

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

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

**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ
ПРЕСУВАННЯ ТА СПІКАННЯ ПОРОШКІВ ДЛЯ
ОТРИМАННЯ ВИРОБІВ КОНСТРУКЦІЙНОГО
ПРИЗНАЧЕННЯ**

**COMPUTER MODELING OF PRESSING AND SINTERING
PROCESSES OF POWDERS TO OBTAIN STRUCTURAL-
PURPOSE PRODUCTS**

спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АВМ-21
ВАЦЬ Дмитро Миколайович

(підпис)

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

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2025 р.
к.т.н., доцент
Гарант освітньої програми:
ГУМЕНЮК Павло Олександрович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Ступінь вищої освіти: *магістр*

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

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

О. Ю. Повстяной

«__» _____ 2025 р.

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

Ваць Дмитра Миколайовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Комп'ютерне моделювання процесів пресування та спікання порошків для отримання виробів конструкційного призначення*

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

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

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

3. Вихідні дані до роботи: *існуючі модельні процеси пресування та спікання порошкових матеріалів, виробу конструкційного призначення*

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

1. Можливості удосконалення обчислювальних засобів та їх застосування для комп'ютерно-інформаційного аналізу.

2. Концепція консолідованого комп'ютерного моделювання матеріалів, технологій

3. Визначення геометричних характеристик структур конструкційних матеріалів

4. Комп'ютерне моделювання технології виготовлення деталей та їх властивостей

5. Перелік графічного матеріалу :

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

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 27.06.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)*Ваць Д.М.*
(прізвище та ініціали)Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис)*Повстяной О.Ю.*
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Ваць Д. М. Комп'ютерне моделювання процесів пресування та спікання порошків для отримання виробів конструкційного призначення. Рукопис.

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

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

Кваліфікаційна робота присвячена сучасним методам комп'ютерного та інформаційного моделювання та експериментальних досліджень процесів пресування та спікання порошків для отримання виробів конструкційного призначення. Результати кваліфікаційної роботи представлені на континуальних уявленнях про будову, поведінку та експлуатаційні властивості деталей конструкційного призначення, що дало змогу змоделювати процеси пресування та спікання відповідних виробів. У поєднанні теоретичних розробок з відповідними експериментальними дослідженнями сприяло застосуванню комп'ютерно-інформаційних технологій при дослідженні будови, властивостей деталей конструкційного призначення та методів їх виготовлення.

Ключові слова: комп'ютерно-інформаційні технології, структура, моделювання, пара, статистична обробка, пресування, спікання, деталі конструкційного призначення.

ANNOTATION

Vats D. Computer modeling of powder pressing and sintering processes for obtaining structural products. Manuscript.

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

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

The qualification work is devoted to modern methods of computer and information modeling and experimental research of powder pressing and sintering processes for obtaining structural products. The results of the qualification work are presented on continuum representations of the structure, behavior and operational properties of structural parts, which made it possible to model the processes of pressing and sintering of the corresponding products. In combination with theoretical developments and relevant experimental studies, it contributed to the application of computer and information technologies in the study of the structure, properties of structural parts and methods of their manufacture.

Keywords: computer and information technologies, structure, modeling, time, statistical processing, pressing, sintering, structural parts.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 МОЖЛИВОСТІ УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНФОРМАЦІЙНОГО АНАЛІЗУ	11
1.1 Розвиток сучасних комп'ютерно-інформаційних засобів.....	11
1.2 Нові комп'ютерно-інформаційні технології, засоби та пристрої	12
1.3 Застосування комп'ютерно-інформаційних технологій для визначення основних властивостей деталей.....	14
Висновки по розділу 1.....	15
РОЗДІЛ 2 КОНЦЕПЦІЯ КОНСОЛІДОВАНОГО КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МАТЕРІАЛІВ, ТЕХНОЛОГІЙ ТА ВИРОБІВ У КОНТЕКСТІ ЦИФРОВОГО МАШИНОБУДУВАННЯ.....	16
2.1 Методи та інструменти цифрового машинобудування для комп'ютерного моделювання технологій та конструкцій.....	16
2.2 Методи та інструменти обчислювального матеріалознавства для комп'ютерного моделювання структури та властивостей металевих матеріалів.....	20
2.3 Основні тенденції у розвитку комп'ютерних методів дослідження структури, властивостей та технології отримання матеріалів конструкційного призначення.....	26
Висновки по розділу 2	29
РОЗДІЛ 3 ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУР КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ЇХ КОЛЬОРОВИМ 3D-ЗОБРАЖЕННЯМИ.....	30
3.1 Створення 3D-зображень структур деталей конструкційного призначення.....	30

3.2	Модель і алгоритм обробки кольорових металографічних 3D-зображень	33
3.3	Реалізація обробки 3D-зображень деталей конструкційного призначення з використанням комп'ютерно-інформаційних технологій Avizo®	35
	Висновки по розділу 3	44
РОЗДІЛ 4 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ		45
4.1	Застосування комп'ютерно-інформаційних технологій для моделювання процесів нанесення захисних покриттів	45
4.2	Застосування комп'ютерно-інформаційних технологій для визначення основних властивостей пористих матеріалів	49
4.3	SolidWorks як сучасна комп'ютерно-інформаційна база для інженерних розрахунків	51
	Висновки по розділу 4	47
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ		55
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		56
ДОДАТКИ		58

ВСТУП

Актуальність дослідження. Актуальність даного наукового дослідження зумовлена інтенсивним розвитком комп'ютерних, інформаційних та програмно-апаратних технологій, що спостерігається протягом останніх десятиліть. Значна частина сучасних розробок у цій галузі здійснюється автономно та орієнтована на вирішення вузькоспеціалізованих задач, що вимагає їх подальшої інтеграції у єдиний інформаційний простір.

Активне впровадження нових інтерфейсів, технологій візуалізації, засобів відображення інформації та інтерфейсів типу «мозок-комп'ютер» набуває широкого застосування не лише в інформаційних технологіях, але й у автоматизації, робототехніці та мехатроніці. Значного поширення набули інтегровані обчислювальні пристрої, що зумовило трансформацію підходів до обробки, зберігання та передачі інформації. Подальший розвиток хмарних обчислень та мережевих сервісів суттєво змінює методи використання обчислювальних ресурсів.

Технічні науки належать до провідних галузей, у яких комп'ютерні технології та сучасне апаратне забезпечення інтегруються для вирішення широкого спектра прикладних завдань, зокрема у сфері діагностики, інженерного аналізу, біометрії, генетики та машинобудування. Сучасна промисловість потребує нових перспективних конструкційних матеріалів, а також технологічного обладнання, оснащеного автоматизованими та роботизованими приводами, що забезпечують реалізацію принципово нових підходів до виготовлення деталей конструкційного призначення.

Розвиток технічної бази наукових досліджень і діагностики дозволяє здійснювати комплексне вивчення структури та властивостей матеріалів, деталей і конструкцій. У свою чергу, удосконалення високопродуктивних інформаційно-обчислювальних систем і спеціалізованого програмного забезпечення створює передумови для широкого застосування методів

комп'ютерного моделювання під час дослідження будови та експлуатаційних характеристик конструкційних елементів.

Мета кваліфікаційної роботи – розроблення методів і моделей аналізу структури та властивостей деталей конструкційного призначення із використанням сучасних комп'ютерно-інформаційних технологій для моделювання процесів пресування та спікання.

Для досягнення поставленої мети у роботі передбачається розв'язання таких задач:

1. Розроблення методів консолідованого комп'ютерного аналізу матеріалів і конструкцій деталей та їх адаптація до конкретних умов експлуатації.

2. Формування комунікативних зв'язків між процесами проектування та дослідження властивостей деталей у єдиному узагальненому інформаційному просторі.

3. Проведення комп'ютерних експериментів із проєктованими структурами та дослідження властивостей складноструктурованих матеріалів з урахуванням експлуатаційних характеристик деталей.

Об'єктом дослідження є деталі конструкційного призначення технологічного призначення.

Предметом дослідження є методи застосування сучасних комп'ютерно-інформаційних технологій для аналізу будови та властивостей деталей конструкційного призначення, пресування та спікання для їх виготовлення.

У процесі виконання кваліфікаційної роботи використовувалися методи комп'ютерного та інформаційного моделювання, а також експериментальні методи дослідження.

