

**Міністерство освіти і науки України**

**Луцький національний технічний університет**

(повне найменування вищого навчального закладу)

**Факультет транспорту та механічної інженерії**

(повне найменування факультету)

**Кафедра прикладної механіки та мехатроніки**

(повна найменування кафедри)

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

**ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНО-  
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ АНАЛІЗУ  
БУДОВИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ  
КОНСТРУКЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

спеціальність 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Прикладна механіка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи ІМм-21  
Бичик Віталій Олександрович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

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

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.  
Гарант освітньої програми:  
к.т.н., доцент  
Четвержук Тарас Іванович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Луцьк – 2023 року

## ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет транспорту та механічної інженерії

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

Освітня програма: Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Р. Редько  
“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

### ЗАВДАННЯ

#### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Бичику Віталію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Застосування комп'ютерно-інформаційних технологій для аналізу будови та властивостей деталей конструкційного призначення*

Керівник роботи: *Повстяной Олександр Юрійович, д.т.н., професор, затверджені наказом закладу вищої освіти від «14» січня 2023 р. № 42/01-02*

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: 1.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: *загальні відомості про структуру й основні властивості пористих проникних матеріалів; технологічні режими процесу; керамічний порошок, декстрин*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити):

*Анотація. Зміст. Вступ. 1 Технології виготовлення, дослідження та використання кемічних фільтруючих пористих порошкових матеріалів. 2 Методика дослідження властивостей керамічних фільтруючих пористих порошкових матеріалів. 3 Вдосконалення обладнання для виготовлення керамічних ППМ. Висновки. Перелік посилань.*

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

*Тема, мета, завдання – 1 лист (ф.А1), основні методи визначення структури пористих матеріалів – 1 лист (ф.А1), отримання пористих матеріалів – 1 лист (ф.А1), технологічна схема отримання пористих матеріалів – 1 лист (ф.А1), дослідження основних характеристик пористих матеріалів – 1 лист (ф.А1)*

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання

02.09.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Обґрунтування теми, огляд літератури із досліджуваної проблеми</i>	<i>15.09.23</i>	
2.	<i>Технології виготовлення, дослідження та використання пористих порошкових матеріалів</i>	<i>01.10.23</i>	
3.	<i>Методика дослідження властивостей фільтруючих пористих порошкових матеріалів</i>	<i>15.10.23</i>	
4.	<i>Вдосконалення обладнання для виготовлення керамічних ППМ</i>	<i>25.10.23</i>	
5.	<i>Технологічний процес отримання фільтруючих матеріалів</i>	<i>01.11.23</i>	
6.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	<i>20.11.23</i>	
7.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	<i>25.11.23</i>	
8.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи магістра до захисту</i>	<i>01.12.23</i>	

Здобувач вищої освіти

\_\_\_\_\_

(підпис)

Бичик В.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

Повстяной О.Ю.

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Бичик В.О. Застосування комп'ютерно-інформаційних технологій для аналізу будови та властивостей деталей конструкційного призначення. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Прикладна механіка» спеціальності 131 Прикладна механіка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2023.

Кваліфікаційна робота магістра складається із вступу, 4 розділів, висновків і пропозицій, списку використаних джерел.

Технічні інженерні науки – це основні області, в яких багато застосовують комп'ютерних технологій, апаратного та програмного забезпечення. Це впроваджено для широкого спектру застосувань у діагностиці, біометрії, генетиці та інженерії. Сучасний розвиток високопродуктивних інформаційних, обчислювальних систем і програмного забезпечення дозволяє проводити комп'ютерне моделювання нових матеріалів, деталей, конструкцій.

Метою кваліфікаційної магістерської роботи є розробка методів, моделей для аналізу будови та властивостей деталей конструкційного призначення з використанням сучасних комп'ютерно-інформаційних технологій.

Під час виконання магістерської роботи використовувалися сучасні методи комп'ютерного, імітаційного та інформаційного моделювання експериментальних досліджень. Результати магістерської роботи базуються на сучасних уявленнях про будову, поведінку та експлуатаційні властивості деталей конструкційного призначення.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, 3D зображення, інформаційні технології, тривимірне матеріалознавство.

## ABSTRACT

Bychyk V.O. The use of computer and information technologies for the analysis of the structure and properties of details of structural purpose. Manuscript.

Master's qualification work of OP "Applied Mechanics" specialty 131 Applied Mechanics. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2023.

The master's thesis consists of an introduction, 4 chapters, conclusions and proposals, a list of used sources.

Technical engineering sciences are the main areas in which computer technologies, hardware and software are widely used. This has been implemented for a wide range of applications in diagnostics, biometrics, genetics and engineering. The modern development of high-performance information, computing systems and software allows computer modeling of new materials, parts, and structures.

The purpose of the qualifying master's thesis is the development of methods, models for analyzing the structure and properties of structural details using modern computer and information technologies.

During the execution of the master's thesis, modern methods of computer, simulation and information modeling of experimental research were used. The results of the master's thesis are based on modern ideas about the structure, behavior and operational properties of structural parts.

Keywords: computer modeling, 3D images, information technologies, three-dimensional materials science.

## ЗМІСТ

1	МОЖЛИВОСТІ УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНФОРМАЦІЙНОГО АНАЛІЗУ.....	9
1.1	Розвиток сучасних комп'ютерно-інформаційних засобів.....	9
1.2	Нові комп'ютерно-інформаційні технології, засоби та пристрої.....	10
1.3	Застосування комп'ютерно-інформаційних технологій для визначення основних властивостей деталей.....	13
1.4	Висновки та постановка завдання.....	17
2	КОНЦЕПЦІЯ КОНСОЛІДОВАНОГО КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МАТЕРІАЛІВ, ТЕХНОЛОГІЙ ТА ВИРОБІВ У КОНТЕКСТІ ЦИФРОВОГО МАШИНОБУДУВАННЯ.....	18
2.1	Методи та інструменти цифрового машинобудування для комп'ютерного моделювання технологій та конструкцій.....	18
2.2	Методи та інструменти обчислювального матеріалознавства для комп'ютерного моделювання структури та властивостей металічних матеріалів...24	
2.3	Актуальні завдання інтеграції результатів інформаційно-обчислювального матеріалознавства у цифрове машинобудування.....	31
2.4	Основні тенденції у розвитку комп'ютерних методів дослідження структури та властивостей матеріалів конструкційного призначення.....	35
3	ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СТРУКТУР ЗА ЇХ КОЛЬОРОВИМ 3D-ЗОБРАЖЕННЯМИ.....	39
3.1	Створення 3D-зображень структур деталей конструкційного призначення.....	39
3.2	Модель і алгоритм обробки кольорових металографічних 3D зображень.....	42

3.3 Реалізація обробки 3D зображень деталей конструкційного призначення за допомогою комп'ютерно-інформаційних технологій Avizo® .....	48
4 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ. ЇХ ВЛАСТИВОСТІ .....	58
4.1 Застосування комп'ютерно-інформаційних технологій для моделювання нанесення захисних покриттів.....	58
4.2 Застосування комп'ютерно-інформаційних технологій для визначення основних властивостей пористих матеріалів.....	63
4.3 SolidWorks як сучасна комп'ютерно-інформаційна база для інженерних розрахунків.....	65
ВИСНОВКИ.....	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	71

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Величезний розвиток відбувається в різних сферах, пов'язаних з обчислювальним програмним забезпеченням, апаратним забезпеченням та його застосування за останні кілька десятиліть. Часто такі розробки робляться незалежно з особливим фокусом, включаючи нові розробки.

Інтерфейси, нові технології та пристрої відображення, інтерфейс мозкового комп'ютера широко застосовуються і прикладній механіці. Кілька нових інтегрованих пристроїв, таких як смартфони, планшети та комп'ютери стали більш популярними та широкоживаними. Подібний розвиток відбувається в парадигмі обчислювальної техніки та програмного забезпечення з особливим акцентом на візуалізацію. Широке використання Інтернету, а останнім часом і хмарні обчислення, боти, змінюють спосіб використання комп'ютерів, інформація передається та зберігається належним чином.

Технічні науки є однією з основних областей, в якій багато застосовують комп'ютерних технологій і апаратного забезпечення. Все це інтегровано та впроваджено для широкого спектру застосувань у діагностиці, біометрії, генетиці та інженерії.

Сучасна технічна промисловість потребує перспективних конструкційних матеріалів. Запроваджене технологічне обладнання, автоматизоване та роботизоване оснащене різними приводами та розробляє принципово нові технології для виробництва деталей конструкційного призначення.

Технічна база діагностики та наукових досліджень забезпечує дослідження структури, властивостей нових матеріалів, деталей, конструкцій. Стрімкий розвиток високопродуктивних інформаційних, обчислювальних систем і програмного забезпечення дозволяє проводити комп'ютерне моделювання нових матеріалів, деталей, конструкцій.

**Мета і задачі дослідження.** Розробка методів та моделей для аналізу будови і властивостей деталей конструкційного призначення з використанням сучасних комп'ютерно-інформаційних технологій.

Задачі дослідження:

1. Розробити методи консолідованого комп'ютерного аналізу матеріалів, конструкцій деталей та застосувати їх для конкретних умов.
2. Побудові комунікативні зв'язки в узагальненому інформаційному просторі між проектуванням та дослідженням властивостей деталей конструкційного призначення.
3. Провести комп'ютерні експерименти з проєктованими структурами та дослідити властивості складно структурованих матеріалів разом з експлуатаційними властивостями деталей.

**Об'єкт дослідження.** Деталі конструкційного призначення.

**Предмет дослідження.** Застосування сучасних комп'ютерно-інформаційних технологій при дослідженні будови, властивостей деталей конструкційного призначення.

**Методи дослідження.** Під час виконання магістерської роботи застосовувалися сучасні методи імітаційного, комп'ютерного та інформаційного моделювання та експериментальних досліджень. Результати роботи базуються на континуальних уявленнях про будову, поведінку та експлуатаційні властивості деталей конструкційного призначення.

**Наукова новизна** визначається полягає у поєднанні теоретичних розробок з проведенням експериментальних досліджень, що сприяло застосуванню комп'ютерно-інформаційних технологій при дослідженні будови, властивостей деталей конструкційного призначення.

**Особистий внесок магістранта.** Основні положення, рекомендації та висновки належать особисто магістранту. Магістрант здійснив постановку задач з розробки методики проведення комп'ютерно-інформаційних досліджень.

# 1 МОЖЛИВОСТІ УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНФОРМАЦІЙНОГО АНАЛІЗУ

## 1.1 Розвиток сучасних комп'ютерно-інформаційних засобів

Впровадження сучасних комп'ютерно-інформаційних технологій вимагає вдосконалення багатьох традиційних систем обробки та аналізу інформації.

Розвиток сучасних комп'ютерно-інформаційних технологій, які пов'язані з комп'ютерами, обчислювальною технікою та комунікаціями відбуваються в експоненціальній манері, особливо якщо враховувати це разом зі зниженням вартості цих технологій. Відповідні розробки демонструють набагато більший інноваційний ріст та прогресивність.

Багато комп'ютерно-інформаційних засобів мають значні переваги останніх десятиліть. Щоб адаптуватися, застосовувати та покращувати спосіб їх роботи та вирішення проблем реального світу не було серйозного прориву в базовій практиці технічної інженерії, за винятком, впровадження аналізу кінцевих елементів 40 років тому. Зростання та розвиток у застосуванні комп'ютерно-інформаційних засобів і технологій був поступовим і лінійним.

Тому розгляд та застосування деяких нещодавніх інформаційних розробок в комп'ютерно-інформаційній частині досліджуються постійно та є актуальним. Їх можна використати для вирішення технічних проблем інженерами-конструкторами та надати більш інноваційне, ефективне, довговічне та безпечніше рішення для визначення певних характеристик та властивостей.

Величезний розвиток відбувається в різних сферах, які пов'язані з комп'ютерно-інформаційним програмними забезпеченнями за останні кілька десятиліть. Часто такі розробки робляться незалежно та з особливим фокусом, включаючи розробку нового людського фактору.

Інтерфейси, нові технології та пристрої відображення, інтерфейс мозкового комп'ютера широко використовуються в робототехніці, мехатроніці тощо. Нові

інтегровані пристрої, такі як смартфони, планшети та комп'ютери стали все більш популярними та розповсюдженими. Подібний розвиток відбувається і в парадигмі інформаційно-обчислювальної техніки та програмного забезпечення з особливим акцентом на візуалізації. Широке використання Інтернету, а останнім часом хмарні обчислення змінюють спосіб використання комп'ютерів, вся необхідна інформація передається та зберігається.

Технічні науки є однією з основних галузей, в якій багато застосовується комп'ютерних технологій, апаратне забезпечення інтегровано для широкого спектру застосувань у діагностиці, аналізі, визначенні.

## 1.2 Нові комп'ютерно-інформаційні технології, засоби та пристрої

Одна з головних проблем, з якою стикається людство після винайдення комп'ютерів, знаходив ефективні засоби взаємодії та спілкування з комп'ютерами.

Ми пройшли довгий шлях від використання перфокарт до поточного стану використання.

Людино-комп'ютерна взаємодія — це вивчення, планування та проектування взаємодії між людьми (користувачами) і комп'ютерами. Взаємодія користувачів і комп'ютерів відбувається в інтерфейсі користувача (або просто інтерфейсі), який включає як програмне забезпечення, так і обладнання. Це символи або об'єкти, що відображаються програмним забезпеченням на персональному моніторі комп'ютера, введення, яке отримане від користувачів через апаратні периферійні пристрої, такі як клавіатури та миші, а також інша взаємодія користувача з великомасштабними комп'ютеризованими системами, такі як літаки, електростанції, космічні ракети.

Через мультидисциплінарний характер люди з різним досвідом роблять свій внесок до його успіху. Професійні практики в людино-комп'ютерній взаємодії застосовують методології реального проектування. Ця робота часто зосереджена на розробці графічних інтерфейсів користувача та інтернет інтерфейсів. Дослідники з

людино-комп'ютерної взаємодії зацікавлені в розробці нових методологій проектування, аналізу, визначення та успішно експериментують з новими апаратними пристроями, прототипуванням нових програмних систем, досліджують нові парадигми взаємодії, а також розробляють нові моделі і теорії взаємодії.

Інтерфейс мозок–комп'ютер, який іноді називають прямим нейронним інтерфейсом або мозково–машинним інтерфейсом є прямим шляхом зв'язку між мозком і зовнішнім пристроєм. Сфера досліджень і розробок інтерфейс мозок–комп'ютер зосереджена в основному на нейропротезування, яке спрямоване на відновлення пошкодженого слуху, зору та рухів.

Через пластичність кори мозку сигнали від імплантованих протезів можуть після адаптації, обробляються мозком як природні сенсорні або ефектні канали.

Науковці створили пристрої для взаємодії з нейронними клітинами та цілими нейронними мережами. Також були зосереджені експерименти на культивованій нервовій тканині на побудові мереж для вирішення проблем, побудові базових комп'ютерів і маніпулюванні роботизованими пристроями.

Віртуальна реальність — це термін, який стосується комп'ютерно змодельованого середовища, яке може імітувати фізичну присутність у місцях реального світу, а також в уявних світах.

Більшість сучасних середовищ віртуальної реальності – це переважно візуальний досвід, який відображається або на екрані комп'ютера, або через спеціальні стереоскопічні дисплеї. Тактильна технологія, або haptics – це технологія тактильного зворотного зв'язку, яка використовує відчуття дотику користувача шляхом застосування сил, вібрації та/або рухів до користувача. Це механічне подразнення може використовуватися для допомоги у створенні віртуальних об'єктів для керування такими віртуальними об'єктами та для вдосконалення дистанційного керування машинами та апаратами (телеоператорами).

У персональних комп'ютерах впроваджується дизайн «тактильний тачпад». Функціональність і тактильний зворотний зв'язок вже вбудовані в поверхню

відстеження. Також тактильний зворотний зв'язок стає поширеним у стільникових пристроях. У більшості випадків це займає форма вібраційної реакції на дотик.

Тактильні технології додають відчуття дотику до рішень, які раніше були лише візуальними. Системи також розробляється для використання тактильних інтерфейсів для 3D-моделювання та проектування різноманітних деталей, вузлів і покликаний дати проектувальникам віртуальний досвід справжнього інтерактивного моделювання.

Індустрія робототехніки та мехатроніки також використовує тактильну технологію для отримання відчуття дотику, тиску та положення, щоб відтворити людську хватку у всій її силі, делікатність і складність. Розробники можуть використовувати пристрої введення з високим ступенем свободи, які дають зворотній зв'язок дотиком, що стосується «поверхні», яку вони проектують або створюють, дозволяючи швидший і більш природний робочий процес, ніж традиційні методи проектування.

Візуалізація — це будь яка техніка для створення зображень, діаграм або анімації передати повідомлення. Візуалізація за допомогою візуальних образів була ефективним способом передавати як абстрактні, так і конкретні ідеї.

Візуалізація сьогодні постійно розширюється застосуванням у науці, освіті, інженерії (наприклад, візуалізація продукту), інтерактив мультимедіа, медицина і т. д.

Винахід комп'ютерної графіки є найбільш важливою подією в галузі візуалізації. Комп'ютерна графіка від свого початку використовувався для вивчення наукових проблем. Наукова візуалізація – це перетворення, відбір або представлення даних із моделювання або експериментів, неявну або явну геометричну структуру, що дозволяє досліджувати, аналізувати та розуміти певні типи даних.

Із зростанням інтересу до побудови комп'ютерно-інформаційного моделювання в промисловості для професіоналів було введено додатки на основі різноманітних моделей.

Комп'ютерно-інформаційне моделювання — це процес генерування та керування даними про проектуванні протягом усього життєвого циклу деталі. Інструменти проектування комп'ютерно-інформаційного моделювання дозволяють отримувати різні види моделей побудови для створення креслень, 3D моделей. Зазвичай він використовує тривимірне програмне забезпечення для динамічного моделювання деталей у режимі реального часу для підвищення продуктивності проектування.

