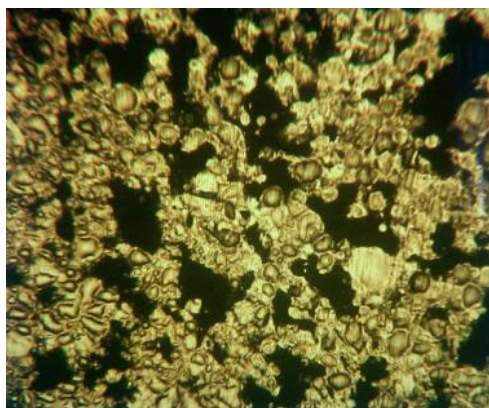


Рисунок 2.8 – Мікроструктура спечених пористих матеріалів з порошку заліза з додаванням карбаміду з розміром частинок менше 50 мкм (x250)

Як видно, при отриманні високопористих порошкових матеріалів методом пресування та спікання спостерігається утворення каналних пор, а також конгломератів з частинок порошку заліза з малими порами, так зване зональне уособлення.

Мікроструктури спечених матеріалів з порошків нікелю карбонільного та електролітичного з додаванням пороутворювачів та без них, отриманих методом пресування та спікання, наведені на рисунках 2.9 – 2.12.

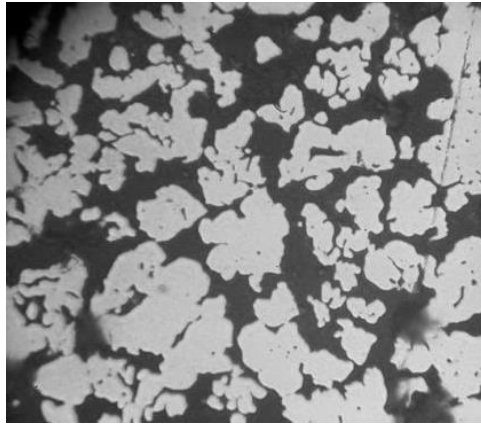
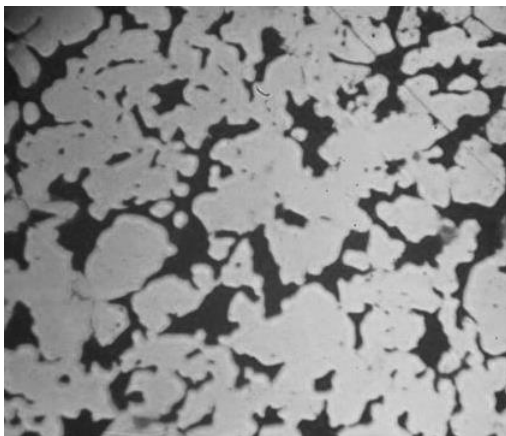
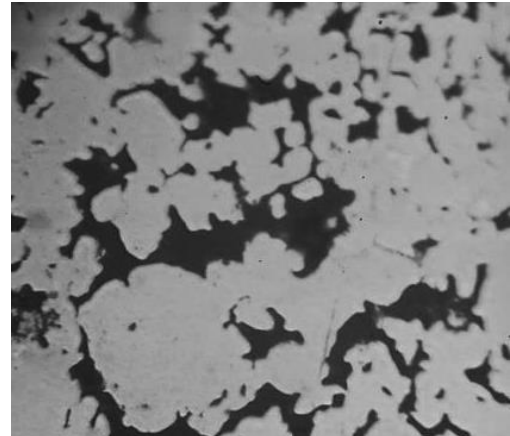


Рисунок 2.9 – Мікроструктура спечених матеріалів з порошків нікеля електролітичного з додаванням 7 % парафіну, отриманих пресуванням та спіканням за температури 800 °С (x400)



*a*



*б*

*a* – 7 %; *б* – 10 %

Рисунок 2.10 – Мікроструктура спечених матеріалів з порошків нікеля електролітичного з додаванням різної кількості парафіну, отриманих пресуванням та спіканням за температури 1000 °С (x400)

Для матеріалів, отриманих з порошків нікеля електролітичного методом пресування та спікання при температурах 800 °С та 1000 °С найвище значення пористості склало 50,7 % для випадку додавання 10 % парафіну і спіканні при 1000 °С, при цьому спостерігається явище зонального уособлення, що характерно для дисперсних порошків.

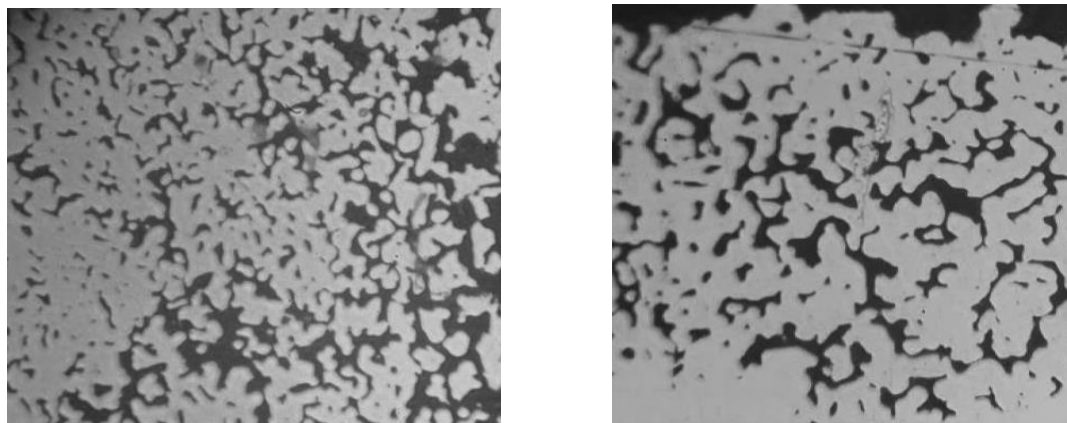
*a**б**a* – 7 %; *б* – 10 %

Рисунок 2.11 – Мікроструктура спечених матеріалів з порошків нікеля карбонільного з додаванням різної кількості парафіна, отриманих пресуванням та спіканням за температури 800 °С (×400)

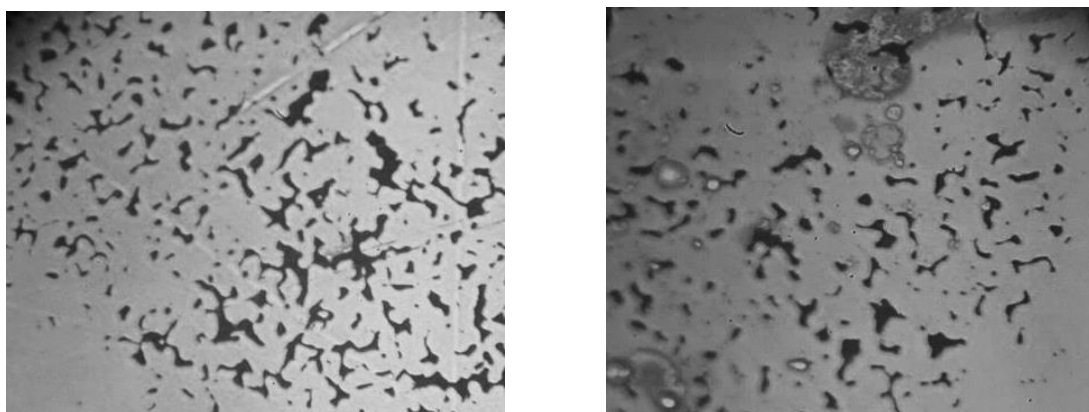
*a**б**a* – 7 %; *б* – 10 %

Рисунок 2.12 – Мікроструктура спечених матеріалів з порошків нікеля карбонільного з додаванням різної кількості парафіна, отриманих пресуванням та спіканням за температури 1000 °С (×400)

Для матеріалів, отриманих з порошків нікеля карбонільного методом пресування та спікання при температурах 800 °С та 1000 °С найвище значення пористості склало 30 %, при цьому явище зонального уособлення виражено більш

чітко за рахунок більш дисперсних порошків при прикладенні аналогічних тисків, як і для нікеля електролітичного.

Мікроструктури спечених матеріалів з порошків нікелю карбонільного та електролітичного з додаванням пороутворювачів та без них, отриманих методом вільної насипки, наведені на рисунках 2.13 – 2.16. Видно, що зональне обособлення при такому методі отримання зберігається. Так, на мікроструктурах можна бачити конгломерати та великі за розміром пори, що розташовані між ними.

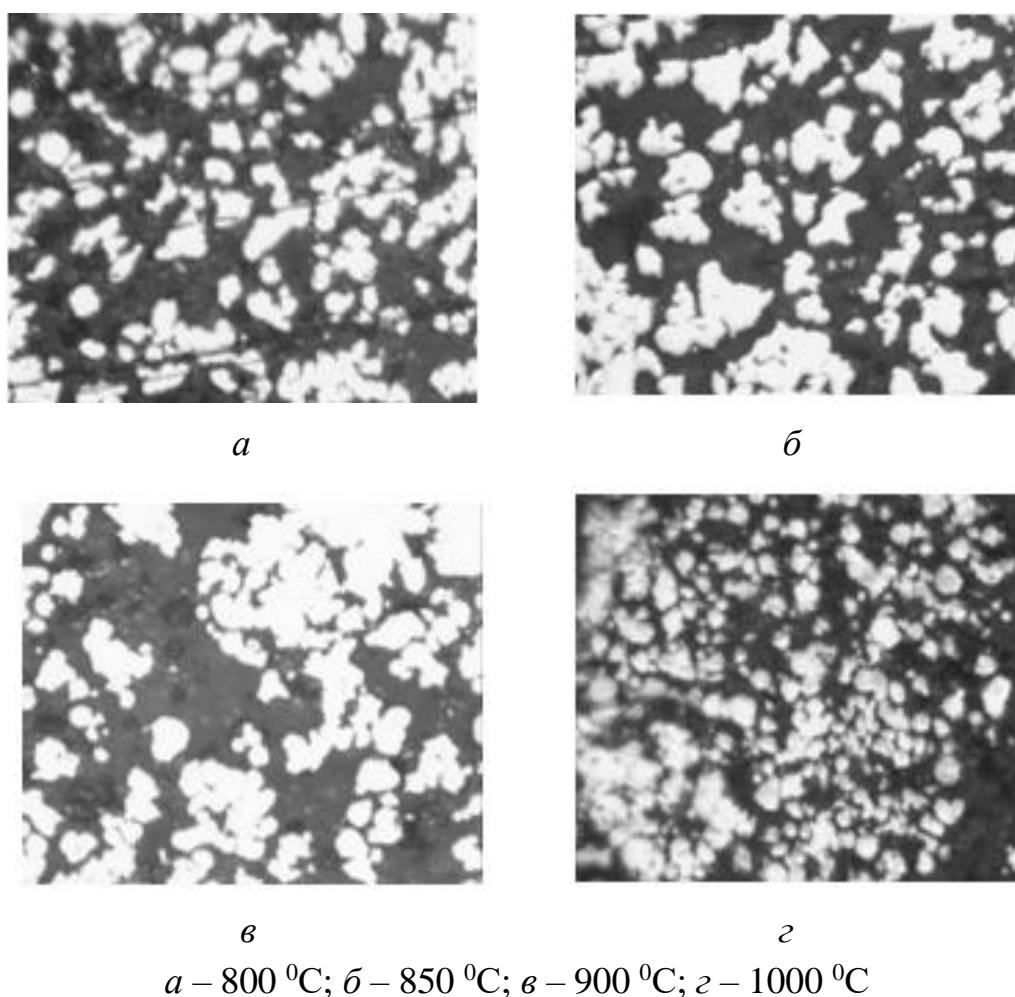


Рисунок 2. 13 – Мікроструктури спечених матеріалів з порошків нікелю карбонільного з додаванням карбаміду, отриманих методом спікання вільно насипаних порошків за різних температур (x400)

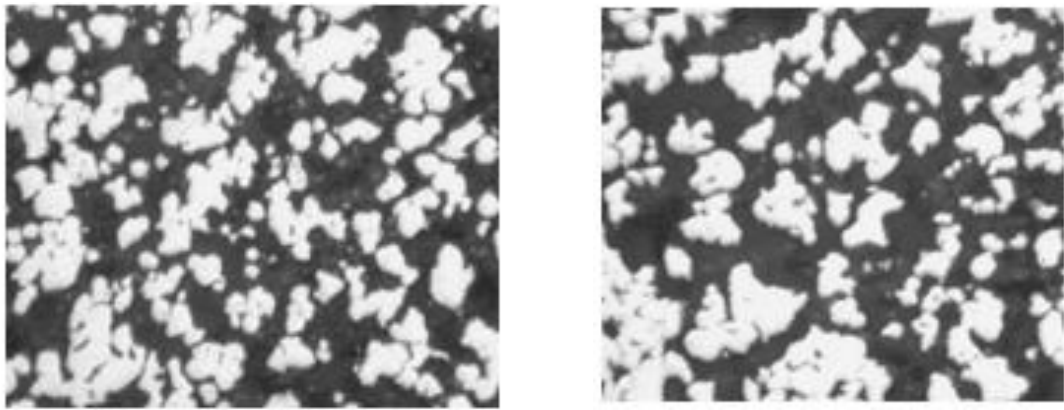
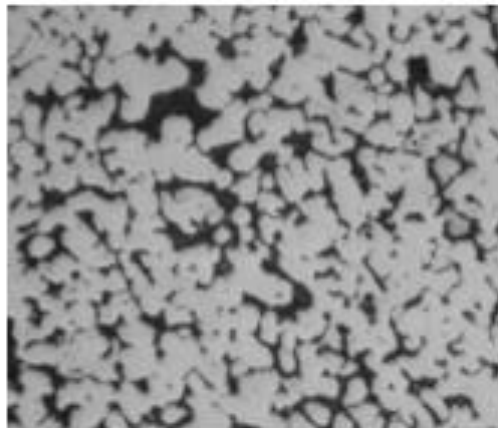
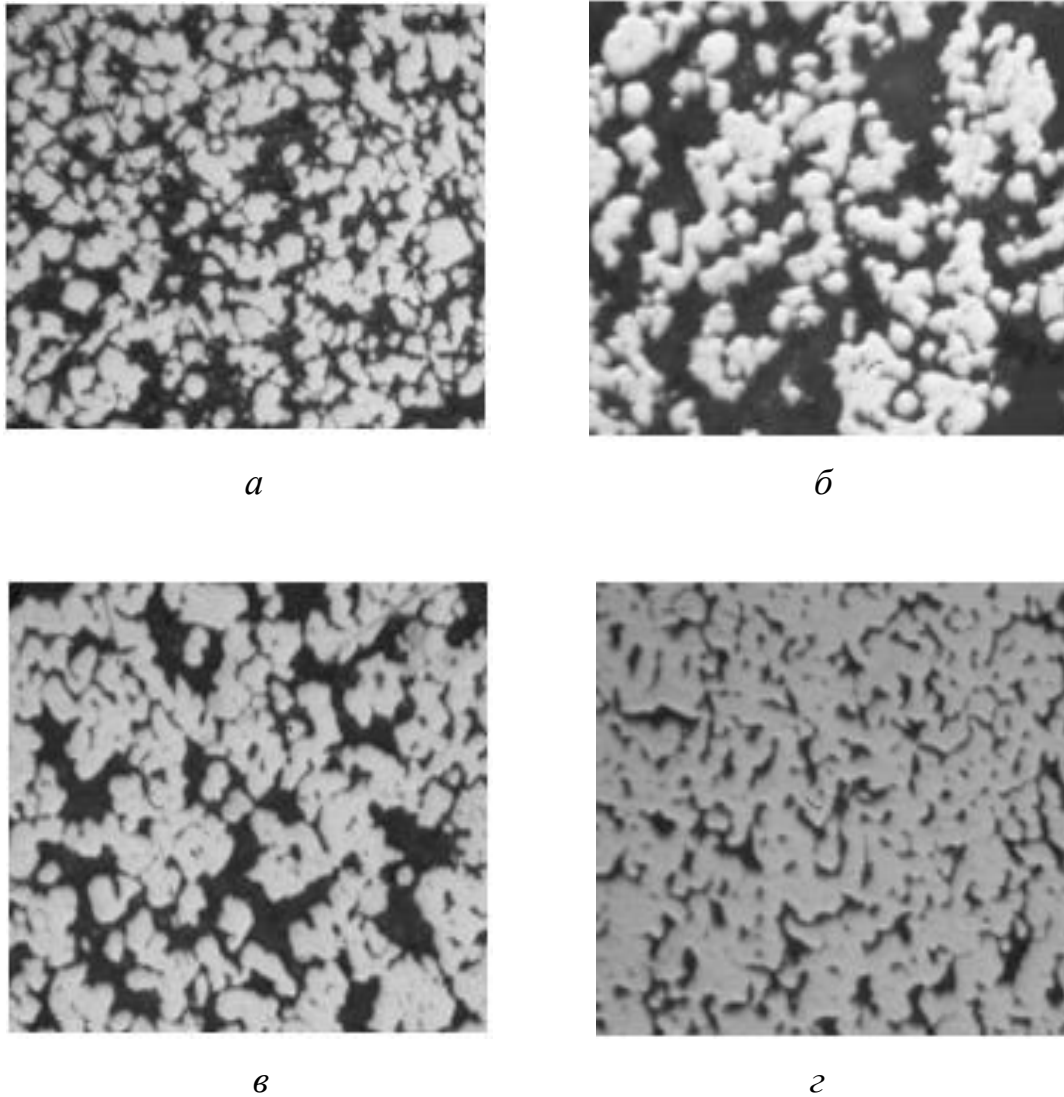
*a**б**в**a* – 850 °C; *б* – 900 °C; *в* – 1000 °C