Наукова новизна роботи полягає у поєднанні теоретичних підходів із експериментальними дослідженнями, що забезпечує розширене застосування комп'ютерно-інформаційних технологій для аналізу структури, властивостей, технологій пресування та спікання деталей конструкційного призначення.

Особистий внесок магістранта полягає у формулюванні задач дослідження, розробленні методики проведення комп'ютерно-інформаційного аналізу, а також у формуванні основних висновків і рекомендацій, викладених у роботі.

Апробація результатів кваліфікаційної роботи магістра: Результати роботи доповідались та обговорювались на XIII Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції молодих учених та студентів «Actual problems of automation and control». Опублікована стаття Ваць Д. М. Моделювання ущільнення порошкових фільтруючих елементів при радіально-ізостатичному пресуванні. *Actual problems of automation and control*: матеріали XIII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів. Випуск № 13. Луцьк: ЛНТУ, 2025. С. 12-17.

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

РОЗДІЛ 1

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

1.1 Розвиток сучасних комп'ютерно-інформаційних засобів

Сучасний етап розвитку інженерії та прикладних технічних наук характеризується широкомасштабним упровадженням комп'ютерно-інформаційних технологій, що потребує суттєвого вдосконалення традиційних систем обробки, аналізу та представлення даних. Інтенсивне зростання обчислювальних потужностей у поєднанні зі зниженням вартості апаратних і програмних засобів зумовлює експоненціальний характер розвитку інформаційно-обчислювальних технологій [1].

Упродовж останніх десятиліть спостерігається поступове, але стабільне зростання ролі комп'ютерно-інформаційних засобів у вирішенні прикладних інженерних задач. Водночас фундаментальні принципи технічного проєктування залишалися відносно незмінними, за винятком впровадження методу кінцевих елементів, який започаткував новий етап у розвитку інженерного аналізу. Подальше вдосконалення комп'ютерних технологій відбувалося переважно еволюційним шляхом шляхом розширення функціональних можливостей програмних комплексів [2].

Актуальним завданням сучасних досліджень є аналіз і адаптація новітніх інформаційно-обчислювальних розробок для потреб інженерії, зокрема з метою підвищення ефективності, надійності та експлуатаційної безпеки технічних рішень. Використання інноваційних комп'ютерно-інформаційних засобів дозволяє інженера отримувати більш точні оцінки механічних, технологічних і функціональних характеристик конструкційних елементів.

Стрімкий розвиток програмного забезпечення, орієнтованого на врахування людського фактору, сприяє поширенню нових підходів до взаємодії між користувачем і комп'ютерними системами. Сучасні інтерфейси, засоби візуалізації та пристрої відображення інформації активно

застосовуються у робототехніці, мехатроніці та автоматизації. Значного поширення набули інтегровані обчислювальні пристрої, що забезпечують мобільність та доступність обчислювальних ресурсів для моделювання процесів виготовлення деталей конструкційного призначення [3].

Подальша еволюція інформаційно-обчислювальних технологій тісно пов'язана з розвитком мережевих сервісів, глобальних інформаційних систем та хмарних обчислень, які змінюють підходи до зберігання, передачі та обробки даних. У технічних науках комп'ютерні технології виступають невід'ємним інструментом аналізу, моделювання та прийняття інженерних рішень, що визначає необхідність їх подальшої інтеграції у проектно-дослідницькі процеси.

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

Однією з ключових проблем, що виникли з моменту появи комп'ютерної техніки, є створення ефективних засобів взаємодії між людиною та обчислювальними системами. Еволюція засобів введення та виведення інформації суттєво вплинула на способи використання комп'ютерів у технічних дисциплінах [4].

Людино-комп'ютерна взаємодія розглядається як міждисциплінарний напрям, що охоплює проектування, аналіз та оптимізацію інтерфейсів користувача. Взаємодія користувачів з комп'ютерними системами реалізується через сукупність апаратних і програмних компонентів, які забезпечують введення, обробку та візуалізацію інформації. Такі системи застосовуються не лише в персональних комп'ютерах, але й у складних технічних комплексах, включаючи авіаційні, енергетичні та космічні системи [5].

Суттєвим напрямом розвитку сучасних комп'ютерно-інформаційних технологій є інтерфейси типу «мозок-комп'ютер», що забезпечують прямий обмін сигналами між нервовою системою людини та зовнішніми пристроями. Основне застосування таких систем пов'язане з нейропротезуванням, однак їх

потенціал поступово розширюється у напрямі керування роботизованими та автоматизованими системами.

Значну роль у розвитку інженерних застосувань відіграють технології віртуальної реальності та тактильного зворотного зв'язку. Віртуальна реальність забезпечує моделювання складних технічних об'єктів у тривимірному просторі, тоді як тактильні інтерфейси дозволяють відтворювати фізичні відчуття взаємодії з віртуальними об'єктами. Це суттєво підвищує ефективність процесів моделювання, проектування та аналізу конструкцій.

Особливе місце у сучасних комп'ютерно-інформаційних технологіях займає наукова та інженерна візуалізація, яка забезпечує інтерпретацію результатів чисельного моделювання та експериментальних досліджень. Комп'ютерна графіка стала універсальним інструментом представлення складних багатовимірних даних, що дозволяє здійснювати глибший аналіз структурних і функціональних властивостей матеріалів та деталей [3].

На рисунку 1.1 представлена блок-схема побудови математичної моделі для можливого подальшого моделювання та експериментальних досліджень.



Рисунок 1.1 – Блок-схема побудови математичної моделі

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

Інженерна діяльність охоплює широкий спектр завдань, пов'язаних з вибором, проектуванням, аналізом та оптимізацією конструкційних систем, технологій отримання виробів. Значна частина цих завдань може бути ефективно реалізована із застосуванням сучасних комп'ютерно-інформаційних технологій, що суттєво підвищує точність і надійність інженерних рішень.

Початкові етапи проектування та розробка технологій передбачають вибір конструктивної схеми та попереднє визначення геометричних і матеріальних параметрів деталей. Для оптимізації цих процесів застосовуються методи нечіткої логіки, багатокритеріальної оптимізації та експертні системи, які дозволяють враховувати комплекс взаємопов'язаних факторів.

Важливою складовою сучасного інженерного аналізу є комп'ютерне моделювання та віртуальна візуалізація результатів розрахунків [6]. Використання тривимірних і чотиривимірних моделей дозволяє детально досліджувати напружено-деформований стан конструкцій, а також прогнозувати їх поведінку в експлуатаційних умовах. Технології віртуальної реальності додатково розширюють можливості інтерпретації результатів моделювання та сприяють глибшому розумінню фізичної природи досліджуваних явищ.

Результати комп'ютерного аналізу часто потребують наочної інтерпретації, що зумовлює широке застосування сучасних засобів візуалізації. Комп'ютерна графіка забезпечує перетворення числових даних у наочні образи, діаграми та анімації, що значно полегшує аналіз і прийняття інженерних рішень [7].

Висновки по розділу 1

Розвиток комп'ютерно-інформаційних технологій є визначальним чинником удосконалення методів інженерного аналізу та проектування. Сучасні обчислювальні засоби та програмні комплекси створюють передумови для комплексного дослідження структури, властивостей, технологій пресування та спікання деталей конструкційного призначення, зменшуючи потребу у трудомістких експериментальних дослідженнях.

Інтеграція новітніх інформаційно-обчислювальних технологій у інженерну практику є об'єктивною потребою сучасної інженерії, що визначає подальші напрями досліджень, спрямовані на створення консолідованих методів комп'ютерного моделювання та аналізу.

РОЗДІЛ 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

Стрімкий розвиток сучасного машинобудування, робототехніки та автоматизації відбувається в руслі переходу до цифрового виробництва, яке забезпечує технологічну підготовку створення нових виробів у глобальному інформаційному середовищі. Цей процес реалізується за допомогою спеціалізованих програмних засобів, що забезпечують моделювання, планування та верифікацію виробничих технологій. Провідні розробники інженерного програмного забезпечення, зокрема Siemens, активно розширюють функціональні можливості платформ цифрового виробництва та формують інтегровану інфраструктуру, у якій системи проектування поєднуються з системами автоматичного керування промисловими установками та робототехнічними комплексами [8].