IFC (Industry Foundation Classes) — це нейтральне сховище даних для комп'ютерно-інформаційних моделей побудови, включаючи геометрію і властивості «розумних» технічних об'єктів та їх зв'язки. Цим вони полегшують обмін даними між іншими несумісними програмами.

Ще один інструмент, який використовується полем обчислень є OpenSees. OpenSees (відкрита система для Simulation), є об'єктно-орієнтованим фреймворком програмного забезпечення з відкритим кодом. Це дозволяє користувачам створювати програми кінцевих елементів для моделювання структурних властивостей матеріалів.

### 1.3 Застосування комп'ютерно-інформаційних технологій для визначення основних властивостей деталей

Практику інженери беруть участь у широкому спектрі діяльності та завдання, такі як:

а) концепція, вибір і розробка структурних систем, придатних для конкретного застосування;

б) попереднє визначення розмірів і проектування структурних компонентів;

в) координація та співпраця з кількома іншими проєктувальниками для розгляду їх вимоги, наприклад, з інженерами-механіками та сервісними інженерами, інженерами-електриками та ін.;

г) структурне моделювання та аналіз основних компонентів;

д) детальний проєкт структурних компонентів;

е) деталізація та складання для виготовлення складальних креслень і технічної документації;

Більшість видів діяльності не тільки придатні для комп'ютерних програм, але й можуть бути такими, що посилюються завдяки використанню та застосуванню нових технологій, інструментів і пристроїв.

Ключ до успіху в інженерному проєкті — це добре почати. Саме базовим кроком на початку майже кожного структурного проєкту є вибір відповідної структурної системи та попередній проєкт структурних компонентів.

Щоб отримати оптимальне рішення, можна взяти до уваги нечітку логіку або оптимізацію та вибір конструктивної системи, проходження попереднього проєктування. Також експертні системи та стандарти можуть бути дуже корисними для ознайомлення з різними деталями, а структурну систему можна перевірити на поведінку конструкції після попереднього проєктування.

Сучасна інформаційно-обчислювальна техніка та пристрої можуть відігравати життєво важливу роль у покращенні життя та роботи інженеру-конструктору. В даний час більшість інженерів-конструкторів використовують традиційні інформаційно-обчислювальні програми та методи для вирішення своїх задач, особливо під час проєктування та моделювання їх структур.

У традиційних інформаційно-обчислювальних програмах це важко вводити дані для моделювання, аналізувати дані, а також інтерпретувати дані. Моделювання конструкцій є основним і складним завданням під час проєктування, яке має бути дуже важливим, задаючись під час моделювання конструкції.

Впроваджуючи передові методи моделювання, наприклад 3D-моделювання і навіть 4D-моделювання в галузі конструкцій, абсолютно можна досягти різних розмірів і концепцій моделювання.

Застосування концепції віртуальної реальності в галузі механічної інженерії може бути новаторським кроком у розумінні фундаментальної природи проблем, пов'язаних з їх структурою. Віртуальна реальність може допомогти стимулювати середовище, яке може стимулювати фізичну присутність структури матеріалу деталі. Використовуючи віртуальну діяльність, стимуляцію структури матеріалу деталі можна спостерігати або на екрані комп'ютера, або через спеціальний стереоскопічний дисплей, який може покращити розуміння інженерів-конструкторів для вирішення проблем, пов'язаних з моделюванням і проектуванням конструкцій.

Ще одна дилема для інженерів-проектувальників полягає у візуалізації результатів, аналізу проведеного на конструкціях. Іноді навіть після успішного аналізу це так важко представити результат у зрозумілий спосіб. Для цього для візуалізації є техніка, яка використовується для передачі повідомлення шляхом створення зображень, діаграм або анімації.

Одним із найважливіших результатів візуалізації є сучасна комп'ютерна графіка, яка може допомогти інженеру або користувачеві трансформувати, вибрати та представляти його дані з моделювання або експериментів за допомогою візуалізації. Ця техніка допомагає досліджувати, аналізувати та розуміти дані.

Розвиток комп'ютерно-інформаційних технологій однаково корисний як для промисловості, так і для індустрії академічної сфери. Інноваційні та сучасні інформаційно-обчислювальні технології можуть бути прийняті в академічному навчанні для закладів навчання, професійної підготовки наукових досліджень і розробок нових технологій. Використання тактильних інтерфейсів для структурного моделювання може виявитися особливо важливим та корисним для тренувань, знати поведінку структури матеріалу деталі. Використовуючи цю технологію,

структурне моделювання може прийняти абсолютно нову форму, оскільки всю структуру можна розглядати як 3D модель. Багато таких властивостей, якими користуються інженери-проектувальники, наприклад напруження, жорсткість, деформація тощо, можуть бути розраховані набагато точніше, ніж це роблять традиційні обчислювальні методи.

Комп'ютерно-інформаційні технології та інше сучасне програмне забезпечення можуть виявитися дуже зручним інструментом для навчання деталізації, кресленню, побудові деталей через її послідовність.

Сучасні інтегровані комп'ютерно-інформаційні пристрої можуть призвести до високого ступеня свободи введення початкових даних, забезпечуючи швидший і більш природний робочий процес, ніж традиційні методи, і це може допомогти зрозуміти структурну поведінку деталі, щоб більш точно ввести структурні дані про деталь та взяти точний результат аналізу.

Розумна структура матеріалу – це система, що містить багатofункціональні частини, які можуть виконувати зондування, керування та приведення в дію основних властивостей матеріалу. Розумні матеріали використовуються для створення цих розумних структур, які можуть виконувати як чутливі, так і виконавчі функції.

Інтелектуальні матеріали та конструкції, які зустрічаються, можна розділити на три різні групи:

- а) однофазні матеріали;
- б) композитні матеріали;
- в) розумні структури

## 1.4 Висновки та постановка завдання

Протягом останніх кількох десятиліть революційний прогрес відбувається в різних сферах і професіях, які пов'язані з обчислювальним апаратним і програмним забезпеченням та їх застосуванням.

Певні знання та зусилля вживаються в різних сферах життя, щоб засвоїти ці інноваційні зміни та якнайкраще використати їх для роботи на сучасних інформаційно-обчислювальних технологіях та пристроях. Ефект від такої прогресії дуже очевидний в нашому житті, і ми можемо спостерігати ці сучасні методи та пристрої всюди навколо нас.

Модернізація інформаційно-обчислювальної техніки та пристроїв не встигає за багато іншими професіями та галузями, які дуже швидко адаптували свої сучасні обчислювальні практики.

Впровадження сучасних методів обчислень і пристроїв в інженерії можуть бути дуже зручними та корисними, що забезпечує неймовірну легкість інженерам-конструкторам з точки зору вирішення складних задач.

Тому для інженерів модернізована інформаційно-обчислювальна техніка та розробка пристроїв є потребою часу, і не лише для того, щоб генерувати та надавати відповіді на більшу кількість питань та задач, але також і відповідати темпам розвитку, що стрімко розвивається навколо нас.

## 2 КОНЦЕПЦІЯ КОНСОЛІДОВАНОГО КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МАТЕРІАЛІВ, ТЕХНОЛОГІЙ ТА ВИРОБІВ У КОНТЕКСТІ ЦИФРОВОГО МАШИНОБУДУВАННЯ

### 2.1 Методи та інструменти цифрового машинобудування для комп'ютерного моделювання технологій та конструкцій

Сучасне машинобудування, інженерія, робототехніка розвивається у напрямі цифрового виробництва (Digital Manufacturing – DM), яке є технологічною підготовкою виготовлення нових виробів у глобальному інформаційному просторі за допомогою програмних засобів моделювання, планування та тестування виробничих процесів. Прогресивні розробники інженерного програмного забезпечення та найбільші виробники техніки, такі як Siemens [32], розширюють інформаційну платформу цифрового виробництва та інтенсивно формують принципово нову інфраструктуру, стикаючи системи проектування з системами автоматичного управління промисловими установками та роботами.

В цьому актуальному напрямку еволюціонують сервіси програмних середовищ для проектування в машинобудуванні, поширюючись на важливі службові функції об'єктів, що проектуються для мехатронних виробів.

Для позначення форми інформаційної інфраструктури сучасного машинобудування тому і запропоновано поняття «цифрового машинобудування», яке розширює інформаційний простір і включає цифрове виробництво. На відміну від докладно викладених у довідковій літературі класичних методів конструювання машинобудівних виробів принципи проектування мехатроніки, що розвиваються останнім часом, у складі цифрового машинобудування позиціонують високу значущість не тільки механічних вузлів, а й узгоджених блоків управління. Співвідношення цифрового виробництва та цифрового машинобудування в інформаційному просторі представлено схемою на рисунку 1.1.

Експериментальне дослідження структури та зміна властивостей

Комп'ютерне моделювання структури та властивостей матеріалів

**ІНФОРМАЦІЙНЕ  
МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

Виготовлен  
ня виробів в  
збірці

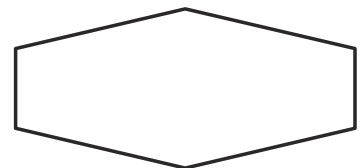


Рисунок 1.1 – Інформаційна структура цифрового машинобудування: комп'ютерне моделювання CAD/CAE технологій та виробів з використанням баз даних матеріалів у складі цифрового машинобудування

Найбільш насичені інформацією про матеріали бази даних необхідні на проектному етапі симуляції CAE та оптимізації цифрової моделі. Невипадковий інтерес до цієї проблематики американських військових відомств, включаючи DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), які постійно інвестують розвиток багаторівневого проектування в розподілених програмних середовищах та інтеграцію в них обчислювального матеріалознавства, розвивають автоматизацію баз даних про нові конструкційні та функціональні матеріали.

Оскільки достовірна інформація про властивості та моделі поведінки матеріалів відіграє ключову роль у забезпеченні точності при симуляції технологічних процесів та експлуатаційних режимів виробів, є актуальним та своєчасним організувати новий напрямок прикладних досліджень на стику інформатики та матеріалознавства – інформаційне матеріалознавство. Інформаційне матеріалознавство у складі цифрового машинобудування може вирішувати завдання формування та організації баз даних, комп'ютерного моделювання структури та властивостей матеріалів, комп'ютерної обробки та інтерпретації експериментальних даних, а також розглядати питання трансляції даних у комп'ютерні моделі CAE, регулювати управління базами та забезпечувати їх інтеграцію з іншими компонентами інформаційного середовища.

Окремі методи та інструменти цифрового машинобудування використовуються нині багатьма підприємствами. Економія тимчасових та матеріальних витрат на виготовлення прототипів, нових виробів та малих партій досягається при цьому за рахунок скорочення дорогих помилок у реальних виробничих процесах завдяки їхньому ранньому винаходу та усунення на стадії проектування.

Усі етапи виготовлення та обслуговування машинобудівної продукції, включаючи проектування виробів, розробку технологій, оформлення конструкторсько-технологічної документації, створення прототипів, проведення тестових випробувань, виробництво, складування, відвантаження, утилізацію та інші необхідні заходи, утворюють життєвий цикл виробу (Product Life-Cycle

Management - PLM). В даний час відбувається об'єднання елементів проектування, виробництва та управління життєвим циклом виробу в інформаційному просторі цифрового машинобудування, що розширюється.

Активно обговорювана останнім часом проблема цифрового машинобудування, що вирішується науковою спільнотою, полягає в побудові паралельного проектування. Для вирішення цієї проблеми необхідно консолідувати на базі цифрової моделі виробу розрізнені програмні засоби, що використовуються різними службами та підрозділи підприємства, включаючи конструкторські та технологічні бюро.

Складність розв'язання проблеми обумовлена величезною кількістю виявлених і ще не встановлених факторів з кола технічних дисциплін, що впливають на підсумкову якість виробів. У більшості випадків зв'язок між цими факторами та конструкторсько-технологічним проектуванням відсутній на рівні фізико-математичних та комп'ютерних моделей, що ускладнює їх інтеграцію до загального інформаційного потоку.

Наростаюча потреба у швидких, надійних та зручних для користувача програмах, що реалізують широкий спектр інженерних розрахунків, послужила імпульсом до розробки як універсальних, так і спеціалізованих пакетів прикладних програм для комп'ютерного інженерного аналізу – CAE.

Слід зазначити комунікативну нестачу численних програм CAE, які представлені на ринку інформаційних технологій. На відміну від інтегрованих комплексів, програмні модулі яких згруповані навколо 3D CAD, програми CAE від різних постачальників можуть мати вузьку спеціалізацію з детальним опрацюванням нюансів розв'язуваного типу завдань. У зв'язку з цим виникають проблеми поєднання програм від різних розробників для консолідованого вирішення проектних завдань.

Однією з причин дисбалансу є недостатнє розуміння ролі та суті цих програм, насамперед – організаторами виробничих та освітніх структур, які недооцінюють актуальність зміни підходів до підготовки фахівців, які повною мірою володіють

сучасними технологіями комп'ютерного моделювання. Разом з тим важливішою проблемою, яку необхідно подолати для отримання очікуваних результатів, є відсутність готових до використання комп'ютерних моделей.

Створення комп'ютерної моделі для додатків цифрового машинобудування включає розробку математичної моделі аналізованих процесів разом із навантаженнями, граничними та початковими умовами; вибір моделей поведінки матеріалів та вимірювання властивостей, обґрунтування опцій рахувальника та розрахункової сітки. Переважним методом дискретизації математичних моделей є метод кінцевих елементів.

Все різноманіття комп'ютерних інженерних розрахунків, які становлять інтерес для машинобудування, можна класифікувати за об'єктами моделювання та розбити на два основні напрямки – конструкторські розрахунки та імітація технологій.

Моделювання технологій CAE включає комп'ютерний аналіз технологічних процесів лиття металів та пластмас, обробки тиском, термообробки, зварювання, механообробки, аналізу будови структури та визначення експлуатаційних характеристик матеріалу.

При проектуванні в програмному середовищі CAD/CAE/CAM програми CAE виконують комп'ютерні експерименти в широкому діапазоні фізичних моделей та процесів, забезпечуючи правильний вибір інженерами конструктивних та технологічних параметрів виробу, що проектується. У прикладних дослідженнях комп'ютерні інструменти CAE використовуються для пошуку нових технічних рішень, конструкцій та технологій. Водночас комп'ютерний інженерний аналіз може бути спрямований на вирішення теоретичних завдань та виявлення нових закономірностей, наприклад, при розробці нанотехнологій та нових матеріалів. Перевагою комп'ютерного дослідження є можливість аналізувати міждисциплінарні моделі та візуалізувати приховані процеси. Зручною інтерфейсною якістю комп'ютерних експериментів є тривимірна кількісна візуалізація результатів, процесів і руйнувань.

Комп'ютерне моделювання матеріалів, технологій або конструкцій послідовно проходить через кілька стадій:

- концептуальне моделювання (формулювання фізичної моделі),
- математичне моделювання (формулювання системи рівнянь),
- дискретизація (генерація розрахункової сітки – препроцесинг),
- вибір алгоритмів,
- програмування,
- чисельне рішення (процесинг),
- презентація розрахункових результатів (постпроцесинг).

На кожній стадії комп'ютерну модель можуть бути внесені помилки.

Комп'ютерні розрахунки з метою забезпечення їхньої достовірності доповнюються експериментальними даними. Доповнивши комп'ютерний експеримент натурними випробуваннями на останніх стадіях проектування, можна досягти максимальної відповідності отриманих результатів реальній поведінці конструкції.

У комп'ютерному аналізі розрізняють верифікацію та валідацію моделей.

Верифікація – це процес, що доводить відповідність створеної моделі та застосовуваних чисельних методів фізичної концепції аналізованого явища. Верифікація проводиться на початковому етапі та переважає рішення простий завдання з обов'язковим поєднанням розрахункових результатів з експериментальними чи аналітичними даними.

Валідація – це процес, який уточнює модель з метою більш адекватного відображення реальних явищ при подальшому проведенні комп'ютерних експериментів з використанням створеної моделі. Валідація проводиться для складних моделей з метою уточнення окремих параметрів, що характеризують унікальну взаємодію різних частин конкретної моделі, та здійснюється також з використанням експериментальних методик.

Методи, що поєднують комп'ютерне моделювання виробу, що проектується, з експериментальним підтвердженням адекватності прийнятих конструкторських рішень і використовуваних моделей, при скороченому обсязі експериментальних досліджень забезпечують оптимальний баланс між точністю і вартістю проекту. Надалі, при проектуванні аналогічних конструкцій та пристроїв, проведення експериментів на натурних зразках не потрібно, достатньо отримати підтвердження технічних характеристик на верифікованих комп'ютерних моделях.

## 2.2 Методи та інструменти обчислювального матеріалознавства для комп'ютерного моделювання структури та властивостей металічних матеріалів

Промисловість потребує нових конструкційних матеріалів, в тому числі композитних. Запроваджене технологічне обладнання, автоматизоване та мехатронне, яке оснащено нелінійними приводами, дозволяє розробляти сучасні технології для виробництва матеріалів з підвищеними конструкційними властивостями – нових матеріалів в будь-якому розмірному масштабі від нано- до макрорівня. У зв'язку з цим розвитком високопродуктивних інформаційно-обчислювальних систем і програмного забезпечення є можливість проводити комп'ютерне моделювання нових матеріалів для деталей конструкційного призначення (рис.2.2).