Рисунок 2. 14 – Мікроструктури спечених матеріалів з порошків нікелю карбонільного з додаванням карбаміду та полівінілового спирту, отриманих методом спікання вільно насипаних порошків за різних температур (x400)

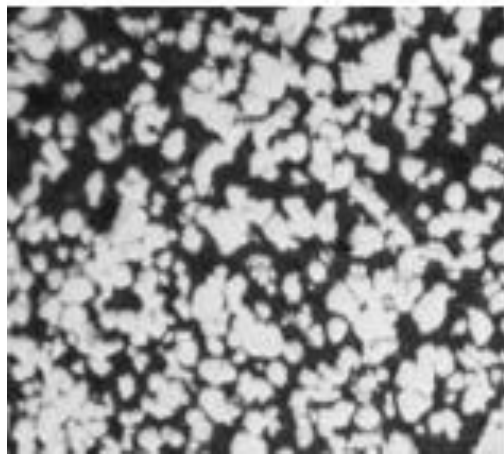
Найбільша пористість при такому методі отримання спостерігається при додаванні парафіну, що підтверджується отриманими мікроструктурами, проте вибір попроутворювача значним чином не впливає на зменшення кількості конгломератів та їх розмір, а також не сприяє зменшенню пор та їх рівномірному розподілу.



*a* – 800 °C; *б* – 850 °C; *в* – 900 °C; *г* – 1000 °C

Рисунок 2. 15 – Мікроструктури спечених матеріалів з порошків нікелю карбонільного з додаванням парафіну, отриманих методом спікання вільно насипаних порошків за різних температур (x400)

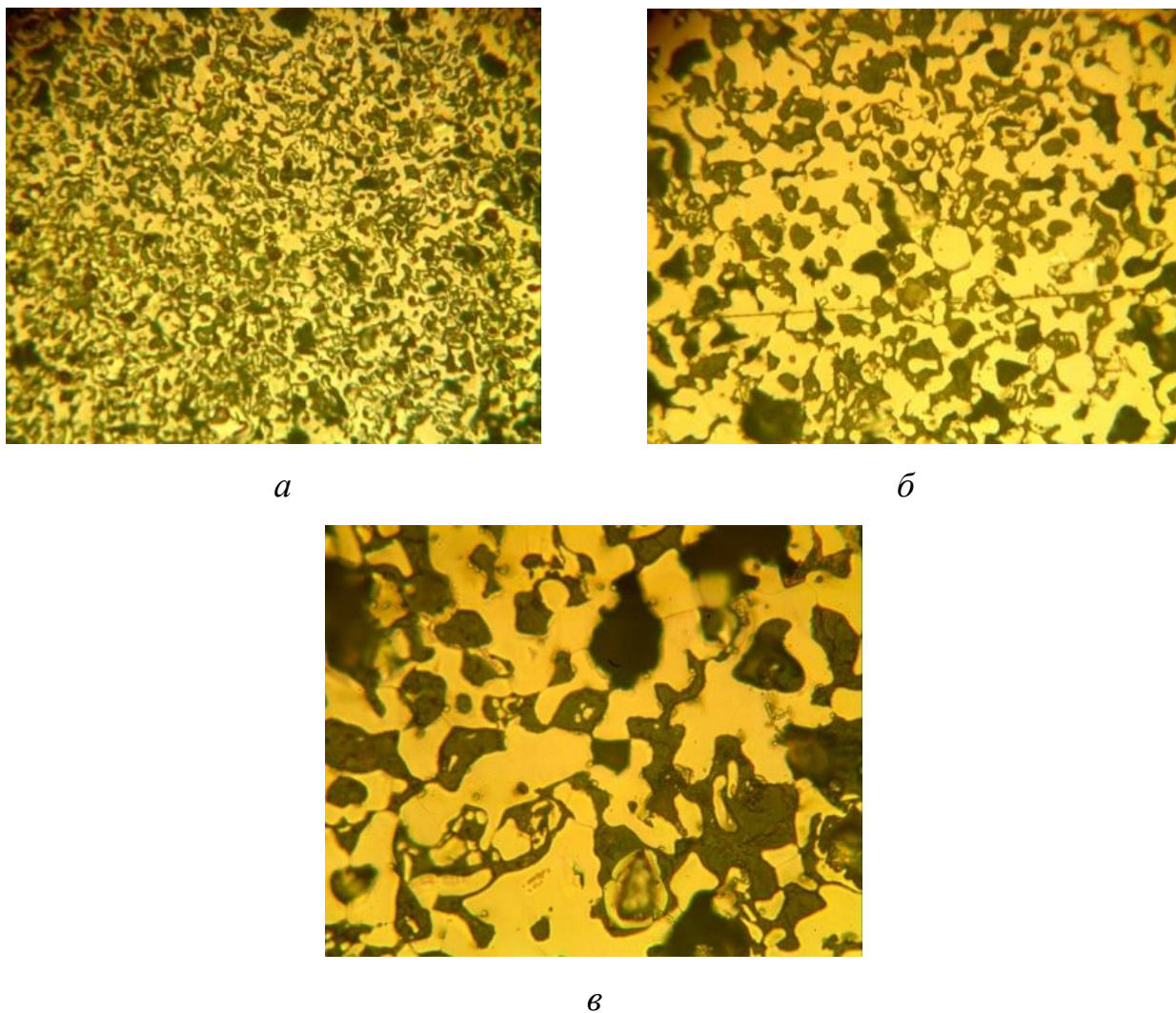
Матеріали, отримані таким методом з порошків нікеля карбонільного без додавання пороутворювача мають досить високі значення пористості (60 %), проте спостерігаються суцільні каналні пори та розрізнені конгломерати, при спіканні ж за температури 1000 °C спостерігається спечений матеріал з малою пористістю, що нерівномірно розподілена по об'єму зразка.

*a**б**в**г*

*a* – 800 °C; *б* – 850 °C; *в* – 900 °C; *г* – 1000 °C

Рисунок 2.16 – Мікроструктури спечених матеріалів з чистих порошоків нікелю карбонільного, отриманих методом спікання вільно насипаних порошоків за різних температур (x400)

Було отримано мікроструктури спечених матеріалів з порошку заліза з середнім розміром частинок 50 мкм, отримані методом шлікерного лиття, при різних збільшеннях (рис. 2.17). Як видно, спостерігається більш рівномірний розподіл пористості у порівнянні з попередніми методами отримання високопористих матеріалів.



*a* – x200; *б* – x500; *в* – x1000

Рисунок 2.17 – Мікроструктури спечених матеріалів з порошоків заліза, отриманих методом шлікерного лиття, при різних збільшеннях

Мікроструктури матеріалів з порошоків нікеля карбонільного, отриманих методом шлікерного лиття при спіканні за температур 850 °С та 900 °С, наведено на рисунках 2.18 – 2.19. Видно, що при такому методі отримання пористих виробів явище зонального уособлення усадки майже відсутнє. Спостерігається більш рівномірний розподіл пористості по об'єму матеріалу при мінімальних розмірах пор. При спіканні за більших температур частинки порошку набагато більші, що цілком узгоджується з відомими теоретичними даними.

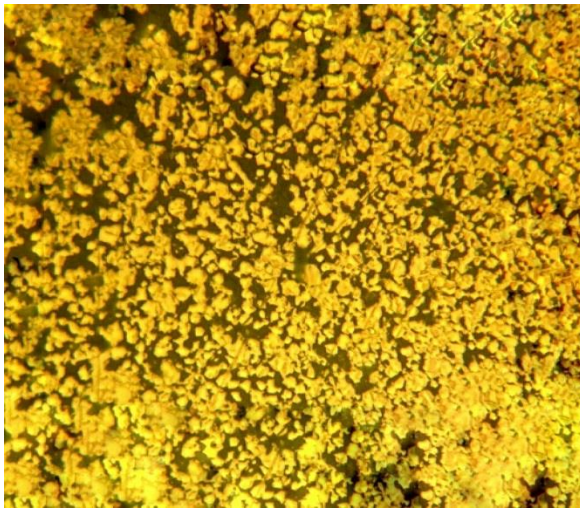
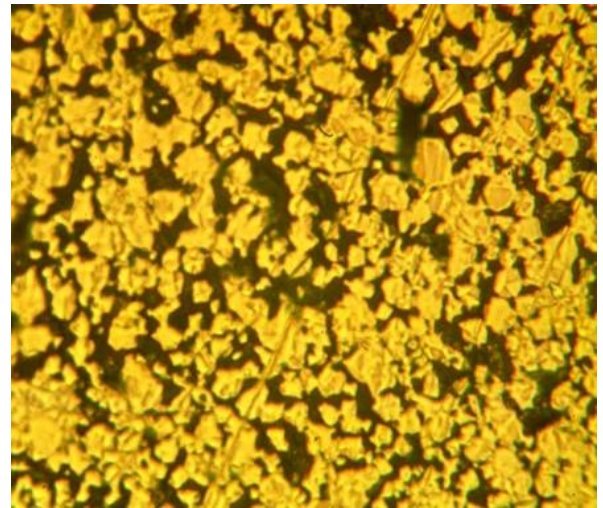
*a**б**a* – x400; *б* – x1000

Рисунок 2.18 – Мікроструктури спечених матеріалів з порошків нікеля карбонільного, отриманих методом шлікерного лиття при спіканні за температури 850 °С, при різних збільшеннях

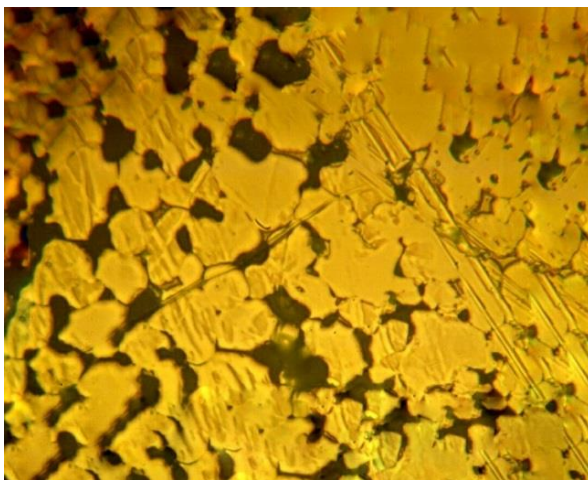
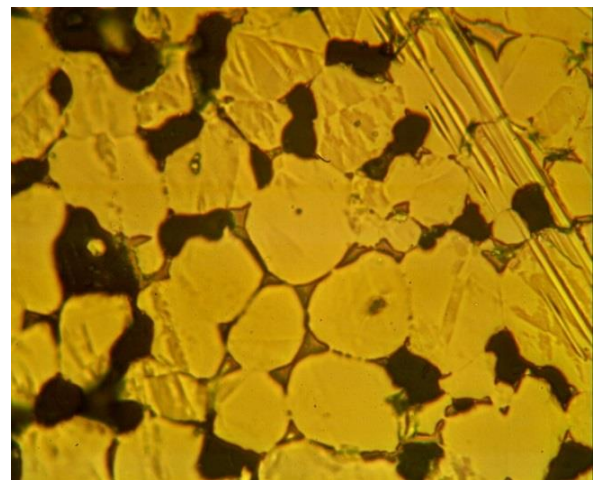
*a**б**a* – x400; *б* – x1000

Рисунок 2.19 – Мікроструктури спечених матеріалів з порошків нікеля карбонільного, отриманих методом шлікерного лиття при спіканні за температури 900 °С, при різних збільшеннях

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В роботі було досліджено вплив вихідних характеристик порошків та методу отримання на характеристики високопористих пресовок з порошків нікелю.

**Дослідження вихідних порошків.** Виходячи з передбачення, що кінцева пористість виробів багато у чому залежить від таких характеристик, як насипна ( $\gamma_{\text{нас.}}$ ) та щільність утруски ( $\gamma_{\text{утр.}}$ ), було досліджено вплив на ці характеристики виду порошку, методу його отримання та середнього розміру його частинок.

