

Міністерство освіти і науки України  
Луцький національний технічний університет  
Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій  
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ  
ФІЛЬТРУЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ВІДХОДІВ  
ПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА**

**MODELING THE PROCESS OF OBTAINING FILTERING  
MATERIALS FROM INDUSTRIAL PRODUCTION WASTE**

спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та

робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи АВм-21  
АЛЕКСЮК Сергій Миколайович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник:  
д.т.н., професор  
ПОВСТЯНОЙ Олександр Юрійович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

к.т.н., доцент

Гарант освітньої програми:

ГУМЕНЮК Павло Олександрович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Луцьк – 2025 року

# ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Ступінь вищої освіти: *магістр*

Галузь знань: *17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації*

Спеціальність: *174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка*

Освітня програма: *«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

О. Ю. Повстяной

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ДРУГОГО (МАГІСТЕРСЬКОГО) РІВНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ

*Алексюка Сергія Миколайовича*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Моделювання процесу отримання фільтруючих матеріалів із відходів промислового виробництва*

Керівник роботи: *д.т.н., професор Повстяной Олександр Юрійович*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «27» червня 2025 року №304/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: *«1» грудня 2025 року*

3. Вихідні дані до роботи: *існуючі технології отримання порошкових фільтруючих матеріалів, властивості порошку ШХ15, модельні уявлення процесів ущільнення порошків*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

*1. Аналіз сучасного стану та розвитку процесів технології виготовлення фільтруючих матеріалів. 2. Практичні передумови технології отримання фільтруючих матеріалів.*

*3. Аналіз структурно-неоднорідних матеріалів за допомогою дискретного моделювання.*

*4. Моделювання випадкових структур матеріалів частинок різної форми.*

5. Перелік графічного матеріалу :

*графічний матеріал виконано у вигляді презентації, яка складається з 10 слайдів*

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1</i>	<i>Повстяной О.Ю.</i>		
<i>Розділ 2</i>	<i>Повстяной О.Ю.</i>		
<i>Розділ 3</i>	<i>Повстяной О.Ю.</i>		
<i>Розділ 4</i>	<i>Повстяной О.Ю.</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Лапченко Ю. С.</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>			
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Федік Л. Ю.</i>		

7. Дата видачі завдання 27.06.2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Аналіз проблеми за темою роботи та постановка задач</i>	<i>01.09.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
<i>2</i>	<i>Аналіз і вибір напрямків дослідження</i>	<i>10.09.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
<i>3</i>	<i>Теоретичне дослідження та практична реалізація</i>	<i>20.09.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
<i>4</i>	<i>Опис засобів розробки об'єкта проектування</i>	<i>01.10.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
<i>5</i>	<i>Загальні висновки та рекомендації</i>	<i>20.10.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
<i>6</i>	<i>Оформлення роботи</i>	<i>10.11.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
<i>7</i>	<i>Оформлення презентації</i>	<i>20.11.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
<i>8</i>	<i>Здача чистового варіанту кваліфікаційної роботи на кафедру</i>	<i>01.12.2025 р.</i>	<i>виконав</i>

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_  
(підпис)*Алексюк С.М.*  
(прізвище та ініціали)Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)*Повстяной О.Ю.*  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Алексюк С. М. Моделювання процесу отримання фільтруючих матеріалів із відходів промислового виробництва. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків.

Кваліфікаційна робота присвячена аналізу та розробці нових комп'ютерно-імітаційних моделей процесу отримання фільтруючих матеріалів із відходів промислового виробництва з урахуванням фракційного складу та морфології структурних елементів шихти за рахунок оптимізації технології отримання пористих виробів. У даній кваліфікаційній роботі був опроаналізовано з використанням сучасних методів досліджень, статистичної обробки отриманих результатів моделювання процесу отримання фільтруючих матеріалів із відходів промислового виробництва.

Ключові слова: комп'ютерно-інтегровані технології, структура, моделювання, статистична обробка, імітаційна модель, фільтруючий матеріал.

## ANNOTATION

Aleksyuk S. Modeling the process of obtaining filtering materials from industrial waste. Manuscript.

Master's qualification work OP «Automation and computer-integrated technologies» specialty 174 Automation, computer-integrated technologies and robotics. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

Master's qualification work consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of used sources, and appendices.

The qualification work focuses on the analysis and development of new computer-simulation models for the process of obtaining filtering materials from industrial waste, considering the fractional composition and morphology of the structural elements of the charge, while optimizing the technology for producing porous products. In this qualification work, equipment and devices were tested and certified using modern research methods, and statistical analysis was performed on the results obtained from modeling the process of producing filtering materials from industrial waste.

Keywords: computer-integrated technologies, structure, modeling, statistical processing, simulation model, filtering material.

## ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП .....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА РОЗВИТКУ ПРОЦЕСІВ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ФІЛЬТРУЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ.....	11
1.1 Комп'ютерне моделювання як сучасне середовище для прогнозування, моделювання, створення фільтруючих матеріалів.....	11
1.2 Використання промислових відходів промислового виробництва для отримання фільтруючих матеріалів.....	14
1.3 Методи підвищення експлуатаційних властивостей фільтруючих матеріалів.....	15
Висновки по розділу 1.....	19
РОЗДІЛ 2 ПРАКТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ФІЛЬТРУЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ.....	20
2.1 Обладнання та методика отримання фільтрувальних матеріалів з відходів промислового виробництва.....	20
2.2 Моделювання системи автоматизації для виготовлення фільтруючих матеріалів зі відходів промислового виробництва..	22
2.3 Моделювання аналізу та оптимізації процесів формування фільтрувальних матеріалів.....	25
Висновки по розділу 2.....	28
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИСКРЕТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	31
3.1 Моделювання структури матеріалів.....	31
3.2 Ймовірно-геометрична концепція випадкових структур матеріалів.....	32

3.3	Моделювання заповнення простору структури матеріалу на основі випадкового розподілу.....	35
	Висновки по розділу 3.....	
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ВИПАДКОВИХ СТРУКТУР МАТЕРІАЛІВ ЧАСТИНОК РІЗНОЇ ФОРМИ.....		39
4.1	Моделювання випадкових структур матеріалів частинок сферичної форми.....	39
4.2	Моделювання випадкових структур матеріалів частинок несферичної форми.....	42
4.3	Функція радіального розподілу статичних сумішей пуасонівського типу.....	45
	Висновки по розділу 4 .....	50
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ .....		51
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....		52
ДОДАТКИ .....		55

## ВСТУП

Актуальність теми. Характерною особливістю переважної більшості сучасних технологій матеріалознавства є використання гранульованих матеріалів як основної вихідної сировини. Це стосується не лише традиційних процесів порошкової металургії, але й технологій нанесення порошкових покриттів, нанотехнологічних процесів та інших технологічних методів. Слід також відзначити тенденцію до подальшого розвитку класичних технологій порошкової металургії шляхом інтеграції нових процесів, зокрема струменевого формування та інжекційного пресування.

Поведінка гранульованої сировини на етапах консолідації або у попередніх технологічних фазах істотно визначає експлуатаційні характеристики кінцевого виробу. Тому дослідження цієї поведінки в умовах, що комплексно відтворюють реальні технологічні процеси, становить предмет особливої наукової уваги. Незважаючи на значні досягнення у створенні та розвитку моделей переробки порошкових матеріалів низка важливих питань досі залишається недостатньо висвітленою. Крім того, поява нових технологічних рішень зумовлює формування нових науково-технічних задач.

Сучасний етап розвитку суспільства характеризується глибокою інтеграцією комп'ютерних та інформаційних технологій у всі сфери діяльності людини, що забезпечує глобалізацію інформаційних потоків та підвищення ефективності науково-технічних процесів. Використання таких технологій дає змогу перейти від емпіричного спостереження до прогнозування властивостей матеріалів, виробів і технологічних процесів. Порошкова металургія, зокрема, дозволяє вирішувати завдання екологічної безпеки, забезпечувати безвідходне виробництво широкого спектра продукції, підвищувати енерго- та ресурсоефективність, а також зменшувати трудомісткість виробництва завдяки оптимізації технологічних операцій та їх автоматизації.

У таких умовах принципово важливим є врахування специфічних характеристик гранульованого середовища як вихідної сировини. Це визначає

необхідність комплексного дослідження процесів переробки гранульованих матеріалів з урахуванням закономірностей їх поведінки в різних технологічних режимах для отримання фільтруючих матеріалів із відходів промислового виробництва.

Мета наукового дослідження полягає у проведенні аналізу та розробленні нових комп'ютерно-імітаційних моделей для отримання фільтруючих матеріалів із відходів промислового виробництва із врахуванням фракційного складу та морфологічних характеристик компонентів шихти, а також в оптимізації технологічних параметрів отримання пористих виробів.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі наукові завдання:

1. Здійснити аналіз існуючих методів моделювання структури пресованих матеріалів і визначити напрями їх удосконалення.

2. Проаналізувати сучасні комп'ютерно-імітаційні моделі структур пористих матеріалів для отримання фільтруючих матеріалів із відходів промислового виробництва.

3. Розглянути алгоритми оцінювання впливу технологічних параметрів засипання порошків на їх пористість.

4. Розробити методикау дослідження ключових параметрів процесу отримання фільтруючих матеріалів із відходів промислового виробництва із застосуванням комп'ютерних металографічних методів засипки порошку у форму.

Об'єкт дослідження – пресовані та спечені матеріали порошкової металургії.

Предмет дослідження – закономірності формування пористої структури матеріалів шляхом комп'ютерного моделювання процесів отримання фільтруючих матеріалів із відходів промислового виробництва

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Запропоновано нові методи та алгоритми комп'ютерно-імітаційного моделювання структури пористих матеріалів.

2. Удосконалено методику дослідження ключових параметрів засипання порошків шляхом інтеграції комп'ютерно-імітаційного моделювання.

3. Отримано функціональні залежності властивостей пористих матеріалів від основних параметрів технології отримання фільтруючих матеріалів із відходів промислового виробництва;

4. Запропоновано методологію моделювання фізичних процесів у фільтрувальних матеріалах у середовищах рідин, газів та повітря із застосуванням програмного комплексу SolidWorks.

Апробація результатів кваліфікаційної роботи магістра: Результати роботи доповідались та обговорювались на XIII Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції молодих учених та студентів «Actual problems of automation and control». Оpubлікована стаття Алексюк С. М. Моделювання процесів створення пористих порошкових матеріалів на основі відходів промислового виробництва з використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій. *Actual problems of automation and control*: матеріали XIII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів. Випуск № 13. Луцьк: ЛНТУ, 2025. С. 8-12.

Особистий внесок магістранта. Основні результати та положення, рекомендації отримані автором самостійно з відповідним консультуванням свого наукового керівника.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА РОЗВИТКУ ПРОЦЕСІВ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ФІЛЬТРУЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ

#### 1.1 Комп'ютерне моделювання як сучасне середовище для прогнозування, моделювання, створення фільтруючих матеріалів

Традиційно наукові завдання матеріалознавства розв'язуються із застосуванням широкого спектра експериментальних методів дослідження структурних характеристик та функціональних властивостей матеріалів. Проте впродовж останніх десятиліть спостерігається стрімкий розвиток обчислювальної техніки та спеціалізованих програмних комплексів, що перетворюються на унікальний інструментарій для проведення комп'ютерних експериментів [1]. Зокрема, моделювання високотемпературних, дифузійних, проникних та корозійних процесів за допомогою комп'ютерних методів часто є єдино можливим шляхом отримання достовірних даних, а також сприяє виявленню чинників, відповідальних за формування дефектів структури. Актуальність таких досліджень посилюється завдяки поширенню інтегрованих програмних платформ і прикладних програмних середовищ, що забезпечують можливість реалізації багаторівневих обчислювальних моделей.

В останні роки особливої уваги набуло питання розроблення нових комп'ютерних методів проектування, що враховують мікроструктурні особливості конструкційних матеріалів [2]. У межах такого підходу технологічні процеси, мікроструктура металевих матеріалів та їх експлуатаційні властивості розглядаються як взаємопов'язані інформаційні поля, для яких прагнуть формалізувати як прямі, так і зворотні залежності. Це дає можливість оптимізувати обчислювальні витрати шляхом мінімізації ресурсів, необхідних для оброблення комп'ютерних моделей. У сучасних наукових дослідженнях [3] основний акцент робиться на анізотропних металевих матеріалах, стан яких описується ортогональним тензором

напружень, що відображає локальну орієнтацію структурних елементів у кожній окремій комірці дискретизації мікроструктури.

Розвиток математичного апарату для опису багаторівневих ефектів у межах напряму, що інтегрує обчислювальне та інформаційне матеріалознавство. Така концепція забезпечує можливість встановлення кореляцій між механізмами руйнування матеріалу та мікроструктурними особливостями, які виступають концентраторами напружень та ініціюють розвиток дефектів. Крім того, подібний підхід створює умови для формування високоточних моделей, придатних для комп'ютерної симуляції фізичних та механічних процесів, що відбуваються у фільтруючих матеріалах.