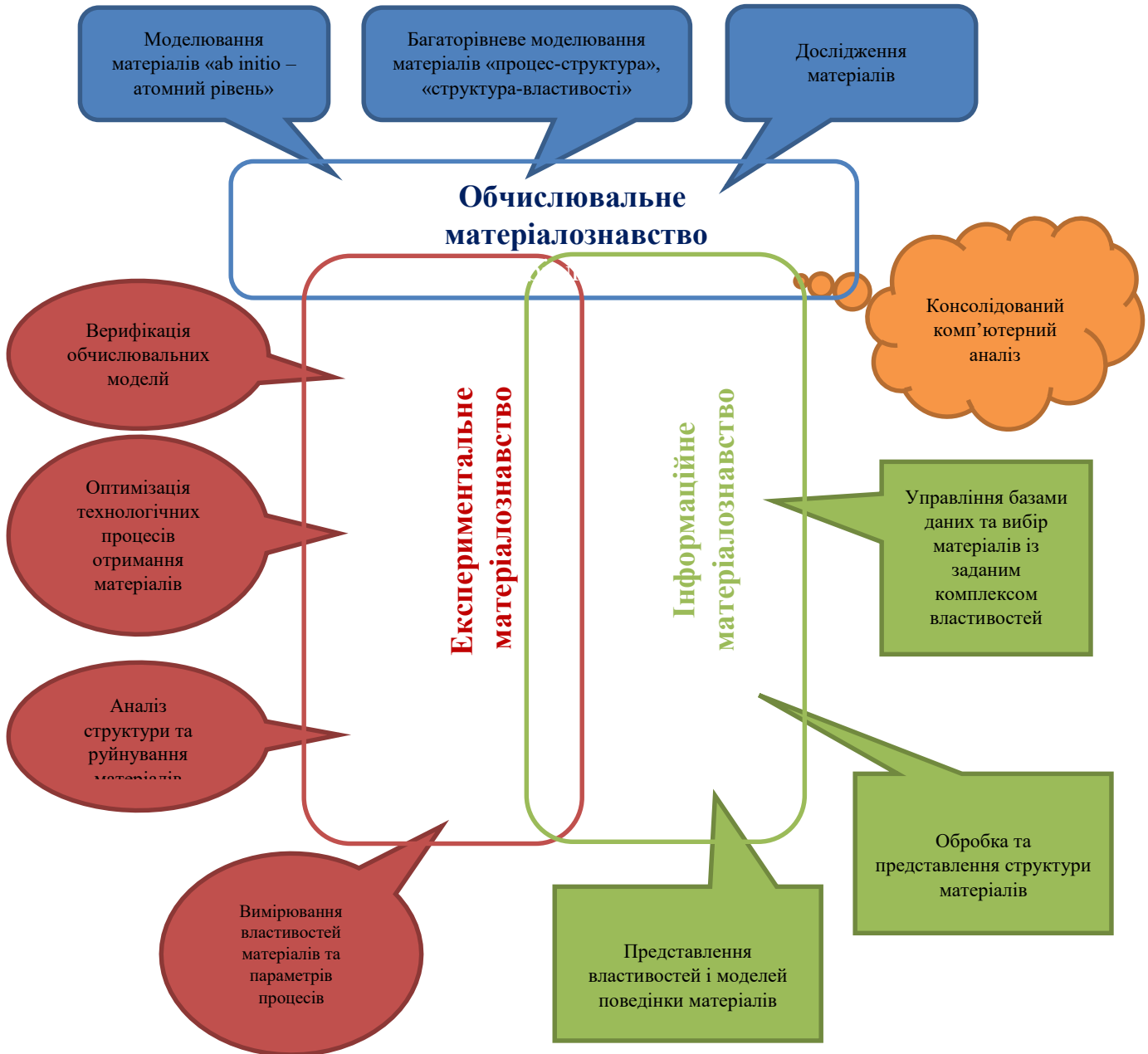


Рисунок 2.2 – Класифікація напрямків сучасного матеріалознавства: взаємозв'язані актуальні напрями розвитку науки про матеріали та відносне розміщення в структурі нового наукового напрямку

Дослідження матеріалів у прикладній механіці є актуальною світовою тенденцією і реалізується використанням методів інформаційно-обчислювального матеріалознавства зі застосуванням консолідованого комп'ютерного металографічного та морфологічного аналізу.

З одного боку необхідно створити нові методи інформаційно-обчислювального матеріалознавства для вибору матеріалів на початковому етапі проектування виробів та формування відповідних баз даних матеріалів, розробити ефективні алгоритми обробки моделей поведінки матеріалів, перевірити достовірність відповідних результатів. З іншого – потрібно вдосконалювати методи інформаційно-обчислювального матеріалознавства для комп'ютерного моделювання структури та властивостей матеріалів, але орієнтуватися і на отримання нових сучасніших матеріалів. Побудова такої методології зумовлює необхідність теоретичних та експериментальних досліджень дотично інформаційно-обчислювального матеріалознавству з виходом на комп'ютерне матеріалознавство з метою подальшої оптимізації конструкцій та матеріалів вцілому.

Проблеми консолідації ускладняється нелінійним та відповідним характером, невизначеністю взаємозв'язку «структура матеріалу» та «службове призначення».

Заважають такій консолідації наступні варіанти:

1. Сумарний обсяг роботи по формуванню взаємозв'язків «структура матеріалу» «службове призначення» часто є нездійсненим у зв'язку зі урахуванням того, що для побудови 3D-моделей мікроструктури за експериментальними 2D-зображеннями для комп'ютерної оцінки властивостей вимагає великих витрат часу.

2. Неповна інформація про параметри інформаційно-обчислювальної моделі через неадекватність даних. Так як, при експлуатації вимагається комплексне бачення та загальне уявлення.

3. Неоднозначна математична модель після спрощень і апроксимацій.

4. Похибки, що обумовлені вибором розрахункової сітки та неправильним вибором чисельних методів вирішення.

5. Похибки вимірювання фізико-механічних, експлуатаційних властивостей матеріалів.

Побудова та організація достовірних баз даних матеріалів залишається невирішеною проблемою сучасного комп'ютерного матеріалознавства конструкційних деталей.

Ці методи комп'ютерного моделювання використовують основні моделі розуміння поведінки матеріалів у більш складних умовах з більшою деталізацією та точністю, ніж це відбувається при експерименті. Кожен метод може використовуватися незалежно один від одного для прогнозування властивостей матеріалів конструкційних деталей.

Інтегрована інженерія обчислювальних матеріалів є однією з значимих галузей науки про матеріали, яка прагне використовувати результати обчислень з експериментами. Основні поточні теми включають кількісну та якісну оцінку, розповсюджуються протягом моделювання для остаточного прийняття рішень.

Ієрархічні рівні в інформаційно-обчислюваному матеріалознавстві представлені на рис.2.3.

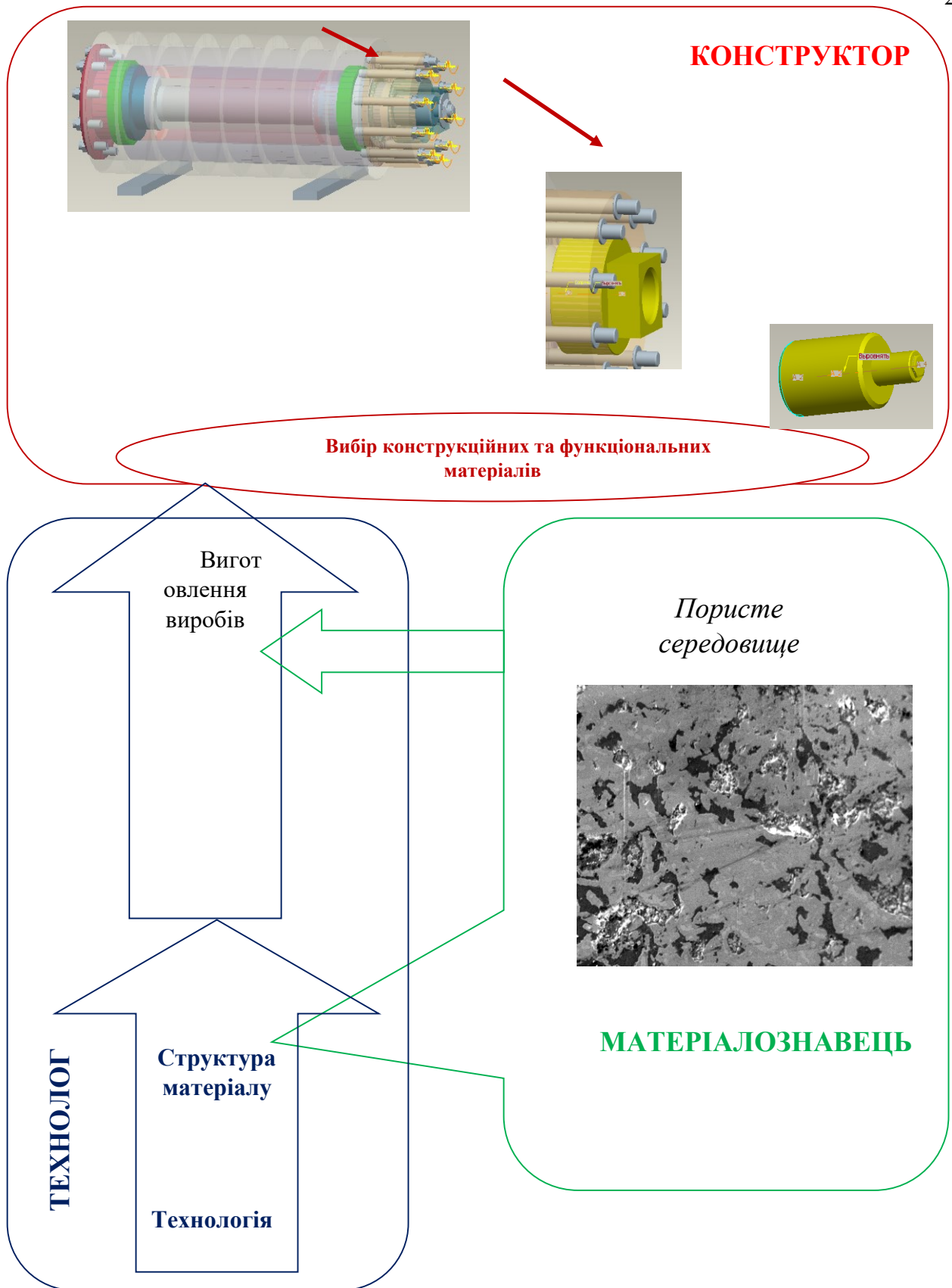


Рисунок 2.3 – Інформаційно-обчислювана структура в матеріалознавстві при моделюванні конструкційних матеріалів

Формування та вивчення інформації про матеріали для комп'ютерного моделювання технологій їх отримання є актуальною проблемою. Проблема застосування результатів та їх методів обчислення в тому, що відповідний зв'язок між структурою матеріалу та комплексом необхідних функціональних властивостей неоднозначний і для багатьох матеріалів не встановлюється у повній мірі. Але існують спроби інтегрувати комп'ютерне моделювання, спираючись на структурні аспекти та нюанси матеріалів.

Типова схема створення нових матеріалів за допомогою комп'ютерного матеріалознавства представлено на рис.2.4.



Рисунок 2.4 – Схема створення нових матеріалів для деталей конструкційного призначення за допомогою комп'ютерного матеріалознавства

Але існує ряд протиріч та невирішених завдань зі структурними аспектами щодо використання інформації про властивості матеріалів у типових прикладних програмах:

1. Нелінійна поведінка матеріалів, яка потребує додаткових даних при аналізі навантаження, що може впливати на початкові умови в комп'ютерних моделях.
2. Неоднозначність апроксимації структури матеріалу при переході до комп'ютерного представлення мікроструктури.
3. Залежність реальних характеристик матеріалу від певного розподілу параметрів мікроструктури в залежності від терміну використання матеріалу.
4. Метастабільність та зміна мікроструктури при певних умовах експлуатації матеріалу.
5. Похибки в описі мікроструктури матеріалу відповідно до параметрів комп'ютерної моделі.

Ключовим фактором підвищення якості готового продукту є інтеграція результатів моделювання структури нових виробів для створення відповідної методології комп'ютерного матеріалознавства. Тому виникає необхідність здійснити відповідний підбір матеріалу, здійснити аналіз їх механічних та експлуатаційних властивостей. Відповідно слід розглянути комп'ютерні методи дослідження структури матеріалів конструкційного призначення.

Вивчення взаємозв'язку між структурою і властивостями матеріалів є важливою сферою дослідження і сучасним науковим завданням. Металевих матеріалів є більшість в машинобудуванні, основним призначенням яких є можливість здійснювати силове навантаження. Внутрішня структура також впливає на механічні, експлуатаційні властивості матеріалів.

Традиційно наукові завдання вирішуються з використанням різних експериментальних методів дослідження структури матеріалів. Комп'ютери і програмні комплекси, прикладні програми стають унікальним дослідницьким інструментом для проведення комп'ютерних експериментів. Застосування комп'ютерних інструментів для дослідження відповідних процесів є

безальтернативним засобом і сприяє виявленню факторів, які відповідальні за утворення дефектів. Актуальність комп'ютерних експериментів обумовлена ще і впровадженням інтегрованих програмних середовищ у вигляді комп'ютерних прикладних програм.

Питання про розвиток нових комп'ютерних методів проектування з урахуванням мікроструктури конструкційного матеріалу завжди було актуальним. Для цього мікроструктуру матеріалів і експлуатаційні властивості об'єднують у відповідні зони і прагнуть ідентифікувати як прямі, так і зворотні зв'язки між цими полями для мінімізації робочих ресурсів комп'ютерів.

Сучасний розвиток математичних методів опису багаторівневих ефектів на перетині обчислювального та інформаційного матеріалознавства є необхідністю сформулювати двонаправлений зв'язок між інформаційними поняттями «структура», «властивості», «процеси». Це дозволяє корелювати різні характеристики матеріалів з певними особливостями мікроструктури. Це автоматично приведе до створення точних моделей для комп'ютерної симуляції процесів побудови структури.

### 2.3 Актуальні завдання інтеграції результатів інформаційно-обчислювального матеріалознавства у цифрове машинобудування

Інтеграція досліджень матеріалів у машинобудівне проектування є актуальною світовою тенденцією та реалізується з використанням методів інформаційно-обчислювального матеріалознавства з урахуванням комп'ютерного аналізу технологічних процесів – Computational Materials Science and Engineering. На всіх етапах конструювання та підготовки виробництва машинобудівних виробів в інтегрованих середовищах CAD/CAE/CAM/PLM виникає потреба враховувати та аналізувати саме поведінку матеріалів. Також гостро ставиться питання про спільне конструювання матеріалів та машинобудівних виробів.

Для тісної інтеграції матеріалознавства та машинобудівного проектування - Integrated Computational Materials Engineering – в рамках інформаційного матеріалознавства потрібно об'єднати два напрями досліджень:

- низхідне (top-down) – від заданих технічних параметрів виробу до пошуку матеріалів із необхідними властивостями;
- висхідне (bottom-up) – від можливої структури матеріалів до нових службових характеристик виробу.

У низхідному напрямку необхідно створювати методи інформаційного матеріалознавства для вибору матеріалів на етапі концептуального проектування виробів та формування баз даних матеріалів для створення ефективних алгоритмів обробки моделей поведінки матеріалів CAE та перевіряти достовірність результатів.

У висхідному напрямку необхідно вдосконалювати методи обчислювального матеріалознавства для комп'ютерного моделювання структури та властивостей матеріалів, орієнтуючись на отримання нових. Побудова методології спільної роботи цих розрізнених та протилежних напрямів потребує прикладних досліджень на перетині обчислювального та інформаційного матеріалознавства, експериментальної механіки та проектування комп'ютерних технологій.

Нова група напрямів інформаційно-обчислюваного матеріалознавства має забезпечити інтегровані середовища життєвого циклу виробів PLM необхідними електронними базами даних про матеріали.

Комп'ютерна модель виробу або технології в інформаційному про-CAD/CAE/CAM/PLM включає математичний опис суттєвих процесів та необхідних закономірностей поведінки матеріалів. Для опису закономірностей поведінки матеріалів можуть використовуватись експериментальні дані, отримані в результаті прямого виміру властивостей.

Сучасні програмні комплекси CAE у складі цифрового машинобудування розвиваються у напрямі багатодисциплінарного комп'ютерного моделювання з використанням кінцево-елементних методів аналізу.

Комп'ютерний інжиніринг забезпечує розрахункове обґрунтування конструкції та прогнозує можливі визначення недоліків. На основі комп'ютерних прогнозів оптимізується конструкція, вносяться відповідні зміни до цифрової моделі виробу.

Ускладнює отримання правильних результатів у комп'ютерному інжинірингу недостатня консолідація моделей технологічних процесів та режимів експлуатації виробів. У поточній практиці машинобудівного проектування на вітчизняних підприємствах розробка технологій та конструкцій ведеться автономно технологічними та конструкторськими бюро. Розвитку консолідації сприяє уніфікація САЕ та застосування МКЕ для комп'ютерного аналізу конструкцій, технологій та матеріалів, включаючи використання інструментів інженерного аналізу для моделювання мікроструктури металевих матеріалів з урахуванням технологічних процесів, що застосовуються. На платформі інформаційного матеріалознавства цікавить параметричне моделювання мікроструктури, яке дозволить передбачати зміну локальних властивостей залежно від вибору технологічних параметрів отримання матеріалу.

Для комп'ютерного моделювання матеріалів у інформаційно-обчислювальному матеріалознавстві використовуються методи молекулярної динаміки, звичайно-елементне та ієрархічне моделювання.

Молекулярна динаміка розглядає процеси в нанометричному масштабі та моделює взаємодію атомів.

Звичайно-елементне моделювання працює на макромасштабному рівні та прогнозує поведінку матеріалу з позицій механіки суцільних середовищ.

Названі методи поки що знаходяться на самому початку свого розвитку. Найважливіше завдання інтеграції методів інформаційно-обчислювального матеріалознавства у цифрове машинобудування полягає у тому, щоб пов'язати макроскопічну поведінку матеріалів та конструкцій зі зміною внутрішньої структури .