Приймаючи до уваги те, що на властивості порошків та процеси, які відбуваються під час компактування, значний вплив має форма частинок, в роботі проводився мікроструктурний аналіз вихідних порошків. Вивчалась форма частинок порошків та визначався їх розмір. Як видно з рисунків 2.4 та 2.5, частинки порошку заліза та карбонільного нікелю мають форму близьку до рівновісної з коефіцієнтом форми від 0,8 до 0,95. Частинки порошку нікелю, отриманого електролізом водного розчину його сульфату, менш рівновісні і мають не чітко виражену дендритну форму, що характерно для порошків, отриманих електролітичним методом. Коефіцієнт форми таких порошків лежить в межах від 0,4 до 0,7.

Як видно з таблиці 2.2, насипна щільність досліджених порошків зменшується зі зменшенням розміру їх частинок, що узгоджується з сучасними уявленнями про природу властивостей порошків, згідно яким зменшення розміру частинок порошків збільшує кількість контактів між ними, що утруднює щільному укладанню частинок за рахунок збільшення сил тертя між ними. Такий же вплив має форма частинок порошків. При інших рівних умовах більш низькі значення насипної щільності для порошку нікелю, який отримано електролізом водного розчину його солі, у порівнянні з насипною щільністю порошку заліза з сумірним розміром частинок зумовлені розвиненою їх поверхнею (дендритною формою). Загалом пористість вільної насипки практично всіх досліджених

порошків більша за 70 %, а для порошку нікелю, отриманого карбонільним методом, вона більша за 80 %.

Після утрушування пористість засипки порошоків зменшується і для порошоків заліза з різним розміром частинок вона практично однакова і незначно зменшується зі зменшенням розміру частинок. Для порошоків нікелю пористість насипки після їх утрушування також зменшується, але зберігається досить високою. Для карбонільного порошку вона складає 76,63 %, а для електролітичного – 69,33 %.

**Дослідження умов пресування.** Як було зазначено, важливим при створенні високопористих матеріалів є мінімально можливе зменшення їх пористості на етапах пресування та спікання. Тому в роботі було досліджено вплив умов компактування та властивостей порошоків нікелю та модельних порошоків заліза на ступінь зміни їх пористості при пресуванні залежно від тиску та після спікання.

Ступінь зменшення пористості визначали за допомогою кореляційних коефіцієнтів, які розраховані за даними наведеними у таблиці 3.1. Зменшення кореляційного коефіцієнту свідчить про більш значне зменшення пористості. Як видно, найбільше зменшення пористості по відношенню до пористості вільно насипаного та пористості утруски порошку відбувається після пресування. При цьому зі збільшенням тиску пресування кореляційні коефіцієнти зменшуються, що свідчить про більш інтенсивне зменшення пористості. На етапі спікання зменшення пористості пресовок відбувається у значно меншому ступені (коефіцієнт  $K_3$  має великі значення). При цьому для пресовок з карбонільного порошку ступінь зменшення пористості збільшується зі збільшенням тиску пресування. Для карбонільного порошку має місце екстремальна залежність. Найбільше зменшення пористості має місце для пресовок, спресованих за тиску 200 МПа. Останнє може бути зумовлене комплексним впливом на процес спікання вихідної пористості і якістю контактів в пресовках.

Таблиця 3.1 – Кореляційні коефіцієнти ( $K_1 = \gamma_{пр.}/\gamma_{нас.}$ ;  $K_2 = \gamma_{спік.}/\gamma_{утр.}$ ;  $K_3 = \gamma_{спік.}/\gamma_{прес.}$ ) при формуванні пористих матеріалів з порошоків нікелю, отриманих різними методами (1 – карбонільний; 2 – електролітичний).

Тиск пресування, МПа	$K_1$				$K_2$				$K_3$	
	1		2		1		2		1	2
	Пресування	Спікання	Пресування	Спікання	Пресування	Спікання	Пресування	Спікання		
50	0,756	0,710	0,710	0,655	0,823	0,779	0,774	0,709	0,938	0,916
100	0,728	0,695	0,658	0,563	0,792	0,757	0,712	0,609	0,955	0,857
200	0,640	0,577	0,611	0,580	0,698	0,627	0,661	0,628	0,899	0,949

Аналіз отриманих в роботі результатів дозволяє стверджувати, що основний вплив на кінцеву пористість має зміна щільності пресовок на етапі пресування. Тому розглядаємо також методи формування, які мають забезпечувати необхідну формовність порошкам при збереженні пористості на рівні вільної насипки або утруски порошку.

Для цього в роботі були досліджені процеси пресування вихідних порошоків нікелю при низьких тисках. Для надання вихідним порошкам формовності використовували зв'язку з парафіну. При цьому досліджувався вплив її кількості на мінімальний тиск пресування при якому зразки зберігали форму, тобто мали достатню формовність. Отримані результати (табл. 2.3) свідчать про те, що наявність парфіну значно зменшує мінімальний тиск пресування для забезпечення достатньої формовності. При цьому щільність та пористість пресовок з карбонільного порошку нікелю практично не залежить від вмісту парафіну. В той же час при пресуванні електролітичного порошку нікелю для забезпечення заданої формовності зі збільшенням вмісту парафіну оптимальний тиск зменшується. Останнє може бути зумовлене формою частинок порошоків, яка також має значний вплив на формовність. Одночасно такі пресовки мають більшу

пористість, що, мабуть, зумовлено при інших рівних умовах меншою насипною щільністю таких порошоків.

Якщо аналізувати значення пористості пресовок з різних порошоків нікелю, то вона у порівнянні з пористістю насипки та утрушування при пресуванні зменшується, але коефіцієнт кореляції збільшується у порівнянні з пресуванням без парафіну. Аналізуючи ці дані можна відмітити, що наявність парафіну збільшує формовність, але на ступінь збереження високої пористості сумірної з пористістю насипки та утрушування впливає не значно.

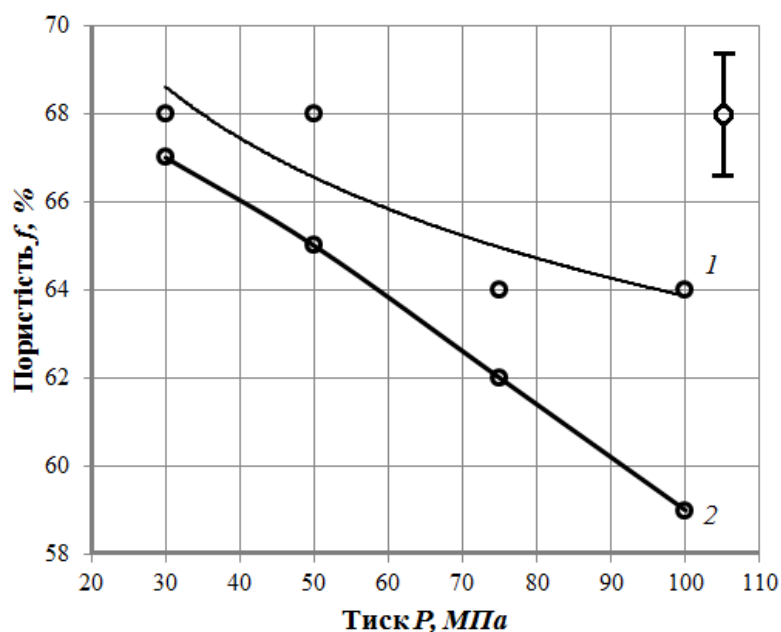
Тому у подальшому для вирішення задачі збереження високої пористості у процесі пресування заготовок в роботі були проведені дослідження по впливу на пористість заготовок уведення пороутворювача. Як пороутворювач в роботі використовували карбамід. При цьому кількість карбаміду вводили із розрахунку стовідсоткового заповнення пор, який має утрушений порошок. Поряд з цим дослідження процесу пресування проводили з введенням у вихідну суміш 2,5 %-вого розчину полівінілового спирту, виходячи з передбачення, що він буде сприяти підвищенню формовності.

Як видно з рисунку 3.1, введення в шихту пороутворювача сприяє збільшенню пористості заготовок і КК лежить у межах 0,85 – 0,90 для тиску пресування 30 МПа. Введення полівінілового спирту до вихідної суміші не сприяє підвищенню формовності, проте зменшує пористість заготовок, що може бути зумовлене його змащувальною дією при ущільненні. Введення полівінілового спирту до вихідної суміші не сприяє підвищенню формовності, проте зменшує пористість заготовок, що може бути зумовлене його змащувальною дією при ущільненні. Різний характер зміни залежності пористості від тиску пресування може бути зумовлений процесами, які відбуваються при ущільненні і які впливають на внутрішнє тертя при структурній деформації.

Також слід зауважити, що має місце дещо інший характер ущільнення залежно від тиску пресування у випадку додавання ПВС. Якщо присутній лише карбамід пористість зменшується нелінійно за рахунок збільшення міжчастинкового тертя, то у випадку додавання ПВС лінійна залежність

розповсюджується на більш широкий інтервал тиску, оскільки в даному випадку ПВС виступає як мастило при структурній деформації порошку.

Варто зазначити, що вивчаючи вплив різних домішок на пористість пресовок з порошоків нікелю, саме додавання карбаміду як пороутворювача дозволяє отримати найвищу пористість на рівні 68 % при додаванні до суміші полівінілового спирту.



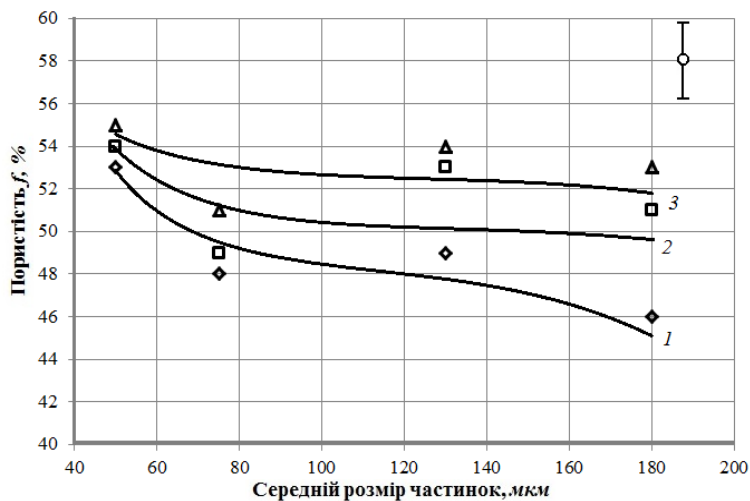
1 – без додавання ПВС; 2 – з додаванням ПВС

Рисунок 3.1 – Залежність пористості від тиску пресування з середнім розміром частинок 50 мкм з карбамідом без додавання та з ПВС

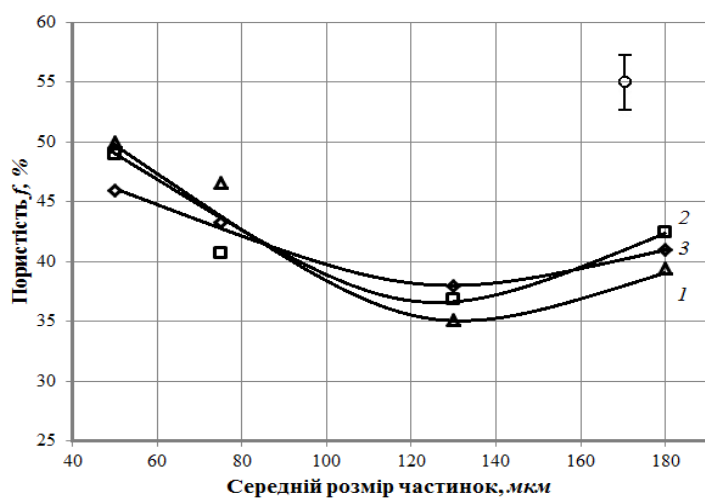
**Дослідження процесів спікання при отриманні зразків статичним пресуванням.** Спікання проводили за температур 1000 °С та 800 °С в середовищі водню та в контейнерах з плавким затвором. Встановлено, що на зміну пористості впливає розмір частинок порошоків, тиск пресування та наявність пороутворювача з додаванням та без додавання полівінілового спирту.

У випадку спікання в контейнері з плавким затвором (рис. 3.2, а) спостерігається зменшення пористості. Для дисперсних порошоків при спіканні

відбувається окиснення, що погіршує процес спікання, тобто пористість вище. При збільшенні розміру частинок зменшується питома поверхні, відповідно зменшується ступінь окиснення, що призводить до кращого спікання.



*a*



*б*

*a* – в контейнері з плавким затвором; *б* – середовище водню

1 – 5 % парафіну; 2 – 10 % парафіну; 3 – 15 % парафіну

Рисунок 3.2 – Залежність пористості від середнього розміру частинок спечених виробів з порошоків заліза з різним вмістом парафіну без захисного середовища та в середовищі водню

У випадку спікання більш дисперсних порошоків спостерігається зменшення пористості зі збільшенням середнього розміру частинок. Це можна пояснити тими, що збільшення питомої поверхні інтенсифікує процес спікання, при цьому для більш дисперсних порошоків розмір пор також менший, тому при пресуванні більша ймовірність утворення закритої пористості. Відповідно під час спікання для таких порошоків газ, що міститься у цих порах, вивільняється, що призводить до більшого розриву контактів та, відповідно, більшої пористості. Також спостерігаємо збільшення пористості для частинок найбільшого розміру 180 мкм. Таку залежність можна пояснити зменшенням впливу капілярного тиску (Лапласівські сили), який залежить від розміру частинок.

У деяких випадках, так як це має місце у випадку спікання зразків спресованих з введенням пороутворювача і ПВС, пористість після спікання знаходиться на рівні вихідної (табл. 2.9). Бачимо, що після спікання пористість збільшується чи залишається на рівні вихідної за рахунок розриву контактів між частинками при інтенсивному видаленні пороутворювача. Це явище підсилюється при наявності ПВС.

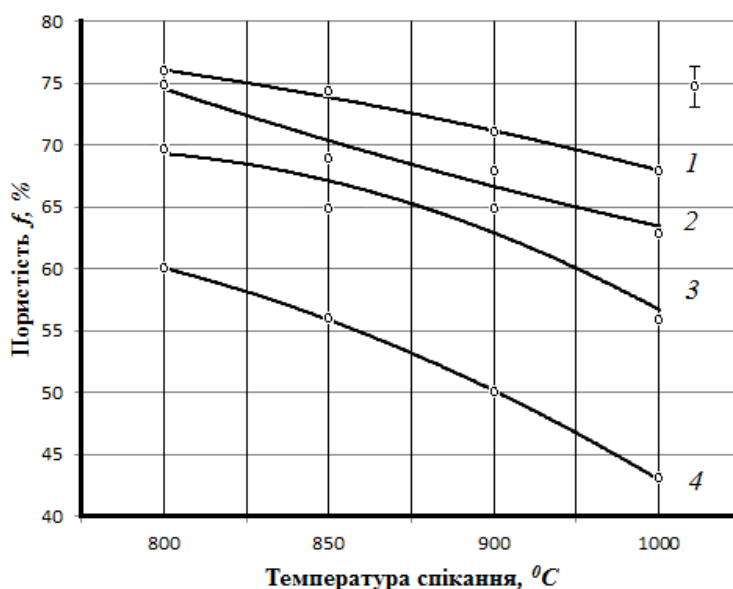
У випадку спікання пресовок з порошоків нікелю (табл. 2.7, 2.8), особливо з карбонільного, відбувається значне зменшення пористості, що зумовлено інтенсивним спіканням зумовленим малим розміром частинок порошоків.