У межах такого підходу еволюціонують сучасні програмні сервіси, що підтримують проектування в робототехніці, поступово охоплюючи функціональні властивості складних технічних об'єктів, у тому числі автоматизованих систем. Цифрове машинобудування розширює традиційний інформаційний простір, включаючи цифрове виробництво як його невід'ємний компонент. На відміну від класичних підходів до проектування машинобудівних виробів, сучасна концепція розроблення мехатронних систем підкреслює необхідність комплексного розгляду механічних вузлів у поєднанні з інтегрованими системами керування, що суттєво підвищує вимоги до інформаційної інтеграції інженерних процесів. Співвідношення цифрових виробництва та машинобудування в інформаційному просторі представлено схемою на рисунку 2.1.

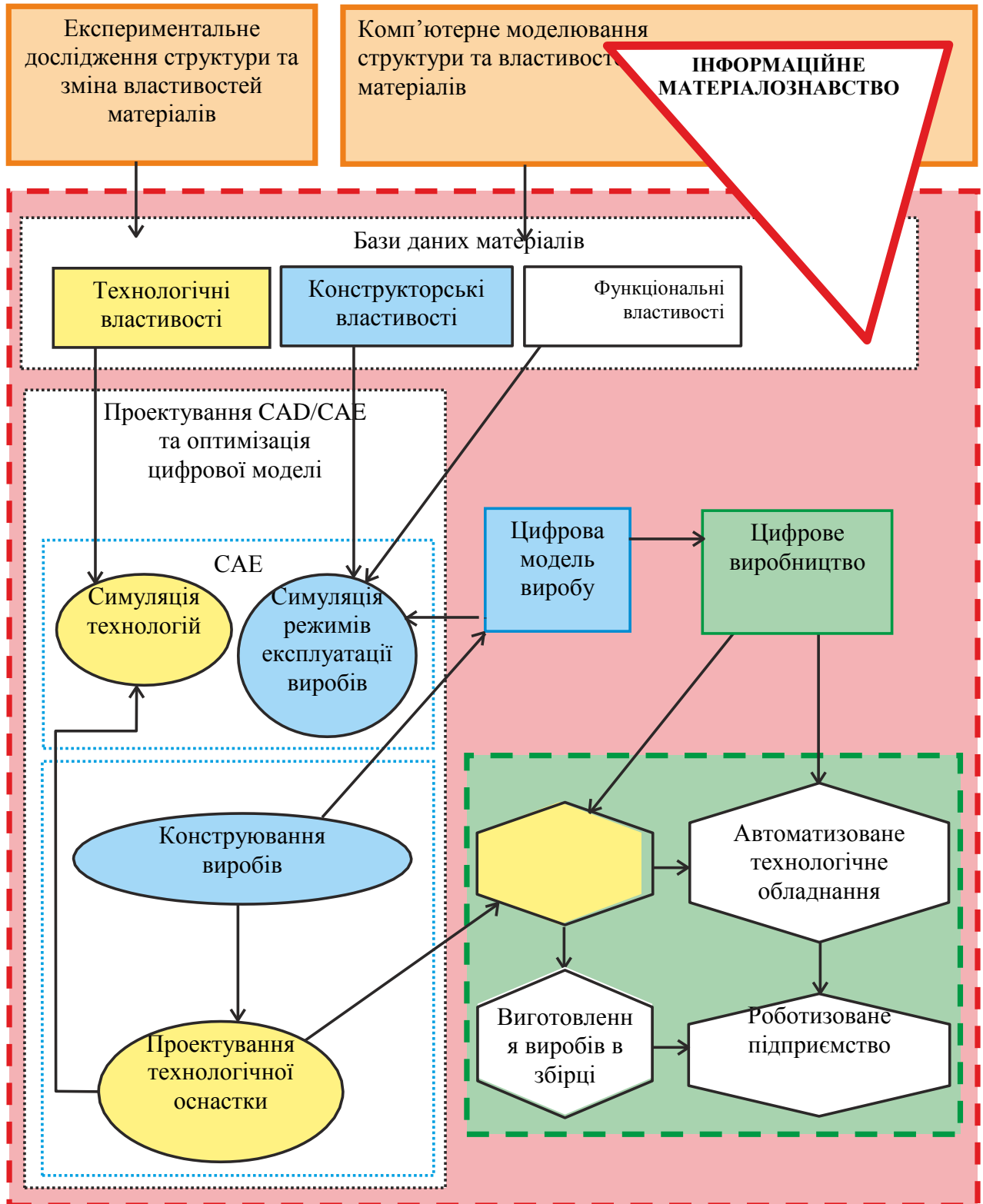


Рисунок 2.1 – Інформаційна структура цифрового машинобудування:
комп'ютерне моделювання CAD/CAE технологій [3]

Центральне місце в інформаційній архітектурі цифрового машинобудування займає цифрова модель виробу, яка є основою для моделювання технологій, оптимізації конструкцій та забезпечення взаємодії між CAD/CAE/CAM/PLM-системами. З огляду на це, ключовим елементом цифрового середовища є надійні бази даних про властивості матеріалів, технології отримання деталей, що необхідні для коректної роботи систем CAE на етапах оптимізації цифрових моделей та симуляції експлуатаційних режимів. Підвищений інтерес до проблеми автоматизації матеріалознавчих даних з боку провідних наукових і промислових установ, зокрема DARPA, свідчить про стратегічну важливість інтеграції обчислювальних технологій у багаторівневе проектування [3].

Оскільки точність моделювання технологічних процесів та прогнозування поведінки виробів суттєво залежить від достовірності матеріальних моделей, виникає потреба у формуванні нового міждисциплінарного напрямку, який забезпечує взаємопов'язане застосування баз даних, методів комп'ютерного аналізу структури та властивостей матеріалів, засобів інтерпретації експериментальних результатів та алгоритмів передавання матеріальних даних у системи CAE.

Методи цифрового машинобудування вже широко використовуються промисловими підприємствами, оскільки дозволяють суттєво зменшити часові та матеріальні витрати на створення прототипів і дослідних зразків. Це досягається завдяки можливості раннього виявлення та усунення технологічних помилок ще на етапі проектування, що мінімізує ризики відхилень у реальних виробничих умовах.

Весь спектр робіт з проектування, виробництва та експлуатації машинобудівних виробів утворює їх життєвий цикл (Product Life-Cycle Management, PLM). Сучасні інформаційні системи PLM інтегрують процеси проектування, моделювання, підготовки виробництва та поствиробничого супроводу виробів, що обумовлює потребу в узгодженні інженерних рішень на всіх рівнях.

Одним із ключових завдань цифрового машинобудування є реалізація принципу паралельного проектування, яке передбачає консолідоване використання програмних засобів різних підрозділів підприємства на основі єдиної цифрової моделі виробу. Проте складність технічних систем, а також різноманіття факторів, що впливають на якість кінцевого продукту, ускладнюють побудову інтегрованих фізико-математичних моделей, які здатні адекватно описати весь цикл проектно-технологічних процесів.

Розвиток цифрового машинобудування супроводжується появою численних програм CAE, які забезпечують інженерний аналіз широкого кола завдань. На відміну від інтегрованих CAD-комплексів, програмні засоби CAE часто мають вузьку спеціалізацію, що ускладнює їх консолідацію в єдиному інформаційному середовищі. Наявність програмних розривів між різними системами гальмує ефективність впровадження цифрових технологій і зумовлює необхідність стандартизації методів обміну даними.

Створення цифрової моделі для потреб цифрового машинобудування передбачає побудову математичного опису фізичних процесів, формування відповідних граничних умов, вибір моделей поведінки матеріалів, визначення параметрів чисельної сітки та алгоритмів розв'язання. Переважним методом дискретизації є метод кінцевих елементів, який забезпечує універсальність і високу точність аналізу.

Комп'ютерні інженерні розрахунки поділяються на два основних напрями:

1. Конструкторські розрахунки – оцінювання експлуатаційних характеристик виробу.
2. Імітаційне моделювання технологій – аналіз процесів лиття, деформаційної обробки, зварювання, термообробки, механообробки та формування структури матеріалу.

Для забезпечення достовірності результатів моделювання необхідно виконувати верифікацію та валідацію моделей.

Верифікація встановлює відповідність створеної моделі фізичній суті задачі. Валідація уточнює модель з використанням експериментальних даних для підвищення її адекватності реальним процесам.

Таким чином, методи цифрового машинобудування забезпечують багаторівневу інтеграцію інженерного аналізу, проектування, матеріалознавства та технологічної підготовки виробництва, створюючи теоретичне й практичне підґрунтя для консолідованого комп'ютерного моделювання конструкцій, матеріалів і технологічних процесів.