Принципово важливою складовою частиною цифрового машинобудування стають бази даних, у тому числі відомості про властивості матеріалів, необхідні для розробки технологічних процесів, а також комп'ютерні інструменти симуляції технологій виготовлення та режимів експлуатації виробів, що проектуються. Організація достовірних баз даних матеріалів залишається невирішеною проблемою комп'ютерного моделювання конструкцій та технологій у машинобудуванні.

За результатами аналізу етапів попередньої підготовки та комп'ютерних програм, що використовуються в цифровому машинобудуванні складено схему магістрального руху цифрової моделі від технічного завдання на проектування виробу до виготовлення на промисловому устаткуванні деталей машини, де позначено роль і місце програм CAE, а також інформаційного матеріалознавства та методів обчислювального матеріалознавства. Технічне завдання ініціює дослідно-конструкторську роботу. У супутній науково-дослідній роботі активно використовуються програми CAE як дослідницькі інструменти. Моделі поведінки матеріалів є вхідною інформацією для CAE-програм, що перевіряють проект на двох рівнях: «конструктор» та «технолог».

На рівні «конструктор» створюється цифрова модель конструкції CAD та перевіряються експлуатаційні характеристики виробу в конструкторських CAE-програмах. Конструктор аналізує цифрову модель у контексті складання та призначає матеріали, керуючись державними стандартами на конструкційні та функціональні матеріали відповідно до заявлених експлуатаційних властивостей.

Далі на рівні «технолог» проектується оснащення у CAD та оптимізуються технології виготовлення деталей за допомогою технологічних CAE-програм. Необхідні для моделювання технологічних процесів властивості матеріалів визначаються емпірично та поміщаються у спеціалізовані бази даних. У повному обсязі інформація про технологічні властивості матеріалів при підвищених температурах, тисках та швидкостях деформування відсутня. Більше того, в більшості випадків експериментально визначити необхідні властивості не є

можливим. Відсутні дані заповнюються комп'ютерним моделюванням із обов'язковою верифікацією. Засобами комп'ютерного аналізу можна врахувати вплив неоднорідної структури матеріалу на властивості і передати уточнені дані на повторний аналіз конструкції для підвищення точності прогнозів.

Магістральний маршрут руху цифрової моделі має на увазі прямий файловий зв'язок модулів CAD-CAM, що забезпечує швидке проектування та передвиробничу підготовку нових виробів. Програми CAM відповідають за виготовлення технологічної оснастки та на заключній стадії – за механічну обробку деталей.

Інтеграція результатів моделювання структури та властивостей у цифрове машинобудування та створення для цього методології інформаційно-обчислюваного матеріалознавства є ключовим фактором підвищення якості виробів, що проектуються. При проектуванні виникає потреба здійснювати вибір матеріалів та аналіз їх механічних та функціональних властивостей. У зв'язку з цим слід розглянути комп'ютерні методи дослідження структури та властивостей деталей конструкційного призначення.

## 2.4 Основні тенденції у розвитку комп'ютерних методів дослідження структури та властивостей матеріалів конструкційного призначення

Важливою областю дослідження та науковим завданням матеріалознавства в машинобудуванні є вивчення взаємозв'язку між структурою, будовою, властивостями та своєрідним матеріалознавством.

Металеві матеріали становлять переважний клас конструкційних матеріалів у машинобудуванні, основною службовою властивістю яких є здатність нести силове навантаження. Внутрішня структура значно впливає на механічні властивості металевих матеріалів. Тому дослідження, прогнозування та спрямоване формування характеристик міцності, довговічності, зносостійкості та інших службових якостей завжди пов'язане з пошуком фізичної природи змін структури сплавів під впливом технологічних та експлуатаційних навантажень.

Традиційно наукові завдання металознавства вирішуються з використанням різних експериментальних методів дослідження структури та властивостей матеріалів. Особливістю останнього часу є швидкий розвиток комп'ютерів та програмних комплексів, які стають унікальним дослідницьким інструментом для проведення комп'ютерних експериментів.

Застосування комп'ютерних інструментів та прикладних програм для дослідження машинобудівних процесів найчастіше є безальтернативним засобом і може сприяти виявленню ряду факторів. Актуальність комп'ютерних експериментів обумовлена також впровадженням інтегрованих програмних середовищ у машинобудівне проектування. Проектування у таких середовищах передбачає прогнозування міцності конструкційних матеріалів із обов'язковою оптимізацією технологічних процесів.

Сучасне матеріалознавство та машинобудування, пов'язуючи фізико-механічні, експлуатаційні властивості конструкційних матеріалів насамперед із їхньою структурою, виділяє чотири розмірні рівні:

- наноскопічний;
- мікроскопічний;
- мезоскопічний;
- макроскопічний.

Наноскопічний рівень розглядає структурні питання для групи атомів, мікроскопічний – для гратових дефектів усередині кристаліту, мезоскопічний – для групи кристалітів у полікристалі, макроскопічний – для деталі в цілому або порівнянню за розмірами дослідного зразка.

З позицій цифрового машинобудування виникає потреба позначити відносний внесок перерахованих рівнів структурної ієрархії в моделі поведінки матеріалів при симуляції технологій та конструкцій в умовах макронавантаження.

Крім розмірного масштабу слід також розглядати структуру матеріалу та її розвиток у часовому масштабі. Зовнішній вплив змушує матеріал змінюватися, ініціює структурно-фазові перетворення, які протікають у часі та підкоряються

законам термодинаміки. У багатьох випадках отримана структура не є рівноважною, і різноманіття властивостей визначається варіативністю термодинамічно нерівноважних станів. Відповідно, тимчасові масштаби кінетики перетворень можуть змінюватися від пікосекунд для динаміки атомів до кількох років для явищ корозії, повзучості та втоми при циклічному навантаженні.

Інтеграція ієрархічних структурних моделей у процеси вдосконалення металевих матеріалів та комп'ютерної симуляції деталей потребує розвитку наступних теоретичних основ.

1. Зв'язок полікристалічної і багатофазної структури з властивостями матеріалу, включаючи кооперативну поведінку на старших ієрархічних рівнях структури (міцність, пластичність, руйнування).

2. Кількісні параметри, що забезпечують чутливість відгуків деталей під навантаженням на різні зміни багаторівневої структурної моделі матеріалу деталі.

3. Моделі, що дозволяють передбачати руйнування та деградацію матеріалу з урахуванням їх мікроструктури.

4. Кількісна оцінка впливу включень, домішок, дефектів, які забезпечуються технологічними процесам.

5. Теорія конкурентного розвитку окремих механічних, хімічних та транспортних явищ у разі високонелінійних взаємодій.

6. Взаємозв'язок квантової фізики (хімії) та інжинірингу, що залучає широкий інтервал розмірних та тимчасових масштабів.

Побудова тривимірних наборів даних про мікроструктуру залишається важливим завданням для систем аналізу прогресивних матеріалів у конструкційних деталях. Незважаючи на успіхи в експериментальній підтримці цієї методології, тривимірні дані дорого коштують і повільно просуваються. Більш того, тестові зразки матеріалу, що піддаються експериментальному дослідженню, обмежені за обсягом розмірами робочої зони приладів і дуже малі, що викликає сумнів у адекватності отриманих результатів та їх застосовності до аналізу варіативності мікроструктури матеріалу в макрообсягах.

Важлива тенденція у комп'ютерному моделюванні конструкційних матеріалів полягає в наскрізному аналізі всього технологічного ланцюжка виробництва деталі. Такий підхід дозволить знизити дефектність металевих матеріалів та залишкові напруження в деталі. На кожному етапі технологічної обробки можуть з'явитися дефекти та залишкові напруження, які вплинуть на подальші процеси.

Тому комп'ютерне дослідження структури та властивостей деталей конструкційного призначення завжди супроводжує проектування нових виробів з новими властивостями. У зв'язку з цим з'являється велика кількість дослідницьких та аналітичних робіт, присвячених комп'ютерному аналізу структури та властивостей деталей конструкційного призначення.

### 3 ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СТРУКТУР ЗА ЇХ КОЛЬОРОВИМ 3D-ЗОБРАЖЕННЯМИ

### 3.1 Створення 3D-зображень структур деталей конструкційного призначення

Сьогодні активно розробляються нові підходи до оцінки структурних характеристик матеріалів і виробів, які засновані на вивченні структури в трьох вимірах. Це є основою для становлення такого напрямку матеріалознавства, як «3D Materials Science», або «тривимірне матеріалознавство».

Методи дослідження структур, що застосовуються для збору проєкційних даних про суть матеріалу, систематизовані в таблиці 3.1. Область використання кожного з методів визначається характеристикою матеріалу зразків і специфікою експлуатації.

В матеріалознавстві основною метою використання томографії є якісна і кількісна оцінка різних елементів структури матеріалів і деталей, що включають як структурні складові, так і дефекти. Ці параметри можуть включати розподіл, форму і розміри структурних елементів, об'ємну частку, їх орієнтацію в просторі та ін. Привабливість використання комп'ютерної томографії для вирішення різних задач полягає в оперативності проведення досліджень, зниженні трудовитрат при підготовці зразків.

Для одержання тривимірного зображення на площині потрібне:

- моделювання — створення тривимірної моделі сцени і об'єктів у ній;
- рендеринг (візуалізація) — побудова проєкції відповідно до обраної фізичної моделі;
- виведення отриманого зображення — дисплей або принтер.

Таблиця 3.1 Морфологічний інструментарій тривимірного моделювання

Напрямок роботи	Методи та інструменти	Результати та їх представлення
-----------------	-----------------------	--------------------------------

Збір проєкційних даних про структуру матеріалу	Рентгенівська томографія	Набір проєкцій розподілу лінійного коефіцієнту послаблення рентгенівського випромінювання
	Електронна томографія	Набір електронно-мікроскопічних зображень високого розширення, що візуалізують розподіл електронної густини
	Нейтронна томографія	Набір проєкцій розподілу інтенсивності нейтронного згустку
	Атомно-зондова томографія	Набір двовимірних зображень розподілу атомів хімічних елементів
Обробка проєкційних даних та отримання об'ємних зображень	Томографічна реконструкція на основі математичних алгоритмів з використанням вбудованих програмних модулів	Просторове зображення структури матеріалу у тривимірному просторі
Моделювання та аналіз результатів	Спеціалізоване програмне забезпечення	Кількісний аналіз параметрів структури
		Оцінка просторово-часових характеристик структури матеріалу

3D-моделі представляють 3D-об'єкт, використовуючи набір точок в 3D-просторі, які поєднані між собою різноманітними геометричними об'єктами: трикутниками, лініями тощо.

Сучасне комп'ютерне програмне забезпечення дозволяє використовувати незалежно від алгоритму моделювання різні підходи для побудови 3D-моделі зображення.

Існує суттєва відмінність між глибинним формуванням зображень і об'ємним. Об'ємне – для поверхневих структур не залежить від хвильового числа. Однак для об'ємних структур існує проблема зникнення зображення залежно від радіального хвильового числа.

Спостерігаючи такі структури оком, ми не зможемо бачити надто дрібні деталі. Проекційні системи формування зображення не розробляються для зображення істинних 3D-об'єктів. Тому об'ємне формування зображень вимагає інших методів та підходів.

Глибинне формування зображень характеризується двома основними величинами:

- глибинним дозволом  $\sigma_z$ ,
- діапазоном глибин  $\Delta_z$ .

Глибинний дозвіл  $\sigma_z$  позначає статистичну помилку вимірювання глибини та мінімальний розв'язок різниць глибин зображення відповідно.

Діапазон глибин  $\Delta_z$  – це різниця між мінімальною і максимальною глибинами, які можна виміряти методом глибинного формування зображень. Отже, відношення діапазону глибин і глибинного дозволу,  $\Delta_z / \sigma_z$  – це динамічний діапазон глибинного формування зображень.

### 3.2 Модель і алгоритм обробки кольорових металографічних 3D зображень

Метод ідентифікації структури металів у оптичного мікроскопічного аналізу ґрунтується на звичайному поданні зображень. Є методи зіставлення, що використовують самі пікселі з відповідними значеннями інтенсивності, методи, що здійснюють пошук відповідності між точками контурів, різними структурними елементами, а також між мітками, що позначають конкретні фізичні об'єкти. Але всі існуючі системи автоматичного аналізу не вирішують задачу загалом, їх головним недоліком є вузька специфіка та мала гнучкість. Такі системи реалізують та застосовують базові методиками, і лише деякі з них повністю або частково автоматизовані.

Металографічні структурні зображення представляються комбінацією різноманітних структурних складових:

- фазами, які характеризуються різноманітними розмірами;
- формою та кольором;
- межами зерен, що можуть бути представлені або окремими лініями на зображенні, або сіткою.

Комбінація цих структурних складових дає дуже складну картину, для інтерпретації якої програма, що аналізує, повинна володіти певними даними. Основну вимогу до якісного аналізу зображень формують і ставлять так: на отриманій під мікроскопом фотографії необхідно виділити структурні складові, а після цього їх класифікувати за формою, яскравістю та розміром.

Сегментація, фільтрування помилок та виділення об'єктів з фону, визначення меж об'єктів, розпізнавання образів – це практична реалізація цієї задачі. Для якісного проведення металографічного аналізу потрібна надійна сегментація зображення. Але через складність металографічних зображень немає такої можливості наперед визначити характеристики об'єктів. Тому процес сегментації повинен бути адаптивним і виділяти на зображенні всі цікаві об'єкти, незалежно від розмірів або яскравості. При цьому повинна бути можливість втручання дослідника в процес розпізнавання.

Область застосування цифрової обробки зображень, котрі несуть інформацію про фізичні процеси та структуру, значно збільшилась. Цьому сприяло застосування нових пристроїв і прикладних програм обробки. Але залишаються певні недоліки в роботі таких систем обробки інформації, і на їх усунення направленні зусилля дослідників.

Гострою залишається проблема дослідження пористості у виробках конструкційного призначення. Дослідження пористості пов'язане з використанням металографічних зображень, на яких показаний стан пор. Параметри пор можуть використовуватись для прогнозу проникності, надійності пористих елементів тощо.

Застосування та адаптація сучасних методів автоматизованої обробки зображень до конкретних задач дозволяє підвищити ефективність роботи дослідників із зображеннями та отримати з них більше інформації. Є можливість отримання інформації про 3D структуру об'єктів на зображеннях, що дуже важко і навіть практично неможливо зробити вручну. Тому створення моделі обробки для вирішення проблеми оцінки пористості за її двовимірними кольоровими зображеннями є актуальною.

Система обробки інформації зображень матеріалів з аналізом 3D структури поверхні повинна містити джерело світла. Досліджуваний зразок матеріалу повинен освітлюватися джерелом некогерентного світла. Відбите від поверхні зразка світло, таким чином, сприймається відеокамерою і передається для аналізу у комп'ютер. При відновленні 3D структури поверхні об'єктів розглядають такі відбиття: дифузне і дзеркальне. Об'єкти з дифузним відбиттям є простіші для аналізу та відновлення 3D інформації зображень.

Для дифузної моделі відбиття інтенсивність точки поверхні рівна:

$$I_{\lambda} = I_a + I_{p\lambda}k_d(N \times L) \quad (3.1)$$

де  $I_a$  – інтенсивність розсіяного світла;

$I_{p\lambda}$  – інтенсивність джерела світла;

$k_d$  – дифузний коефіцієнт, який відображає рівень дифузного відбивання досліджуваної точки на поверхні:

$$N_j = \left\{ \frac{-p}{\sqrt{p^2+q^2+1}}, \frac{-q}{\sqrt{p^2+q^2+1}}, \frac{1}{\sqrt{p^2+q^2+1}} \right\}, \quad (3.2)$$

де похідні:

$$p = \frac{dz}{dx}, \quad (3.3)$$

$$q = \frac{dz}{dy}, \quad (3.4)$$

$N_j$  – одиничний вектор нормалі до поверхні в досліджуваній точці зразка деталі;

$L = (L_x, L_y, L_z)$  – одиничний нормалізований вектор, який задає напрям до джерела світла.

Нехай в приймачі маємо джерело світла з такими параметрами, що  $L=(0,0,1)$ , тоді (3.1) з (3.2 – 3.4) приймає вигляд:

$$I_\lambda = I_a + I_{p\lambda} k_d \frac{1}{\sqrt{p^2+q^2+1}}, \quad (3.5)$$

(3.5) показує, що отримані рівняння з чотирма невідомими  $p$ ,  $q$ ,  $k_d$ ,  $I_a$ . Для обчислення похідних вектору нормалі 3D простору потрібно порахувати значення  $I_a$  і дифузного коефіцієнту  $k_d$ . Це здійснюють експериментальним шляхом.

Для виділення сегментів зображення необхідно провести відповідну кольорову селекцію зображення. У результаті селекції маємо просторовий сегмент зображення з нахилою площиною з інтенсивністю  $I_\lambda k_d$  (3.5). Тут у просторовому сегменті для точки, яка лежить на площині (в площині розташована пара), потрібно визначити  $k_d$ :

$$k_d I_{p\lambda} = (I_{\lambda kd} + I_a) \sqrt{\operatorname{tg}^2 \theta + 1}, \quad (3.6)$$

де  $I_{\lambda kd}$  – інтенсивність точки поверхні, в якій розташована пора.

Потім визначаємо інтенсивність фону на основі аналізу інформації про два зображення. Сформуємо штучне затінення структури пори, з якого і отримується зображення.

Приймачем отримуються два зображення одного і того ж досліджуваного зразка з порами. Базове зображення не має тіні. Друге з отриманих зображень буде мати штучне затінення пори. У системі обробки за зображенням пори із тінню можна визначити значення інтенсивності фону цілого металографічного зображення зразка.

Щоб отримати оцінку вектора нормалі пори беремо наступний клас пор. Нехай площина, на якій є пори, розташована горизонтально на висоті  $z_\beta$ .