Вивчення структури спечених матеріалів підтверджує викладені нам результати дослідження процесу спікання (рис. 2.8 – 2.12). Слід відмітити, що при спіканні пресовок з дисперсних порошоків спостерігається утворення каналних пор, а також конгломератів з частинок порошку з малими порами, так зване явище зонального уособлення усадки, наслідком чого є нерівномірний розподіл пор по об'єму і розміру. Дане явище пояснюється тим, що усадка при спіканні відбувається в межах не однієї, а багатьох зон, що призводить до утворення конгломератів, їх уособленню та росту міжгрупової пористості. Локалізацію усадки обусловлює нерівномірний просторовий розподіл центрів частинок та полідисперсність, що в свою чергу призводить до накопичення флуктуацій недосконалостей та локалізації ущільнення.

Виникнення явища зонального уособлення становить проблему для вирішення поставленої в роботі мети – отримання ізомерних пор малого розміру.

**Спикання вільно насипаних та віброущільнених порошків.** Виходячи з передбачення, що кінцева пористість може наближено дорівнювати пористості вільної насипки чи утруски порошку, було проведено спикання вільно насипаного порошку. З огляду на отримані характеристики вихідних порошків (табл. 2.2), для проведення експерименту використовували найбільш дисперсний порошок – нікель карбонільний з найбільшими значеннями пористості вільної насипки та утруски порошку (83,37 % та 76,63 %).

Аналізуючи отримані дані при формуванні пресовок методом спикання та пресування, можна сказати, що введення пороутворювачів суттєво впливає на кінцеву пористість заготовки. Як видно з рисунку 3.3, додавання парафіну до вихідного порошку дозволило отримати найвищі значення пористості. Карбамід з додаванням полівінілового спирту мав менший вплив на пористість, відсутність ПВС дозволило збільшити пористість виробу до 75 %.



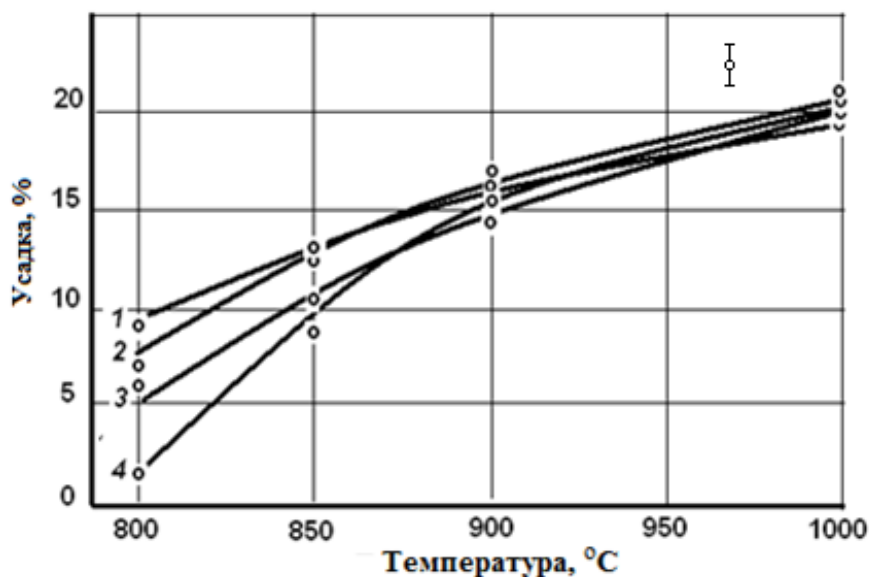
1 – парафін; 2 – карбамід; 3 – ПВС; 4 – без пороутворювача

Рисунок 3.3 – Залежність пористості спечених матеріалів з порошку нікелю карбонільного з додаванням різних пороутворювачів від температури спікання

Поставлену мету з досягнення пористості кінцевого виробу значень вільної насипки чи утруски порошку було майже досягнуто. Так, для матеріалів з додаванням карбаміду та парафіну в якості пороутворювача, отриманих спіканням при 800 °С вдалось досягти пористість 75 % та 76 %, що майже дорівнює пористості утруски порошку (76,63 %).

Встановлено, що температура спікання має великий вплив на пористість. Оптимальною температурою є 800 °С. Так, зі збільшенням температури збільшується усадка виробу, що призводить до зменшення пористості.

Як видно з рисунку 3.4, усадка при спіканні збільшується зі збільшенням температури спікання, що узгоджується з існуючими уявленнями про процеси спікання порошкових матеріалів [8]. Згідно з цими уявленнями збільшення температури прискорює процеси масоперенесення за рахунок дифузійних процесів, які є термічно активованими. Як наслідок збільшується усадка при спіканні, при чому основними діючими механізмами при спіканні порошків нікелю є об'ємна самодифузія та дифузійна в'язка течія.



1 – без пороутворювача ; 2 – парафін; 3 – ПВС; 4 – карбамід

Рисунок 3.4 – Залежність усадки при спіканні від складу вихідної шихти та температури

Різницю у величині усадки при спіканні чистого порошку нікелю та сумішей порошку нікелю з різними пороутворювачами можна пояснити тим, що наявність пороутворювача зменшує контактну поверхню між частинками порошку нікелю і тим самим призводить до зменшення усадки, особливо при спіканні за низьких температур.

Різна величина усадки зразків з різними пороутворювачами у випадку спікання за температур від 800 °С до 900 °С може бути зумовлена різною термостійкістю (температурою розкладання) пороутворювача. Чим вища температура його видалення, тим довше пороутворювач роз'єднує частинки порошку нікелю і тим менше усадка при спіканні такого матеріалу. Отримані в роботі результати узгоджуються з викладеними міркуваннями.

Вивчення мікроструктури спечених матеріалів підтверджує викладені нам результати дослідження процесу спікання (рис. 2.13 – 2.16). При отриманні виробів методом вільної насипки порошку, як і при отриманні пресуванням та спіканням, також спостерігається явище зонального уособлення усадки внаслідок нерівномірного просторового розподілу центрів частинок та полі дисперсність, що призводить до утворення конгломератів, їх уособлення та зростанню між групової пористості, що становить проблему для виконання поставленої мети роботи.

**Спікання пористих заготівок, отриманих методом шлікерного лиття.** Дані дослідження проводили, виходячи з передбачення, що при отриманні зразків методом шлікерного лиття формування матеріалу буде відбуватися за рахунок укладання частинок порошку на стінки гіпсових форм рівномірно під дією потоків рідини, що наявна у підготованому шлікері, за рахунок капілярних сил всмоктування. Так, передбачалося усунути зональне уособлення усадки, що спостерігається при формуванні дисперсних порошоків нікеля різними методами, розглянутими вище. З огляду на це, було проведено дослідження процесів спікання порошоків нікеля карбонільного з найменшим розміром частинок.

Отримані результати (табл. 2.13) показують, що зі збільшенням температури спікання пористість зменшується, що цілком узгоджується з відомими

літературними даними. При цьому значення пористості матеріалів з порошків нікелю карбонільного для даного методу отримання менше, ніж для методів, розглянутих вище. Це можна пояснити тим, що наявне більш щільне укладання частинок під дією потоків рідини та, як наслідок, меншого тертя між частинками.

Як видно на мікроструктурах отриманих виробів (рис. 2.18 – 2.19), спостерігається рівномірне укладання частинок порошку по об'єму пресовки та відсутність конгломератів. При спіканні за температури 1000 °С можна побачити перешийок між частинками, при цьому відсутнє їх злиття, тобто спостерігаємо механізм поверхневої дифузії, при якому відсутнє зближення центрів частинок, а отже і усадка. При спіканні за менших температурах при досить високих значеннях пористості відсутнє зональне обособлення та спостерігається рівномірний розподіл пор по об'єму пресовки та за розміром, що було основним завданням дослідження.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### Вступ

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності [51].

Зокрема, охорона праці включає організаційні і технічні заходи, спрямовані на усунення причин травматизму і захворювань робітників та службовців на виробництві, створення для них безпечних умов, поступову ліквідацію шуму і вібрацій, запиленості виробничих приміщень, будівництво і реконструкцію санітарно-побутових приміщень, поліпшення забезпечення робітників засобами індивідуального захисту. Правильний розрахунок і організація заходів по усуненню дії шкідливих факторів на організм людини є одним з основних елементів, які повинні розроблятися на самому початку науково-дослідницької роботи, оскільки від цього залежить здоров'я та ефективність роботи персоналу [52].

Усе це в комплексі підвищує продуктивність праці людини і зберігає її здоров'я.

Метою даного розділу є аналіз небезпечних та шкідливих чинників в процесі отримання високопористих матеріалів з порошків нікеля та заліза, а також розробка засобів та заходів для створення здорових і безпечних умов праці та усунення можливої надзвичайної ситуації.

Було використано наступні основні матеріали: порошок Ni та Fe. Дана дипломна робота проводиться в декількох лабораторіях факультету: 022 – дозування порошків, пресування та спікання; 112 – шліфування зразків; 110 – скануюча електронна мікроскопія. Основна робота проводилась у лабораторії 022, де було виготовлено зразки, зокрема, їх було спресовано та спечено. Все це представляє деяку небезпеку під час роботи і для попередження проблем в роботі та травмувань, уражень електричним струмом, та уникнення робочих травм маємо

дотримуватися всіх правил охорони праці та безпеки під час роботи на всіх, без винятку, установках.

#### 4.1 Аналіз умов праці, небезпечних та шкідливих факторів

Як було зазначено, робота проводилась в корпусі № 9, в науково-дослідній лабораторії 022. Характеристики даного приміщення наводяться в таблиці 4.1.

Відповідно до основних вимог до будівель виробничого призначення, які викладені в [53], висота виробничих приміщень повинна бути не менше 3,2 м, а об'єм і площа – 15 м<sup>3</sup> та 4,5 м<sup>2</sup> на кожного працівника.

Таблиця 4.1 – Параметри науково-дослідної лабораторії

Довжина, м	9
Ширина, м	6
Висота, м	4,5
Площа, м. кв.	54
Об'єм, м. куб.	243

В нашому випадку над дослідженням працювало 3 людини, отже площа на одну людину складає 18 м<sup>2</sup>, а об'єм 81 м<sup>3</sup>.

Отже, згідно [53], приміщення за геометричними параметрами відповідає основним вимогам до будівель виробничого призначення.

Метою запровадження правил безпечної роботи на виробництві є забезпечення безпеки, збереження здоров'я та працездатності людини протягом усього процесу. Ця мета досягається через дотримання певного комплексу правил із забезпечення гідних та безпечних умов праці на виробництві громадян.

Відповідно до рекомендацій МОП, визначають такі основні фактори виробничого середовища, що чинять вплив на працездатність та здоров'я людини під час робочого процесу [54]:

а) фізичні зусилля (переміщення вантажів певної ваги в робочій зоні, утримування вантажів, тиснення на предмет праці або важелі протягом певного часу). Таке напруження поділяють на: незначне, середнє, сильне і дуже сильне;

б) нервові напруження (складність розрахунків, особливі вимоги до якості продукції, складність управління механізмом, приладдям, небезпека для життя, особлива точність виконання завдання). Є такі види напруження: незначне, середнє, підвищене;

в) робоче положення (положення тіла людини і його органів відносно засобів виробництва). Розрізняють незручне, обмежене, незручно-стиснене та дуже зручне робоче положення;

г) монотонність роботи (багаторазове повторення одноманітних та короткочасних операцій, дій тощо). Монотонність може бути: незначна, середня, підвищена;

д) температура, вологість, теплове випромінювання в робочій зоні. Стадії впливу зазначених факторів поділяються на: незначні, підвищені або знижені, середні, високі, дуже високі;

е) забруднення повітря. Ступінь забруднення повітря може бути незначний, середній, підвищений, сильний, дуже сильний;

ж) виробничий шум (частота шуму в герцах, сила шуму в децибелах). Розрізняють помірний, підвищений і сильний шум;

и) вібрація, обертання, поштовхи (амплітуда на хвилину, градуси і кількість обертів або поштовхів за хвилину). Є такі рівні значень указаних факторів: підвищені, сильні, дуже сильні;

к) освітленість робочої зони. Освітленість може бути нормальна, недостатня або осліплююча.

Будь-яка робота потребує обов'язкового дотримання правил охорони праці, щоб запобігти виробничому травматизму і професійним захворюванням.

Всі застосовані порошки та обладнання можуть бути чинником виробничого травматизму та професійних захворювань. Шкідливі та небезпечні

фактори, які можуть мати місце при виконанні особливих операцій дипломної роботи, наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Шкідливі і небезпечні виробничі фактори, що можуть мати місце при виконанні деяких операцій диплому

Найменування операцій	Устаткування	Потенційні небезпеки
Пресування	Розбірна прес-форма, прес гідравлічний	Вібрації, травматизм
Спікання	Воднева піч	Опik
Обробка експерименту	Комп'ютер ЕОМ	Можливе ураження електричним струмом

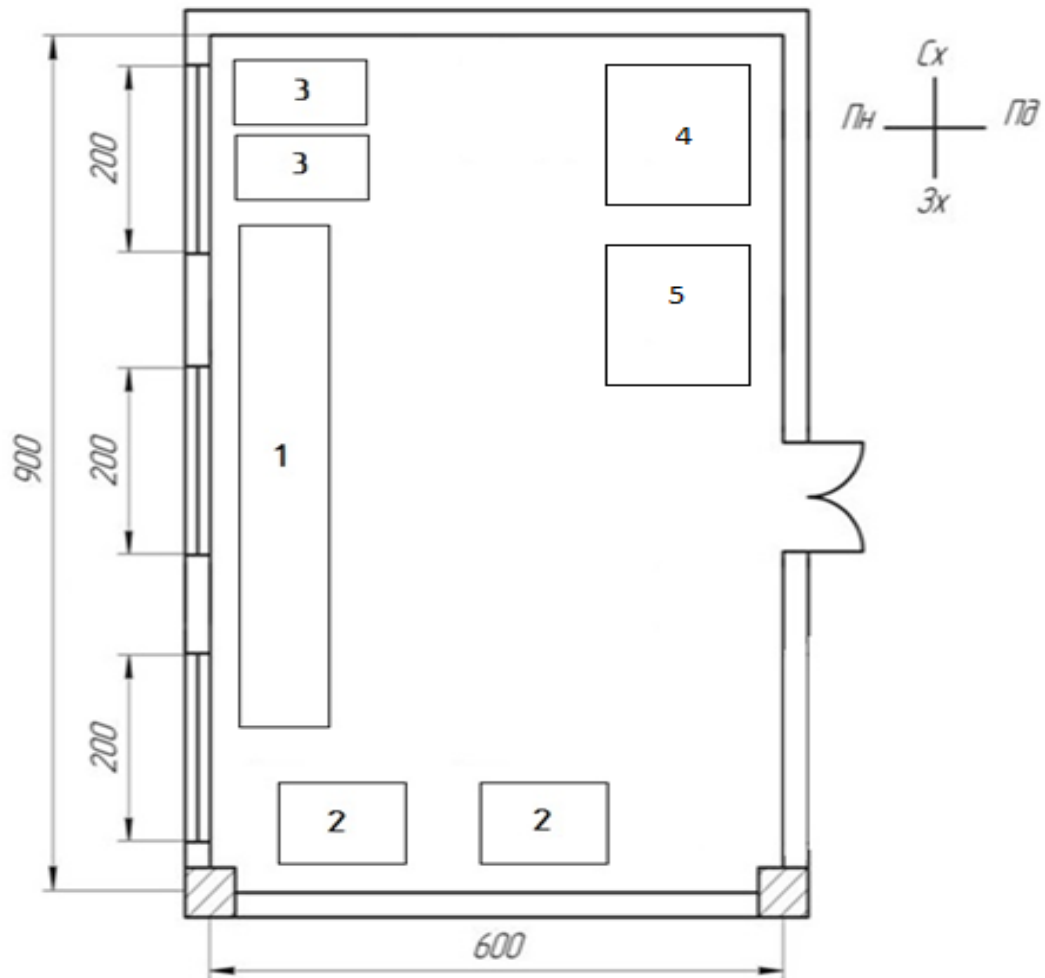
Важливе значення для здорових та безпечних умов праці має раціональне розташування основного та допоміжного устаткування, виробничих меблів, та правильна організація робочих місць. Порядок розташування і відстань визначається розмірами, технологічними умовами і вимогами техніки безпеки (рис. 4.1).