Сучасний рівень розвитку технологій отримання фільтрувальних матеріалів з одного боку, обмежується можливостями наявних технологічних методів їх формування, а з іншого – недостатньою повнотою опису залежностей між технологічними параметрами та комплексом експлуатаційних властивостей таких матеріалів.

З метою забезпечення необхідної тонкості фільтрації та підвищення проникності й міцності виробів до порошкової суміші вводять наповнювачі-пороутворювачі. Їх використання активізує дифузійні процеси, що сприяє формуванню міцних контактів між частинками порошку [4]. Рівномірність розподілу пор по об'єму пористих проникних матеріалів (ППМ) забезпечують методи гідростатичного, гідродинамічного та вібраційного пресування, а також інші варіанти технологічного ущільнення [3].

У роботі [5] запропоновано спосіб отримання ППМ шляхом пресування металевого порошку для формування трубчастої заготовки довільним методом, після чого здійснюється спікання при температурі 0,7-0,9 від температури плавлення. Також існує технологія створення виробів із анізотропною пористою структурою, що включає формування плоскої порошкової заготовки, її спікання та подальше деформування згинанням за циліндричною або сферичною поверхнею.

У роботі [6] описано метод отримання ППМ шляхом деформування спеченої заготовки методом холодної прокатки. Однак головним недоліком зазначених способів є низька проникність отриманих виробів, зумовлена зменшенням загальної пористості.

Високоєфективним різновидом ППМ з неоднорідною структурою є багат шарові матеріали, в яких кожен шар виготовлено з порошку різного гранулометричного складу. Фільтрувальні елементи з таких матеріалів демонструють значно більшу брудоемність, тривалість експлуатації та продуктивність порівняно з одношаровими аналогами [3].

До найбільш перспективних способів формування ППМ зі змінною пористістю та варіативними розмірами пор належать методи вібраційного ущільнення металевих порошків, а також технології пошарового формування порошкової суміші з використанням пороутворювачів.

Аналіз сучасних технологічних рішень щодо отримання ППМ свідчить, що процеси консолідації на стадії формування заготовок відіграють ключову роль у забезпеченні якості та економічної ефективності виготовлення виробів. Однією із найбільш перспективних технологій є сухе радіально-ізостатичне пресування (СР-ІП) [3], за якого форма з матеріалом, що ущільнюється, ізольована від робочої рідини. Такий підхід дозволяє реалізувати переваги традиційних схем пресування, мінімізуючи їхні недоліки. Радіальна схема ущільнення є найбільш придатною для формування високопористих матеріалів і може слугувати базою для створення нових та удосконалення існуючих технологій виготовлення ППМ, виробничого обладнання та інструменту, а також нових видів багат шарових фільтрувальних матеріалів.

Спікання є однією з основних технологічних операцій, що забезпечує формування пористої структури та необхідних експлуатаційних характеристик ППМ. Основними технологічними параметрами процесу є температурний режим та середовище спікання, а суттєвим фактором впливу є також тиск пресування вихідних заготовок. Зі збільшенням густини пресовок

величина усадки під час спікання зменшується, оскільки відносне підвищення густини є більш значним у зразках, спресованих при нижчих тисках.

Відомо, що ключовими характеристиками ППМ є розміри пор та коефіцієнт проникності, які визначаються під час вибору матеріалу для конкретного практичного застосування. Однак в умовах експлуатації ці матеріали зазнають механічного навантаження, що вимагає врахування їх міцнісних властивостей. Тому важливим є встановлення таких режимів спікання заготовок, які забезпечують необхідний рівень міцності поряд із збереженням заданої пористої структури.

## **1.2 Використання промислових відходів промислового виробництва для отримання фільтруючих матеріалів**

Коефіцієнт утилізації відходів металургійних і машинобудівних виробництв у середньому не перевищує 20 %. Це зумовлює, по-перше, накопичення значних обсягів техногенних відходів, а по-друге – необхідність пошуку нових ефективних шляхів їх повернення у виробничий цикл. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є застосування порошкових технологій як засобу переробки вторинних ресурсів.

Важливою особливістю таких технологій є здатність використовувати як вихідну сировину матеріали у порошкоподібному стані або забезпечувати ефективну трансформацію недиспергованої сировини у порошкову форму. Крім того, сучасні технологічні підходи [5] пропонують широкий спектр методів для класифікації порошків за різними ознаками (дисперсність, морфологія частинок, електромагнітні властивості, густина тощо) та їх раціонального змішування. Це створює можливості для отримання як однокомпонентних монодисперсних порошків зі сферичною формою частинок, так і багатоконпонентних полідисперсних сумішей – шихти високого ступеня однорідності.

Розроблено значний перелік технологій отримання порошку зі стружкових та шламових відходів. Як вихідна сировина шліфувальні шлами мають низку переваг, зокрема:

1. Високий вміст металевої складової.
2. Наявність легуючих елементів, що дозволяють використовувати отриманий порошок для виготовлення фільтрувальних матеріалів.
3. Низький ступінь окиснення металевих частинок.
4. Відсутність потреби у додатковому подрібненні металевої фази завдяки достатній дисперсності частинок.
5. Низьку собівартість сировини.

Стружкові відходи сталі ШХ15 у вихідному стані не придатні для використання у традиційних технологіях порошкової металургії, що зумовлює необхідність їх попереднього диспергування як початкової операції технологічного процесу. Порошок, отриманий шляхом розмелу стружки сталі ШХ15, піддають відпалу у водневому середовищі протягом однієї години при температурі 900–950 °С, після чого пресують у гідростатичній установці під тиском 500 МПа. Отримані зразки характеризуються пористістю 2-4 % та твердістю HRC = 43...50. Таким чином, для виготовлення якісних спечених виробів зі стружкових відходів необхідно забезпечити їх попереднє подрібнення та подальше ущільнення за високих тисків, що потребує значних енергетичних витрат.

Шламові металомісткі відходи є економічно доцільною сировиною для подальшої переробки, оскільки їх використання сприяє збереженню природних ресурсів та оптимізації матеріаломісткості виробництва.

### **1.3 Методи підвищення експлуатаційних властивостей фільтруючих матеріалів**

Сучасний етап розвитку матеріалознавства та порошкової металургії характеризується появою нових концепцій щодо створення та вдосконалення

технологій отримання пористих проникних матеріалів (ППМ). Ці підходи спрямовані передусім на забезпечення високих експлуатаційних характеристик виробів та зниження їх собівартості [5].

До основних методів підвищення зносостійкості та протикорозійного захисту легких сплавів належать:

1. Електрохімічне осадження твердих покриттів на основі хрому, нікелю та інших металів і сплавів, а також композиційних електрохімічних покриттів (КЕП).

2. Вакуумне напилення покриттів, включаючи методи іонної імплантації.

3. Різні методи оксидування.

4. Лазерне модифікування поверхневого шару, що передбачає оплавлення та введення дисперсних частинок карбідів, оксидів, нітридів й інших сполук у поверхневу зону матеріалу.

Існує значна кількість технологічних підходів до отримання композиційних порошків, зокрема порошків із плакованою оболонкою. Кожен із методів плакування порошків має певні переваги та обмеження. Наприклад, поверхневе електролітичне осадження (рис. 1.1) не може бути безпосередньо застосоване для неелектропровідних порошків, оскільки вони потребують попередньої металізації іншими способами. Обмеженою є також можливість створення оболонок із карбідів, нітридів та інших надтвердих сполук.

Електролітичні та хімічні покриття широко використовують для відновлення та зміцнення деталей (зокрема, хромування, залізнення, нікелювання), для антикорозійного захисту, а також для покращення зовнішнього вигляду виробів (нікелювання, хромування, цинкування, кадміювання та ін.).

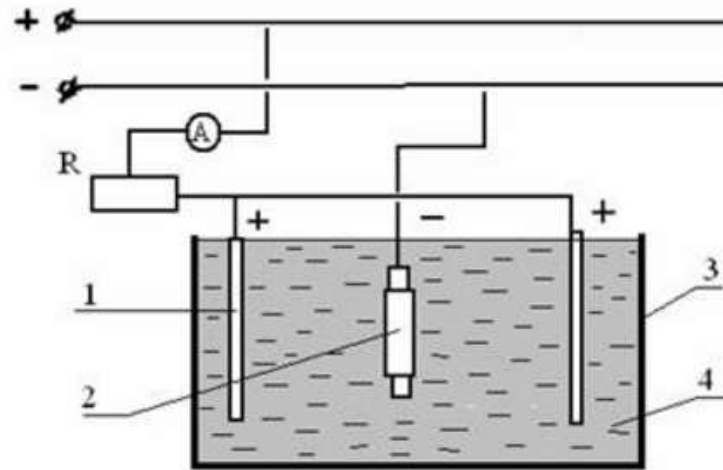


Рисунок 1.1 – Схема установки для електролітичного осадження металу:  
1 – матеріал покриття(анод); 2 – виріб(катод); 3 – ванна; 4 – електроліт [7]

Завдяки хімічній металізації можна формувати одно- і багатокомпонентні шари на різних фільтруючих матеріалах (рис.1.2). Недолік цього способу – необхідність промивання і сушіння порошоків.

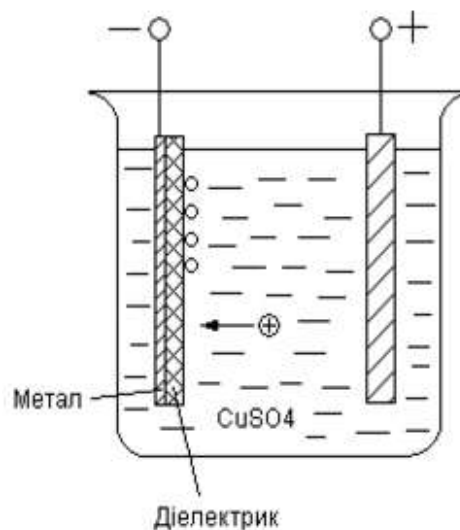


Рисунок 1.2 – Схема хімічної металізації [8]

Електрометалізація, або електродугове наплення, належить до ефективних методів нанесення металевих покриттів на поверхні як металевих, так і неметалевих матеріалів. Цей метод має тривалу історію застосування,

насамперед для формування цинкових та алюмінієвих антикорозійних шарів, а також для нанесення зносостійких і відновних покриттів.

Захисне покриття утворюють шляхом розпилення суцільного металевого дроту за допомогою електродугового металізатора, оснащеного модифікованою розпилювальною системою (рис. 1.3). У такій конструкції електрична дуга горить безпосередньо в каналі розпилювальної головки, що забезпечує отримання тонкодисперсних високоякісних покриттів [9].

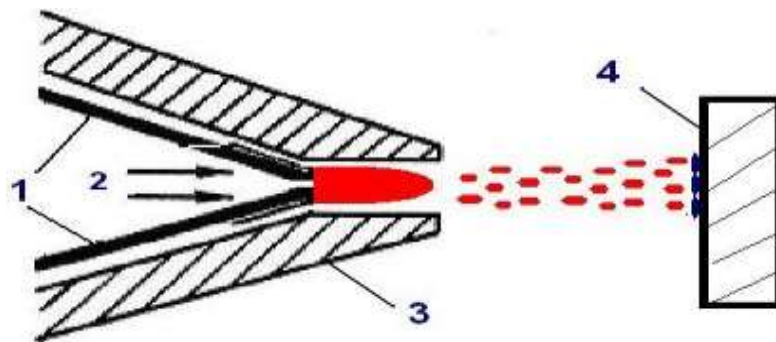


Рисунок 1.3 – Процес електродугового напилення: 1 – дроти; 2 – повітряний струмінь; 3 – корпус розпилювальної головки; 4 – підклад [9]

Процес нанесення покриття на зразок передбачає такі операції: знежирення зразка; дробоструменеву обробку; напилення зразків; контроль якості напилення; шліфування зразків.

Властивості отриманих покриттів визначаються хімічним складом електроліту та параметрами режиму плазмового електролітичного окисдування (ПЕО). Для забезпечення керованого синтезу поверхневих шарів заданого складу на металах і сплавах у процесі ПЕО необхідно підбирати склад електроліту та режими окисдування з урахуванням низки принципів положень [10]. Зокрема, слід враховувати можливі зміни форм існування аніонних комплексів у розчині залежно від значення рН як у об'ємі електроліту, так і в локалізованій приелектродній області.

## Висновки по розділу 1

Станом на сьогодні в Україні накопичено близько 25 млрд т твердих промислових відходів. Дані інвентаризації та статистичної звітності за останнє десятиріччя свідчать, що щороку на підприємствах України утворюється понад 1 млрд т твердих промислових відходів, з яких близько 100 млн т становлять токсичні речовини, а 2,5-3,5 млн т – високотоксичні відходи, що за європейською класифікацією відносяться до першого класу небезпеки. Кількість підприємств, на яких фіксують токсичні відходи, перевищує 2500. Загальний обсяг накопичених токсичних відходів становить приблизно 4,5 млрд т, а щорічні витрати на їх зберігання та утримання перевищують 25 % вартості виробленої продукції.