Для аналізу використаємо схему, де перерізами типу  $Pr(x, y)$ , представлено пору, яка розташована горизонтально на висоті  $z_\beta$  (рис.3.1). Перерізи пори зроблені площинами, які паралельні площині  $YOZ$ , сліди яких є на площині  $XOY$  прямі паралельні вісі  $OY$ .

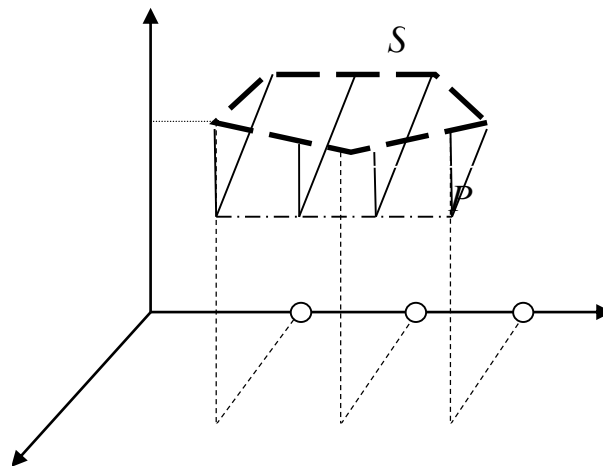


Рисунок 3.1 – Зображення пори за допомогою перерізів площини

Загальна аналітична модель пори з врахуванням висоти  $z_\beta$ :

$$z_{\beta pr} = z_\beta + z_{pr}, \quad (3.7)$$

де  $z_{pr} = f(x, y)$ .

Далі шукаємо оцінку похідних вектора нормалі пори, яка обмежена поверхнею  $S_{cr}$ , рівняння якої  $Z_{pr} = f(x, y)$ . Переріз пори площиною, яка розташована на відстані  $x$  від площини  $YOZ$ , що залежить від  $x$ , позначимо  $Pr(x, y)$ .

Приймаємо для спрощення розрахунку оцінки вектора нормалі даної пори такі припущення:

- поверхня  $S_{pr}$  розташована над площиною  $XOY$ ;
- переріз тріщини  $Pr(x, y)$  не залежить від  $x$ , для всіх  $x$ , що належать відрізку  $[x_1, x_n]$ .

Тут повинна виконуватися умова:

$$P_r(x_a, y) = P_r(x_b, y), \quad (3.8)$$

$$\forall x_a \in [x_1, x_n], \forall x_b \in [x_1, x_n]$$

Перевірку цієї умови можна реалізувати програмно. З розгляду рис.3.1 видно, що існує зона значень  $[x < x_1; x > x_n]$ , де умова (3.8) не виконується.

При виконанні (3.8) для точок пори, що належать перерізу  $P_r(x, y)$ ,  $x \in [x_1, x_n]$  похідна (3.5):

$$p = p(x, y) = 0, \quad (3.9)$$

Підставивши певні попередні значення, отримаємо:

$$q = q(x, y) = \sqrt{\frac{(tg^2\theta + 1)(I_{\lambda kd} - I_a)}{(I_{\lambda} - I_a)^2}} - 1, \quad (3.10)$$

де  $I_{\lambda} = I_{\lambda}(x, y)$ .

Звідси отримаємо вираз для оцінки похідних вектора нормалі пори, який скорочено позначатимемо  $Prg$ .

Оцінку вертикальної координати пори в 3D-просторі відносно поверхні площини визначимо як:

$$z(x_{pr}, y_{pr}) = z_{pr} + \int_{x_0}^{x_{pr}} \frac{df(x, y_0)}{dx} + \int_{y_0}^{y_{pr}} \frac{df(x_{pr}, y)}{dy} dy, \quad (3.11)$$

де  $y_{cr}$  – відома вертикальна координата відносно поверхні площини елемента  $z_{cr} = f(x_0, y_0)$  в точці  $(x_0, y_0)$ , що належить проекції підсегмента пори на площину  $XOY$ .

$$z_{prt} = f(x, y_{tnm}) = z_{prb} = f(x, y_{bnm}) = \rho \approx 0, \quad (3.12)$$

Оцінка вертикальної координати в сегменті пори  $Seg_{nm}$  в 3D-просторі приймає таку форму:

$$z(x, y_\sigma) = \int_{y_{bnm}}^{y_\sigma} \frac{df(x, y)}{dy} dy = \int_{y_{bnm}}^{y_\sigma} \left( \sqrt{\frac{(tg^2\theta+1)(I_{\lambda kd}-I_a)^2}{(I_\lambda(x, y)-I_a)^2}} - 1 \right) dy, \quad (3.13)$$

Далі проведемо інтегрування по частинах, представимо оцінку площі пори у такій формі:

$$S_{nm} = - \int_{y_{bnm}}^{y_{tnm}} \int_{y_{bnm}}^{y_\sigma} \frac{df(x_{nm}, y)}{dy} dy dy_\sigma = \int_{y_{bnm}}^{y_{tnm}} [y - y_{tnm}] \frac{df(x_{nm}, y)}{dy} dy, \quad (3.14)$$

Маємо оцінку об'єму підсегмента пори  $Seg_{nm}$ :

$$V_{nm} = (b_{nm} - a_{nm}) S_{nm} = (b_{nm} - a_{nm}) \int_{y_{bnm}}^{y_{tnm}} [y - y_{tnm}] \frac{df(x_{nm}, y)}{dy} dy, \quad (3.15)$$

Нехай підсегмент пори  $Seg_{nm}$  представлено відеосигналом, тоді отримаємо оцінку об'єму підсегмента пори  $Seg_{nm}$ :

$$V_{nm} = (b_{nm} - a_{nm}) \times \int_{y_{bnm}}^{y_{tnm}} [y - y_{tnm}] \left[ \sqrt{\frac{(tg^2\theta+1)(I_{\lambda kd}-I_a)^2}{(I_\lambda(x, y)-I_a)^2}} - 1 \right] dy, \quad (3.16)$$

Щоб оцінити об'єм пори необхідно просумувати всі підсегменти пори:

$$\hat{V} = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M V_{nm}, \quad (3.17)$$

На краях пори обчислення об'єму потрібно зробити інтерполяцією значень об'єму. Для кожного краю пори така інтерполяція значень об'єму є лінійною і визначається об'ємом крайнього. На початку пори інтерполяція значень об'єму

визначається об'ємом  $V_{00}$ . На кінці пори – визначається об'ємом  $V_{NM}$ . У результаті інтерполяції отримуються об'єм початку пори  $V_{ss}$  і об'єм кінця пори  $V_{end}$ , які додаються до початкової оцінки об'єма пори  $V$ , що дає оцінку об'єма пори в цілому:

$$V = V_{ss} + V_{end} + \hat{V}, \quad (3.18)$$

На основі запропонованих розрахунків люмінаційної моделі зображення пористої поверхні буде апробовано програмне забезпечення для аналізу 3D зображень – Avizo<sup>®</sup>. Дана методика дозволить визначити довжину, об'єм пори, а також глибину пороутворення. А оцінка зміни кольору – встановлювати фазовий склад матеріалу деталі конструкційного призначення.

### 3.3 Реалізація обробки 3D зображень

деталей конструкційного призначення за допомогою комп'ютерно-інформаційних технологій Avizo<sup>®</sup>

Доцільним є використання новітніх методів і засобів, які б забезпечили спрощення процедур рендерінгу як на програмному, так і апаратному рівнях, оскільки етап кінцевої візуалізації є найтрудомісткішим етапом формування тривимірних зображень (60-80% від загального обсягу обчислень).

Дослідження та аналіз властивостей деталей конструкційного призначення буде відбуватися за рахунок формування тривимірних зображень у процесі реалізації етапів кінцевої візуалізації з використанням Avizo<sup>®</sup>.

Avizo<sup>®</sup> - одна з найбільш прогресивніших прикладних програм для обробки та аналізу металографічних зображень з можливістю візуалізації тривимірних об'єктів. Це універсальний програмний продукт для наукової та промислової візуалізації та аналізу різноманітних точних даних

Avizo<sup>®</sup> розроблений VSG Visualization Sciences Group і був спочатку розроблений і створений для візуалізації та аналізу певних груп даних.

Avizo<sup>®</sup> - програмне рішення для 3D візуалізації, обробки та аналізу наукових і виробничих даних..

Avizo<sup>®</sup> є об'єктно-орієнтованим програмним забезпеченням. Його модулі використовуються для візуалізації об'єктів даних для виконання обчислювальних операцій над ними.

Прямо-об'ємний рендерінг – це один з найбільш потужних методів для візуалізації даних 3D-зображення у даному програмному продукті. Параметри поглинання та випромінювання світла віднесені до кожної точки обсягу. Моделювання пропускання світла дозволяє відображати дані з будь-якого напрямку погляду без побудови проміжних полігональних моделей. *Avizo<sup>®</sup>* здатний виконувати прямий рендерінг у режимі реального часу .

Металографічні зображення можуть бути представлені комбінацією різноманітних структурних складових:

- фазами, які характеризуються різноманітними розмірами;
- формою та кольором;
- межами зерен;

У ЛНТУ проводяться широкомасштабні та комплексні роботи з проектування, виготовлення, дослідження, аналізу та застосування пористих деталей конструкційного призначення. За своїми властивостями і складом вони нічим не відрізняється від компактної сталі, проте є досить дешевим при виготовленні.

Утворення 3D зображення тут здійснюється шляхом накладання плоских поперечних розрізів відповідного діапазону по висоті готового зразку (рис.3.2).

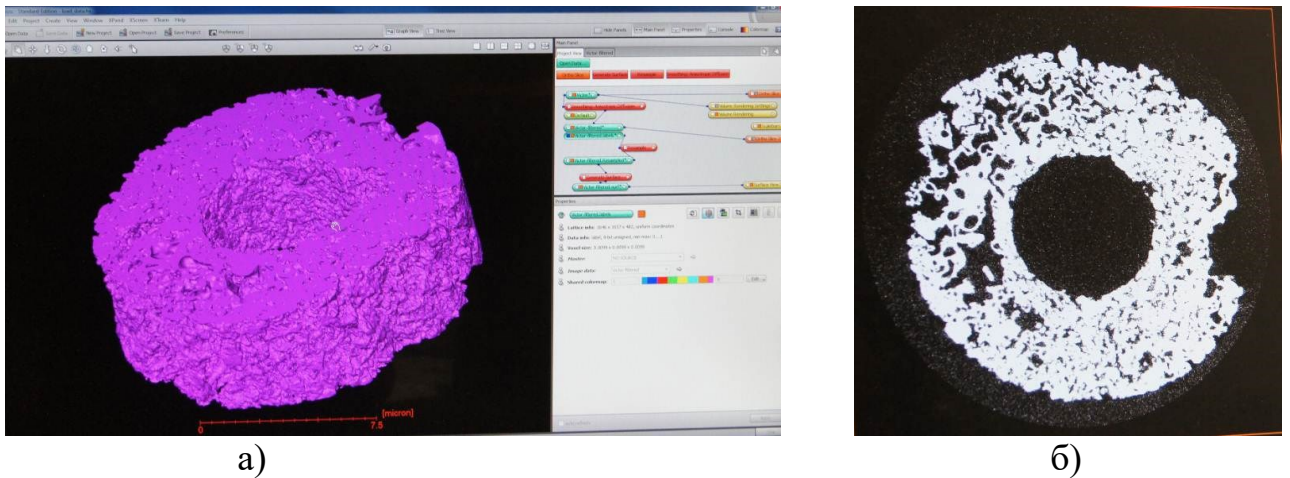


Рисунок 3.2 – Отримане зображення поперечного перерізу пористого матеріалу:

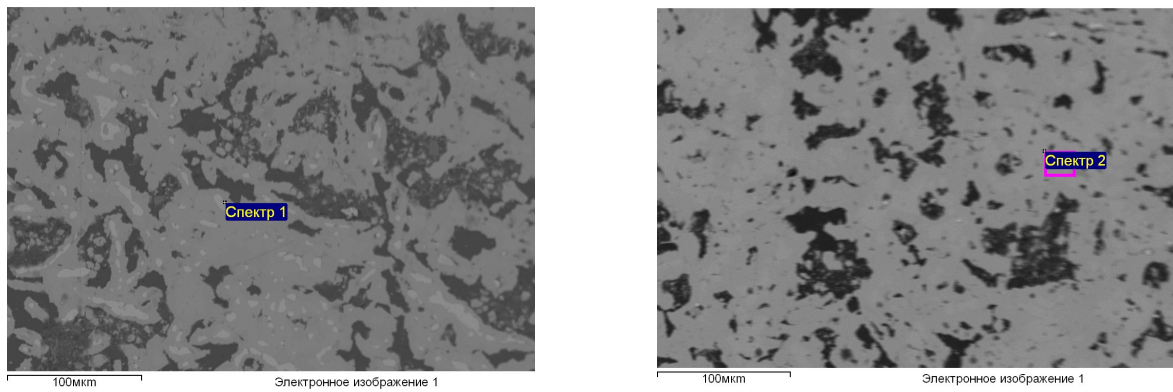
а) 3D-зображення з використанням AVIZO;

б) рентгенограма

Робота Avizo<sup>®</sup> ґрунтується на системному розумінні морфології та мікроструктури дослідного зразка. Ці знання мають значення при оцінці якості деталі. Визначити та дослідити основні морфологічні параметри структури потрібно для повної та якісної оцінки зразка:

- ✓ визначення кількості частинок різного розміру;
- ✓ визначення структурних дефектів зразка;
- ✓ визначення форми пор;
- ✓ визначення загального розподілу пор;
- ✓ визначення загального розподілу певних форм частинок по периметру і об'єму.

На рис.3.3. показані структури деталей конструкційного призначення з відходів промислового виробництва, які отриманні методом сухого радіально-ізостатичного пресування.



а)

б)

Рисунок 3.3 – Мікроструктура деталі (зразка) з відходів промислового виробництва:

а) розмір частинок вихідного порошку – 0,1 мм

б) розмір частинок вихідного порошку – 0,063 мм

У Avizo® можливо вимірювати лінійні, кутові та полярні розміри, а також отримати точні розміри певної ділянки зрізу (рис.3.4). Також можна проводити розрахунок об'єму, площі, периметра об'єкта.

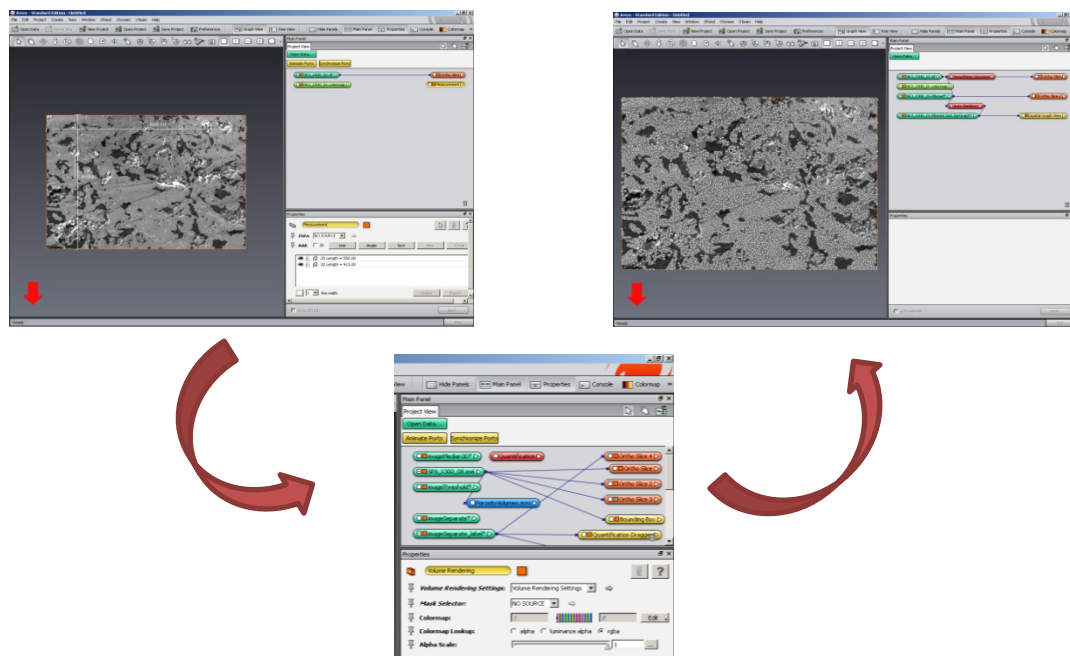


Рисунок 3.4 – Визначення лінійних розмірів та встановлення зв'язків між даними частини зрізу шліфу зразка

Зносостійкість – важлива характеристика будь-якого виробу. Зношування поверхні призводить до зниження функціональних якостей деталей конструкційного призначення. Підвищенню зносостійкості виробів сприяють і конструктивні рішення – компенсація зносу, резервування зносостійкості, загальне поліпшення умов тертя.

За допомогою програми Avizo® можна визначити найбільш слабкі місця деталей конструкційного призначення, які можуть призвести до руйнування конструкції.

Червоним кольором показано найбільш уразливі місця деталей конструкційного призначення (рис.3.5).