Основним елементом виробничої структури є робоче місце, від правильної організації якого залежить ефективність та безпека кожної технологічної операції та виробничого процесу в цілому. В нашому випадку стан робочих місць забезпечує зручні і безпечні дії з матеріалами та експлуатацію обладнання. На робочому місці передбачена площа, на якій розміщуються тара, столи.

#### 4.1.1 Мікроклімат

Лабораторія 022 оснащена системами опалення, вентиляції та кондиціонування для забезпечення потрібних мікрокліматичних умов приміщення. Умови мікроклімату виконуються завдяки встановленому водяному опаленню у холодний період року та штучній припливно-витяжній вентиляції у

теплій період року. Параметри мікроклімату знаходяться у допустимих межах, встановлених ДСН 3.3.6.042-99 [55].



1 – робочий стіл; 2 – гідравлічний прес; 3 – воднева піч;  
4 – кульовий млин; 5 – двуконусний змішувач

Рисунок 4.1 – План дослідної лабораторії

Робота, яка виконується у лабораторії, відноситься до категорії середньої важкості Па, оскільки робота пов'язана з ходінням, переміщенням дрібних (до 1 кг) виробів або предметів у положенні сидячи або стоячи і які потребують незначного фізичного напруження. Енерговитрати організму становлять від 151 ккал/год до 200 ккал/год.

Значення показників температури, відносної вологості та швидкості руху повітря для категорії робіт середньої важкості Па у лабораторії 022 відповідають допустимим вимогам встановлених для постійного робочого місця в холодний та теплий період року (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Параметри мікроклімату

Категорія робіт	Параметр мікроклімату	Період року	Нормовані значення мікроклімату ДСН 3.3.6.042-99 [5]		Дані вимірювань	Висновки
			Оптимальні	Допустимі		
Середньої важкості Па	Температура, °С	Холодний	19 – 21	17 – 23	17	Допустимі
		Теплий	21 – 23	18 – 27	23	Оптимальні
	Відносна вологість повітря, %	Холодний	40 – 60	75	72	Допустимі
		Теплий	40 – 60	65	54	Оптимальні
	Швидкість руху повітря, м/с	Холодний	0,2	не більше 0,3	0,2	Оптимальні
		Теплий	0,3	0,2 – 0,4	0,3	Допустимі

#### 4.1.2 Освітлення виробничого приміщення

Залежно від джерела світла освітлення може бути природним, штучним та суміщеним. У свою чергу, природне освітлення може бути в залежності від розташування світлових прорізів (ліхтарів) боковим, верхнім або комбінованим. Штучне освітлення буває лише загальним (при рівномірному освітленні приміщення), локалізованим (при розташуванні джерел світла з урахуванням

робочих місць), комбінованим (урахування поєднання загального та місцевого освітлення) [56].

В лабораторії проводяться зорові роботи середньої точності (розряд зорової роботи IV), підрозряд зорової роботи  $v$  – відповідно до найменшого розміру об'єкта розрізнення, який становить від 0,5 мм до 1 мм, та контрасту об'єкта з фоном і характеристикою останнього згідно [56]. При загальному штучному освітленні нормованим значенням освітленості у нашому випадку є 200 лк. При боковому природному освітленні табличне значення КПО  $e_n$  відповідно до [6] становить 1,5 %. Корпус розташований на території НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», вікна аудиторії 022-9 виходять на південь, тому при орієнтації світлових прорізів на південь коефіцієнт світлового клімату  $m_N$  становить 0,85 відповідно до [56].

Нормоване значення КПО ( $e_N$ ) становить:

$$e_N = e_n \cdot m_N = 1,5 \cdot 0,85 = 1,275 \% .$$

Глибина приміщення  $B = 6$  м. Висота верху вікна над рівнем робочої поверхні  $h_1 = 2,8$  м. Довжина приміщення  $l_n = 9$  м.

Відстань від розрахункової точки до зовнішньої стіни  $l = 4,5$  м.

$$B/h_1 = 2,14, \quad l/B = 0,75, \quad l_n/B = 1,5.$$

Згідно з [56] для побіленої стелі, стін, підлоги:

$$\rho_1 = 0,7, \quad \rho_2 = 0,7, \quad \rho_3 = 0,1,$$

$$S_1 = S_3 = 54 \text{ м}^2, \quad S_2 = 117 \text{ м}^2.$$

Підрахуємо  $\rho_{\text{сеп}}$ :

$$\rho_{\text{сеп}} = (0,7 \cdot 54 + 0,7 \cdot 117 + 0,1 \cdot 54) / (54 \cdot 2 + 117) = 125,1 / 225 = 0,556.$$

Використовуючи всі вище підраховані значення знаходимо  $r_1 = 2$ .

Розрахунок площі світлових прорізів при боковому освітленні проводять за формулою:

$$100 \frac{S_0}{S_n} = \frac{e_N K_3 \eta_0}{\tau_0 r_1} K_{зд},$$

де  $S_0$  – площа світлових прорізів при боковому освітленні;

$S_n$  – площа підлоги приміщення;

$e_N$  – нормоване значення КПО;

$K_3$  – коефіцієнт запасу (навчальне приміщення, лабораторія, кут нахилу вікна до горизонту  $90^\circ$ ,  $K_3 = 1$ );

$\eta_0$  – світлова характеристика вікон, яка визначається за розрахованими даними  $B / h_l$  і  $l_n / B$ ,  $\eta_0 = 13$ );

$t_0$  – загальний коефіцієнт світлопроникнення, який визначається за формулою:

$$t_0 = t_1 \cdot t_2 \cdot t_3,$$

де  $t_1$  – коефіцієнт світлопроникнення матеріалу (скло віконне листове подвійне,  $t_1 = 0,8$ );

$t_2$  – коефіцієнт, який враховує втрати світла в рамах світлопрорізу (рама дерев'яна одинарна  $t_2 = 0,75$ );

$t_3$  – коефіцієнт, який враховує втрати в несучих (бокове освітлення,  $t_3 = 1$ );

$K_{зд}$  – коефіцієнт, який враховує затінення вікон протилежними будинками і визначається ( $K_{зд} = 1$ );

$$S_0 = (1,275 \cdot 1,3 \cdot 13 \cdot 54) / (0,48 \cdot 2 \cdot 100) = 12,12 \text{ м}^2.$$

Оскільки розрахункова площа вікон перевищує фактичну для даного приміщення (9 кв. м) більше ніж на 10 %, то можна зробити висновок, що для запропонованих умов потрібне значення КПО = 1,275 % не може бути забезпечене, природне освітлення для заданого розряду зорової роботи є недостатнім.

Джерелом штучного освітлення є 10 світильників (по 5 в 2 ряди), в кожному встановлено 2 лампи ЛД-40. Освітлення загальне рівномірне. По [56] нормативне значення  $E_{min} = 200$  лк.

Для розрахунку рівномірного освітлення використовується метод коефіцієнта використання світлового потоку однієї лампи [56]:

$$\Phi_{л} = \frac{E_{min} \cdot k \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta},$$

де  $E_{min}$  – мінімальна нормована освітленість,  $E_{min} = 200$  лк;

$k$  – коефіцієнт запасу,  $k = 1,5$ ;

$S$  – освітлювана площа,  $S = 54$  м<sup>2</sup>;

$Z$  – коефіцієнт нерівномірності освітлення,  $Z = 1,2$ ;

$N$  – кількість світильників,  $N = 10$ ;

$n$  – кількість ламп у світильнику;

$\eta$  – коефіцієнт використання світлового потоку в частках одиниці.

Для визначення коефіцієнта використання світлового потоку  $\eta$  знаходять індекс приміщення  $i$  і передбачувані коефіцієнти відбиття поверхонь приміщення: стелі  $\rho_c$ , стін  $\rho_{ст}$ , підлоги  $\rho_{п}$ .

Для виробничих приміщень з незначними пиловиділеннями:  $\rho_c = 50$  %,  $\rho_{ст} = 30$  %,  $\rho_{п} = 10$  % [56].

Знаходимо індекс приміщення  $i$ :

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)},$$

де  $A$ ,  $B$ ,  $h$  – довжина, ширина і розрахункова висота (висота підвісу світильника над робочою поверхнею) приміщення, м.

$$h = H - h_{зв} - h_p,$$

де  $H$  – геометрична висота приміщення,  $H = 4,5$  м ;

$h_{зв}$  – висота звисання світильника.  $h_{зв} = 0,2$  м;

$h_p$  – висота робочої поверхні,  $h_p = 1$  м.

В нашому випадку маємо:

$$h = 4,5 - 0,2 - 1 = 3,3 \text{ м.}$$

Далі знаходимо  $i$ :

$$i = 9 \cdot 6 / (3,3 \cdot (9 + 6)) = 1,09.$$

З джерела [57] визначаємо коефіцієнт використання світлового потоку, що дорівнює 0,43. Розрахуємо світловий потік лампи  $\Phi_{л}$ :

$$\Phi_{л} = 200 \cdot 1,5 \cdot 54 \cdot 1,2 / (10 \cdot 2 \cdot 0,43) = 2260 \text{ лм.}$$

Виберемо найближчу стандартну лампу. Для нашого випадку це ЛД 40 ( $\Phi_{факт} = 2340$  лм).

Розрахуємо фактичну освітленість за формулою:

$$E = \frac{\Phi_{\text{факт}} \cdot E_{\text{min}}}{\Phi_{\text{Л}}},$$

$$E = 2340 \cdot 200 / 2260 = 207,07 \text{ лк.}$$

Визначаємо фактичне відхилення від нормованого значення, порівнюючи з допустимим за формулою:

$$\Delta E = ((E - E_{\text{н}}) / E_{\text{н}}) \cdot 100 \%.$$

Отже, порівнюючи значення нормованої освітленості  $E_{\text{н}} = 200$  лк і фактичної освітленості  $E_{\text{ф}} = 207,07$  лк робимо висновки, що освітленість в лабораторії 022 відповідає нормам [56], оскільки допускається відхилення фактичної освітленості від нормованої не більше, ніж на 10 %.

#### 4.1.3 Рівень шуму

Шум – це будь-який небажаний звук, якій наносить шкоду здоров'ю людини, знижує його працездатність, а також може сприяти отриманню травми внаслідок зниження сприйняття попереджувальних сигналів [58].

Вібрація – це механічні коливання твердого тіла [59].

Лабораторія оснащена наступними приладами, які є джерелом шуму, а саме: гідравлічні преси, печі для спікання та електроустаткування.

За часовою характеристикою шум відноситься до постійного – рівень звуку за весь робочий день при роботі обладнання не змінюється більш ніж на 5дБА. За походженням шум поділяється на електромагнітний (джерело – електроустаткування) та механічний (джерело – гідравлічні преси). При одночасній роботі всього устаткування рівень шуму може перевищувати допустимі норми [58], що призводить до виникнення профзахворювань.

Шум може викликати різні загально-біологічні подразнення, патологічні зміни, функціональні розлади та механічні ушкодження. Для зменшення шкідливого впливу виробничого шуму на працівників шумних виробництв, послаблення передавання його в сусідні приміщення застосовують звуко- і віброізоляцію, звуко- і вібропоглинання та глушники шуму. Також для зменшення шкідливого впливу шуму використовуються індивідуальні засоби захисту від шумового впливу, або обмеження часу перебування в зоні підвищеного шуму. Так як всі установки одночасно не використовувались, а період роботи на окремих з них не великий, то вплив шуму не значний, тому в даних умовах застосовувати захист не потрібно.

Шліфувальний верстат є джерелом не тільки шуму, а й вібрації. Вібрація викликає порушення фізіологічного та функціонального стану людини. Вібрацію нормують згідно з [59]. Допустима тривалість вібраційного впливу не більше 120 хв.

Для віброізоляції стаціонарних машин з вертикальною змішувальною силою використовують віброізолювальні опори у вигляді прокладок або пружин. В нашому випадку використовувались резинові прокладки.

#### **4.1.4 Небезпека ураження електричним струмом**

Електробезпека – система організаційних і технічних заходів та засобів, що забезпечують захист людей від шкідливої і небезпечної дії електричного струму, електричної дуги, електричного поля і статичної електрики [60]. Знання основ електробезпеки обов'язкове для персоналу, що обслуговує електроустановки та електроустаткування.

У лабораторії 022-9 використовується струм напругою 220 В для живлення сушильної шафи печі для спікання, шліфувального верстату. Опір ізоляції силових та освітлювальних електропроводів повинен бути не менше 0,5 МОм.

Категорія приміщення визначається наявністю в приміщенні чинників підвищеної або особливої небезпеки електротравм. До чинників підвищеної

небезпеки належать: температура в приміщенні, що впродовж доби перевищує  $35^{\circ}\text{C}$ ; відносна вологість більше 75 %, але менше повного насичення (100 %); струмопровідна підлога – металева, бетонна, цегляна, земляна тощо; струмопровідний пил; можливість одночасного доторкання людини до неструмовідних частин електроустановки і до металоконструкцій, що мають контакт із землею. Лабораторія 022-9 належить до приміщення з підвищеною небезпекою електротравм, оскільки існує можливість одночасного доторкання людини до неструмовідних частин електроустановки і до металоконструкцій, що мають контакт із землею.

У однофазних мережах змінного струму і мережах постійного струму можуть бути два види дотику:

а) однополюсний – дотик людини, що стоїть на землі, до одного полюса мережі;

б) двополюсний прямий дотик – дотик людини до двох полюсів мережі.