Аналіз сучасних тенденцій розвитку технологій створення фільтруючих матеріалів засвідчує актуальність комплексного дослідження і формування науково-практичних принципів прогнозування, моделювання структури та властивостей фільтруючих матеріалів, виготовлених із промислових відходів. Виникає об'єктивна потреба у створенні нової технології отримання порошкових виробів з підвищеними механічними та функціональними характеристиками та регульованою пористістю, призначених для очищення рідин і газів, із широким використанням комп'ютерно-інформаційних технологій.

Необхідність і своєчасність розроблення таких концептуальних та технологічних принципів управління процесами створення фільтруючих матеріалів на основі промислових відходів підтверджуються як екологічною ситуацією, так і стратегічними потребами промисловості у ресурсозбереженні та переробці техногенних відходів.

## РОЗДІЛ 2

### ПРАКТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ФІЛЬТРУЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ

#### 2.1 Обладнання та методика отримання фільтрувальних матеріалів з відходів промислового виробництва

У сучасних умовах розвитку науки й техніки виробничі процеси потребують максимального підвищення ефективності на всіх етапах виготовлення та експлуатації продукції, а також упровадження маловідходних, енерго- та ресурсозберігальних технологій. Одним із ключових напрямів порошкової металургії є створення фільтруючих матеріалів працездатність і сфера застосування яких визначаються формуванням просторово взаємопов'язаної порової структури. Хоча така структура формується протягом усього технологічного циклу, вирішальний вплив на неї має етап виготовлення заготовок [3]. Саме він визначає не лише структуру, геометричні параметри, густину та форму виробів, продуктивність процесу й безпеку праці, але й значною мірою впливає на експлуатаційні властивості кінцевого продукту. Крім того, вибір способу формування заготовок залежить від складності геометричної форми, розмірів виробу та вимог до його функціональних характеристик.

У зв'язку з цим комплексне дослідження закономірностей ущільнення фільтруючих матеріалів, спрямоване на створення та впровадження удосконалених технологій, обладнання й інструменту, є актуальним науковим і практичним завданням сучасного матеріалознавства, порошкової металургії та технологій обробки матеріалів тиском.

Зростання потреби в матеріалах із високою та стабільно регульованою пористістю по об'єму виробу висуває підвищені вимоги до нових раціональних технологій, які мають забезпечувати комплексність властивостей виробів, мінімізацію енергосилових навантажень, безпечність та

гнучкість виробництва [7]. Аналіз наявних технологічних процесів порошкової металургії засвідчує, що етап консолідації фільтруючих матеріалів при формуванні заготовок визначає основні якісні та економічні характеристики майбутніх виробів.

Водночас традиційні процеси пресування – гідростатичне, гідродинамічне, магнітно-імпульсне, еластостатичне, осьове, мундштучне формування, прокатування тощо – хоча й мають певні переваги, проте характеризуються низкою обмежень, що унеможливорює повне задоволення вимог до виготовлення високоякісних виробів. Вибір способу формування фільтруючих матеріалів визначається вимогами до властивостей виробів, енергосиловими затратами, типом виробництва та його культурою.

З метою підвищення надійності та довговічності роботи обладнання була розроблена вдосконалена установка для пресування фільтруючих матеріалів (рис. 2.1).

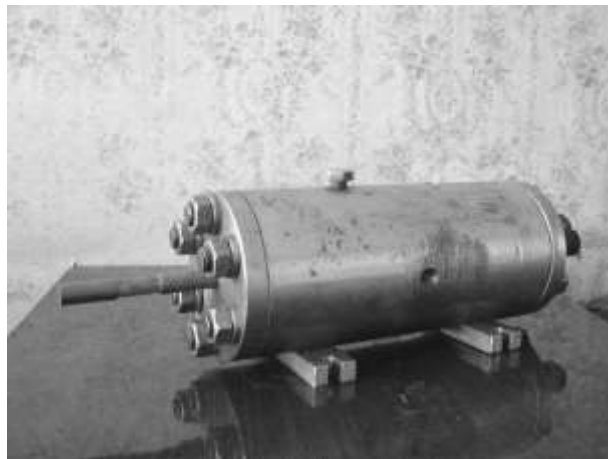


Рисунок 2.1 – Вдосконалена установка для пресування фільтруючих матеріалів [3]

У конструкції запропонованого пристрою основним елементом, що сприймає осьові зусилля, є жорстка циліндрична рама, сформована з набору пластин [3]. Таке конструктивне рішення забезпечує рівномірний розподіл навантаження між пластинами, що дає змогу витримувати значні осьові

зусилля з високим запасом міцності та формувати підвищені тиски пресування автоматизованого пресувального комплексу (рис. 2.2).

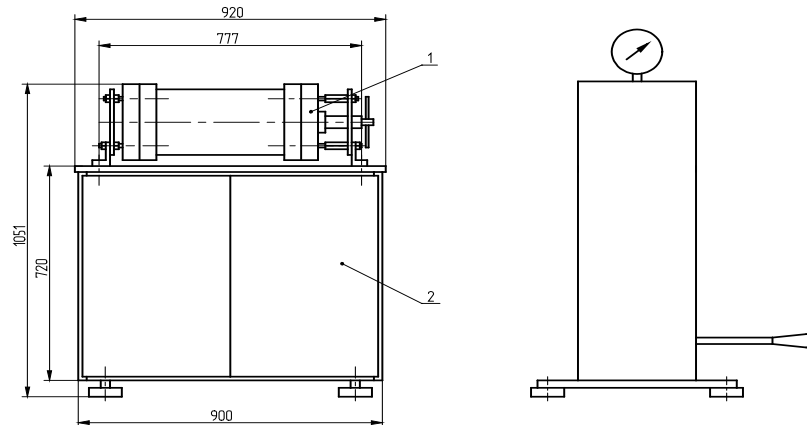


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд автоматизованого пресувального комплексу:  
1 – пристрій для пресування ППМ, 2 – каркас [3]

Пластинчаста рама покращує технологічність конструкції, оскільки корпус під час пресування зазнає лише радіальних та тангенціальних напружень, що підвищує його надійність, а відповідно – і надійність установки загалом.

## 2.2 Моделювання системи автоматизації для виготовлення фільтруючих матеріалів зі відходів промислового виробництва

Розроблений автоматизований технологічний комплекс (рис. 2.2) забезпечує реалізацію процесу сухого радіально-ізостатичного пресування, застосування якого дає змогу виготовляти пористі проникні матеріали різного функціонального призначення з порошкових та інших ущільнювальних матеріалів. Особливо актуальним є отримання виробів складної геометричної форми, а також матеріалів, виготовлених із техногенних відходів промислового виробництва.

Фільтрувальні матеріали повністю відповідають сучасним вимогам до якості продукції відповідного типу. В умовах стійкого зростання вимог до

експлуатаційних характеристик промислових виробів створення фільтруючих матеріалів із гарантованими властивостями є актуальним науково-прикладним завданням. Традиційна технологія порошкової металургії дозволяє виготовляти такі матеріали, однак потребує точного прогнозування та контролю параметрів їх структури на всіх етапах формування. До цих параметрів належать гранулометричний склад і морфологія частинок шихти, щільність заготовки, якість міжчастинкових контактів, схема пресування, величина та характер розподілу пористості і густини по об'єму виробу.

Разом з тим, традиційні методи порошкової металургії не завжди забезпечують однорідність властивостей у товщі матеріалу та не дають можливості отримувати структурні характеристики на високому рівні деталізації. Підвищення ефективності цих технологій, упровадження безвідходного виробництва виробів широкого призначення, зниження енергоємності та трудових витрат, а також здійснення оперативного контролю параметрів структури ППМ стають можливими завдяки використанню комп'ютерного моделювання, комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації виробничих процесів.

Актуальні задачі створення пористих середовищ ефективно розв'язуються за допомогою сучасних методів комп'ютерного моделювання, автоматизованих систем проектування та цифрових технологій, що дозволяють оптимізувати процес отримання фільтруючих матеріалів і забезпечити прогнозовані властивості виробів.

Аналіз існуючих технологічних процесів формування пористих проникних матеріалів показує, що кореляційні зв'язки між складом, структурою та властивостями формуються на всіх етапах технологічного циклу [3]. Водночас початковою і визначальною операцією є заповнення прес-форми порошком, оскільки саме на цьому етапі задаються геометричні параметри, густина, продуктивність, рівень безпеки та технологічної культури, а також формується основа експлуатаційних властивостей майбутнього виробу.

Для створення обладнання різного призначення та оптимізації технологій отримання ППМ доцільним є застосування спеціалізованих систем моделювання, побудованих на принципах об'єктно-орієнтованого підходу та параметризації. У межах розробленої об'єктно-орієнтованої системи автоматизованого проектування механізм параметризації реалізовано на базі систем параметричного креслення та моделювання T-FLEX CAD (рис. 2.3) і Pro/ENGINEER (рис. 2.4), що стали платформою для створення модулів моделювання та параметричного проектування установок для сухого радіально-ізостатичного пресування.

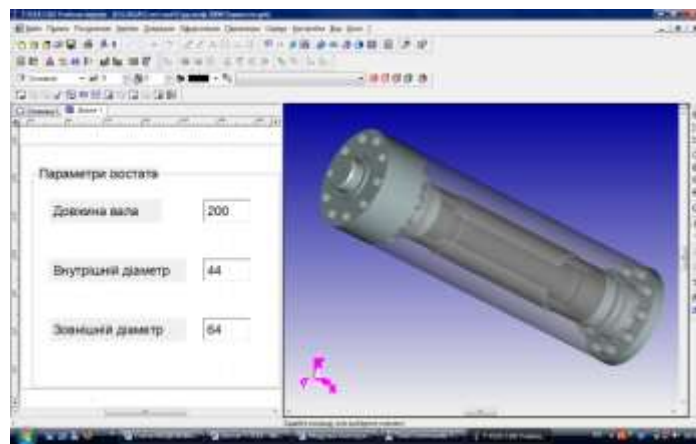


Рисунок 2.3 – Система моделювання параметричного проектування установок для пресування фільтруючих матеріалів на базі T-FLEX CAD

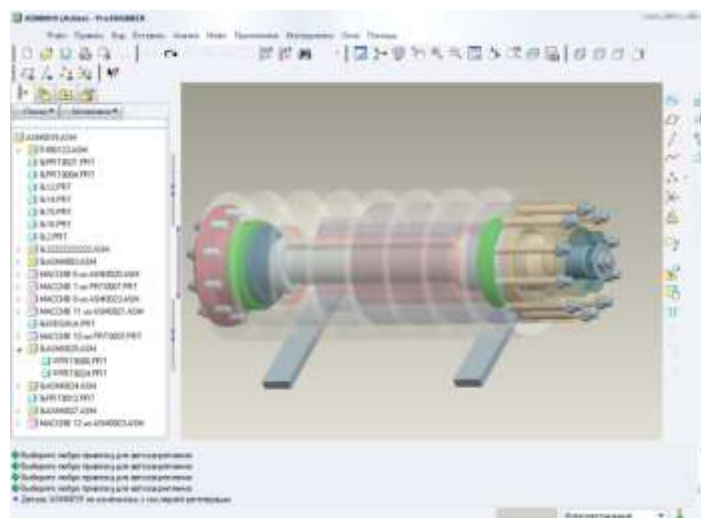


Рисунок 2.4 – Система моделювання параметричного проектування установок для пресування фільтруючих матеріалів на базі Pro/ENGINEER

Прогрес у галузі створення фільтруючих матеріалів тиском значною мірою визначається вдосконаленням процесів пресування. Ці процеси належать до ключових етапів виробничого циклу й визначають не лише геометричні параметри, форму й асортимент продукції, а також рівень енергосилових витрат, але й суттєво впливають на комплекс основних експлуатаційних властивостей кінцевого виробу. У цьому контексті важливим є забезпечення керованості якості продукції, підвищення рівня механізації й автоматизації процесів пресування, модернізації обладнання та інструменту, а також можливість прогнозування властивостей матеріалів уже на початкових стадіях формування. Це, у свою чергу, сприяє формуванню теоретичних засад технології отримання пористих матеріалів.

### **2.3 Моделювання аналізу та оптимізації процесів формування фільтрувальних матеріалів**

Для розв'язання початково-крайових задач застосовуються процедури покрокового інтегрування відповідних рівнянь, які є кінетичними щодо таких параметрів, як пористість. Після виконання інтегрування отримані значення використовують для формування матриці жорсткості системи рівнянь відносно вузлових швидкостей. Аналіз визначальних рівнянь показує, що ця матриця залежить від самих шуканих швидкостей, унаслідок чого кожна обчислювальна ітерація є нелінійною і потребує використання ітераційних методів. У розробленій методиці застосовано процедуру градієнтного спуску, поєднану зі спеціальним алгоритмом вибору початкового наближення.