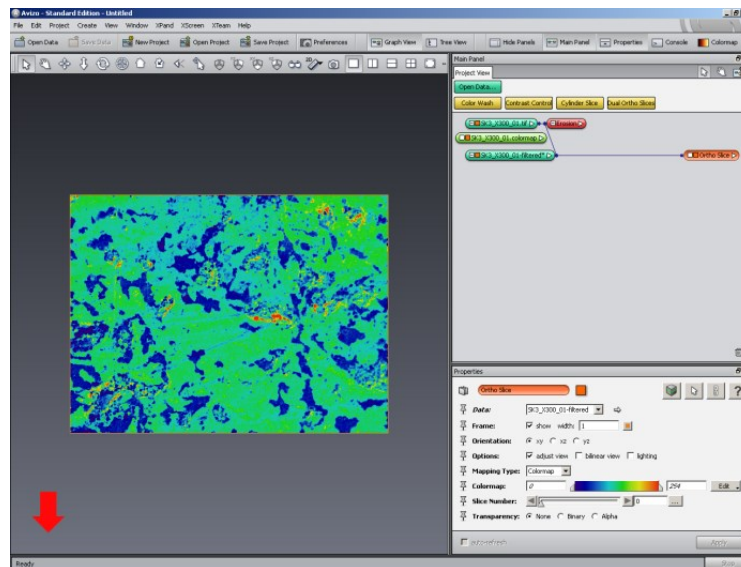
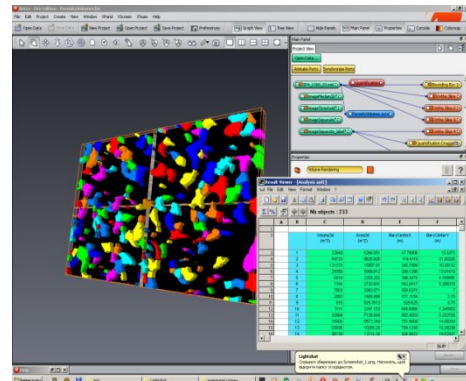
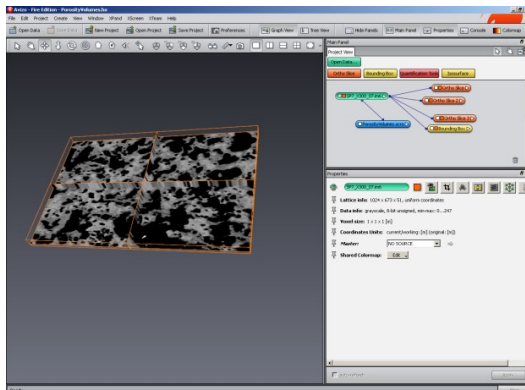
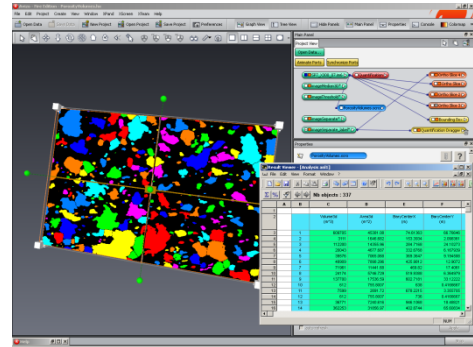
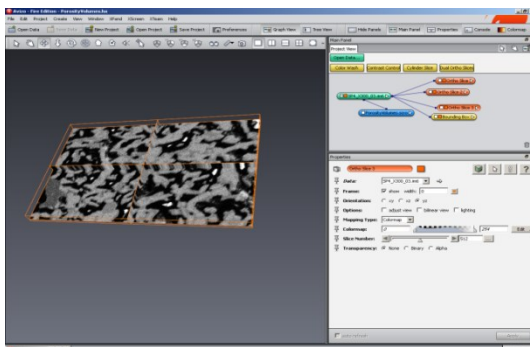


Рисунок 3.5 – Визначення зносостійкості у деталей конструкційного призначення

Комбінація структурних складових (площинні та просторові) для деталей конструкційного призначення представлені на рис.3.6.



a)



б)

Рисунок 3.6 – Визначення та аналіз структурних складових деталей конструкційного призначення у форматі 3D-зображення:

- а) з розміром частинок вихідного порошку – 0,1 мм;
- б) з розміром частинок вихідного порошку – 0,063 мм

Кінцевою задачею металографічного аналізу вважають статистичну обробку отриманих даних у процесі вимірювання характеристик об'єктів.

На рис.3.7. наведено основні структурні характеристики деталей конструкційного призначення, які визначили за допомогою Avizo®.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1													
2			Volume3d (m³)	Area3d (m²)	BaryCenterX (m)	BaryCenterY (m)	BaryCenterZ (m)	Mean	FirstPointX (pixel)	FirstPointY (pixel)	FirstPointZ (pixel)	Index	
3	1		72063	10329.71	17.45294	23.06511	25	1.428875	1	1	1	1	
4	2		200379	21689.03	281.8386	32.28124	25	1.140494	250	1	1	2	
5	3		206295	23028.56	359.5407	20.04648	25	0.8229914	310	1	1	3	
6	4		61965	9121.732	445.2955	14.51934	25	1.065844	424	1	1	4	
7	5		75480	11052.78	491.7061	14.1223	25	1.033784	468	1	1	5	
8	6		35700	7046.203	602.7786	10.22571	25	2.057143	592	1	1	6	
9	7		32130	7407.836	665.9873	8.596826	25	2.007936	658	1	1	7	
10	8		11373	4655.953	766.9014	2.878924	25	2.850224	744	1	1	8	
11	9		150348	16661.87	859.9088	20.24763	25	0.9708277	826	1	1	9	
12	10		49980	9046.162	997.5653	9.147959	25	2.026531	968	1	1	10	
13	11		91086	12699.58	61.84267	23.40482	25	1.717245	57	4	1	11	
14	12		3774	1710.391	553.8514	7.716216	25	7.027027	555	5	1	12	
15	13		663	637.2662	211.3946	8.615365	25	16.39461	212	8	1	13	
16	14		171972	19633.69	783.86	48.6	25	1.07325	797	14	1	14	
17	15		9231	2989.116	119.8674	22.43094	25	3.21547	116	19	1	15	
18	16		9643	3223.708	156.6549	27.60104	25	6.010363	153	21	1	16	
19	17		6783	2846.372	542.2256	35.37594	25	10.67669	540	25	1	17	
20	18		14178	3994.32	604.8453	35.18345	25	2.766187	598	29	1	18	
21	19		34833	6266.929	188.1464	39.52416	25	1.814056	178	30	1	19	
22	20		165189	21033.94	436.9861	61.57888	25	2.260883	429	30	1	20	
23	21		123471	16571.2	937.0256	49.47873	25	1.226766	919	32	1	21	
24	22		32538	5792.474	684.2618	48.33072	25	2.037617	690	36	1	22	
25	23		56406	8994.604	1001.86	57.38065	25	1.702532	1019	40	1	23	
26	24		95319	12792.45	225.2836	74.65971	25	1.331193	246	54	1	24	
27	25		236232	27515.93	647.0324	110.6492	25	1.130613	666	55	1	25	
28	26		30957	6778.979	596.4333	69.56178	25	2.171335	578	60	1	26	
29	27		29635	7045.573	111.1863	71.4547	25	2.523077	102	63	1	27	
30	28		59976	9927.366	17.83944	86.12925	25	1.308674	1	65	1	28	
31	29		11322	3370.893	638.8514	75.5991	25	7.486466	637	67	1	29	
32	30		11628	3369.296	861.2105	82.20175	25	3.399123	863	73	1	30	
33	31		85527	11704.77	799.7365	97.43948	25	1.539058	797	75	1	31	
34	32		62679	10116.02	965.6379	94.11961	25	1.49878	985	76	1	32	
35	33		239649	24937.5	262.7693	114.2707	25	1.093211	258	77	1	33	
36	34		125715	16405.89	537.0832	122.9513	25	1.716024	528	77	1	34	
37	35		14178	3796.166	1017.669	96.05036	25	2.647482	1023	83	1	35	
38	36		29835	5762.365	917.6068	98.11111	25	1.505983	915	86	1	36	
39	37		68289	9574.97	742.4302	108.053	25	1.970874	730	90	1	37	
40	38		202215	22741.28	82.08575	128.0853	25	1.464817	53	94	1	38	
41	39		123420	16224.57	384.9612	133.3934	25	1.590909	367	97	1	39	
42	40		67677	10923.42	886.4785	119.4529	25	1.876413	899	99	1	40	
43	41		38556	6921.942	570.9669	115.9696	25	1.548942	557	103	1	41	
44	42		44013	7170.959	24.47625	134.1599	25	2.365006	17	115	1	42	
45	43		4947	1913.016	447.7216	110.0819	25	5.123711	444	115	1	43	
46	44		22542	4898.541	585.0724	140.862	25	1.868778	591	130	1	44	
47	45		74358	11606.49	474.4986	154.8539	25	1.863512	453	138	1	45	
48	46		179879	16079.07	996.4762	162.7707	25	1.179687	1091	141	1	46	

Рисунок 3.7 – Основні структурні характеристики, які визначили за допомогою

Avizo®

Вмонтований механізм автоматизації в Avizo® прозорий і дозволяє без надмірних зусиль аналізувати дані з багатьох точок зору, отримувати інтегральні характеристики різноманітних властивостей деталей конструкційного призначення (рис.3.8, 3.9.). Це універсальний інструмент для якісного аналізу зображення в науці та на виробництві.

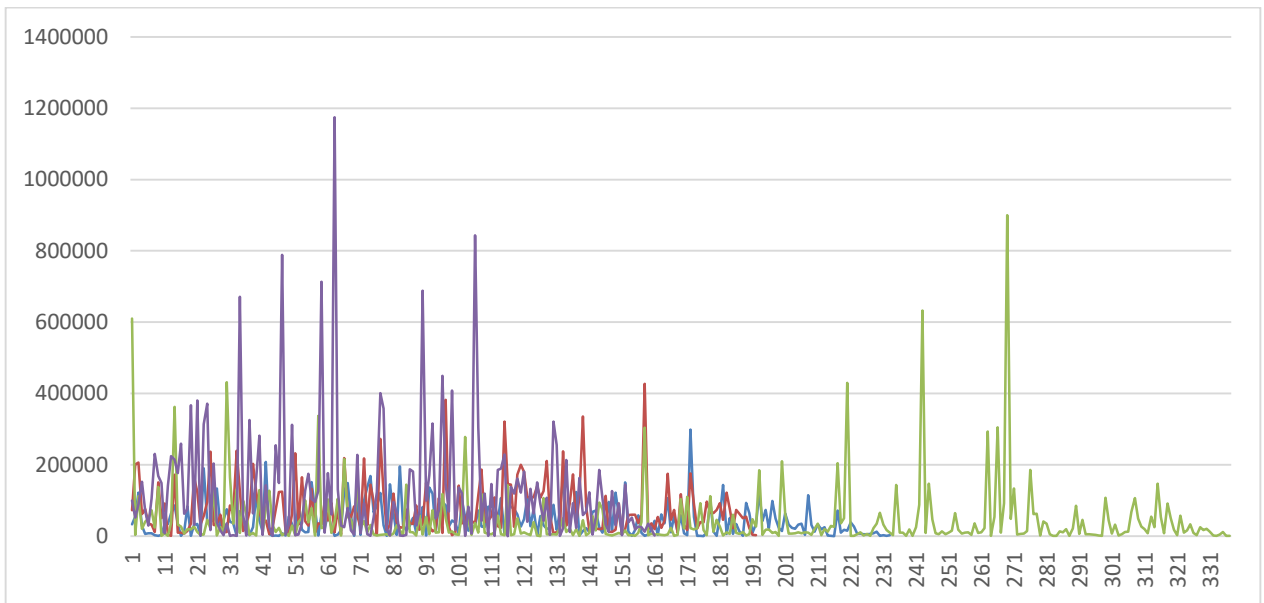
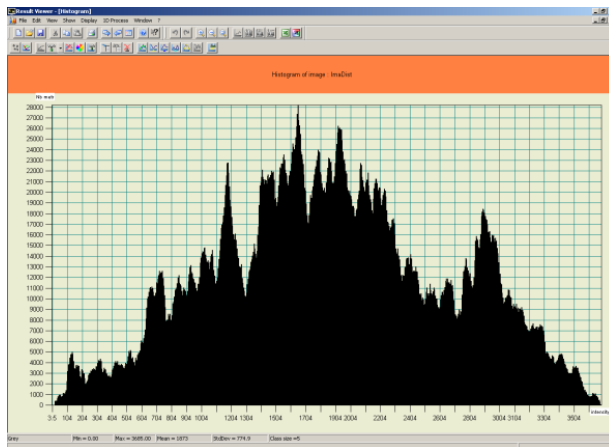
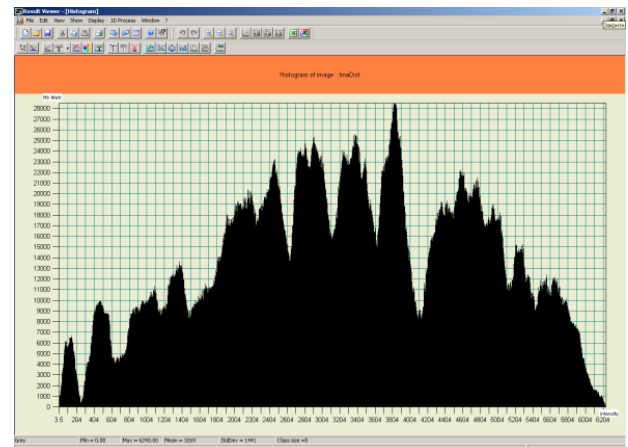


Рисунок 3.8 – Розподіл зміни пористості по січенню деталей конструкційного призначення (розмір частинок вихідного порошку – 0,063 мм)



а)



б)

Рисунок 3.9 – Побудова та відображення лінійної гістограми пористості деталей конструкційного призначення:

- а) з розміром частинок вихідного порошку – 0,1 мм
- б) з розміром частинок вихідного порошку – 0,063 мм

Одна з головних задач розпізнавання зображень в металографічному аналізі – це сегментація зображень. Це розділення зображення на декілька областей, які відрізняються один від одного елементарними ознаками (яскравість, колір, текстура, форма).

Сегментація може виділити ділянки зображення, які можуть розглядатися однорідними. Неправильне виділення сегментів на зображенні в кінцевому рахунку може відбитися на якості розпізнавання і навіть зробити його неможливим.

Існує велика кількість алгоритмів сегментації. Найбільш відомі серед них:

- порогова сегментація;
- центроїдне зв'язування;
- алгоритм вододілу.

Усі ці алгоритми використовують один принцип: групування в області пікселів, які розташовані поруч один з одним і мають рівні яскравості.

Запропонований метод дозволяє сегментувати зображення без вибору порога. При цьому формується база сегментів, що дозволяє зберігати їх атрибути для подальшого аналізу (рис.3.10.).

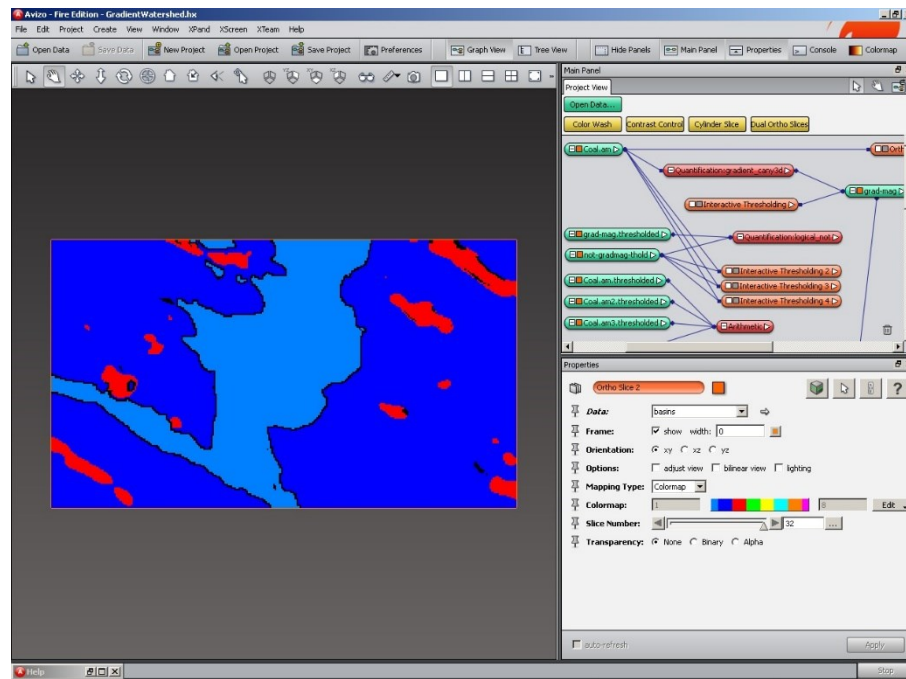


Рисунок 3.10 – Процес сегментації деталей конструкційного призначення у Avizo®

Застосування прогресивної комп'ютерно-інформаційної технології Avizo® для комплексного дослідження аналізу структурних властивостей деталей конструкційного призначення дало змогу отримати – розподіл пористості по січенню зразка. Для візуалізації пороросподілення був застосований етап кінцевої візуалізації – рендерінг. Це дало змогу миттєво визначити комбінацію таких структурних складових деталей конструкційного призначення як фази, а також межі зерен.

На сьогодні Avizo® - найпрогресивніша прикладна програма для обробки та аналізу металографічних зображень з можливістю візуалізації тривимірних об'єктів.

## 4 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ, ЇХ ВЛАСТИВОСТІ

### 4.1. Застосування комп'ютерно-інформаційних технологій для моделювання нанесення захисних покриттів

Деталі конструкційного призначення в механізмах постійно піддаються зношуванню. Тому актуальним є нанесення захисного покриття, що значно підвищить зносостійкість деталей конструкційного призначення в умовах реверсивного тертя. Це питання, що пов'язані з процесом взаємодії поверхонь, що контактують у процесі їхнього взаємного переміщення.

Контакт взаємодії твердих деталей спостерігається лише в окремих зонах, розміри і густина яких залежать від величини прикладеного навантаження, а також від напруженого деформованого стану контактів. Вони залежать від геометричної форми мікронерівностей та механічних властивостей поверхневого шару.

Електрометалізація – спосіб нанесення металевих покриттів на металеві поверхні. Він застосовується для створення захисних зносостійких та антикорозійних покриттів на відповідних деталях.