У трифазних ЕМ можуть бути три види дотику:

а) однофазний дотик – дотик людини, що стоїть на землі, до одного фазного провідника;

б) двофазний дотик – це одночасний дотик людини до двох різних фазних провідників;

в) одночасний дотик до фазного і нейтрального провідника у мережах з напругою до 1 кВ з глухозаземленою нейтраллю.

Все електричне обладнання та печі в лабораторії з'єднано між собою та є трифазною електронною мережею з глухозаземленою нейтраллю. Розетки відносяться до однофазної електронної мережі. Можливими випадками ураження електричним струмом у даній лабораторії є ураження при пошкодженні ізоляції і заземлення печей та електричного обладнання або при пошкодженні розетки, яке можливе безпосередньо при дотику до пошкодженої ізоляції чи до корпусу установки, безпосереднє зіткнення з струмоведучими частинами установок, що знаходяться під напругою, пов'язане з небезпекою ураження струмом. При цьому ступінь небезпеки і можливість ураження електричним струмом залежать від

того, яким чином сталося дотик людини до провідників, що знаходяться під напругою. Таким чином, ураження людини електричним струмом у лабораторії може статися під час двофазного дотику чи однофазного дотику до фазного і нейтрального провідника у мережах з напругою до 1кВ з глухозаземленою нейтраллю.

Дотик до двох лінійним дротом (двох фаз) одночасно є надзвичайно небезпечним, оскільки до тіла людини в цьому випадку прикладається найбільше можливе в даній мережі напруга - лінійне. Струм, що протікає через тіло людини, дорівнює:

$$I_q = U_n / R_q = \sqrt{3} \cdot U_\phi / R_q,$$

де  $I_q$  – струм, що протікає через тіло людини, *A*;

$U_n$  – лінійна напруга установки, *B*;

$U_\phi$  – фазова напруга, *B*;

$R_q$  – опір людини, *Ом*.

У мережі з лінійною напругою 380 В і при опорі тіла людини 1000 Ом через людину буде проходити струм, рівний:

$$I_q = 380 / 1000 = 0,38 \text{ A.}$$

Такий струм є, безумовно, небезпечним для життя людини.

У 90 – 97 % випадків, які спричинили тяжкі електропорази, мало місце дотик до однієї фази. Однак дотик до однієї фази є значно менш небезпечним, ніж двофазний дотик. Пояснюється це тим, що при однофазному дотику напруга, під яким опиняється людина, не перевищує фазного, тобто менше лінійного в 1,73 рази. Крім того, на величину цього струму впливає також режим нейтралі джерела струму, опір підлоги, на якому стоїть людина, опір його взуття і деякі інші фактори. Нейтралі генераторів і трансформаторів можуть бути виконані або

глухозаземленими, або ізольованими від землі. Глухозаземленою називається нейтраль генератора або трансформатора, приєднана до заземлювального пристрою безпосередньо або через малий опір (наприклад, трансформатори струму і т. д.). Ізольованою називається нейтраль, не приєднана до заземлювального пристрою або приєднана до нього через великий опір (наприклад, компенсаційні котушки, трансформатори напруги і т. д.).

При однофазному дотику в мережі з глухозаземленою нейтраллю струм, що протікає через тіло людини, визначається фазовою напругою мережі, опором тіла  $R_{ч}$ , опором  $R_{п}$  підлоги і ґрунту на ділянці від ступені ніг до заземлювального пристрою, опором взуття  $R_{об}$  та опором заземлення нейтралі джерела струму  $R_0$ :

$$I_{ч} = U_{ф} / (R_{ч} + R_{п} + R_{об} + R_0) = U_{л} / \sqrt{3} \cdot (R_{ч} + R_{п} + R_{об} + R_0).$$

Розглянемо найбільш несприятливий випадок. Припустимо, що людина, що доторкнеться до однієї фази, стоїть на сирому ґрунті або на провідній (металевій або земляній) підлозі; її взуття також проводить струм - сира або має металеві цвяхи. Отже, можна прийняти  $R_{п} = 0$  і  $R_{об} = 0$ .

При лінійній напрузі  $U_{л} = 380$  В через тіло людини буде протікати струм, рівний:

$$I_{ч} = 380 / \sqrt{3} \cdot 1000 = 0,22 \text{ А.}$$

Такий струм небезпечний для життя.

Якщо ж людина стоїть на ізольованій підлозі (наприклад, з метласької плитки) в непровідного взуття (наприклад, гумового), то, приймаючи  $R_{п} = 120000$  Ом і  $R_{об} = 100\ 000$  Ом, отримаємо:

$$I_{ч} = 380 / \sqrt{3} \cdot (1000 + 120000 + 100000) = 0,001 \text{ А.}$$

Такий струм безпечний для людини.

Таким чином двофазний дотик до мережі є більш небезпечним для людини, ніж однофазний в мережі з глухо заземленою нейтраллю. Проте при дотриманні правил безпеки при роботі в лабораторії 022-9 шанси бути ураженим електричним струмом мінімальні.

Щоб запобігти ураженню електричним струмом потрібно:

- забезпечити недоступність струмопровідних частин устаткування від торкання (огороження струмонесучих частин, що передбачено конструкцією електроустаткування; ізоляція та інше);

- здійснити заземлення корпусу електроустаткування;

- здійснити перевірку електричної системи перед експлуатацією устаткування, задля виявлення пошкоджень;

- вилучити небезпеку ураження при появі напруги на корпусах, кожухах, та інших частинах електроустаткування, використанням подвійної ізоляції, захисним заземленням;

- забезпечити всі електроустановки засобами орієнтації.

Допустима напруга для людини при нормальному (не аварійному) режимі роботи електроустановки не повинна перевищувати 3 В для змінного струму і 8 В для постійного.

Найбільш небезпечна частота становить від 50 Гц до 60 Гц.

#### **4.1.5 Виробниче випромінювання**

Джерелом теплового випромінювання є піч для спікання з робочою температурою, що не перевищує 750 °С. Внаслідок тривалої роботи печі, теплове випромінювання може привести до теплового удару та головного болю, до ослаблення уваги. Допустиме значення густини потоку ІЧВ, згідно з [55] складає 140 Вт/кв. м., за рахунок високої температури є висока небезпека опіків.

З метою захисту від теплового впливу та опіків при роботі із нагрівальною піччю використовували спецодяг – рукавиці та спеціальний інструмент (металеві щипці) для завантаження та вивантаження зразків.

У виробничих умовах з високою температурою і вологістю навколишнього середовища тепловіддача утруднена, організм людини може перегрітися. Таке явище називають гіпертермією. Внаслідок перегрівання організму і втрати ним великої кількості рідини з потом можливе порушення водно-електролітного обміну, що проявляється судомною хворобою.

Під час завантаження та вивантаження зразків використовувались металеві щипці та рукавиці.

#### **4.1.6 Пожежна безпека**

У лабораторії 022-9 можлива надзвичайна ситуація – пожежа.

Пожежа – неконтрольоване горіння поза спеціальним вогнищем, що розповсюджується у часі і просторі. Спричиняється при порушенні правил і норм експлуатації електричних приладів та виробничого устаткування [60]. У даній лабораторії можливі пожежі класу А (горіння твердих речовин).

Відповідно до [61] приміщення за вибухопожежною та пожежною небезпекою відноситься до категорії Г (приміщення в яких знаходяться негорючі речовини та матеріали в гарячому, або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскор, полум'я; горючі газы, тверді речовини, які спалюються або утилізуються як паливо).

Можливими причинами виникнення пожеж у приміщенні лабораторії можуть бути: коротке замикання в електричних ланцюгах, порушення правил пожежної безпеки при використанні побутових електронагрівальних приладів, при виробництві вогневих робіт (зварювання).

Дана лабораторія обладнана місцевою вентиляцією, щоб виключити такі причини, як запиленість чи загазованість повітря. Для запобігання самозапаленню різних матеріалів, розробляються спеціальні правила для їх зберігання та

використання. Зберігати ці матеріали необхідно в металевій щільно зачиненій тарі.

У зв'язку з тим, що в КПІ ім. Сікорського значна частина обладнання є електричним, основним засобом гасіння пожежі є вогнегасник ОУ-2. Для виявлення пожеж у лабораторіях застосовується автоматична пожежна сигналізація. Тип автоматичного датчика плавкий. Кожна лабораторія має схему евакуації людей під час пожежі. У приміщенні лабораторії встановлено 4 пожежні сигналізатори ИП-105, сигнал з яких надходить на основну панель пожежної сигналізації. Сигналізатори ИП-105 спрацьовують на підвищення температури до  $t = 72\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для евакуації персоналу під час виникнення пожежі передбачено план евакуації, який наведено на рисунку 4.2.

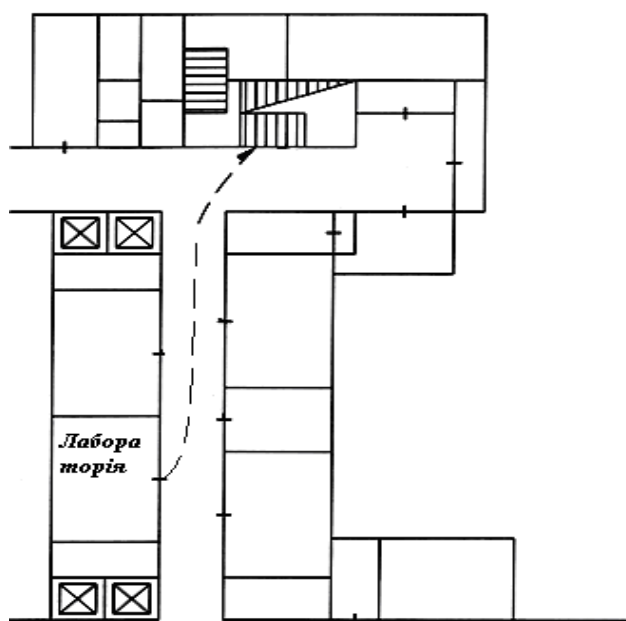


Рисунок 4.2 – План евакуації з приміщення

У коридорі знаходиться пожежний кран із приєднаним до нього пожежним рукавом. Відповідно до [61] будівля корпусу відноситься до I ступеня вогнестійкості.

Отже, заборонено:

– палити;

- зберігати пальні та легкозаймисті матеріали, не пов'язані з технологічним процесом;
- використовувати електронагрівальні прилади у побутових цілях;
- користуватись зіпсованим електричним устаткуванням, некаліброваними електричними запобіжниками, незаземленими електроприладами;
- захищувати проходи та виходи;
- захищувати проходи до засобів гасіння пожежі (вогнегасників, вентиляльних пожежних кранів).

Усі електрощити повинні постійно знаходитись у закритому стані й не захищуватись сторонніми предметами.

Оскільки у будівлі знаходяться прилади, що працюють безперебійно, то вони повинні бути під постійним наглядом відповідальних осіб.

Перед закриттям приміщення проводять ретельний огляд. Перекривають воду та знеструмлюють усі установки, що не працюють безперебійно.

Для запобігання самозапалення різних матеріалів, таких як спирт, бензин, технічні олії потрібно зберігати ці речовини необхідно в металевій тарі щільно зачиненій [62].

Співробітники чи студенти, що виявили виникнення пожежі, зобов'язані:

- а) викликати пожежну допомогу за телефоном 5 – 01 (міський – 01);
- б) прийняти усі заходи до урятування людей та гасіння пожежі усіма доступними засобами гасіння пожежі.

#### **4.1.7 Підсумковий аналіз умов праці, небезпечних та шкідливих чинників**

Аналізуючи умови праці, небезпечні та шкідливі фактори, можна зазначити, що виконана робота не є шкідливою для робітників.

Так, параметри мікроклімату знаходяться у допустимих межах, встановлених ДСН 3.3.6.042-99 [55]. Освітленість відповідає нормам [56], оскільки допускається відхилення фактичної освітленості від нормованої не

більше, ніж на 10 %. Шум та вібрації не мали значного впливу при виконанні роботи, оскільки всі установки, наявні в приміщенні не використовувалися одночасно. Лабораторія 022-9 належить до приміщення з підвищеною небезпекою електротравм, оскільки існує можливість одночасного доторкання людини до неструмовідних частин електроустановки і до металоконструкцій, що мають контакт із землею.

#### **4.2 Забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях**

Надзвичайна ситуація (НС) – це порушення нормальних умов життя і діяльності людей на об'єкті або території, спричинене аварією, катастрофою, стихійним лихом, великою пожежею, застосуванням засобів ураження, що призвели або можуть призвести до людських і матеріальних втрат.

Відповідно до цивільного кодексу України, надзвичайні ситуації класифікуються за характером походження, ступенем поширення, розміром людських втрат та матеріальних збитків [62]. Залежно від характеру походження подій, що можуть зумовити виникнення надзвичайних ситуацій на території України, визначаються такі види надзвичайних ситуацій:

а) техногенного характеру – транспортні аварії (катастрофи), пожежі, неспровоковані вибухи чи їх загроза, аварії з викидом (загрозою викиду) небезпечних хімічних, радіоактивних, біологічних речовин, раптове руйнування споруд та будівель, аварії на інженерних мережах і спорудах життєзабезпечення, гідродинамічні аварії на греблях, дамбах тощо;

б) природного характеру – небезпечні геологічні, метеорологічні, гідрологічні морські та прісноводні явища, деградація ґрунтів чи надр, природні пожежі, зміна стану повітряного басейну, інфекційна захворюваність людей, сільськогосподарських тварин, масове ураження сільськогосподарських рослин хворобами чи шкідниками, зміна стану водних ресурсів та біосфери тощо;

в) соціальні – порушення нормальних умов життя та діяльності людей на окремій території чи об'єкті на ній або на водному об'єкті, спричинене

протиправними діями терористичного і антиконституційного спрямування, або пов'язане із зникненням (викраденням) зброї та небезпечних речовин, нещасними випадками з людьми тощо;

г) воєнні – порушення нормальних умов життя та діяльності людей на окремій території чи об'єкті на ній або на водному об'єкті, спричинене застосуванням звичайної зброї або зброї масового ураження, під час якого виникають вторинні чинники ураження населення, що її визначають в окремих нормативних документах.

Залежно від обсягів заповдіяних надзвичайною ситуацією наслідків, обсягів технічних і матеріальних ресурсів, необхідних для їх ліквідації, визначаються такі рівні надзвичайних ситуацій [62]:

- а) державний;
- б) регіональний;
- в) місцевий;
- г) об'єктовий.

Порядок класифікації надзвичайних ситуацій за їх рівнями встановлюється Кабінетом Міністрів України.

Оповіщення про загрозу або виникнення надзвичайних ситуацій полягає у своєчасному доведенні такої інформації до органів управління цивільного захисту, сил цивільного захисту, суб'єктів господарювання та населення.

В даній лабораторії можливе виникнення надзвичайної ситуації техногенного характеру об'єктового рівня, яка розгортається на території об'єкта або на самому об'єкті і наслідки якої не виходять за можливий рівень об'єкта або його санітарно-захисної зони.