Для моделювання, аналізу та оптимізації процесів формування пористих циліндричних конструкцій методом радіального ущільнення фільтрувальних матеріалів створено систему «Математика ФІЛЬТР». Теоретичні засади системи ґрунтуються на припущенні, що під час засипання порошку в спеціальну капсулу можна сформувати сукупність коаксіальних циліндричних шарів, заповнених порошками різного типу, які характеризуються відмінними

механічними властивостями. Система «Математика ФІЛЬТР» дає змогу здійснювати аналіз процесу радіального ущільнення системи вкладених пористих циліндрів з різною початковою пористістю.

Функціональні можливості системи включають моделювання процесів перерозподілу щільності, а також зміни геометричних характеристик порошкових і пористих шарів у разі радіального обтиснення капсули зовнішніми силами. Передбачено можливість визначення розподілу щільності (або пористості) у радіальному напрямку на будь-якому етапі деформування, а також розрахунок зміни товщини шарів за умов відомих початкових значень щільності, координат розділових меж та реологічних характеристик матеріалів у спеціально визначеній формі.

Основою розрахункових алгоритмів є теорія пластичного деформування та нелінійно-в'язкої течії стискуваних матеріалів [11]. Система реалізована у середовищі «Математика-3». Необхідні обчислювальні процедури, що включають покрокове інтегрування та ітераційні методи розв'язання систем нелінійних алгебраїчних рівнянь, були додатково розроблені спеціально для цієї системи.

Для запуску програмного комплексу «Математика ФІЛЬТР» користувач вводить початкові значення щільності кожного шару та координати меж між циліндричними оболонками. Реологічні характеристики матеріалів задаються у спеціальному форматі. Передбачається, що поведінка частинок порошку або каркаса пористого матеріалу в кожному шарі описується рівнянням (2.1):

$$\sigma = \sqrt{1+n^2} \sigma_k \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + n^2 \gamma_k}}, \quad (2.1)$$

де  $n$  – часове відчуття;

$\sigma_k$ ,  $\gamma_k$  – параметри апроксимації, які визначаються з аналізу кривої напруження-швидкість деформування для матеріалу частинок порошку ППМ.

Тут константа  $\sigma_k$  розглядаєть як напруженість течії. Для процесів холодної деформації вважають  $n=1$ . Ця система дозволяє враховувати наявність осьового притиску капсули, для чого спільно зі швидкістю радіального обтиснення  $v$  допускається введення осьової швидкості деформації  $e_z$ .

Ця система використовується для розрахунку і оптимізації процесів отримання фільтруючих матеріалів при радіально-ізостатичному пресуванні (рис. 2.5).

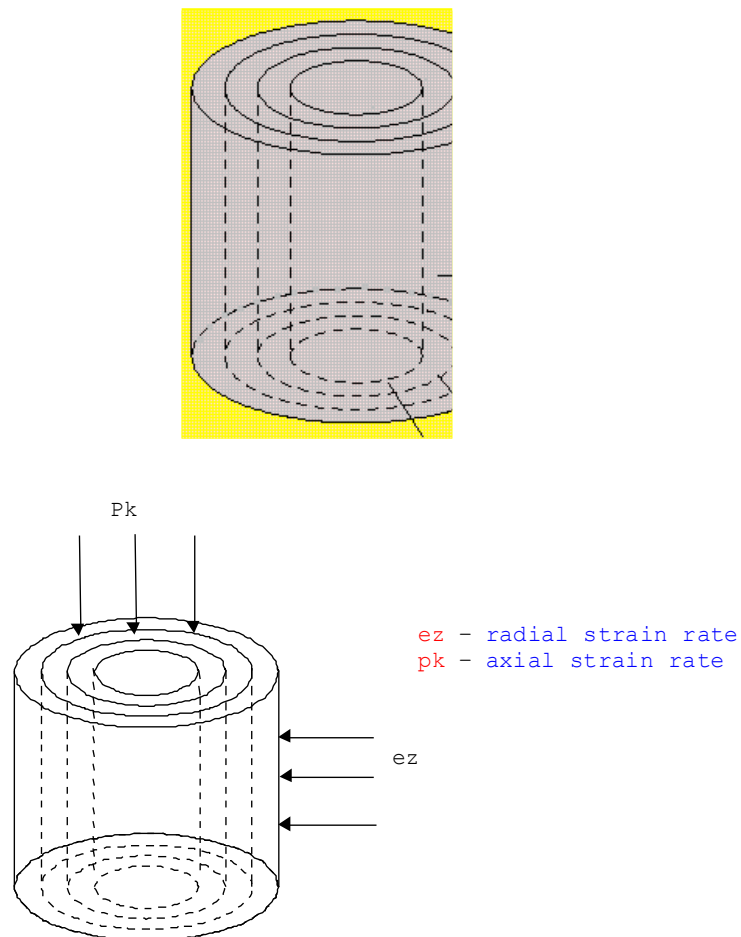


Рисунок 2.5 – Моделювання багатошарового фільтруючого матеріалу з радіусами кожного циліндру

Розподіл густини по радіусу кожного шару фільтруючого матеріалу в різний момент часу деформування показано на рисунку 2.6.

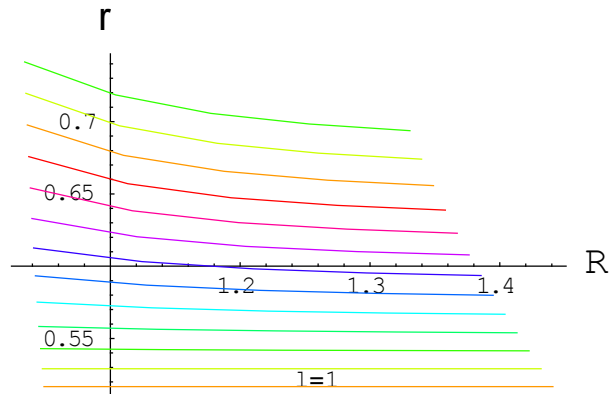


Рисунок 2.6 – Розподіл густини по радіусу кожного шару фільтруючого матеріалу в різний момент часу деформування

Проведене моделювання підтвердило нерівномірність розподілу пористості і якісно відповідає розрахунковим даним [3].

## Висновок до розділу 2

Аналіз сучасного стану модельних досліджень свідчить, що структурні характеристики матеріалів, отриманих у результаті комплексу технологічних операцій отримання фільтруючих матеріалів, є цілком можливим завдяки використанню комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Розроблено комп'ютерну систему, яка дає можливість визначати розподіл густини по радіусу кожного шару фільтруючого матеріалу в різний момент часу деформування. Підтверджено комп'ютерним моделюванням, що при пресуванні фільтрувальних елементів циліндричної форми розподіл величини пористості нерівномірний. Зі збільшенням радіуса величина пористості зростає.

Під час проведення теоретичних міркувань отриманий результат, який дозволяє аналізувати фактори, що сприяють неоднорідності розподілу густини фільтруючого матеріалу.

## РОЗДІЛ 3

### ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ОТРИМАННЯ ФІЛЬТУЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ З ВІДХОДІВ ПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

#### 3.1 Ущільнення фільтруючих матеріалів при радіально-ізостатичному пресуванні

Технологічні параметри процесу пресування визначають геометричні розміри, форму та просторовий розподіл властивостей виробів, що безпосередньо впливає на їх експлуатаційні характеристики, зокрема на ефективність і надійність роботи фільтрувальних елементів.

Завдання вибору оптимальних параметрів пресування є складним через необхідність одночасного врахування багатьох взаємопов'язаних факторів. У зв'язку з цим поряд із традиційними експериментальними методами дедалі ширше застосовуються методи попереднього комп'ютерного моделювання. Їх використання стало можливим завдяки суттєвому прогресу у розумінні закономірностей поведінки порошкових матеріалів під час ущільнення та створенню відповідного математичного апарату для опису цих процесів.

Важливою складовою досліджень є проведення модельних експериментів з прогнозування залежностей між технологічними параметрами формування та властивостями пористих матеріалів. Для цього застосовуються аналітичні, числові та числово-аналітичні методи, що дозволяють комплексно описати процес ущільнення та структурування матеріалу.

Розроблення та впровадження нових пористих проникних матеріалів є важливою науково-технічною задачею, розв'язання якої значною мірою прискорюється завдяки засобам автоматизованого інжинірингу. Зі зростанням обчислювальної потужності інформаційних систем багатовимірне комп'ютерне моделювання стає дедалі ефективнішим інструментом для оптимізації технологічних процесів і прогнозування властивостей матеріалів.

Комп'ютерне моделювання поведінки фільтрувальних елементів під час радіально-ізостатичного пресування, визначення закономірностей зміни їх

форми, розподілу пористості та інших параметрів, що формують експлуатаційні властивості кінцевих виробів, становить актуальну й важливу науково-технічну проблему [3].

Фільтрувальні матеріали, виконані у формі тіл обертання (труб, дисків, колб тощо), набувають дедалі ширшого застосування в різних галузях техніки завдяки високій технологічності таких конструкцій. Однією з ключових вимог до геометрії цих виробів є забезпечення високої точності зовнішніх та внутрішніх розмірів, що визначає їх функціональну придатність у складі фільтрувальних або технологічних систем.

Активно використовувані фільтрувальні матеріали характеризуються високою технологічністю виготовлення, а їх форма та розміри регламентуються габаритами обладнання, у складі якого вони експлуатуються. Підвищення продуктивності таких пристроїв без зміни їх габаритів є важливим чинником зростання загальної ефективності їх використання.

Обчислення форми заготовки, що ущільнюється, а також полів щільності, напружень і деформацій здійснювали за допомогою методу скінченних елементів.

Для процесів пресування найбільш придатними є еластичні оболонки з поліуретану, який здатний витримувати багаторазові деформації при тисках до 600 МПа. Такі оболонки зберігають пружні властивості, мають хорошу технологічність у виробництві та характеризуються високою адгезією до металевих і керамічних матеріалів.

### **3.2 Моделювання процесу ущільнення фільтруючих матеріалів при радіально-ізостатичному пресуванні**

Для аналізу готового виробу розглядалися радіальна схема ущільнення радіальне (рис. 3.1). Матеріал порошку, що ущільнюється – порошок сталі ШХ15. Початкова пористість фільтрувального елемента дорівнювала 0,7.

Ущільнення відбувалося на оправку під впливом еластичного середовища, матеріал якого – поліуретан.

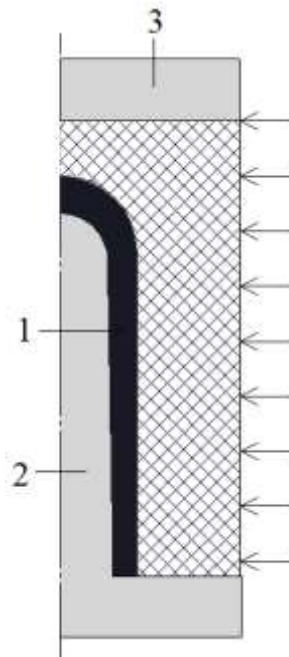


Рисунок 3.1 – Схеми радіального ущільнення:

1 – порошок, що ущільнюється, 2 – оправка, 3 – кришка, 4 – стінка

Поверхня поліуретану, на яку здійснювалося силове навантаження, переміщалася з постійною швидкістю в радіальному напрямку.

У початковий момент відбувається ущільнення стінки фільтруючого елемента. Розподіл пористості за радіусом стінки фільтра є нерівномірний. Зі збільшенням радіуса пористість відповідно зростає. Розподіл величини накопиченої пластичної деформації також має нерівномірний характер. Максимальна величина накопиченої деформації – у внутрішній поверхні стінки фільтра, мінімальна – у зовнішній поверхні.

На рисунку 3.2 представлений розподіл пористості і накопиченої пластичної деформації при радіальному ущільненні. Найбільш інтенсивно порошок ущільнюється в області дна фільтра.

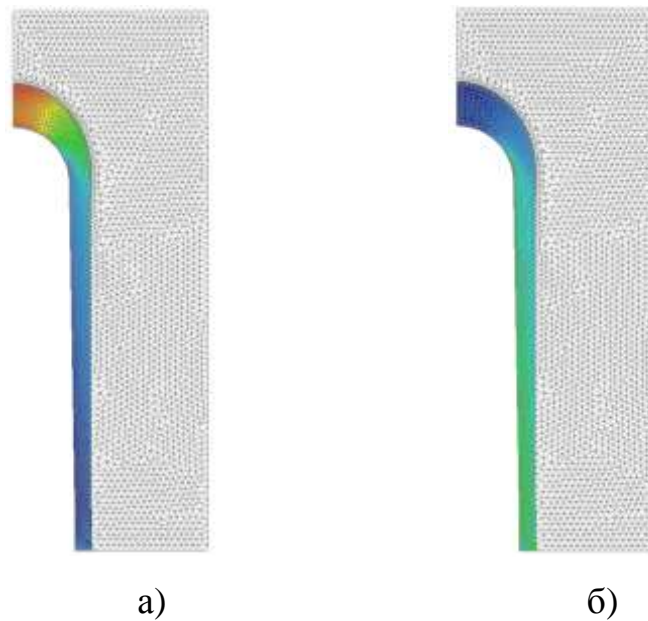


Рисунок 3.2 – Схематичне зображення розподілу пористості (а) та величини накопиченої пластичної деформації (б) при радіальному ущільненні

Розподіл пористості по радіусу дна нерівномірний (рис. 3.3, а). Зі збільшенням радіуса ця пористість зростає.