Для нанесення такого корозійностійкого захисного електрометалізаційного покриття на деталях конструкційного призначення застосовують метод вакуумно-дугового напилення та плазмоелектролітного оксидування (ПЕО). Він – сучасний і перспективний метод отримання на поверхні металів і сплавів відповідних захисних шарів. Властивості таких отриманих покриттів визначаються складом електроліту і режимами процесу ПЕО.

У ході виконання магістерської роботи було нанесено комбіноване захисне покриття на деталі конструкційного призначення. Це втулки, що працюють в умовах реверсивно-поступального тертя, виготовлені з відходів промислового виробництва (порошок сталі ШХ15) з добавлянням міді та без неї (рис.4.1.)

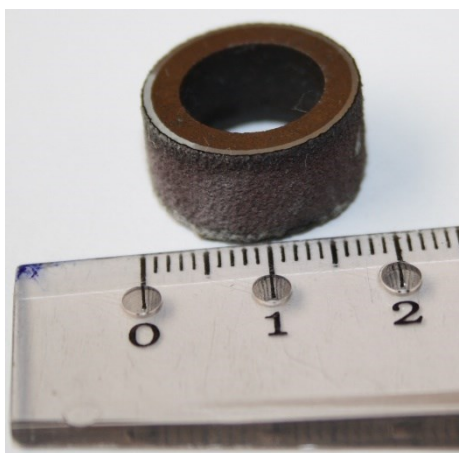


Рисунок 4.1 – Загальний вигляд втулок з комбінованим покриттям

Далі було вивчено проблему напилення на деталь, згодом виникло питання розробки відповідного програмного забезпечення, що моделює та досліджує процес нанесення на деталь захисного покриття. Це значно зменшує витрати часу на обчислення та отриманні відповідних даних.

Час нанесення, товщина захисного шару та вид покриття – вихідні дані для розробки програмного забезпечення. До того ж програма повинна бути універсальною, простою та ергономічною.

Існує багато комп'ютерно-інформаційних систем, але не всі з них можуть виконувати інженерні розрахунки.

Java Script – це динамічна мова програмування. Це інтерпретована мова програмування з об'єктно орієнтованими можливостями. Java Script є найбільш поширеною формою мови. Сценарій повинен бути включений у систему або на який посилається HTML-документа для коду. Java Script – механізм, що забезпечує безліч переваг в порівнянні з традиційними CGI серверних сценаріїв.

Для відтворення та порівняння захисного покриття методом ПЕО і електрометалізаційним методом у розробленому програмно-інформаційному забезпеченні (рис.4.2.) необхідно задати дані, які виведені на табло.

Початкові дані для розробки програмного забезпечення: внутрішній діаметр деталі, зовнішній діаметр, висоту деталі, а також характеристики, які стосуються методів напилення:

- продуктивність напилення;
- дефектний шар;
- знос поверхні;
- густину матеріалу;
- швидкість обертання деталі;
- швидкість переміщення металізатора відносно напилювальної поверхні.

The screenshot shows a software interface with the following sections:

- Geometric Parameters:**
  - Внутрішній діаметр, мм: 50
  - Зовнішній діаметр, мм: 55
  - Висота (мм): 100
  - Знос поверхні, мм: 1
  - Густина матеріалу: 2.69 (with a dropdown arrow)
  - Вести вручну, г/см<sup>3</sup>: 0 (with a radio button)
- Production and Defect Parameters:**
  - Продуктивність напилення, кг/год: 1
  - Дефектний шар, мм: 1
- Process Parameters:**
  - Швидкість обертання деталі, м/хв: 15 (with a slider)
  - Швидкість переміщення металізатора відносно напилюваної поверхні, мм/об: 10 (with a slider)
- Electroplating Options:**
  - Електрометалізаційне напилення:  Вкл.
  - Зовнішнє напилення:
  - Внутрішнє напилення:
  - Колір: #CCCCCC
- Plasma Electrolytic Oxidation Options:**
  - Метод плазми електролітичного окисування:  Вкл.
  - Зовнішнє напилення:
  - Внутрішнє напилення:
  - Колір: #000000
- Buttons and Navigation:**
  - Старт button
  - Деталі досліді | Графіки | Візуальна модель (navigation links)

Рисунок 4.2 – Інтерфейс програми «Моделювання процесу напилення на деталь конструкційного призначення»

Проводимо інтерактивне обчислення параметрів напилення після введення всіх необхідних початкових даних (рис.4.3).

[Деталі дослід](#) [Графіки](#) [Візуальна модель](#)

Товщина напилення: 300 мкм

Час напилення ESS: 100 сек (1.667 хв)

Час напилення PEO: 1344 сек (299.117 хв)

Рисунок 4.3 – Результати обчислення параметрів напилення захисного покриття на деталь конструкційного призначення

У даному програмному забезпеченні для побудови необхідних графічних залежностей розроблений відповідний модуль «Chart» (рис.4.4, 4.5.).

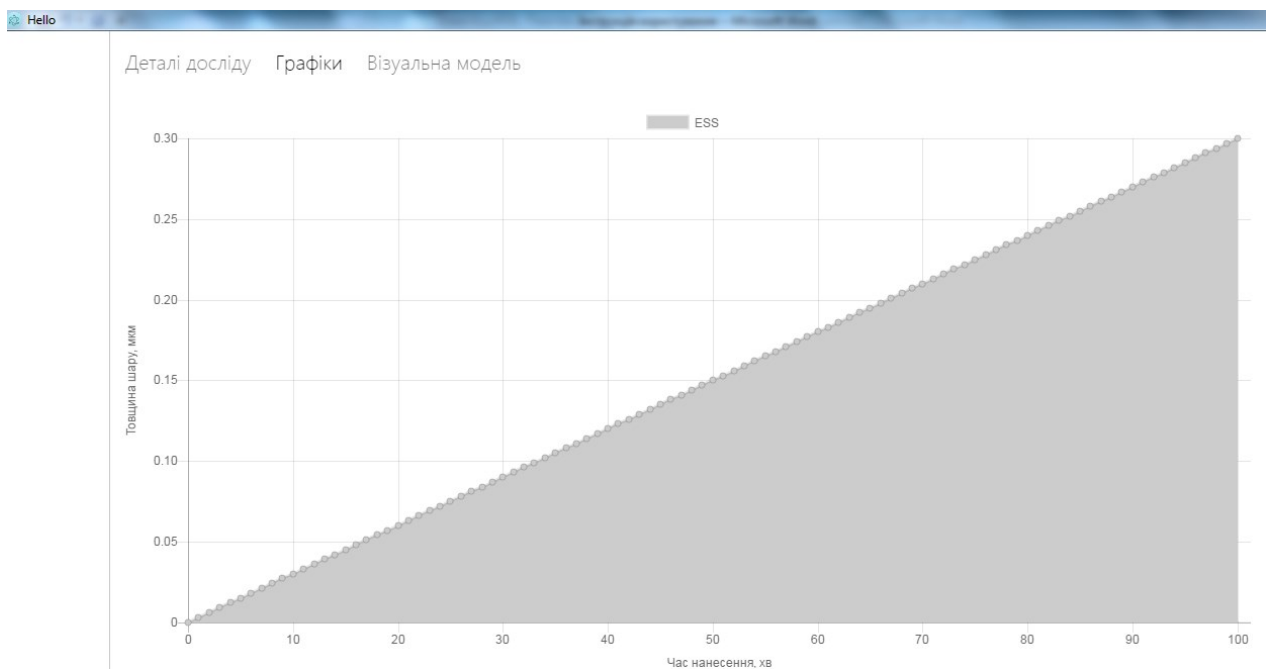


Рисунок 4.4 – Залежність товщини електродугового напилення відносно часу нанесення

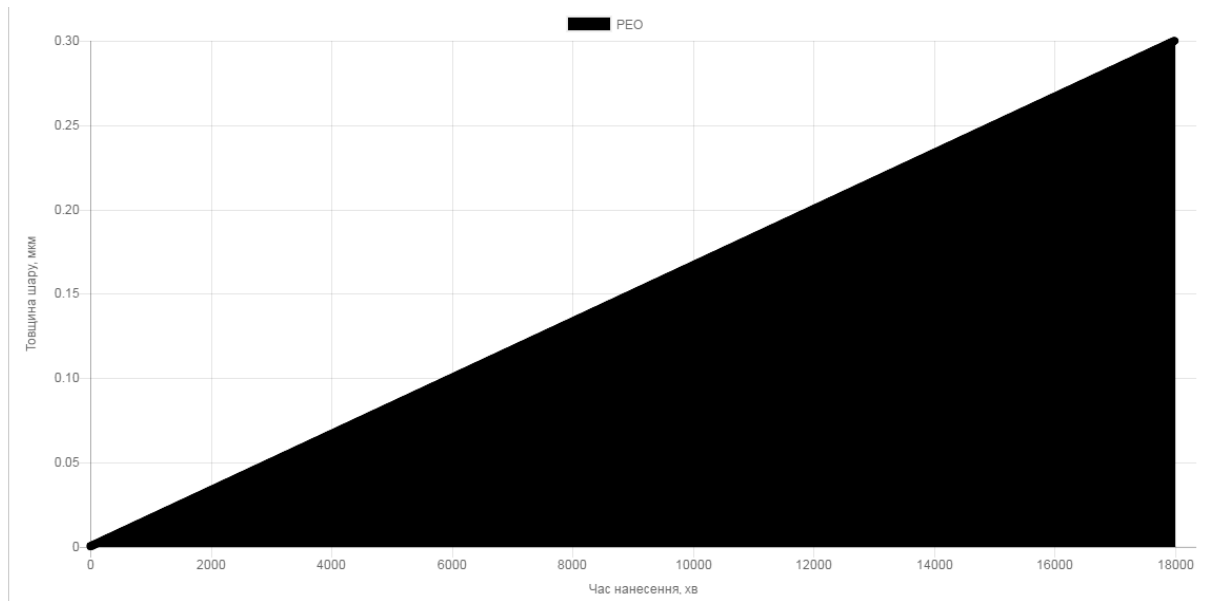


Рисунок 4.5 – Залежність товщини плазмоелектролітного оксидування відносно часу нанесення

Модуль «Clearness» відповідає за наочність комп'ютерного моделювання даного програмного забезпечення (рис.4.6.).

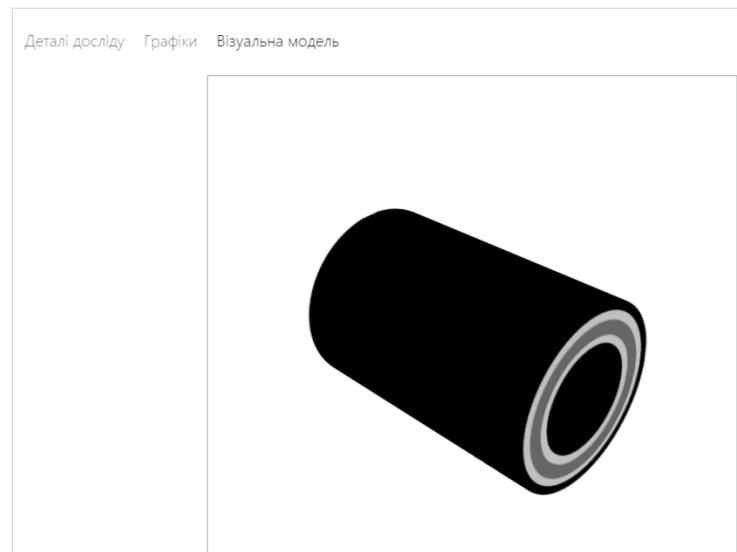


Рисунок 4.6 – Процес комп'ютерного моделювання процесу нанесення покриття

Ця програма є досить зручна і проста у використанні і має наступні переваги над аналогами:

- можна змоделювати деталь відповідної конфігурації та робити натурні експерименти, це значно економить час;
- можна моделювати наплення на різного роду деталей (корпусні, типу «вал», шестерні тощо).

#### 4.2 Застосування комп'ютерно-інформаційних технологій для визначення основних властивостей пористих матеріалів

Моделювання пористої структури пористого матеріалу здійснювалося в пакеті прикладних програм MatLab. Розроблене програмне забезпечення на мові програмування C++, дало змогу змоделювати процес визначення основних властивостей пористих матеріалів.

Оскільки деталь конструкційного призначення (пористий матеріал) має форму витягнутого кругового циліндра (рис.4.7), то моделювання проводилось для наступних вхідних параметрів технологічного процесу: діаметр оправки — 40 мм, діаметр армованої еластичної оболонки — 80 мм.

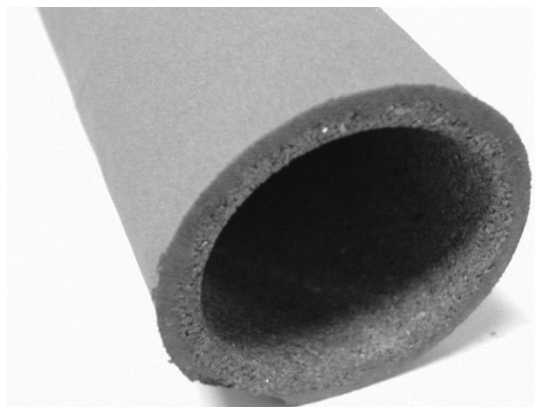


Рисунок 4.7 - Деталь конструкційного призначення (пористий матеріал)

Ø40×220 мм

Для початку роботи з програмою необхідно ввести початкові дані для моделювання. Для цього редагуємо файл Begin.txt, вводячи необхідні параметри для моделювання багат шарового фільтра (рис.4.8).

```

Begin - Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
R1=          // Внешний радиус
1
maxtime =    // Конечный момент времени
0.2
epsilon =    // Точность решения уравнений равновесия
0.00001
n1=          // РЕОЛОГИЧЕСКИЙ ПАРАМЕТР N !!!
0.1
maxiter =    // Максимальное число итераций в решении уравнений равновесия
90000
max_teta_increas = // Максимально возможное увеличение пористости за один шаг по
времени
1.02
max_teta_decreas = // Максимально возможное уменьшение пористости за один шаг по
времени
0.995
begin_teta = // начальное значение пористости
0.6
PL0=         // Удельное лапласовское давление
0
Ez=          //Скорость осевой деформации
0
min_tet=
0.02

```

а)

```

D:\ДОКТОРСЬКА\ФІЛЬТР\Filter КУЗЬМОВ\Filter\Radial2.exe
dt[73]= 0.00134218
time = 0.0705008
step of time = 73
iter=262
!Grad! = 9.98709e-006
epsilon=1e-005
dt[74]= 0.00134218
time = 0.071843
step of time = 74
iter=165
!Grad! = 9.14647e-006
epsilon=1e-005
dt[75]= 0.00134218
time = 0.0731852
step of time = 75
iter=171
!Grad! = 9.53464e-006
epsilon=1e-005
dt[76]= 0.00134218
time = 0.0745273
step of time = 76
iter=225
!Grad! = 7.29618e-006
epsilon=1e-005
d

```

б)

Рисунок 4.8 – Ввід початкових даних (а) та процес обчислення (б) структурних характеристик деталі

Визначений розподіл пористості та радіальної швидкості при моделюванні показаний на рис.4.9.

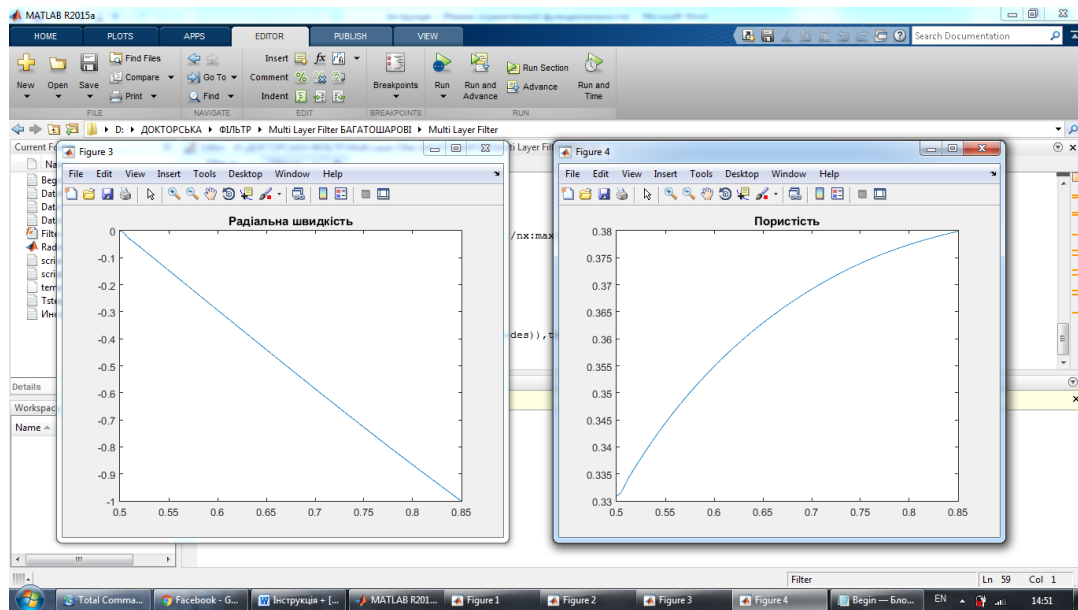


Рисунок 4.9 – Виведення графічних залежностей (властивостей) впливу радіальної швидкості та розподілу пористості деталі конструкційного призначення (пористий матеріал)

Даний метод комп'ютерного моделювання дозволив не тільки визначити розподіл пористості та інших властивостей пористого матеріалу, але й встановити взаємозв'язок між експлуатаційними характеристиками та технологічним режимами їх отримання.

#### 4.3 SolidWorks як сучасна комп'ютерно-інформаційна база для інженерних розрахунків

SolidWorks – програмний комплекс САПр для автоматизації робіт на етапах конструкторської та технологічної підготовки виробництва, забезпечує проектування, моделювання виробів будь-якого ступеня складності і призначення.