2.2. Методи та інструменти обчислювального матеріалознавства для комп'ютерного моделювання структури та властивостей металевих матеріалів

Сучасний етап розвитку машинобудування та прикладної механіки характеризується зростаючою потребою в нових конструкційних матеріалах, у тому числі композиційних і багатофазних, здатних забезпечувати підвищені механічні, експлуатаційні та функціональні характеристики деталей машин і механізмів. Запровадження автоматизованого, роботизованого та мехатронного технологічного обладнання, оснащеного нелінійними приводами та інтелектуальними системами керування, створює передумови для реалізації принципово нових технологій отримання матеріалів з керованою структурою у широкому діапазоні масштабних рівнів – від атомного та нанорівня до макроскопічного рівня конструкційних елементів [3].

Розвиток високопродуктивних інформаційно-обчислювальних систем і спеціалізованого програмного забезпечення дозволяє перейти від переважно експериментальних методів дослідження матеріалів до комплексного застосування методів обчислювального матеріалознавства, який представлено на рисунку 2.2.

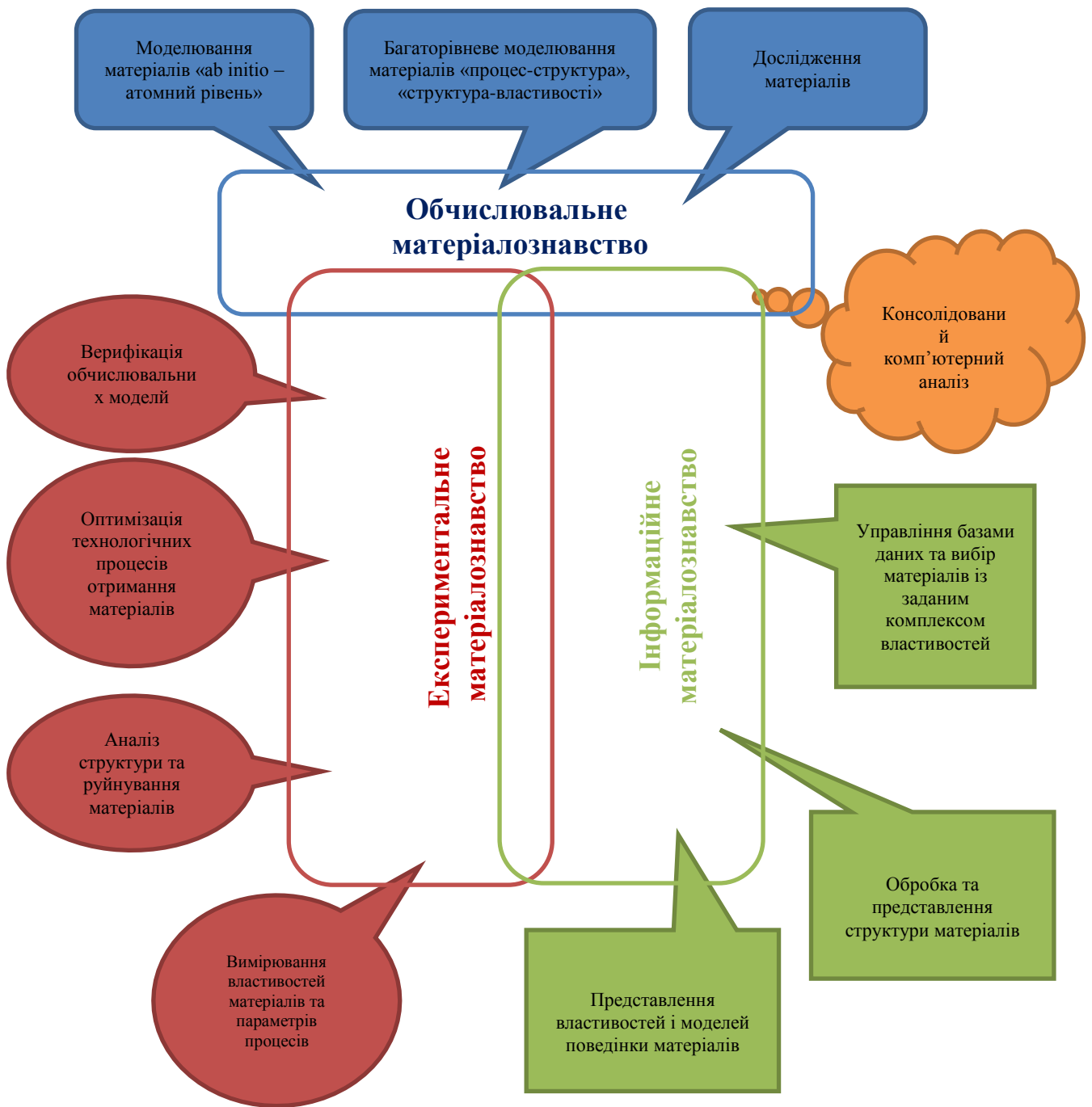


Рисунок 2.2 – Класифікація напрямків сучасного матеріалознавства в контексті розвитку обчислювальних технологій [3]

Такий підхід базується на консолідованому використанні чисельного моделювання, експериментальних даних та інформаційних технологій з метою прогнозування структури, властивостей і поведінки матеріалів у реальних умовах виготовлення та експлуатації деталей конструкційного призначення.

Обчислювальне матеріалознавство охоплює сукупність методів комп'ютерного моделювання, спрямованих на встановлення взаємозв'язків між технологічними параметрами, мікроструктурою матеріалу та його експлуатаційними характеристиками. У цьому контексті особливого значення набувають багаторівневі моделі типу «процес-структура-властивості», які дозволяють здійснювати узгоджений аналіз впливу технологічних факторів на кінцеві функціональні параметри матеріалу.

Одним із фундаментальних напрямів обчислювального матеріалознавства є моделювання матеріалів *ab initio*, що базується на квантово-механічному описі взаємодії атомів і електронної структури речовини. Такі методи дозволяють прогнозувати базові фізичні властивості матеріалів без використання емпіричних параметрів, проте через високу обчислювальну складність вони застосовуються переважно на атомному та нанорівнях.

На мезо- та макрорівнях широкого поширення набули методи багаторівневого ієрархічного моделювання, які поєднують результати квантових розрахунків, молекулярної динаміки, мезоскопічних моделей структури та континуальних підходів механіки суцільних середовищ. Такі методи дозволяють моделювати формування зеренної структури, фазові перетворення, процеси пластичної деформації та руйнування металевих матеріалів у взаємозв'язку з технологічними умовами їх отримання.

Важливою складовою сучасного обчислювального матеріалознавства є консолідований комп'ютерний аналіз, який передбачає інтеграцію результатів експериментальних досліджень, комп'ютерного моделювання та баз даних матеріалів у єдиному інформаційному середовищі (рис. 2.3).