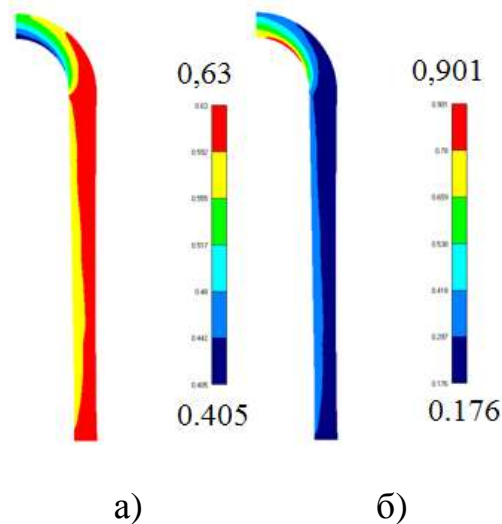


Рисунок 3.3 – Результати розподілу пористості (а) та величини накопиченої пластичної деформації (б) при радіальному ущільненні

Під час радіально-ізостатичного пресування порошкового фільтрувального елемента у формі колби спостерігається нерівномірний розподіл пористості та накопиченої пластичної деформації по об'єму виробу, що зумовлено особливостями вибраної схеми ущільнення.

Застосування радіального навантаження приводить до більш інтенсивного ущільнення матеріалу в зоні стінки фільтрувального елемента, тоді як дно виробу ущільнюється меншою мірою.

У разі використання схеми осьового ущільнення відбувається протилежна картина: найбільш значне ущільнення спостерігається в зоні дна фільтра, тоді як стінка заготовки також ущільнюється, але менш інтенсивно.

Із зростанням радіуса елемента пористість стінки та дна збільшується, водночас величина накопиченої пластичної деформації зменшується, що відображає закономірності розподілу напружено-деформованого стану у фільтрувальних заготовках під час радіально-ізостатичного формування.

### **3.3 Моделювання ущільнення багат шарового фільтруючого матеріалу при радіально-ізостатичному пресуванні**

Метод радіально-ізостатичного пресування дає змогу виготовляти також багат шарові фільтрувальні елементи, пористість окремих шарів яких є різною (рис. 3.4). Наявність градієнта пористості забезпечує більш рівномірний розподіл забруднювальних частинок по об'єму фільтруючої структури порівняно з одношаровими елементами, що істотно підвищує ресурс роботи фільтра. За таких умов процес очищення залишається високоефективним [12].

Під час пресування багат шарових фільтрів навантаження знімається після ущільнення кожного окремого шару. Після цього у простір між сформованим шаром та еластичним елементом, який повернувся до первісної форми, засипається нова порція порошку, і процес пресування продовжується.

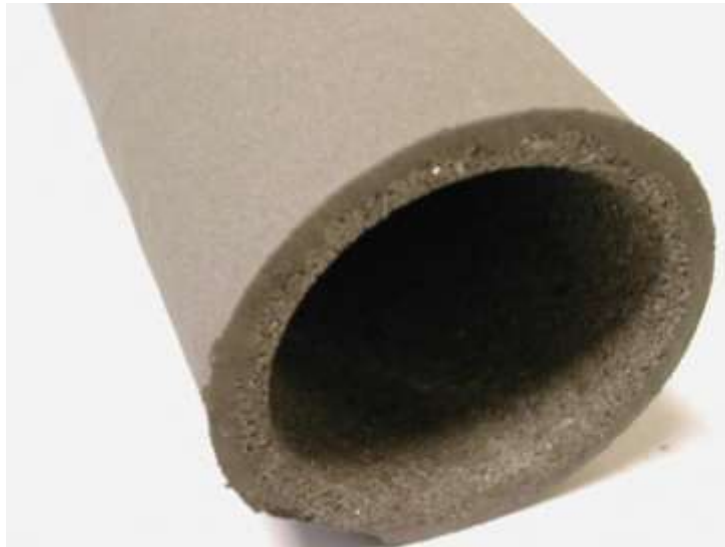


Рисунок 3.4 – Двошаровий фільтруючий елемент виготовлений методом радіально-ізостатичного пресування

Для розширення номенклатури фільтрувальних пористих порошкових виробів, зменшення витрат сировини та оптимізації виробничого процесу суцільний еластичний вкладиш може бути замінений набором вкладених один в один елементів. Такий підхід забезпечує можливість регулювання товщини окремих шарів, отримання виробів з ширшим діапазоном геометричних параметрів, а також підвищує технологічність і культуру виконання процесу пресування [3].

Результати моделювання з розподілу пористості по перерізу фільтрувальних матеріалів наведені на рисунку 3.4.

При ущільненні одношарового фільтрувального матеріалу розподіл пористості нерівномірний (рис. 3.4, а). Зі збільшенням радіуса пористість зростає. Зі збільшенням рівня деформації різниця між величинами пористості матеріалу у внутрішньої і зовнішньої поверхонь фільтра зменшується.

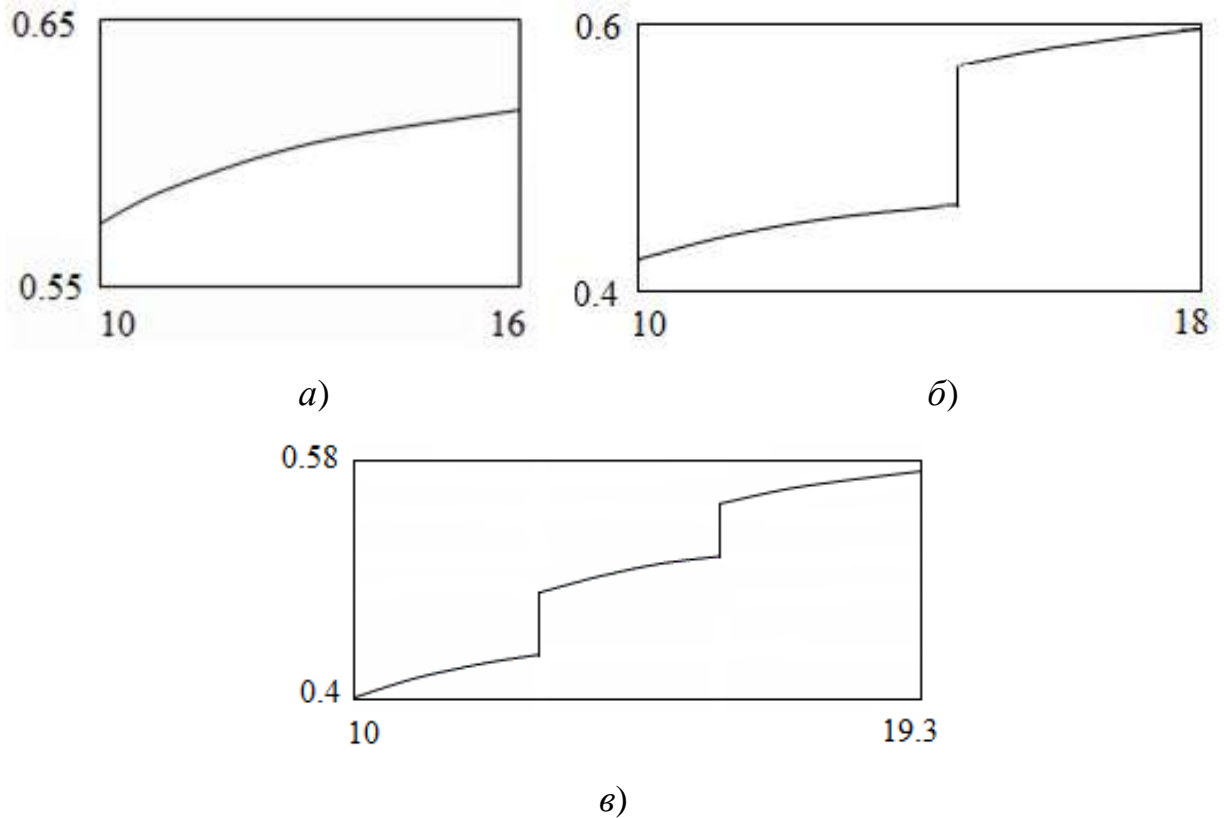


Рисунок 3.4 – Розподіл пористості по радіусу (мм) в одношаровому (а), двошаровому (б) і тришаровому (в) ППМ

Результати моделювання розподілу пористості при поетапному процесі ущільнення дво- та тришарового ППМ наведені на рисунку 3.5.



Рисунок 3.5 – Моделювання розподілу пористості для поетапного ущільнення двошарового фільтруючого матеріалу

### 3.4 Моделювання ущільнення фільтруючих матеріалів з розвинутою поверхнею при радіально-ізостатичному пресуванні

Підвищення продуктивності фільтруючих матеріалів без зміни їх розмірів може бути досягнуто через збільшення площі робочої поверхні та за рахунок її ускладнення [3].

Процес пресування фільтруючих матеріалів з розвинутою бічною поверхнею у вигляді повздожніх ребер, які утворені дугами окружностей з розмірами, розраховані з точки зору максимізації коефіцієнта збільшення поверхні. Матеріал еластичної оболонки – поліуретан Л-167. Порошок, що пресується – порошок сталі ШХ15. Тиск пресування – 100 МПа.

Результати моделювання представлено на рисунку 3.6.

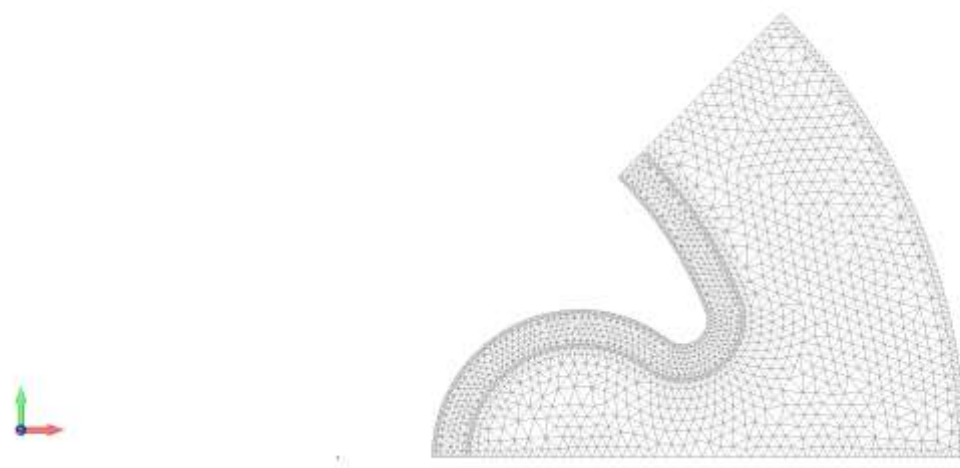


Рисунок 3.6 – Розбиття площини січення фільтруючих матеріалів на кінцеві елементи

Приймаючи напруження, які направлені перпендикулярно поверхні контакту еластичного інструменту, а напруження, які направлені по дотичній до цієї поверхні в площині, перпендикулярні осі пресовки і є дотичними, проведемо аналіз результатів моделювання, який представлений на рисунку 3.7.



Рисунок 3.7 – Деформований стан системи

Величина напружень по контуру пресовки не є постійною. Це визначається властивостями матеріалу еластичної оболонки. Завдяки геометричній неоднорідності системи ці переміщення в об'ємі еластичної оболонки різні [12]. Тому границі контакту еластичної оболонки та порошку величини нормальних та дотичних напружень індивідуальні. Ці переміщення спостерігаються в областях між ребрами пресуємого фільтруючого матеріалу, що зумовлено перетіканням поліуретану під дією тиску.

### Висновки до розділу 3

1. Встановлено, що під час радіально-ізостатичного пресування порошкового фільтрувального елемента складної геометричної форми спостерігається нерівномірний розподіл пористості та накопиченої пластичної деформації по об'єму виробу. Характер цих розподілів визначається обраною схемою ущільнення.

2. Результати моделювання процесу пресування фільтруючих матеріалів на основі порошку сталі ШХ15 свідчать, що характер розподілу густини вздовж контуру пресовки залишається незмінним. Це підтверджує вирішальну роль механічних властивостей матеріалу деформувального інструмента в процесі пресування.