Для захисту лабораторій ІФФ від виробничих аварій і катастроф, а також їх попередження, здійснюється комплекс організаційних, інженерно-технічних заходів, які визначають вимоги охорони праці і техніки безпеки, протипожежної безпеки, а також вимог інструкції по експлуатації обладнання, електричних установок, посудин під тиском [60].

Для захисту корпусу від пожеж, що викликані стихійними лихами

(блискавки, замикання електропроводки внаслідок пошкодження магістралей і т.п.) використовуються громовідводи, автоматичні системи відключення, системи автоматичного пожежогасіння, а також первинні засоби пожежогасіння [61].

Для ліквідації можливих пожеж на ділянці передбачені вогнегасники типу ОУ-5 та пожежні стенди.

### **4.3 Висновки до розділу охорони праці**

1. Мікроклімат в лабораторії 022-9, де проводились дослідження, відповідає вимогам санітарних норм.

2. Показники шкідливих чинників, що виникають в процесі роботи (освітленість, шум, запиленість, теплове та інфрачервоне випромінювання) не перевищують допустимих значень.

3. З точки зору пожежної безпеки лабораторія 022-9 відноситься до приміщень категорії Г, вона обладнана необхідними засобами пожежогасіння.

## 5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Як відомо, на сьогоднішній день все більше набувають популярності «стартап-проекти». Тому в даній роботі розглядається можливість розроблення проекту за темою дисертації.

Інновація – це новостворені (застосовані) і (або) вдосконалені конкурентоздатні технології, продукція або послуги, а також організаційно-технічні рішення виробничого, адміністративного, комерційного або іншого характеру, що істотно поліпшують структуру та якість виробництва і (або) соціальної сфери [63].

Інновації – це реальні процеси створення нових знань, систем та засобів виробництва, технологій і впровадження їх у сферу економіки чи державного управління, товарообміну або міжнаціональних зв'язків. Якщо поширення інновації набуває загальносуспільного характеру, то інновація стає національним комплексно-інноваційним процесом. Інновація стає процесом тоді, коли вона базується на безперервному розвитку науково-технічного прогресу та його втіленні в нові види засобів виробництва, технологій, продуктів, форм і методів виробництва й управління. Інновація як процес завершується лише тоді, коли споживач оцінить стосовно своїх потреб ідею і знання щодо їх реалізації, технічний засіб виробництва та реальне використання його під час виробництва продукту, реалізацію товару й отримання прибутку, купівлю товару і задоволення виробничих та соціальних потреб [64].

Для початку слід розглянути питання, що таке стартап-проект – нещодавно створена компанія (можливо, ще не зареєстрована офіційно, але планує стати офіційно), що буде свій бізнес на основі інноваційних технологій, не вийшла на ринок чи почала виходити і що володіє обмеженими ресурсом. Таким чином компанія є обмеженою ресурсно, тому вона сильно залежить від інвесторів. Тому в першому випадку доцільно розглянути саму ідею стартап-проекту яка представлена в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Отримання високопористих матеріалів на основі нікеля.	Авіакосмічна	Випаровувачі в теплообмінниках космічних апаратів, демпфування коливань та звукопоглинання в літаках
Завдяки корозійностійкості, пористості порядку 70 % та мінімальному рівномірно розподіленому розміру пор по об'єму виробу може використовуватися довгий час для фільтрації	Промислова електрохімія	Об'ємно-пористі електроди за рахунок розвинутої поверхні пор
	Машинобудування	Різноманітного виду фільтри для фільтрації масел, води, лугів та іншого
	Електронна	Виготовлення пластин, що поглинають звук в телефонних трубках

Однак, на сьогоднішній день ринок України та не тільки займають не тільки вітчизняні, а і міжнародні фірми, які продовжують тримати лідерство, тому доцільним є розглянути позитивні та негативні сторони нашого проекту та конкурентів (табл. 5.2).

Основним чинником виконання даного проекту, чи роботи, є можливість застосування надійної та простої технології виготовлення. Дана технологія повинна мати гарну відтворюваність результатів, та мати економічний ефект при використанні, аналіз технології наведений в таблиці 5.3.

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Товар				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)			
		Мій проєкт	OPEKS Energy-systems	SWEP	ЧНПФ «Анкор-Тепло-енерго»						
1	Пористість	Випаровувачі в теплообмінниках						+			
2	Інформаційне забезпечення										+
4	Контроль якості									+	
3	Ціна									+	

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технології	Доступність технологій
Випаровувачі в теплообмінниках	Статичне пресування та спікання матеріалу	Наявна технологія, можливість прогнозування отриманих результатів, висока точність розмірів, відсутність браку	Доступна технологія
	Вільна засипка порошку в форму	Наявна технологія, перевагою є висока пористість, недоліком є мала продуктивність, сферична форма вихідного порошку	Доступна технологія
	Шлікерне лиття	Наявна технологія, перевагами є рівномірний розподіл пористості, недоліком – невелика продуктивність	Доступна технологія
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: шлікерне лиття			

Як було показано вище, найбільш оптимальним методом отримання матеріалу є статичне пресування та спікання, який дає найбільший ефект, так як

дозволяє отримувати необхідну пористість. Тому для входження на ринок товарів та послуг слід розглянути останні.

Технологічність – відповідність продукції вимогам економічної технології її використання. Технологічність забезпечується при розробці конструкції виробу. Технологічною називається така конструкція виробу або його складових елементів (деталей, вузлів, механізмів), яка забезпечує задані експлуатаційні якості продукції і дозволяє при даній серійності виготовляти її з найменшими затратами праці та матеріалів. Технологічна конструкція характеризується простотою компоновки, довершеністю форм. Попередня характеристика потенційного ринку наведена у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показник стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців	3
2	Загальний обсяг продаж, <i>грн/ум.од</i>	15000
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Спеціальне обладнання
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Присутні
6	Середня рентабельність в галузі, %	Більше 25 %

Також при входженні на ринок слід враховувати цільову аудиторію на яку буде направлений збут товарів та послуг, враховуючи потреби та вимоги споживачів, так як вони формують ринок (табл. 5.5).

Однак, як з перевагами отримання прибутку можуть виникнути загрози зриву проекту, які слід детально розглянути таблиця 5.6. Як видно із даної таблиці, найбільшу небезпеку на сьогодні становить перебіг в постачанні продукції, який в першу чергу пов'язаний через дефіцит продукції. Однак якщо вирішити дане питання, то вірогідність на успіх є великою через те що даний ринок товарів та послуг не є переповненим.

Таблиця 5.5. – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінність у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Високі значення пористості з рівномірним її розподілом	Авіакосмічна, промислова електрохімія, машинобудування та електронна	До даних деталей застосовують спеціальні випробування, та стандарти, які визначають самі покупці	Вимоги до продукції: -низька вартість -висока стабільність - відповідність вказаним габаритам Вимоги до компанії - стабільність товару та поставок -можливість корегування замовлення

Таблиця 5.6 – Фактори загроз

№	Фактори	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Виготовлення сировини	Недостатня кількість сировини через складність отримання та постачання	Можливість закупівлі у інших компаній чи початок налагодження виробництва сировини
2	Складність доставки	Несвоєчасна доставка готової продукції покупцям	Розробка та налагодження логістичних зв'язків
3	Великі витрати	Великі витрати на розхідні матеріали та енергію	Зменшення витрат за рахунок початку виробництва сировини самостійно, оптимізація існуючого обладнання
4	Нестабільність курсу	Нестабільність курсу, що призведе до різкого збільшення вартості сировини і готової продукції	Завчасні домовленості із постачальником про ціну на товар у договорі, зменшення отриманого чистого прибутку за рахунок незначного збільшення ціни на готовий продукт

Також на сьогоднішній день варто враховувати і альтернативні ринки, які в тій чи іншій мірі можуть бути зацікавлені в нашій продукції через її високу надійність в порівнянні із аналогами (табл. 5.7). Однак слід врахувати, що даний

ринок не є основним і на нього не потрібно робити великі ставки, так як це зачасту одиничні замовлення.

Таблиця 5.7 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернативні ринки збуту	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Авіакосмічна промисловість	Одиничні замовлення	В залежності від складності та кількості необхідного товару
2	Промислова електрохімія		
3	Машинобудування		
4	Електронна промисловість		

Надалі логічним є ступеневий аналіз конкуренції на ринку, так як даний аспект дасть можливість точно сказати в який період часу варто впроваджувати продукцію і з якої кількості товару чи послуги доцільно розпочинати (табл. 5.8).

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Вказати тип конкуренції – олігополия	Наявна велика кількість фірм, що пропонують товар, відмінність у ціні невелика, як і характеристики	Зменшення ціни на продукцію та покращення якості
2. За рівнем конкурентної боротьби – національна	Наявна велика кількість міжнародних фірм	Завоювати довіру на українському ринку та вийти на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою – міжгалузева	Найбільш привабливою є машинобудувна та авіакосмічна галузь	Реалізовувати продукцію в даних галузях
4. За характером конкурентних переваг – не цінова	Великі обсяги закупівль у вказаних галузях, що є привабливими для збуту	Слід за меншу ціну збільшити показники ефективності деталей
5. За інтенсивністю	Низька інтенсивність, яка проявляється за кількістю проданої продукції	Можливості для невеликої партії

Аналізуючи таблицю можна побачити, що на ринку відсутні монополісти, проте можливе покращення якості виробів, що дасть можливість для нових фірм та дослідно-промислового виробництва.

Аналіз конкурентів – це щорічні зведення (довідники) техніко-економічних показників підприємств тих галузей (підгалузей), до яких входять конкуренти; статистичні довідники; газети, журнали (галузеві).

Аналізуючи всі наведені фактори доцільно скласти SWOT аналіз, який представлений в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Високі характеристики кінцевого виробу</li> <li>– Відпрацювання технології виробництва та обробки виробу</li> <li>– Можливість корегування характеристик</li> <li>– Підкріплення практичних даних теоретичними розрахунками для моделювання процесів, які відбуваються під час експлуатації деталі та подальша оптимізація останнього</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Недостатня кількість спеціалістів в даній галузі (покупці) може призвести до непорозуміння при постановці задачі</li> <li>– Неможливість відтворення реальних процесів, для перевірки матеріалу в відповідних умовах</li> <li>– Дороговизна проведення деяких видів аналізу матеріалів</li> </ul>
Можливості	Загрози
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Набутий досвід призведе до правильного напрямку втілення та досягнення високих результатів</li> <li>– Подальші вивчення продукції та покращення характеристик</li> <li>– Можливість виходу на інші ринки збуту при невеликій кількості замовлень</li> <li>– Залучення та навчання молодих кадрів та використання сучасного обладнання</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Можливість несвоєчасного постачання сировини</li> <li>– Складність отримання вихідного порошку для подальшого виробництва</li> <li>– Великі витрати на розхідні матеріали та на енергію</li> <li>– Нестабільність курсу, що призведе до різкого збільшення вартості сировини, і готової продукції</li> </ul>

SWOT - аналіз для визначення факторів і явищ, що роблять найбільший вплив на підприємство. Цей етап включає також визначення стадії життєвого

циклу продукції, що дозволяє оцінити необхідність вкладень в розробку вдосконалених видів продукції з тим, щоб уникнути погіршення ринкової позиції в майбутньому.

– Strengths (сильні сторони – досвід та вміння, що дають змогу організації задумати та забезпечити виконання її стратегії.);

– Weaknesses (слабкі сторони – досвід і вміння, що не сприяють вибору та втіленню стратегії, потрібної для виконання місії організації. Організація має два шляхи вирішення проблеми «слабких сторін». По-перше, вона може робити інвестиції, щоб отримати перевагу, необхідну для виконання місії. По-друге, можна змінити місію так, щоб її досягти за допомогою досвіду й уміння, які організація вже має);

– Opportunities (можливості – це умови середовища, що забезпечують досягнення високого результату);

– Threats (загрози – це умови середовища, що ускладнюють досягнення високих результатів навиків і вмінь).

Для визначення існуючої позиції бізнесу та його частин, а також розробки можливих напрямків розвитку можуть використовуватися моделі портфельного аналізу.

Для завершення, слід вказати які основні переваги нашого потенційного товару в порівнянні із аналогами, що дасть можливість стверджувати, про можливість конкурентно спроможності (табл. 5.10).

Таким чином, можна побачити що високопористі матеріали з порошків нікелю на сьогоднішній день є перспективними матеріалами для виготовлення випаровувачів в теплообмінниках космічних апаратів, виробництво яких може бути реалізоване приблизно за рік з відпрацюванням технології з відповідною сировинною базою.

Таблиця 5.10 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Пористість	Задовільння потреб при невисокій ціні	Велика пористість в порівнянні з аналогами
3	Мінімальний рівномірний розподіл пор по об'єму виробу		Відсутність закритих пор
2	Надійність		Надійна робота при циклічних навантаженнях
3	Дешевизна		Дешевизна товару на 25% від конкурентів

## ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз літературних даних про отримання високопористих матеріалів. Розглянуті технологічні варанти та вихідні матеріали, що дозволяють отримання виробів з високою пористістю. Як методи їх виготовлення може бути традиційна технологія порошкової металургії, спікання вільно насипаних порошків та шлікерне лиття.

2. Вивчені властивості вихідних порошків та їх вплив на формування властивостей виробів після пресування та спікання. Для узагальнення отриманих даних введено поняття кореляційного коефіцієнту, який дає можливість прогнозувати властивості високо пористих порошкових виробів залежно від властивостей вихідних порошків.

3. Встановлено, що введення у вихідні порошки наповнювачів (карбаміду, ПВС, парафіну) сприяє збільшенню пористості кінцевих виробів, що зумовлено перешкоджанням щільної укладки частинок у вихідних заготовках. При цьому збільшення температури видалення наповнювача сприяє отриманню виробів з більшою пористістю. Показано, що найбільша пористість досягається при додаванні 15 % карбаміду.

4. Встановлене явище локалізації усадки при спіканні заготовок з порошків з наповнювачами, що зумовлено нерівномірністю розподілу їх у вихідній шихті. Останнє є причиною нерівномірності розподілу пористості у кінцевих виробках отриманих методами статичного пресування з наступним спіканням, а також спіканням вільно насипаних порошків. Зміна механізму формування вихідної пористої заготовки при шлікерному литті, при якому відсутнє внутрішнє і зовнішнє тертя, сприяє отриманню пористих виробів з рівномірно розподіленою пористістю.

5. Вивчення процесів пресування та спікання високопористих виробів показало, що для їх отримання необхідно реалізувати процес ущільнення при пресуванні за рахунок структурної деформації, а спікання – за рахунок дії механізму поверхневої самодифузії.

6. Розроблені засади з техніки безпеки та охорони навколишнього середовища, що забезпечують безпечні умови виробництва високопористих матеріалів на основі порошків нікелю для випаровувачів теплообмінників.

7. Розроблено стартап-проект, який показує, що отримання випаровувачів теплообмінників є перспективним для виробництва і може бути реалізовано в Україні та за кордоном.