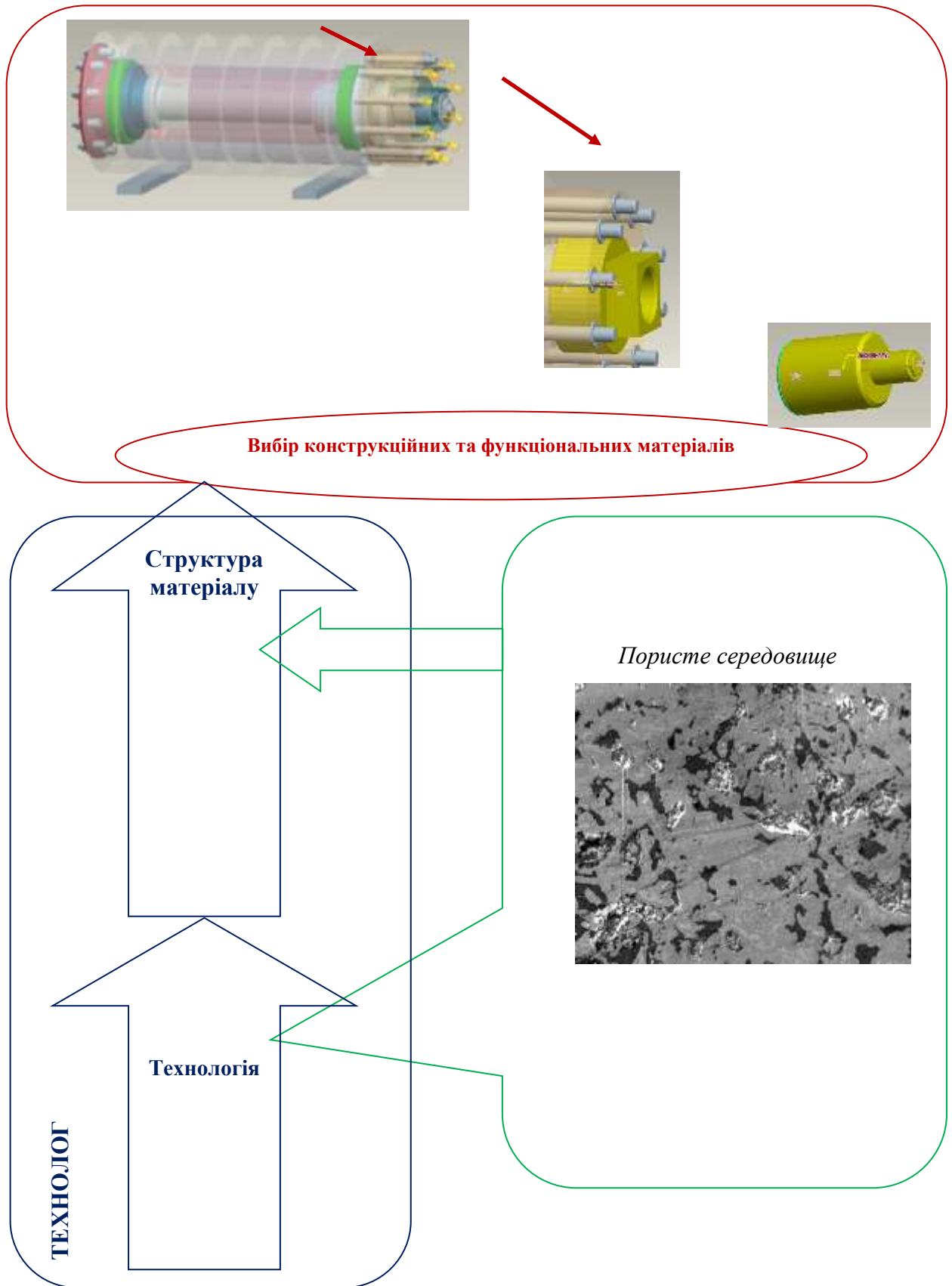


Рисунок 2.3 – Інформаційно-обчислювана структура при моделюванні конструкційних матеріалів на всіх етапах виготовлення [3]

Такий підхід забезпечує можливість обробки великих масивів даних, побудови узагальнених моделей поведінки матеріалів та підтримки процесів вибору матеріалів із заданим комплексом властивостей на ранніх етапах проектування.

Разом з тим реалізація консолідованого підходу ускладнюється низкою методологічних проблем. До них належать значні витрати часу на побудову тривимірних моделей мікроструктури матеріалів за експериментальними двовимірними зображеннями, неповнота та неоднозначність вихідних даних, що використовуються в інформаційно-обчислювальних моделях, а також наявність похибок, пов'язаних зі спрощеннями математичного опису реальної структури матеріалу (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Схема створення нових матеріалів для деталей конструкційного призначення [3]

Додатковими джерелами невизначеності є вплив вибору розрахункової сітки, чисельних алгоритмів та похибки експериментального визначення фізико-механічних і експлуатаційних характеристик матеріалів.

Особливої уваги потребує проблема формування достовірних і уніфікованих баз даних матеріалів, які повинні містити не лише номінальні значення властивостей, але й інформацію про залежність цих властивостей від структури, технологічних параметрів та умов експлуатації. Наявність таких баз даних є необхідною умовою ефективного функціонування систем CAE у складі цифрового машинобудування.

Інтегрована обчислювальна інженерія матеріалів розглядається як перспективний міждисциплінарний напрям, спрямований на поєднання результатів чисельних розрахунків з експериментальними дослідженнями для прийняття обґрунтованих інженерних рішень. Основними завданнями є кількісна оцінка впливу структури матеріалу на експлуатаційні властивості деталей, а також оптимізація технологічних процесів з урахуванням багаторівневої структури матеріалу.

Ієрархічна структура інформаційно-обчислювального матеріалознавства передбачає розподіл функцій між різними рівнями інженерної діяльності, а саме від технолога до конструктора. Такий підхід дозволяє узгоджувати вибір матеріалу, параметри технологічного процесу та вимоги до конструкції виробу в єдиному інформаційному просторі цифрового машинобудування.

Отже, методи та інструменти обчислювального матеріалознавства є базовим елементом концепції консолідованого комп'ютерного моделювання матеріалів, технологій і конструкцій. Їх застосування створює наукове та методичне підґрунтя для розроблення нових конструкційних матеріалів і оптимізації властивостей деталей конструкційного призначення, забезпечуючи зменшення експериментальних витрат, підвищення точності прогнозів і конкурентоспроможності машинобудівної продукції.

2.3 Основні тенденції у розвитку комп'ютерних методів дослідження структури, властивостей та технології отримання матеріалів конструкційного призначення

Інтеграція досліджень у галузі матеріалознавства з процесами машинобудівного проектування є однією з ключових сучасних тенденцій розвитку інженерної науки та промисловості. Реалізація такого підходу здійснюється на основі методів інформаційно-обчислювального матеріалознавства з урахуванням комп'ютерного моделювання технологічних процесів і режимів експлуатації виробів. У сучасних інтегрованих середовищах CAD/CAE/CAM/PLM на всіх етапах конструювання та підготовки виробництва виникає необхідність урахування поведінки матеріалів як визначального чинника надійності та довговічності машинобудівної продукції.

Суттєвим науково-практичним завданням цифрового машинобудування є перехід від ізольованого проектування конструкцій і технологій до спільного проектування матеріалів і виробів, при якому матеріал розглядається не як заданий параметр, а як змінна складова цифрової моделі. Такий підхід потребує формування нової методології інтеграції результатів обчислювального матеріалознавства в процес інженерного аналізу та оптимізації конструкцій.

Важливою складовою цифрового машинобудування стають електронні бази даних матеріалів, які повинні містити узагальнену інформацію про фізико-механічні, технологічні та експлуатаційні властивості матеріалів у широкому діапазоні умов навантаження. Проте на практиці організація таких баз залишається складною науково-технічною проблемою, зумовленою відсутністю повних експериментальних даних, а також складністю опису нелінійної поведінки матеріалів при змінних режимах експлуатації.

Комп'ютерні моделі виробів і технологій у середовищах CAD/CAE/CAM/PLM ґрунтуються на математичному описі фізичних

процесів, що визначають поведінку матеріалів. Для цього використовуються як експериментально отримані дані, так і результати чисельного моделювання. Особливе значення має коректне передавання матеріалознавчої інформації між рівнями «матеріал-технологія-конструкція», що забезпечує підвищення точності комп'ютерних прогнозів.

Сучасні програмні комплекси CAE у складі цифрового машинобудування розвиваються в напрямі багатодисциплінарного аналізу з використанням методу кінцевих елементів. Комп'ютерний інжиніринг у такому середовищі дозволяє здійснювати розрахункове обґрунтування конструктивних рішень, прогнозувати можливі дефекти та оптимізувати геометрію і технологічні параметри виробу на етапі його цифрового прототипування.

Разом з тим ефективна інтеграція матеріалознавчих моделей у цифрове машинобудування ускладнюється недостатньою консолідацією моделей технологічних процесів і режимів експлуатації. У традиційній практиці машинобудівного проектування розроблення конструкції та технології часто здійснюється автономно, що призводить до фрагментації інформаційних потоків. Подолання цієї проблеми пов'язане з уніфікацією CAE-інструментів і застосуванням кінцево-елементних методів для комплексного моделювання конструкцій, технологій і матеріалів у єдиному інформаційному середовищі.

Особливу перспективу має параметричне моделювання мікроструктури матеріалів, яке дозволяє прогнозувати зміни локальних властивостей залежно від варіації технологічних параметрів. Такий підхід створює можливість передачі уточнених матеріалознавчих даних у повторний аналіз конструкцій, що сприяє підвищенню точності інженерних розрахунків і зниженню ризиків виникнення експлуатаційних дефектів.