## РОЗДІЛ 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВІДХОДІВ ПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

#### 4.1 Дослідження структурних характеристик фільтруючих матеріалів

Одним із найбільш інтуїтивно зрозумілих і водночас високоефективних методів візуалізації даних тривимірних зображень є метод прямого об'ємного рендерінгу. У цьому підході параметри випромінювання та поглинання світла асоціюються з кожною точкою об'ємних даних. Моделювання проходження світлового променя крізь об'єм зображення дає змогу візуалізувати будь-які типи даних без необхідності побудови проміжних полігональних моделей. Відповідне програмне середовище підтримує прямий рендерінг у режимі реального часу навіть для великих масивів даних, що забезпечує швидке виділення релевантних ділянок зображення та миттєвий доступ до інформаційно значущих структур [13].

Металографічні зображення можуть містити різноманітні структурні складові, що різняться за фазовим складом, геометрією, кольором та масштабом; межі зерен можуть задаватися окремими лініями або утворювати суцільну сітчасту структуру. Тому ключовою вимогою до якісного аналізу таких зображень є коректне виділення структурних складових з наступною їх класифікацією за яскравістю, розмірами та формою. Реалізація цього завдання передбачає застосування класичних процедур цифрової обробки зображень, таких як сегментація, фільтрація дефектів та шумів, відокремлення об'єктів від фону, визначення меж об'єктів і розпізнавання образів.

Формування тривимірного зображення у програмному середовищі здійснюється шляхом послідовного накладання серії плоских поперечних зрізів у визначеному діапазоні висот досліджуваного пористого порошкового матеріалу (рис. 4.1).

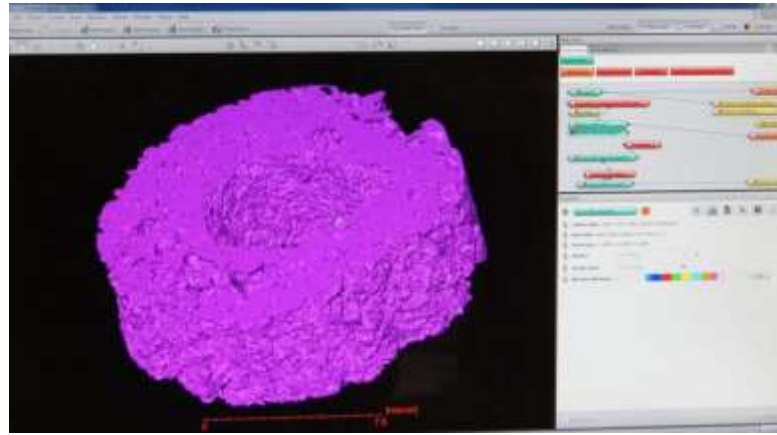


Рисунок 4.1 – Візуалізація отриманого зображення поперечного перерізу фільтруючого матеріалу

Металографічні зображення шліфів фільтруючих матеріалів являють собою комбінацію різноманітних структурних складових у різних співвідношеннях: фаз, що характеризуються відмінними розмірами, формою та кольоровими відтінками, а також меж зерен, які можуть відобразитися на зображенні у вигляді окремих ліній або формувати суцільну сітчасту структуру [3]. Поєднання площинних та просторових структурних елементів, характерних для фільтруючих матеріалів, отриманих із відходів промислового виробництва, наведено на рисунку 4.2.

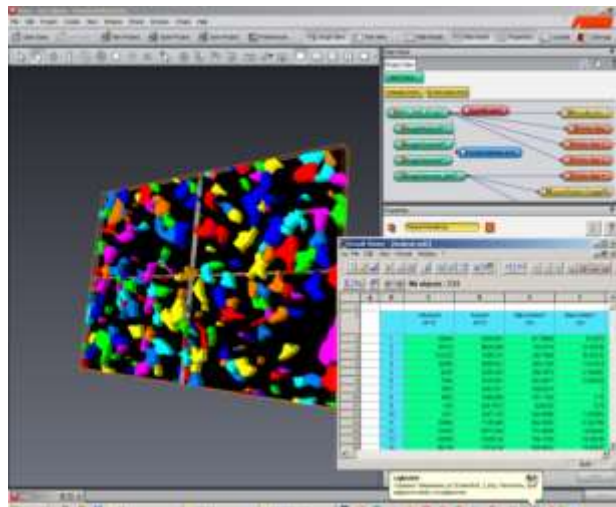


Рисунок 4.2 – Визначення та аналіз структурних складових фільтруючих матеріалів у форматі 3D-зображення

Кінцевою метою металографічного аналізу з використанням спеціалізованих прикладних програм є статистична обробка характеристик об'єктів, отриманих у процесі їх вимірювання, визначення середніх значень досліджуваних параметрів, а також побудова графічних залежностей, що забезпечують наочну візуалізацію результатів аналізу [14].

#### **4.2 3D-реконструкція структури фільтруючого матеріалу**

Морфологічні характеристики фільтруючих матеріалів визначають їх фільтрувальні властивості, а відтак – ефективність функціонування у різних сферах застосування. Адаптація структурних параметрів фільтруючих матеріалів до конкретних умов експлуатації становить суттєву науково-технічну проблему, особливо за відсутності методів їх високоточної морфологічної оцінки.

Кількісні та якісні залежності між морфологією пористих структур, їх локальними та глобальними фільтрувальними характеристиками мають ключове значення для широкого спектра технічних і технологічних застосувань. Забезпечення відповідності морфологічних властивостей фільтруючих матеріалів їх цільовому призначенню є складним завданням доти, доки не розроблено надійних та стандартизованих методик отримання точних кількісних характеристик структури.

Визначення кількісних морфолого-фільтрувальних параметрів може ґрунтуватися на прямому моделюванні пористої структури із використанням тривимірної реконструкції та аналізом перенесення потоку крізь модель матеріалу. Проте точність моделювання завжди обмежується точністю обраної моделі.

Тривимірна реконструкція фільтруючих матеріалів із комплексними макро- та мікроструктурними ознаками зазвичай здійснюється із застосуванням електронної мікроскопії [15].

Сканувальна та просвічувальна електронна мікроскопія забезпечують високу точність та надійність отримання двовимірних зображень і тому широко використовуються для аналізу структурних параметрів. Однак 2D-зображення часто є недостатніми для коректного опису повного комплексу морфологічних особливостей матеріалу. Крім того, існують фундаментальні відмінності між фільтрувальними властивостями двовимірних і тривимірних моделей.

Саме тому застосування методів тривимірної візуалізації є необхідною умовою для достовірного відтворення та визначення морфологічних параметрів повноцінної 3D-моделі ППМ та забезпечення реалістичного моделювання їхніх структурних та фільтрувальних характеристик.

Принцип роботи просвічувальної електронної мікроскопії представлено на рисунку 4.3 . Потужна, але проста робота даного виду мікроскопії надає можливість обробляти великі обсяги матеріалу відносно швидко, з незначним обмеженням.

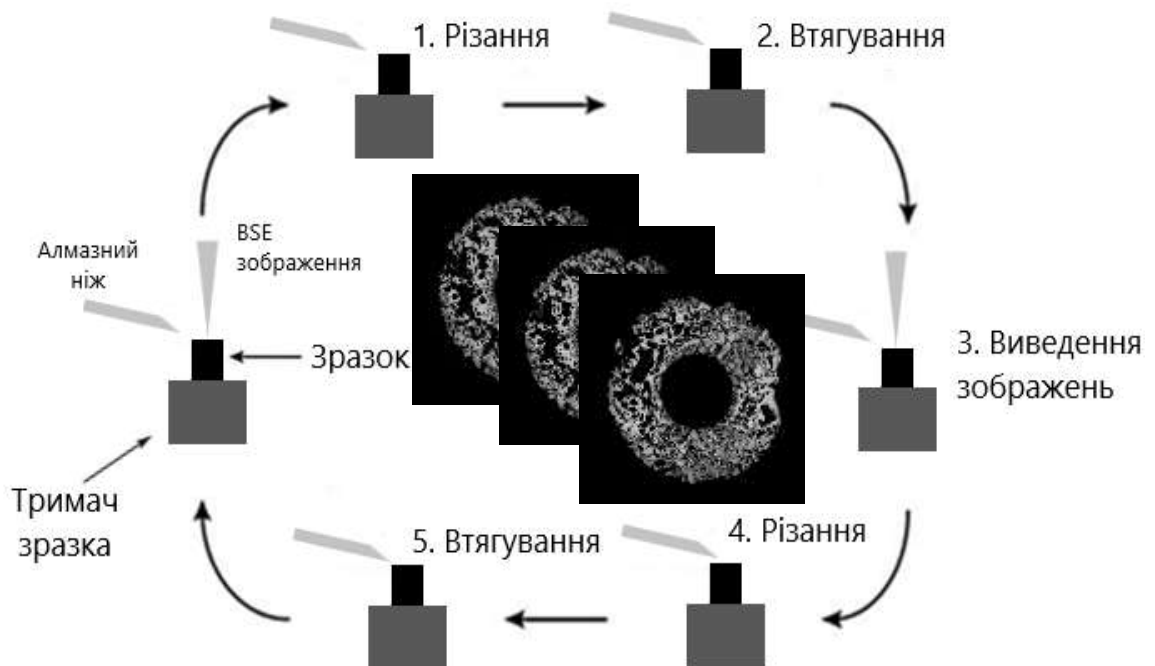


Рисунок 4.3 – Принцип роботи просвічувальної електронної мікроскопії [3]

Принцип роботи сканувальної електронної мікроскопії полягає в отриманні послідовності високоточних зображень шляхом поетапного видалення надтонких зрізів матеріалу. Зразок піддається серійному зрізуванню, у результаті чого на його поверхні формується чиста й гладка площина, яка фіксується мікроскопом і відтворюється на моніторі. Після візуалізації зріз видаляється, оголюючи новий шар матеріалу, що підлягає подальшому скануванню. Цикл повторюється доти, доки не буде отримано необхідну кількість поперечних зображень.

Типова товщина одного зрізу перебуває у межах 30-100 нм. У рамках проведеного дослідження було отримано 1300 зрізів, кожен з яких мав товщину 100 нм і роздільну здатність  $4000 \times 4000$  пікселів. Первинні зображення проходили процедуру автоматизованої бінаризації, що включала шумопоглинання, фільтрацію та порогове перетворення. Після цього зображення об'єднувалися у тривимірний масив, який забезпечував реконструкцію об'ємної структури моноліту пористого порошкового матеріалу (рис. 4.4).

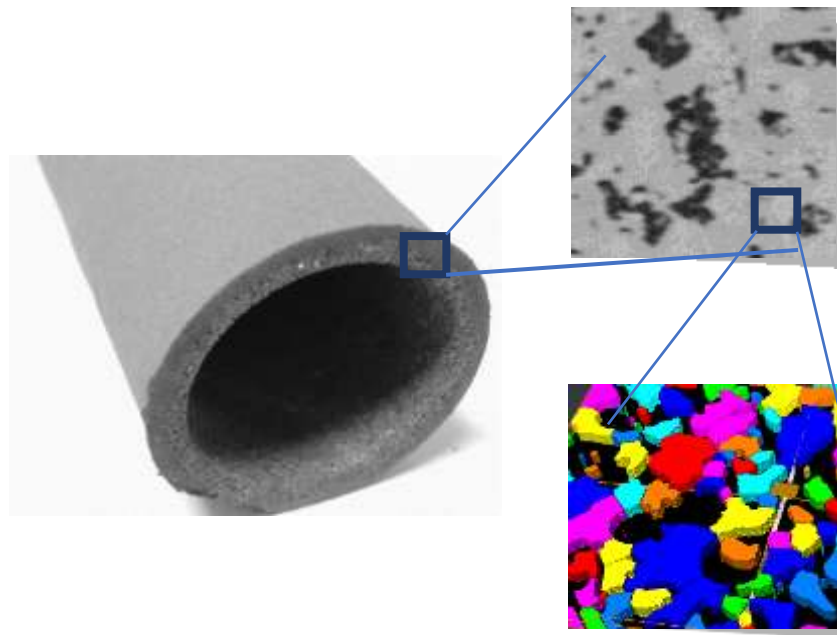


Рисунок 4.4 – 3D-зображення реконструйованого об'єму циліндричного зразка

Досліджуваний зразок являє собою монолітний металевий каркас (непрозорий скелет) із пористістю приблизно 69 %, де поровий простір представлений у вигляді проміжних пустот (заштрихована зона).

### 4.3 Дослідження проникності фільтруючого матеріалу експериментальним шляхом

На основі проведених раніше досліджень був обраний розмір частинок порошку сталі ШХ15 становив 0,1 мм, оскільки ця фракція дає можливість виготовляти ППМ з середньою пори розміром 20 мкм.

Вплив кількості пороутворювача на розмір пор показано на рисунку 4.5. Звідси видно, що додавання пороутворювача призводить до збільшення розмірів пор і пористості.