Визначальними рисами даної САПр SolidWorks є:

- твердотільне і поверхневе параметричне моделювання;
- повна асоціативність між деталями, збірками та кресленнями;
- багатий інтерфейс імпорту / експорту геометрії;

- експрес-аналіз міцності деталей і кінематики механізмів;
- спеціальні засоби для роботи з великими збірками;
- висока функціональність;
- гнучкість і масштабність;
- 100% дотримання вимог ЕСКД при оформленні креслень.

SolidWorks є системою гібридного параметричного моделювання, вона призначена для проектування деталей у 3D-форматі, а також для оформлення конструкторської документації. У SolidWorks використовується принцип тривимірного твердотілого і поверхневого параметричного проектування. Це дозволяє конструктору створювати об'ємні деталі і компоувати збірки у вигляді 3D моделей.

Створення і розробка деталей конструкційного призначення (пористих матеріалів) неможлива без вимірювання та контролю властивостей вихідних порошків і готових виробів.

Важливою характеристикою пористих матеріалів є розподіл локальної проникності або визначення коефіцієнта проникності.

Відомий ряд методів визначення проникності пористих матеріалів. Кращим є спосіб визначення проникності через коефіцієнт проникності за допомогою вдосконаленої установки, яка представлена на рис.4.10.

Найбільш поширеною проблемою при роботі деталі, що входить у складання, є втрата швидкості та перепад тиску. Найкращим з пропонованих SolidWorks шляхом для вирішення цієї проблеми є визначення даних характеристик в умовах моделювання та прогнозування. При моделюванні цих параметрів можна буде дослідити, чи можливі втрати тиску та швидкості, а також легко можна це змінити.

Засоби, які надає SolidWorks, дозволяють говорити про неї саме як про систему для проектування, моделювання, яка орієнтована на дослідника.



Рисунок 4.10 – Загальний вигляд установки для визначення проникливості пористого матеріалу

Змодельовану цілу систему для визначення комплексної оцінки пористого матеріалу представлено на рис.4.11 та 4.12.

Середовище води зображується рухомими стрілками, які в різних ділянках зображаються різними кольорами, відповідно до максимальних і мінімальних значень в процесі руху.

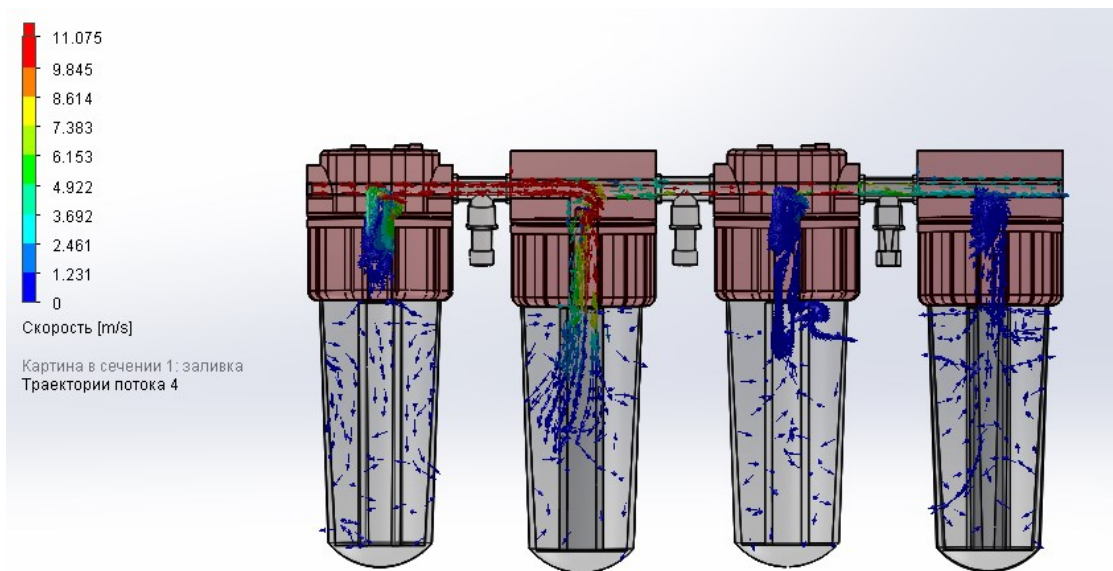


Рисунок 4.11 – Напрямки руху потоку води в системі із 4-х зразків при визначенні швидкості

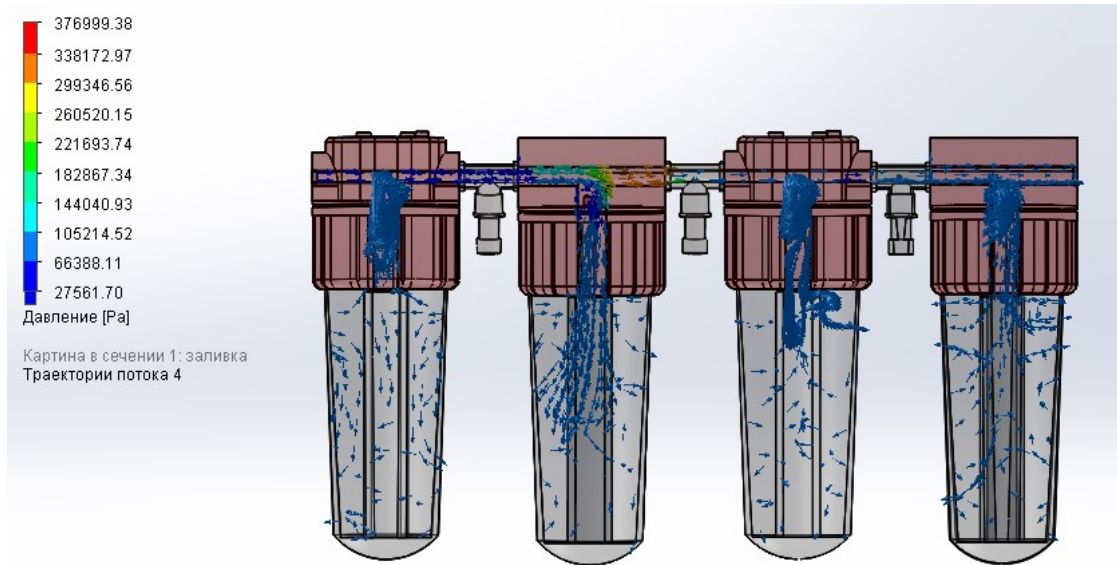


Рисунок 4.12 – Напрямки руху потоку води в системі із 4-х зразків при визначенні перепаду тисків

Графічні залежності швидкості руху потоку води та перепаду тисків представлено на рис.4.13 та 4.14.

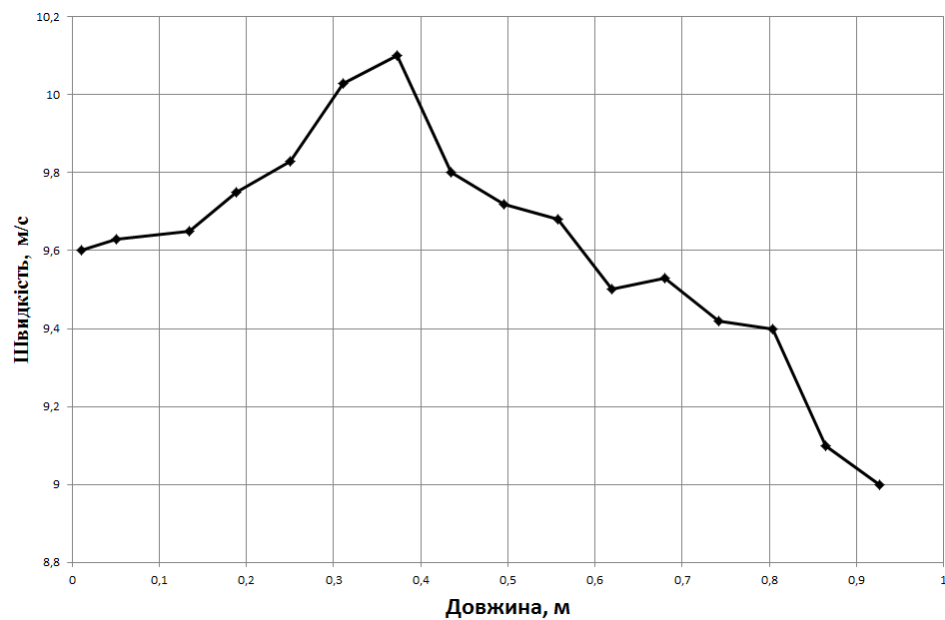


Рисунок 4.13 – Графік залежності швидкості руху води в системі із 4-х зразків відносно перерізу

Графік зображує швидкість руху потоку рідини по довжині перерізу системи із 4-х зразків. З графіка видно, що швидкість руху рідини збільшується ближче до краю зразка. Швидкість змінюється на проміжку від 1 до 10,2 м/с.

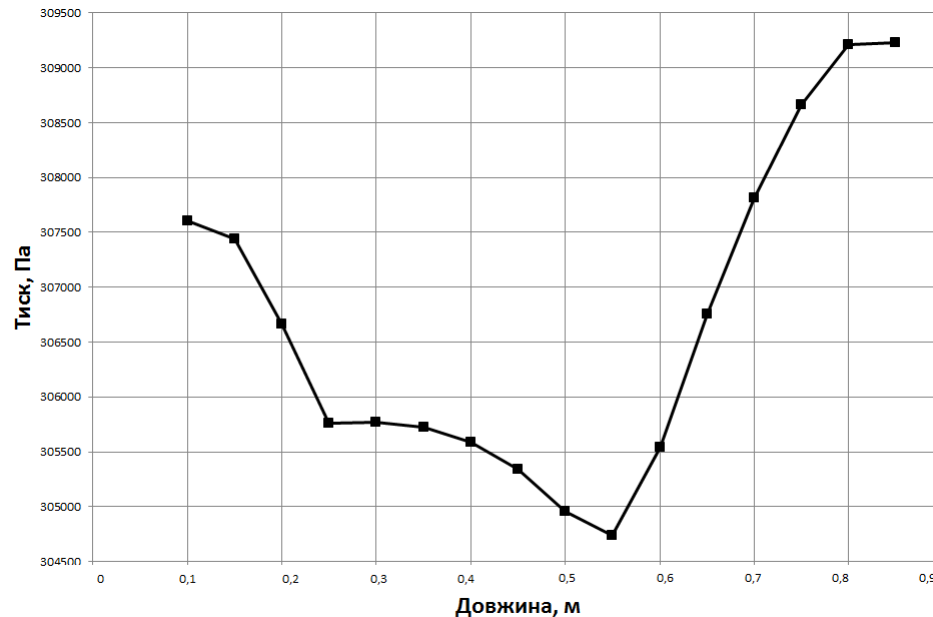


Рисунок 4.14 – Графік залежності перепаду тисків у системі із 4-х зразків відносно перерізу

Графік зображує перепад тисків потоку рідини по довжині перерізу системи із 4-х зразків. З графіка випливає, що тиск рідини збільшується ближче до краю зразка.

Уміле використання системи моделювання SolidWorks параметричного проектування відповідної установки на етапі конструкторської та технологічної підготовки виробництва показало можливість значного скорочення часу і працездатності моделювання та проектування.

## ВИСНОВКИ

При виконанні даної магістерської роботи був проведений комплекс експериментальних та розрахункових робіт, після виконання яких можна зробити наступні висновки:

1. Показано та описано нові комп'ютерно-інформаційні технології, засоби та пристрої, які використовуються для визначення основних властивостей деталей конструкційного призначення.

2. Наведені методи та інструменти обчислювального матеріалознавства для комп'ютерного моделювання структури та властивостей металічних матеріалів.

3. Розроблено модель і алгоритм обробки кольорових металографічних 3D зображень для аналізу структури деталей конструкційного призначення та проведена відповідна практична реалізація.

4. Проведено комп'ютерне моделювання технології виготовлення деталей їх властивості:

— для моделювання нанесення захисних покриттів;

— для визначення основних властивостей пористих матеріалів;

— для комплексного визначення контролю властивостей пористих матеріалів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. V. Vychyk Simulation of compaction of porous permeable materials of complex shape during // Тези III студентської науково-технічної конференції факультету транспорту та механічної інженерії “Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії ” (16 листопада 2023 року). – Луцьк: ЛНТУ – 2023 – С.6-9.
2. Povstyanou O., Zabolotnyi O., Rud V., Kuzmov A., Herasymchuk H. Modeling of Processes for Creation New Porous Permeable Materials with Adjustable Properties. In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham (2019). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_46](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_46)
3. Xi Z.P, Tang H.P. Sintered metal porous material. Beijing: Metallurgical Industry Press; (2009).
4. Bruno G., Efremov A. M., Levandovskyi A.N. Connecting the macro- and microstrain responses in technical porous ceramics: Modeling and experimental validations. Journal of Materials Science. 46(1), pp.161-173, (2020).
5. Bejan A., Dincer I., Lorente S., Miguel A. F., Reis A. H. Porous and Complex Flow Structures in Modern Technologies. Springer-Verlag. 1, pp.90-99, (2014).
6. Chern M., Vaziri N. Effect of Porous Media on Hydraulic Jump Characteristics by Using Smooth Particle Hydrodynamics Method. Int J Civ Eng. 18, Pp.367–379, (2020).
7. Hunyadi Murph S. E., Jacobs S., Siegfried M., Hu T., Serkiz S. and J. Hudson Manganese-Doped «Gold Nanoparticles as Positive Contrast Agents for Magnetic Resonance Imaging (MRI)». Journal of Nanoparticle Research, 14, pp. 658–659, (2012).
8. Jonsson P., Jonsen P., Andreasson P., Lundstrom T. S., Hellstrom J. G. «Smoothed particle hydrodynamic modelling of hydraulic jumps: bulk parameters and free surface fluctuations». Engineering. 8, pp.386–402, (2016).
9. Faisal, A.A.H., Sulaymon, A.H. & Khaliefa, Q.M. A review of permeable reactive barrier as passive sustainable technology for groundwater remediation. Int. J. Environ. Sci. Technol. 15, 1123–1138 (2018). <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1466-0>

10. Lagae A, Dutré P. «A Comparison of methods for generating Poisson disk distributions». *Computer Graphics*. 27(1), pp.114-129, (2018).
11. McMillan, A., Jones, R., Peng, D., Chechkin, G.: A computational study of the influence of surface roughness on material strength, submitted to *Meccanica*, (2017).
12. Nurkanov E.Yu., Kadushnikov R.M, Kamenin I.G, Alievsky D.M, Kartashov V.V. Study of the density characteristics of three-dimensional stochastic packages of spherical particles using a computer model. *Powder metallurgy*. 5(6), (2001).
13. Rusark Z., Horvarth I., Mandorli F. «Towards multi-domain knowledge transfer in engineering analyses and simulations based on virtual prototypes». *Engineering with Computers*. 29 (3), pp. 247-250, (2013).
14. Dodig Crnkovic G. *Information and Computation Nets. Investigations into Info-computational World*. In: *Information and Computation*, Verlag, Saarbrucken, pp. 91–96, (2019).
15. Povstyanoy, O., Sychuk, V., Makmyllan, A., Rud, V., Zabolotnyy, O.: Metallographic analysis and processing of images of microstructure of nozzles for sandblasting which are made by powder metallurgy, *Powder metallurgy*, 3 (4), pp.234-240, (2015).
16. Saadatfar M, Garcia-Moreno F, Hutzler S, Sheppard AP, Knackstedt MA, Banhart J, et al. Imaging of metallic foams using X-ray micro-CT. *Colloid Surface Physicochem Eng Aspect*, (1–3), (2009).
17. Sidi *Practical Extrapolation Methods: Theory and Applications*, Cambridge Monographs on Applied and Computational Mathematics». Cambridge, 432 p., (2002).
18. Shyberko V., Rud V. Modelling of structural and inhomogeneous materials based on the finite element method. *Actual problems of economics APE*. pp. 124–130, (2013)
19. Імбірович Н.Ю., Клапків М.Д., Повстяной О.Ю. Конверсійна оксидокераміка як ефективний спосіб захисту імплантів. *Global scientific unity 2014: матеріаллы Международного конгресса (Прага, 26-27 сентября 2014 года)*. Прага, 2014. С. 36-37.

20. Рудь В.Д., Шиберко В.В., Повстяной О.Ю. Аналіз порошкових матеріалів за допомогою програмного комплексу ABAQUS. Сучасні проблеми інформатики в управлінні, економіці та освіті: матеріали XIII міжнародного наукового семінару / наук. ред. д.е.н., проф. М.М. Єрмошенко. Київ, 2014. С.77-81.

21. Повстяной О.Ю., Михайлов А.О., Рудь В.Д., Михайлов О.В. «Моделювання ущільнення порошкового фільтруючого елемента складної форми при радіально-ізостатичному пресуванні». Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. 2019. №3. С. 40-44.

22. Імбірович Н.Ю., Посувайло В.М., Шимчук С.П., Повстяной О.Ю., Остап'юк С.І. «Трибологічна характеристика плазмоелектролітно-окисдованих покриттів на сплавах ASTM B265 та 2024». Вісник Українського матеріалознавчого товариства. 2019. №1 (12). С. 66-74.

23. Oleksandr Povstyanoy, Nataliia Imbirovuch, Yuliia Kuts «Peculiarities of protective coating of constructional details with powder obtained from industrial wastes». Metallurgical and mining industry. 2016. №4. P. 88-96.

24. Повстяной О.Ю. «Комп'ютерно-інформаційні технології прогнозування та моделювання властивостей матеріалів конструкційного призначення». Вісник Українського матеріалознавчого товариства. 2018. №8. С. 9-18.

25. Повстяной О.Ю., Куц Ю.В., Імбірович Н.Ю. «Застосування комп'ютерного моделювання для візуалізації трьохмірних даних при дослідженні властивостей пористих проникливих матеріалів». *Наукові нотатки*. 2015. Випуск 50. С. 159-165.