Отже, ключовим завданням інтеграції результатів інформаційно-обчислювального матеріалознавства у цифрове машинобудування є встановлення стійкого та формалізованого зв'язку між внутрішньою структурою матеріалів і макроскопічною поведінкою конструкцій. Реалізація

такого підходу забезпечує перехід до науково обґрунтованого проектування виробів із прогнозованими властивостями, що є необхідною умовою підвищення якості та конкурентоспроможності сучасної машинобудівної продукції.

Висновок до розділу 2

У розділі обґрунтовано теоретико-методологічні засади формування концепції консолідованого комп'ютерного моделювання матеріалів, технологій та виробів у контексті цифрового машинобудування, а саме:

1. Сучасне цифрове машинобудування трансформується в напрямі створення інтегрованих інформаційних середовищ, у яких проектування виробів, оптимізація конструкцій, моделювання технологічних процесів та управління життєвим циклом продукції виконуються на основі єдиної цифрової моделі. Такі середовища забезпечують скорочення виробничих витрат, підвищення точності прогнозування експлуатаційних характеристик та мінімізацію ризиків на етапах виготовлення і тестування.

2. Ключовим елементом цифрового машинобудування є використання спеціалізованих програмних комплексів CAD/CAE/CAM/PLM, які забезпечують багаторівневу підтримку процесів моделювання.

3. Основним напрямом розвитку цифрового машинобудування є побудова паралельного проектування, що передбачає консолідацію інженерних рішень різних підрозділів на основі узгоджених цифрових моделей.

4. Встановлено, що обчислювальне матеріалознавство відіграє визначальну роль у забезпеченні достовірності комп'ютерного аналізу конструкцій та технологій.

5. Показано, що параметричне моделювання мікроструктури матеріалів і прогнозування локальних змін властивостей є перспективним інструментом для вдосконалення цифрових моделей виробів.

Таким чином, результати розділу 2 демонструють, що консолідоване комп'ютерне моделювання матеріалів, технологій і конструкцій є необхідною та перспективною складовою цифрової трансформації машинобудування. Створення методологічної основи для узгодження матеріалознавчих, технологічних та конструкційних моделей визначає подальші напрями досліджень і є фундаментом для підвищення ефективності сучасного інженерного проектування та розробки нових технологій.

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУР КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ЇХ КОЛЬОРОВИМ 3D-ЗОБРАЖЕННЯМИ

3.1 Створення 3D-зображень структур деталей конструкційного призначення

На сучасному етапі розвитку матеріалознавства інтенсивно формуються та впроваджуються нові підходи до оцінювання структурних характеристик матеріалів і виробів конструкційного призначення, що ґрунтуються на дослідженні їхньої просторової організації у тривимірному вимірі. Зазначені підходи становлять методологічну основу формування та розвитку окремого наукового напрямку, спрямованого на комплексне просторове вивчення внутрішньої структури матеріалів.

Методи дослідження структури, які застосовуються для отримання проєкційних даних про внутрішню будову матеріалів, систематизовано в таблиці 3.1. Доцільність використання того чи іншого методу визначається фізико-механічними характеристиками досліджуваних зразків, а також умовами їх подальшої експлуатації та функціонального призначення.

У наукових дослідженнях комп'ютерна томографія використовується насамперед з метою здійснення якісної та кількісної оцінки структурних елементів матеріалів і деталей, включаючи як закономірні структурні складові, так і різноманітні дефекти. До параметрів, що підлягають аналізу, належать просторовий розподіл, форма та геометричні розміри структурних елементів, їх об'ємна частка, орієнтація в просторі та інші морфологічні характеристики.

Висока ефективність застосування комп'ютерної томографії зумовлена оперативністю отримання результатів досліджень, а також суттєвим зниженням трудомісткості підготовки зразків порівняно з традиційними методами аналізу [9].

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

Тривимірні моделі використовуються для представлення об'єктів у тривимірному евклідовому просторі на основі дискретної множини точок (вершин), координати яких визначають геометрію об'єкта та з'єднуються між собою різними геометричними примітивами, зокрема трикутниками, відрізками та іншими елементами полігональної сітки.

Сучасні програмні засоби комп'ютерного моделювання забезпечують можливість формування 3D-моделей зображень із застосуванням різних методологічних підходів, які, як правило, є незалежними від конкретних алгоритмів моделювання і визначаються поставленими дослідницькими або прикладними задачами.

Водночас принциповою є відмінність між методами глибинного та об'ємного формування зображень. Для поверхневих структур процес об'ємного формування зображень не залежить від значення хвильового числа. Однак у разі аналізу внутрішніх, об'ємних структур виникає проблема зникнення зображення, що зумовлена залежністю інтенсивності сигналу від радіального хвильового числа.

Під час візуального спостереження таких структур за допомогою органів зору людини стає неможливим розрізнення дрібномасштабних деталей. Крім того, класичні проєкційні системи формування зображень не призначені для адекватного відтворення істинних тривимірних об'єктів, у зв'язку з чим реалізація об'ємного формування зображень потребує застосування спеціалізованих методів і принципово інших підходів до візуалізації даних.

Формування тривимірного зображення з подальшим його відображенням на площині передбачає реалізацію таких основних етапів:

1. Моделювання, що полягає у створенні тривимірної цифрової моделі сцени та об'єктів, розташованих у її межах.
2. Рендерингу (візуалізації), який забезпечує побудову проєкції моделі відповідно до обраної фізичної або математичної моделі формування зображення.
3. Виведення результатного зображення, що здійснюється за допомогою засобів відображення інформації, таких як дисплейні пристрої або друкувальне обладнання.

3.2 Модель і алгоритм обробки кольорових металографічних 3D-зображень

Методи ідентифікації структури металів ґрунтуються на традиційному представленні цифрових зображень. У межах автоматизованого аналізу застосовуються різні підходи, зокрема методи зіставлення, що оперують безпосередньо значеннями пікселів та відповідними рівнями інтенсивності, методи пошуку відповідності між точками контурів і окремими структурними елементами, а також підходи, засновані на використанні міток, які ідентифікують конкретні фізичні об'єкти [10].

Водночас наявні системи автоматичного аналізу не забезпечують комплексного розв'язання задачі ідентифікації структури, оскільки характеризуються вузькою спеціалізацією та обмеженою гнучкістю. Здебільшого такі системи реалізують базові алгоритмічні підходи, і лише незначна їх частина має повну або часткову автоматизацію.

Металографічні структурні зображення являють собою складну композицію різнорідних структурних складових, до яких належать:

1. Фази, що відрізняються характерними геометричними розмірами.
2. Форма та колір окремих структурних компонентів.
3. Межі зерен, які на зображеннях можуть бути представлені як у вигляді окремих ліній, так і у формі розгалуженої сітки.

Поєднання зазначених складових формує складну для інтерпретації картину, коректний аналіз якої потребує наявності у програмного забезпечення відповідної апріорної інформації. Основною вимогою до якісного аналізу металографічних зображень є необхідність виділення структурних елементів на мікроскопічному зображенні з подальшою їх класифікацією за формою, яскравістю та геометричними розмірами.

Практична реалізація вказаної задачі включає виконання таких процедур, як сегментація зображення, фільтрація похибок, відокремлення об'єктів від фону, визначення меж структурних елементів та розпізнавання образів. Ключовим етапом при цьому є надійна сегментація зображень. Однак

через складність та різноманітність металографічних структур наперед задати універсальні характеристики об'єктів практично неможливо. У зв'язку з цим алгоритм сегментації повинен бути адаптивним і забезпечувати виділення всіх інформативних об'єктів незалежно від їх розмірів, форми чи яскравості, з можливістю коригування процесу розпізнавання з боку дослідника.

Сфера застосування цифрової обробки зображень, які містять інформацію про фізичні процеси та структурну організацію матеріалів, істотно розширилася завдяки появі нових технічних засобів та спеціалізованого програмного забезпечення. Водночас у роботі таких інформаційно-аналітичних систем зберігається низка недоліків, усунення яких і надалі залишається актуальним напрямом наукових досліджень.

Особливої уваги потребує проблема дослідження пористості виробів конструкційного призначення. Аналіз пористості базується на використанні металографічних зображень, на яких відображено морфологічний стан пор. Кількісні та якісні параметри пористої структури можуть бути використані для прогнозування проникності матеріалу, його експлуатаційної надійності та інших функціональних характеристик.