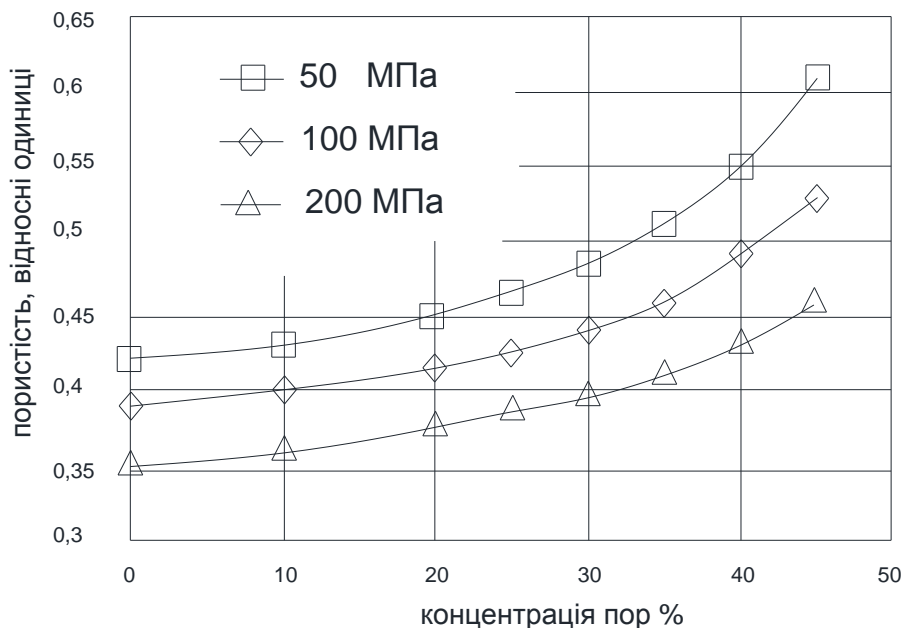


Рисунок 4.5 – Вплив тиску пресування і концентрації пороутворювача на пористість фільтруючого матеріалу

На рисунку 4.6 наведені експериментальні дослідження розподілу пористості по січенню тришарового фільтруючого матеріалу.

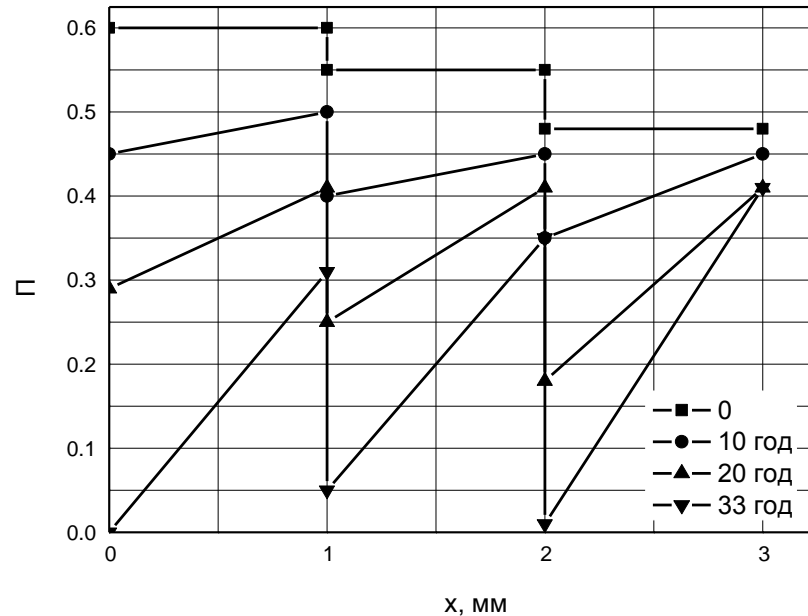


Рисунок 4.6 – Зміна у процесі фільтрації розподілу пористості за січенням тришарового фільтру

#### 4.4 Визначення границі міцності фільтруючих матеріалів методами моделювання

Аналіз структури різних матеріалів із використанням комп'ютерних технологій здійснювався різними науковими колективами. Особливістю цих робіт є те, що за допомогою математичних моделей, спеціалізованих програмних комплексів та розроблених алгоритмів досліджується структура вже сформованих матеріалів.

Традиційні технологічні процеси створення фільтруючих матеріалів характеризуються чітко регламентованою послідовністю операцій: підготовка шихти, заповнення прес-форм, формування заготовки, спікання, фінішна механічна обробка тощо. Кожний із цих етапів суттєво впливає на якість кінцевого виробу. У зв'язку з цим одним із ключових напрямів розвитку

сучасних технологій є використання комп'ютерного моделювання, зокрема методів скінченних елементів, що дозволяють прогнозувати властивості готової продукції ще на стадії її формування.

Моделювання виконувалося у програмному комплексі ABAQUS, який містить такі основні модулі: Part, Property, Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Job, Visualization, Sketch. Для імітації структурно неоднорідного середовища в нашому дослідженні було застосовано модуль Visualization. Як зразок використано круглу пластину, виготовлену з еластичного матеріалу, у циліндричній системі координат, товщиною  $h$  та радіусом  $R$  (рис. 4.7).

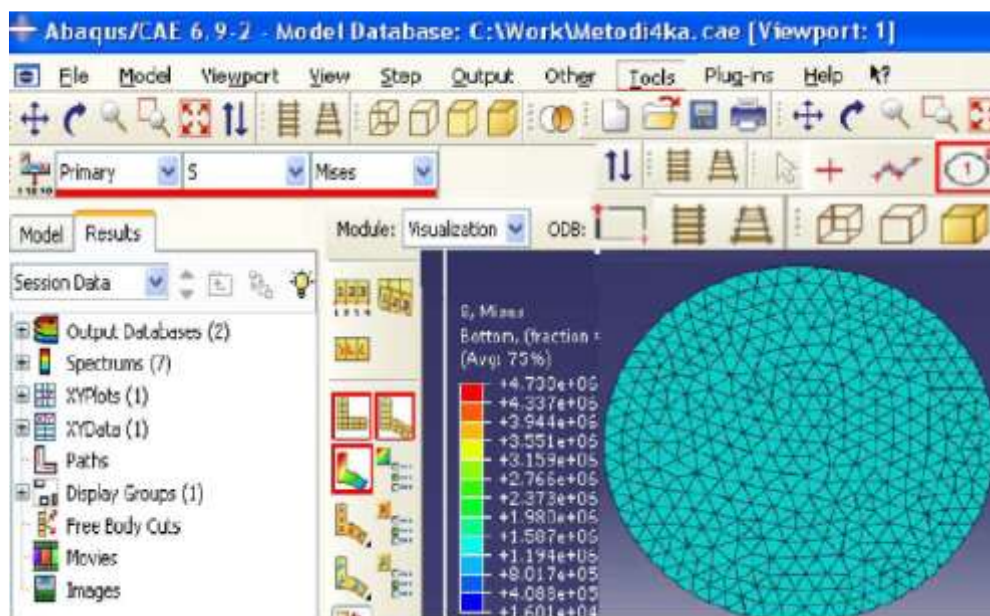


Рисунок 4.7 – Пластина циліндричної системи координат  $x, y, z$ , яку складено за даними [3]

За допомогою модуля Visualization програмного комплексу ABAQUS та наведеного вище матеріалу, проаналізували коливання пластини, отримуємо результати, які представлені на рисунку 4.8.

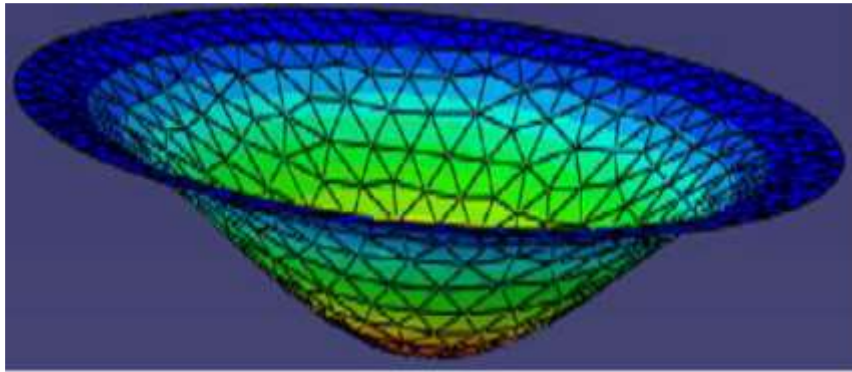


Рисунок 4.8 – Коливання пластини у момент часу  $t=2^0\text{C}$ , яку складено за даними [3]

Розглянемо фільтруючий матеріал зовнішнім діаметром 40 мм, внутрішнім діаметром 30 мм і довжиною 220 мм, який виготовлений із матеріалу – порошок сталі ШХ15 (рис. 4.9) і навантажену силою  $P=10$  кПа, яка прикладена до тіла ззовні та зсередини.

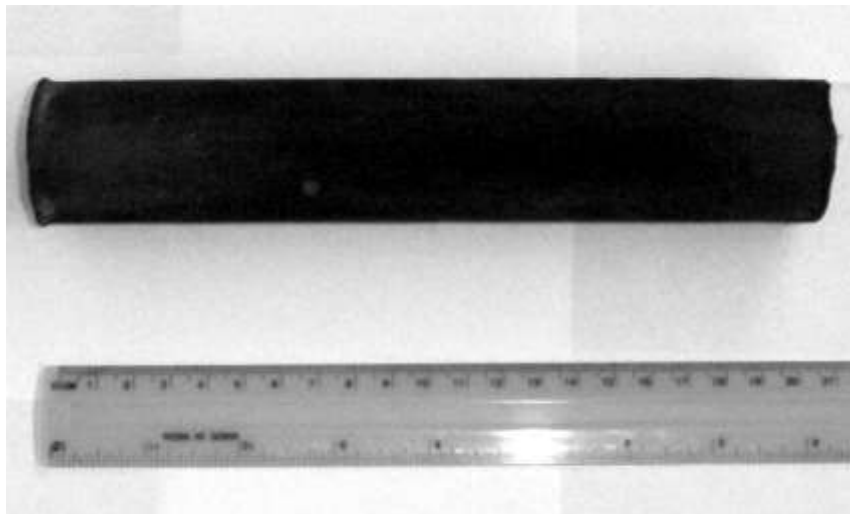


Рисунок 4.9 – Загальний вигляд фільтруючого матеріалу виготовленого з порошку ШХ15

Тут необхідно завантажити заздалегіть створену деталь із пористого фільтруючого матеріалу. Дана деталь була накреслена з допомогою програмного комплексу Solidworks (рис. 4.10).

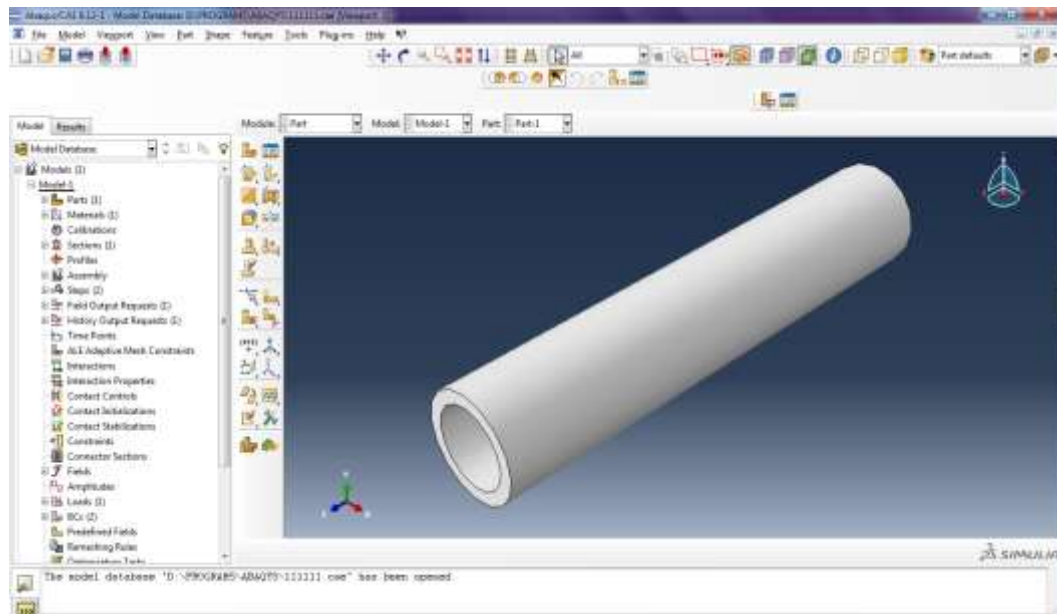


Рисунок 4.10 – Тривимірна модель фільтруючого матеріалу, яка виготовлена з порошку сталі ШХ15

У модулі Encastre вводимо нульові лінійні і кутові переміщення в торці фільтруючого матеріалу і виводимо прикладання тиску ззовні (рис. 4.11).