## CONCLUSIONS

1. An analysis of the literature data on obtaining high-porous materials is carried out. Technological currencies and source materials are considered, allowing to receive products with high porosity. As the methods of their manufacture can be traditional technology of powder metallurgy, sintering of freely poured powders and casting molding.

2. The properties of initial powders and their influence on the formation of properties of products after pressing and sintering have been studied. To summarize the data obtained, the concept of a correlation coefficient is introduced, which makes it possible to predict the properties of highly porous powder products, depending on the properties of the initial powders.

3. It was found that the introduction of fillers in powders (carbamide, wax, pva) contributes to the increase of porosity of final products, which is due to the obstruction of the dense stacking of particles in the initial samples. At the same time, increasing the temperature of removal of the filler contributes to the receipt of products with greater porosity. It is shown that the highest porosity is achieved by adding 15% carbamide.

4. The phenomenon of localization of shrinkage during the sintering of billets from powders with fillers has been established, due to the uneven distribution of them in the initial charge. The latter is the cause of the uneven distribution of porosity in finite products obtained by methods of static pressing with subsequent sintering, as well as sintering of freely poured powders. Changing the mechanism of formation of the output porous billets in a cast-in-place casting, in which there is no internal and external friction, promotes the receipt of porous products with uniformly distributed porosity.

5. Study of the processes of pressing and sintering of high-porous products showed that for their obtaining it is necessary to realize the process of compression during compression due to structural deformation, and sintering - due to the mechanism of surface self-diffusion.

6. The principles of safety and environmental protection have been developed, which provide safe conditions for the production of high-porosity materials based on nickel powders for heat exchanger evaporators.

7. A startup project has been developed, which shows that obtaining heat exchanger evaporators is promising for production and can be implemented in Ukraine and abroad.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. Neena G. *Fundamental Biomaterials* / G. Neena, Ajalesh B. Nair. – Elsevier, 2018. – P. 243 – 268.
2. Tang H. P. *Titanium Powder Metallurgy* / H. P. Tang, J. Wang, Ma Quian. – Elsevier, 2015. – P. 533 – 554.
3. Liu P. S. *Application of Porous Metals* / P. S. Liu, G. F. Chen // *Porous Materials*. – Elsevier, 2014. – P. 113 – 188.
4. Goodall R. *Advances in Powder Metallurgy* / R. Goodall. – Elsevier, 2013. – 624 p.
5. Infiltrated  $\text{Pr}_2\text{NiO}_4$  as promising bi-electrode for symmetrical solid oxide fuel cells / Zhipeng Gao, Xifeng Ding, Dong Ding [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. – Elsevier, 2018. – Vol. 43. – P. 8953 – 8961.
6. Wang D. The process, properties, and applications of metallic foam / D. Wang, Z. Shi // *Journal of Dalian Railway Institute*. – 2001. – № 3. – P. 79 – 86.
7. Никифорова Э. М. Теоретические основы, технология получения и свойства порошковых материалов: курс лекций / Э. М. Никифорова, Ю. А. Артемьева, А. Г. Верхотуров. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – 304 с.
8. Investigation of bi-porous electrodes for lithium oxygen batteries / Caroline Gaya, Yinghui Yin, Amangeldi Torayev [et al.] // *Electrochimica Acta*. – Elsevier, 2018. – Vol. 279. – P. 118 – 127.
9. Characteristics of castables incorporating highly porous alumina aggregates fabricated by high- temperature evaporation method / Muto Daimu, Shinobu Hashimoto, Yusuke Daiko [et al.] // *Ceramics International*. – Elsevier, 2019. – Vol. 45. – P. 11143 – 11152.
10. Fabrication and characterization of porous  $\text{CaSiO}_3$  ceramics / Yue Hu, Zhen Xiao, Huanping Wang [et al.] // *Ceramics International*. – Elsevier, 2019. – Vol. 45. – P. 3710 – 3714.

11. Minko D. A porous materials production with an electric discharge sintering / D. Minko, K. Belyavin // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – Elsevier, 2016. – Vol. 59. – P. 67 – 77.

12. Тумилович М. В. Пористые порошковые материалы и изделия на их основе для защиты здоровья человека и охраны окружающей среды: получение, свойства, применение / М. В. Тумилович. – Минск : Беларус. навука, 2010. – 365 с. – ISBN 978-985-08-1221-6.

13. Классификация свойств пористых материалов / П. А. Витязь, В. К. Шелег, В. М. Капцевич, В. В. Савич // *Порошковая металлургия*. – 1986. – № 12. – С. 72 – 79.

14. Панов В. С. Технология получения и свойства спеченных материалов и изделий из них : Лабораторный практикум / В. С. Панов, В. К. Нарва, Л. В. Дубинина. – М. : МИСиС, 2007. – 93 с.

15. Pore classification in the characterization of porous materials : A perspective / V. D. Zdravkov, J. J. Cermak, M. Sefara, J. Janku // *Central European Journal of Chemistry*. – Versita, 2007. – Vol. 5. – P. 385 – 395.

16. Recommendations for the characterization of porous solids : Technical Report / J. Rouquerol, D. Avnir, C.W. Fairbridge [et al.] // *Pure Appl. Chem.* – Great Britain, 1994. – Vol. 66. – P. 1739 – 1758.

17. Kodikara J. Changes in clay structure and behaviour due to wetting and drying / J. Kodikara, S. L. Barbour, D. G. Fredlund // *Australian Geomechanics Society*. – Barton, 1999. – P. 179 – 185.

18. Dubinin M. M. Micropore structures of charcoal adsorbents : A general characterization of micro- and supermicropores in the fissure model / M. M. Dubinin // *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR*. – 1979. – Vol. 8. – P. 1691 – 1696.

19. Черемской П. А. Методы исследования пористости твердых тел // П. А. Черемской. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 109 с.

20. Технологія виробництв порошкових та композиційних матеріалів: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для спеціальності

«Композиційні та порошкові матеріали, покриття» / А. В. Мініцький, М. А. Сисоєв, В. А. Маслюк, Я. В. Заулічний. – К. : НТУУ «КПІ», 2011. – 52 с.

21. Neikov O. D. Handbook of Non-Ferrous Metal Powders: Technologies and Applications // O. D. Neikov. – Elsevier, 2019. – P. 323 – 349.

22. Tvergaard V. Porous Metal Products / V. Tvegaard, C. F. Niordson. – PMOVER, 2010. – 36 p.

23. Руденко Н. А. Получение и свойства высокопористых материалов на основе порошка железа / Н. А. Руденко, А. М. Лаптев // Производство изделий из порошковых материалов. – Харьков : Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, 2009. – № 5. – С. 23 – 25.

24. Шембель Н. Л. Высокопористые тугоплавкие материалы на основе карбидов переходных металлов / Н. Л. Шембель, И. Д. Симонов-Емельянов // Порошковая металлургия. – 2001. – № 1. – С. 31 – 37.

25. Liu P. S. Making Porous Metals / P. S. Liu, G. F. Chen // Porous Materials. – Elsevier, 2014. – P. 21 – 112.

26. Shapovalov V. Porous Metals / V. Shapovalov. – MRS BULLETIN, 2013. – P. 24 – 28.

27. Создание высокопористого материала с иерархической структурой методом спекания нанопорошка никеля с использованием бикарбоната аммония в качестве порообразователя / А. Г. Гнедовец А. Б. Анкудинов, В. А. Зеленский, М. И. Алымов // Новые технологии получения и обработки материалов. – М. : Перспективные материалы, 2018. – № 9. – С. 68 – 79.

28. Effect of sintering time on the microstructure of porous tantalum / S. Wei, Y. Bangchao, Z. Xuanhong, M. Jianhua // Rare Metal Materials and Engineering. – Elsevier, 2015. – Vol. 44. – P. 319 – 322.

29. Wang B. On the compressive behavior of sintered porous coppers with low-to-medium porosities – Part II: Preparation and microstructure / B. Wang, E. Zhang // International Journal of Mechanical Science. – Elsevier, 2008. – Vol. 50. – P. 550 – 558.

30. Получение пористой трубки из порошка карбида титана / М. И. Алымов, В. С. Шустов, А. Б. Анкудинов, В. А. Зеленский. – М. : Перспективные материалы, 2011. – № 9. – С. 94 – 99.

31. Пат. 2444418 С1 РФ. Способ изготовления спеченных пористых изделий из псевдосплава на основе вольфрама / Белов В. Ю., Баранов Г. В., Качалин Н. И., Малинов В. И. – № 2010125194 ; заявл. 18.06.2006 ; опубл. 10.03.2012, Бюл. № 03/2012.

32. Effect of transference velocity and hydrogen pressure on porosity and pore morphology of lotus-type porous copper fabricated by a continuous casting technique / J. S. Park, S. K. Hyun, S. Suzuki, H. Nakajima // *Acta Materialia*. – Elsevier, 2007. – № 16. – P. 5646 – 5654.

33. Effect of crystallographic texture on mechanical properties in porous magnesium with oriented cylindrical pores / M. Tane, T. Mayama, A. Odaa, H. Nakajimaa // *Acta Materialia*. – Elsevier, 2015. – № 22. – P. 80 – 94.

34. Banhart J. Metal foams near commercialization / J. Banhart, J. Baumeister, M. Weber // *Metal Powder Report*. – Elsevier, 1997. – Vol. 52. – P. 38 – 41.

35. Wang F. The research and development of metallic foams / F. Wang, L. Wang // *Acta Materialia*. – Elsevier, 2000. – № 8. – P. 48 – 51.

36. Fatigue behavior of highly porous titanium produced by powder metallurgy with temporary space holders / S. Ozbilen, D. Liebert, T. Beck, M. Bram // *Material Science and Engineering*. – Elsevier, 2016. – Vol. 60. – P. 446 – 457.

37. Surface modification of highly porous titanium by plasma treatment / N. F. Daudt, M. Bram, A. P. Cysne Barbosa, C. Alves Jr. // *Materials Letters*. – Elsevier, 2015. – Vol. 141. – P. 194 – 197.

38. Степанчук А. М. Теоретичні та технологічні основи отримання порошків металів, сплавів і тугоплавких сполук. – К. : «Політехніка», 2006. – 353 с.

39. The development of porous titanium products using slip casting / Q. Xua, B. Gabbitas, S. Matthews, D. Zhanga // *Journal of Materials Processing Technology*. – Elsevier, 2013. – Vol. 213. – P. 1440 – 1446.

40. Fei Li. Optimization of non-aqueous nickel slips for manufacture of MCFC electrodes by tape casting method / Fei Li, Chun-ming Wang, Ke-ao Hu // *Materials Research Bulletin*. – Elsevier, 2002. – Vol. 37. – P. 1907 – 1921.

41. Осокин Е. Н. Процессы порошковой металлургии: курс лекций / Е. Н. Осокин, О. А. Артемьева. – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – 168 с.

42. Analysis of the formation of FeAl with a high open porosity during electric current-assisted sintering of loosely packed Fe-Al powder mixtures / D. D. Dudina, B. B. Bokhonov, M. A. Legan [et al.] // *Vacuum*. – Elsevier, 2017. – Vol. 146. – P. 74 – 78.

43. Fabrication of porous copper by unidirectional solidification under hydrogen and its properties / H. Nakajima, S. K. Hyun, K. Ohashi, K. Ota // *Physicochemical and Engineering Aspects*. – Osaka : Colloids and Surfaces, 2001. – P. 209 – 214.

44. Bewerse C. Porous shape-memory NiTi-Nb with microchannel arrays / C. Bewerse, L. C. Brinson, D. C. Dunand // *Acta Materialia*. – Elsevier, 2016. – P. 83 – 93.

45. Kennedy A. R. Porous titanium manufactured by a novel powder tapping method using spherical salt bead space holders: Characterisation and mechanical properties / A. R. Kennedy, Jiangang Jia, A. R. Sibbiq // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – Elsevier, 2015. – Vol. 48. – P. 229 – 240.

46. Minko D. A porous materials production with an electric discharge sintering / D. Minko, K. Belyavin // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – Elsevier, 2016. – Vol. 59. – P. 67 – 77.

47. Степанчук А.М. Теорія і технологія пресування порошкових матеріалів : Підручник / А. М. Степанчук. – К. : ЗАО “ВІПОЛ”, 2012. – 321 с.

48. Скороход В. В. Физико-металлургические основы спекания порошков // В. В. Скороход, С. М. Солонин. – М. : Металлургия, 1984. – 159 с.

49. Компьютерное моделирование эволюции микроструктуры полидисперсных материалов при спекании / Р. М. Кадушников, Д. М. Алиевский, В. М. Алиевский, А. Р. Бекетов // *Порошковая металлургия*. – 1991. – № 5. – С. 5 – 10.

50. Андриевский Р. А. О зональном обособлении при спекании ультрадисперсного никелевого порошка / Р. А. Андриевский, С. Э. Зеер // Порошковая металлургия. – 1985. – № 7. – С. 39 – 42.

51. Документація. Закон України «Про охорону праці». – [Чинний від 1992-10-14]. – К. : Верховна Рада України, 1992. – № 49.

52. Основи охорони праці : Підручник / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний [ та інш.]. – К. : «Основа», 2006. – 448 с.

53. Документація. Производственные здания: СНиП 2.09.02-85. – [Действующий от 1987-01-01]. – М. : Госстрой СССР, 1987.

54. Экономика труда и социально-трудовые отношения / Под ред. Г. Г. Мешовяна, Р. П. Колосовой. — М. : Изд-во Моск. ун-та, 1996.

55. Документація. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень: ДСН 3.3.6.042-99. – [Чинний від 1999-12-01]. – К. : Міністерство охорони здоров'я України, 1999.

56. ДБН В 2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення. – [Чинний від 2006-10-01]. – К. : Держстандарт України, 2008.

57. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях: методичні вказівки до виконання розділу у випускних роботах здобувачів освітнього ступеню магістр усіх спеціальностей інженерно-фізичного факультету / за заг. ред. В. В. Зацарного. – К. : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». – 69 с.

58. Документація. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку: ДСН 3.3.6.037-99. – [Чинний від 1999-12-01]. – К. : Міністерство охорони здоров'я України, 1999.

59. Документація. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації: ДСН 3.3.6.039-99. – [Чинний від 1999-12-01]. – К. : Міністерство охорони здоров'я України, 1999.

60. Гандзюк М. П. Основи охорони праці / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський. – К. : Каравела, 2011. – с. 384.

61. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – К. : Держстандарт України, 1999.

62. Кодекс цивільного захисту України // Відомості Верховної Ради України. – К. : Верховна Рада України, 2013. – № 34. – С. 1802.

63. Закон України «Про інноваційну діяльність» // Відомості Верховної Ради України. – К. : Верховна Рада України, 2002. – № 36.

64. Вознюк Т. К. Загальні економічні тенденції інноваційного розвитку економіки в умовах інтеграції в міжнародний економічний простір / Т. К. Вознюк // Економічні науки. – Хмельницький, 2014. – С. 11 – 14.