Застосування й адаптація сучасних методів автоматизованої обробки зображень до специфічних дослідницьких задач дає змогу суттєво підвищити ефективність аналізу та розширити обсяг інформації, що отримується з експериментальних даних. Зокрема, з'являється можливість відновлення інформації про тривимірну структуру об'єктів за їх зображеннями, що є надзвичайно складним або практично неможливим при ручному аналізі. Тому розроблення моделі обробки зображень для оцінювання пористості матеріалів за двовимірними кольоровими зображеннями є актуальною науково-прикладною задачею.

Система обробки зображувальної інформації матеріалів з аналізом тривимірної структури поверхні повинна включати джерело освітлення. Досліджуваний зразок матеріалу освітлюється некогерентним світлом, відбите випромінювання з поверхні якого реєструється відеокамерою та передається

до комп'ютерної системи для подальшого аналізу. Під час відновлення тривимірної структури поверхні враховують характер відбиття світла, зокрема дифузне та дзеркальне. Об'єкти з переважно дифузним відбиттям є більш придатними для аналізу та реконструкції 3D-інформації, оскільки забезпечують стабільніші умови формування зображень.

Для дифузної моделі відбиття інтенсивність точки поверхні визначається рівнянням (3.1):

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

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:

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

$$I_{\lambda} = I_a + I_{p\lambda}k_d \frac{1}{\sqrt{p^2+q^2+1}}. \quad (3.2)$$

Рівняння (3.2) показує, що отримані рівняння з чотирма невідомими p , q , k_d , I_a . Для обчислення похідних вектору 3D простору потрібно порахувати значення I_a і дифузного коефіцієнту k_d .

Для виділення сегментів зображення проводять відповідну кольорову селекцію. У результаті такої селекції маємо просторовий сегмент зображення з інтенсивністю $I_{\lambda}k_d$. Тут у просторовому сегменті для точки, яка лежить на площині (в площині розташована пара), потрібно визначити k_d з рівняння (3.3):

$$k_d I_{p\lambda} = (I_{\lambda}k_d + I_a)\sqrt{tg^2\theta + 1}, \quad (3.3)$$

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

Наступним кроком буде визначення інтенсивності фону на основі аналізу інформації про два зображення.

Тут отримуються два зображення одного і того ж досліджуваного зразка з порами. Перше зображення не має тіні. Друге з отриманих зображень буде мати затінення пори. Тут із тінню можна визначити значення інтенсивності фону всього зображення зразка.

Щоб отримати оцінку вектора нормалі пори беремо наступний клас пор. Нехай площина розташована горизонтально на висоті z_β .

Для аналізу використаємо схему, де перерізами типу $Pr(x, y)$, представлено пору, яка розташована горизонтально на висоті z_β (рис. 3.1). Тут пори зроблені площинами, які паралельні площині YOZ , сліди яких є на площині XOY .

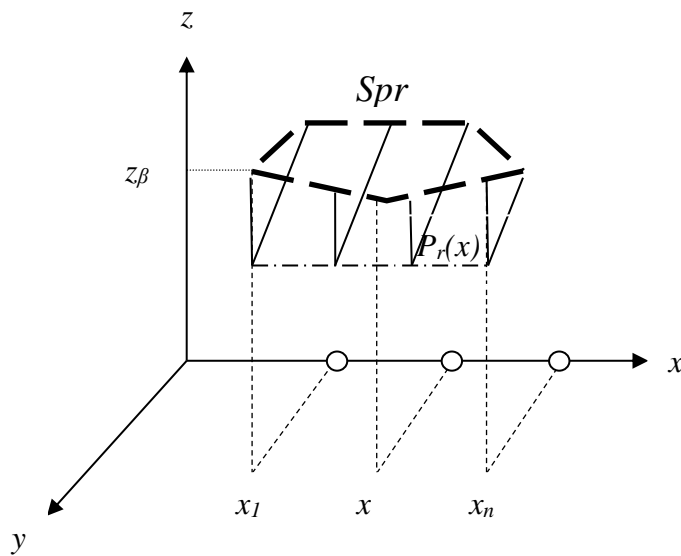


Рисунок 3.1 – Зображення пори за допомогою перерізів площини

Загальна аналітична модель пори з врахуванням висоти z_β визначається за формулою (3.4):

$$z_{\beta pr} = z_\beta + z_{pr}, \quad (3.4)$$

де $z_{pr} = f(x, y)$.

Далі шукаємо оцінку похідних вектора нормалі пори. Переріз пори площиною залежить від x , позначимо $Pr(x, y)$.

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

1. Поверхня S_{pr} розташована над площиною XOY ;
2. Переріз тріщини $Pr(x, y)$ не залежить від x , для всіх x , що належать відрізьку $[x_1, x_n]$.

Тут повинна виконуватися умова (3.5):

$$P_r(x_a, y) = P_r(x_b, y). \quad (3.5)$$

Перевірку умови можна реалізувати програмно.

Підставивши певні попередні значення, отримаємо рівняння (3.6):

$$q = q(x, y) = \sqrt{\frac{(tg^2\theta + 1)(I_{\lambda kd} - I_a)}{(I_{\lambda} - I_a)^2}} - 1, \quad (3.6)$$

де $I_{\lambda} = I_{\lambda}(x, y)$.

Звідси отримаємо вираз для оцінки похідних вектора нормалі пори Pr_g .

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

$$z(x_{pr}, y_{pr}) = z_{pr} + \int_{x_0}^{x_{pr}} \frac{df(x, y_0)}{dx} + \int_{y_0}^{y_{pr}} \frac{df(x_{pr}, y)}{dy} dy, \quad (3.7)$$

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 .

Далі проведемо інтегрування по частинах, представимо оцінку площі пори у такій формі, як представлено у рівнянні (3.8):

$$S_{nm} = - \int_{y_{bnm}}^{y_{tnm}} \int_{y_{bnm}}^{y_{\sigma}} \frac{df(x_{nm}, y)}{dy} dy dy_{\sigma} = \int_{y_{bnm}}^{y_{tnm}} [y - y_{tnm}] \frac{df(x_{nm}, y)}{dy} dy. \quad (3.8)$$

На краях пори обчислення об'єму робимо інтерполяцією значень об'єму. 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 .

На основі запропонованих розрахунків програмне забезпечення для аналізу 3D зображень – Avizo[®]. Дана методика визначає довжину, об'єм пори, а також глибину пороутворення.

3.3 Реалізація обробки 3D-зображень деталей конструкційного призначення з використанням комп'ютерно-інформаційних технологій Avizo[®]

На сучасному етапі розвитку комп'ютерної візуалізації доцільним є застосування інноваційних методів і програмно-апаратних засобів, спрямованих на спрощення та оптимізацію процедур рендерингу, оскільки етап кінцевої візуалізації є найбільш обчислювально затратним у процесі формування тривимірних зображень та, за різними оцінками, становить близько 60-80 % від загального обсягу обчислень.

Дослідження та аналіз властивостей деталей конструкційного призначення у даній роботі здійснюється шляхом формування тривимірних цифрових зображень на етапі кінцевої візуалізації з використанням програмного комплексу Avizo[®]. Зазначений підхід дає змогу отримувати

наочне та кількісне уявлення про внутрішню та поверхневу структуру об'єктів без застосування руйнівних методів контролю.

Програмний продукт Avizo® належить до числа найбільш функціонально розвинених прикладних систем для обробки, аналізу та візуалізації металографічних і томографічних даних з можливістю відтворення тривимірних об'єктів. Це універсальне програмне середовище, орієнтоване на використання у наукових дослідженнях і промислових застосуваннях, яке забезпечує роботу з різнотипними високоточними експериментальними даними.

Пакет Avizo® було розроблено первинно для візуалізації та аналізу спеціалізованих наборів наукових даних, з подальшим розширенням функціональних можливостей до універсальної платформи просторового аналізу. Програмне забезпечення реалізовано за об'єктно-орієнтованим принципом, що забезпечує модульну структуру системи, у якій окремі програмні модулі використовуються для візуалізації об'єктів даних та виконання над ними обчислювальних операцій.

Одним із найбільш ефективних методів візуалізації тривимірних даних у середовищі Avizo® є метод прямого об'ємного рендерингу. У межах цього підходу кожній елементарній точці об'єму поставлено у відповідність параметри поглинання та випромінювання світла, що дозволяє моделювати процес його проходження крізь матеріал. Застосування прямого об'ємного рендерингу забезпечує можливість візуалізації даних з будь-якого напрямку спостереження без необхідності побудови проміжних полігональних моделей. Важливою перевагою є також здатність програмного комплексу Avizo® виконувати такі операції в режимі реального часу, що суттєво підвищує ефективність аналізу великих обсягів даних.