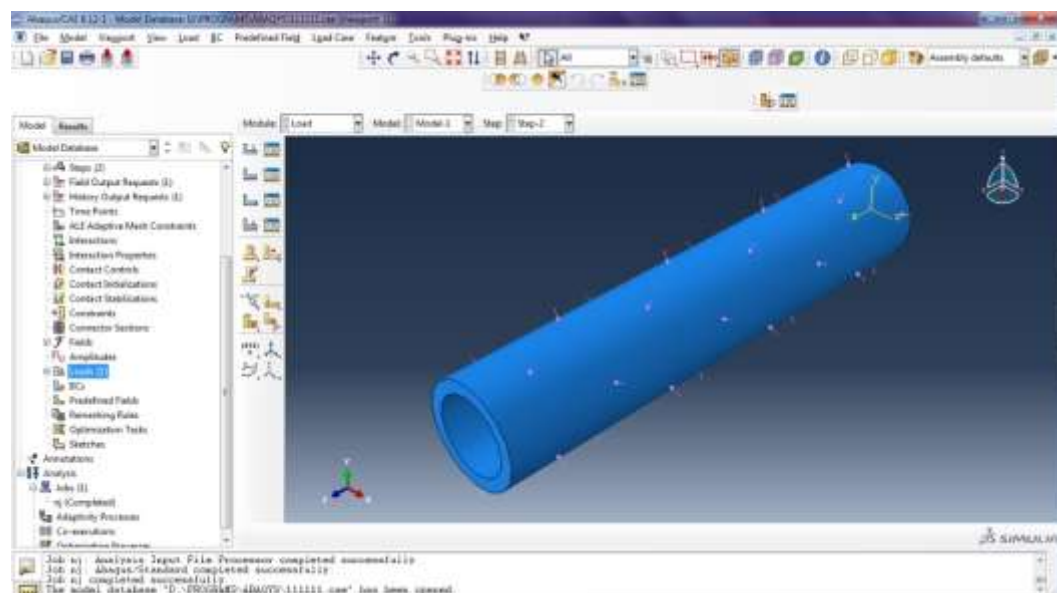


Рисунок 4.11 – Графічне відображення прикладених сил

Як критерій міцності у програмному комплексі ABAQUS вибираємо кількість питомої потенціальної енергії формозміни. Небезпечний стан у

загальному випадку напруженого стану виникає тоді, коли питома потенціальна енергія формозміни досягне свого критичного значення.

За допомогою Plot Contour програмного комплексу ABAQUS та введених всіх необхідних даних відбуваються розрахунки (рис. 4.12).

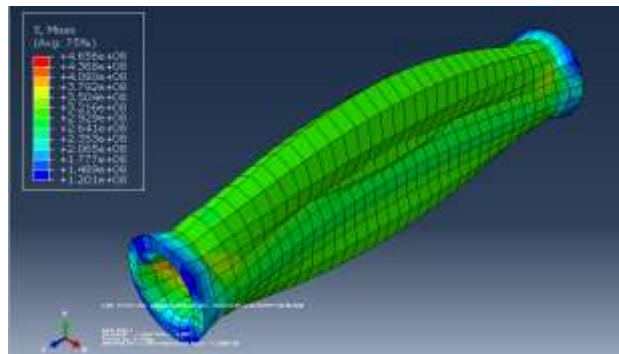


Рисунок 4.12 – Розподілення навантаження на фільтруючий матеріал за критерієм максимального напруження

Деталь відображається в деформованому вигляді. Зеленим кольором показано допустимі навантаження на фільтруючий матеріал за критерієм Мізесом, а червоним відображено перевищення гранично допустимих навантажень [16].

Змінимо критерій на Pressure (критерій руйнування в ABAQUS) і відображуємо розподілення по тиску (рис. 4.13).

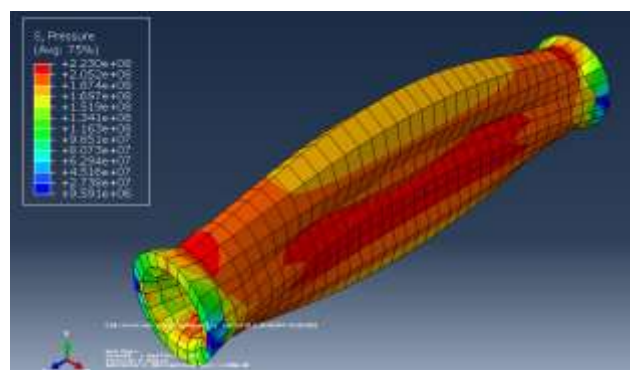


Рисунок 4.13 – Розподілення деформацій по фільтруючому матеріалі під дією заданого тиску

Тут ми отримуємо графічне відображення розподілення навантаження за критерієм Pressure. Деталь відображається в деформованому вигляді. Зеленим кольором показано допустимі навантаження на фільтруючий матеріал, а червоним відображено перевищення гранично допустимих навантажень.

Результати моделювання представлено у вигляді графічної залежності, яка представлена на рисунку 4.14.

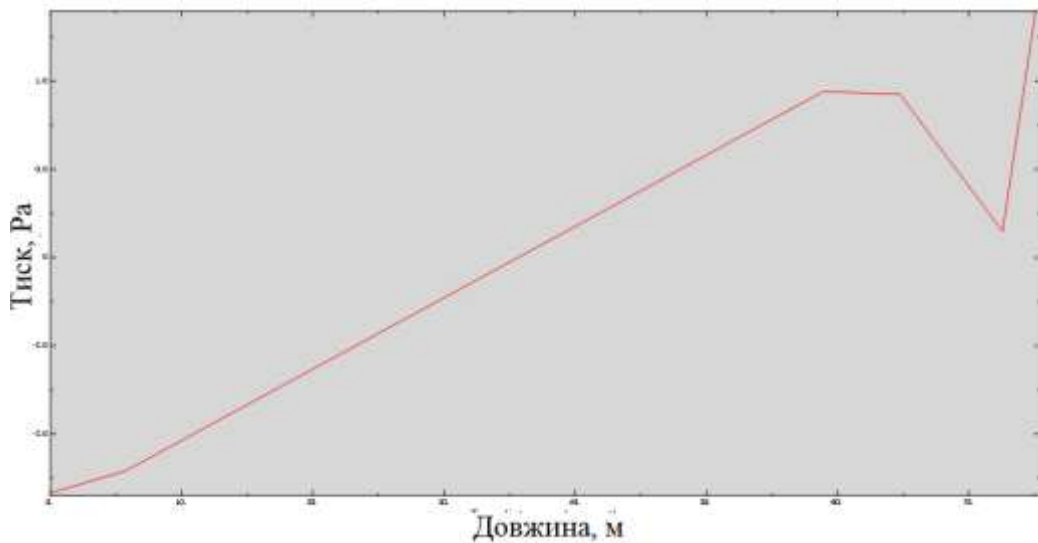


Рисунок 4.14 – Графік залежності тиску, що діє на фільтруючий матеріал від довжини перерізу

Програмне середовище для моделювання ABAQUS надає можливість досліджувати закономірності формування структури та властивості фільтруючих матеріалів з урахуванням розмірів порошку, встановлення кореляційних зв'язків між складовими їх, а також використовується для аналізу напружено-деформованого стану під дією механічних навантажень.

#### Висновки до розділу 4

1. Проведена обробка 3D зображень фільтруючого матеріалу, а саме показано утворення 3D зображення за допомогою програмного середовища способом накладання плоских поперечних розрізів відповідного діапазону.

2. Визначено основні структурні характеристики фільтруючого матеріалу з відходів промислового виробництва.

3. Проведена 3D-реконструкція та морфологічний у аналіз фільтруючого матеріалу з відходів промислового виробництва з визначення середнього значення пористості в об'ємі та становить 0,687.

4. При моделювання міцності фільтруючого матеріалу показано, що чим далі від зони закріплення його діє навантажувальне середовище, тим більший тиск створюється у ньому.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У ході виконання кваліфікаційної роботи були проаналізовані наявні технології виготовлення фільтруючих матеріалів з відходів промислового виробництва на основі моделювання їх процесів, а саме:

1. Проаналізовано сучасні методи моделювання фільтруючих матеріалів та визначено, що високоефективним різновидом модельних уявлень є пористі матеріали з неоднорідною структурою та різного гранулометричного складу.

2. Аналіз сучасних тенденцій розвитку технологій створення фільтруючих матеріалів дав змогу змоделювати систему автоматизації для виготовлення фільтруючих матеріалів в T-FLEX та ProENGINEER. Порівняння даних систем показало ефективність використання ProENGINEER для моделювання процесів отримання фільтруючих матеріалів.

3. Наведені сучасні комп'ютерно-імітаційні моделі структур пористих матеріалів для отримання фільтруючих матеріалів із відходів промислового виробництва дали можливість змоделювати та оптимізувати процес формування пористих циліндричних конструкцій в системі «Математика ФІЛЬТР».

4. При моделюванні структури пористих матеріалів визначено алгоритми оцінювання впливу технологічних параметрів та наявності осьового притиску з радіальним обтисненням та введенням осьової швидкості деформації.

5. Зі застосуванням наведених спеціалізованих комп'ютерних металографічних методів розроблено методику дослідження основних параметрів процесу отримання фільтруючих матеріалів із відходів промислового виробництва, яка включає в себе засипку порошку у форму та радіально-ізостатичного пресування. Встановлено, що при такому пресуванні спостерігається нерівномірний розподіл пористості та накопиченої пластичної деформації.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кузяєв І. М. Основи комп'ютерного моделювання технічних систем : монографія. Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2020. 392 с.
2. Zaleta O. M., Povstyanoy O. Yu., Ribeiro L. F., Redko R. G., Bozhko T. Ye., Chetverzhuk T. I. Automation of optimization synthesis for modular technological equipment. *Journal of Engineering Sciences*. Vol. 10 (1), 2023. Pp. A6-A14, doi: 10.21272/jes.2023.10(1).a2.
3. Повстяной О. Ю. Багатошарові пористі проникні матеріали з регульованою пористістю з відходів промислового виробництва : дис...докт. техн. наук: 05.02.01 / Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України. Київ, 2021. 345 с.
4. Povstyanoy O., Zabolotnyi O., Rud V., Kuzmov A., Herasymchuk H. Modeling of processes for creation new porous permeable materials with adjustable properties. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE-2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Vol. 1. 2020. Pp. 456-465. doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\_46.
5. Паливода Ю. Є. Заготовки у машинобудівному виробництві : навчально-методичний посібник. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2023. 148 с.
6. Povstyanoy O., Imbirovich N., Tkachuk V., Redko R., Priadko O. Theoretical and Experimental Studies of the Properties of Porous Permeable Materials Obtained from Industrial Waste. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Vol. 4., 2022. Pp. 519-528. DOI: 10.1007/978-3-031-06025-0\_51.
7. Імбірович Н. Ю. Механізми та закономірності плазмо-електролітного синтезу біопокриттів на основі титанових сплавів : дис...докт. техн. наук: 05.02.01 / Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2023. 289 с.
8. Імбірович Н. Ю., Звірко О. І., Кужидловський К. Я. Морфологія та поруватість поверхні титанових сплавів після плазмо-електролітного

оксидування у лужному середовищі з діатомітом. «*Фізико-хімічна механіка матеріалів*». Т.52. №4, 2023. С. 67-75.

9. Імбірович Н. Ю., Звірко О. І., Повстяной О. Ю., Дубіцький А. Особливості формування та морфології поверхні біопокриттів, насичених природними кременистими сполуками. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. 2023. № 75. С.120-125.

10. Імбірович Н. Ю., Повстяной О. Ю. Дослідження корозійної тривкості пористих проникних матеріалів зі захисними покриттями нового покоління. *Технічні науки та технології*. №3 (33). 2023. С. 30-39.

11. Тітов В. А., Злочевська Н. К. Теорія пластичної деформації-2. Математичні основи пластичної деформації. Конспект лекцій : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 75 с.

12. Алексюк С. М. Моделювання процесів створення пористих порошкових матеріалів на основі відходів промислового виробництва з використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій. *Actual problems of automation and control: матеріали XIII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів*. Випуск № 13. Луцьк: ЛНТУ, 2025. С. 8-12.

13. Merlet R. B., Pizzoccaro-Zilamy M.-A., Nijmeijer A., Winnubst L, Hybrid ceramic membranes for organic solvent nanofiltration: State-of-the-art and challenges. *Journal of Membrane Science*. Vol. 599. 2020. p. 117839. doi: 10.1016/j.memsci.2020.117839.

14. Кравченко І. В., Микитенко В. І., Тимчик Г. С. Комп'ютерне моделювання: системи і процеси : навч. посібн. Київ : Вид-во «Політехніка», 2022. 215 с.

15. Балик Н. Р. Вибрані питання комп'ютерного моделювання процесів і явищ: підручник. Тернопіль, 2022. 272 с.

16. Кузяєв І. М. Основи комп'ютерного моделювання технічних систем: монографія. Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2020. 392 с.