Металографічні зображення деталей конструкційного призначення зазвичай формуються як сукупність різнорідних структурних складових, серед яких основними є:

1. Фази матеріалу, що характеризуються різними геометричними розмірами.

2. Морфологія, зокрема форма та колір структурних елементів.

3. Межі зерен, які визначають топологію мікроструктури матеріалу.

У Луцькому національному технічному університеті проводяться комплексні та широкомасштабні дослідження, спрямовані на проектування, виготовлення, експериментальне дослідження та практичне застосування пористих деталей конструкційного призначення. За своїм хімічним складом і базовими фізико-механічними властивостями такі матеріали є близькими до компактних сталей, водночас характеризуються суттєво нижчою вартістю виготовлення, що зумовлює їхню економічну доцільність для ряду інженерних застосувань [12].

Формування тривимірних зображень пористих матеріалів у даному дослідженні здійснюється шляхом пошарового накладання плоских поперечних перерізів у межах заданого діапазону висот готового зразка, що забезпечує відновлення просторової структури об'єкта, яке представлено на рисунку 3.2.

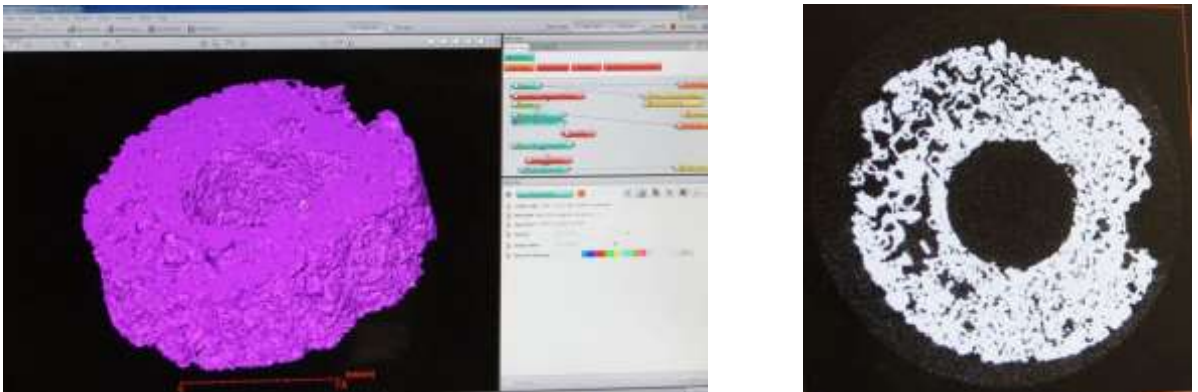


Рисунок 3.2 – Отримане зображення поперечного перерізу пористого матеріалу деталі конструкційного призначення

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

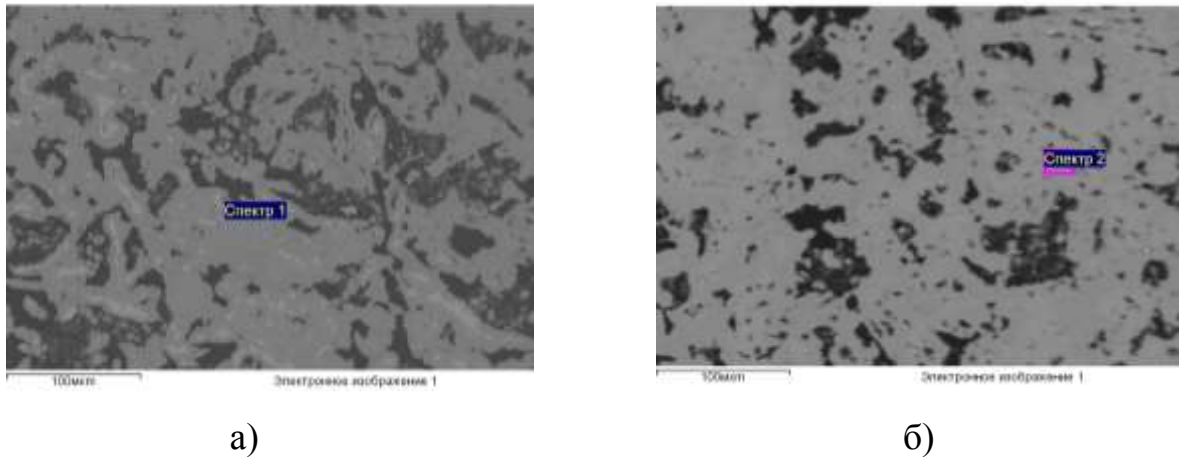


Рисунок 3.3 – Мікроструктура деталі (зразка) з відходів промислового виробництва: а) розмір частинок вихідного порошку – 0,1 мм,
б) розмір частинок вихідного порошку – 0,063 мм

За допомогою Avizo® можна вимірювати лінійні, кутові та полярні розміри (рис.3.4). Також проводять розрахунок об'єму, площі, периметра об'єкта.

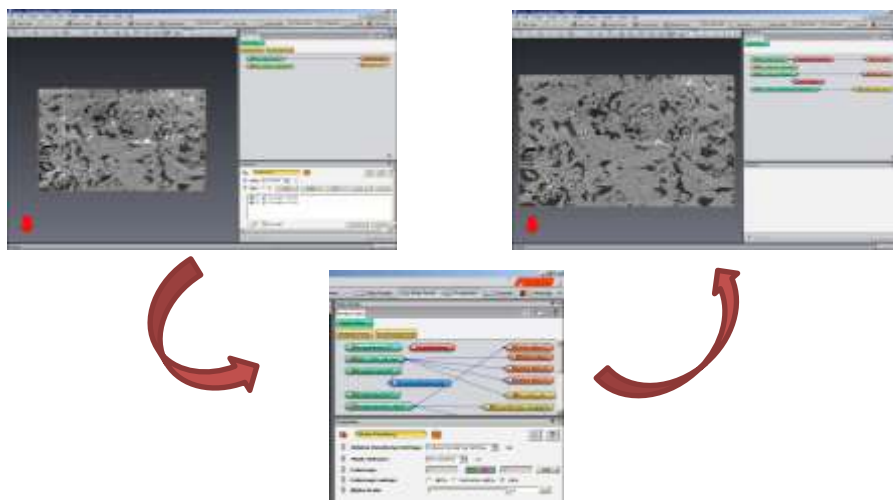
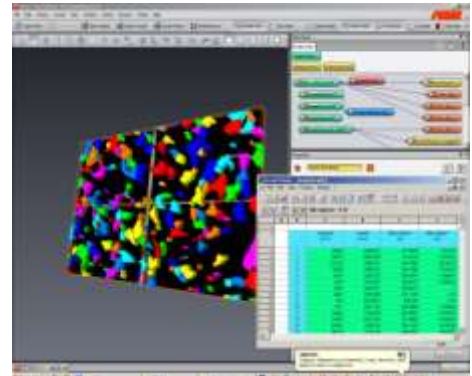
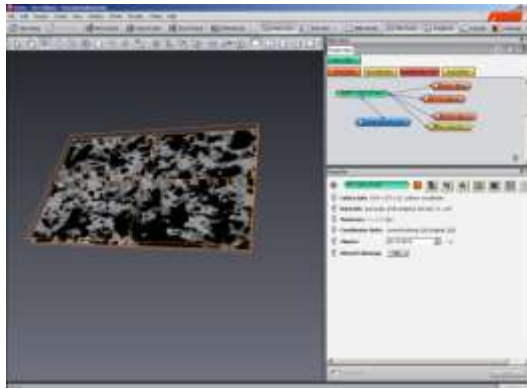
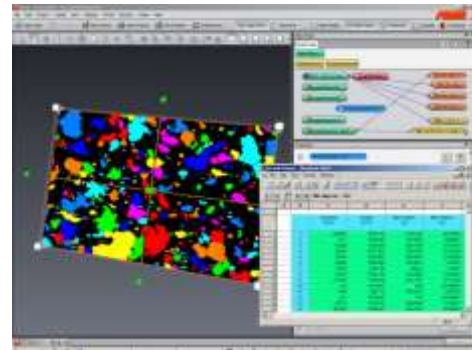
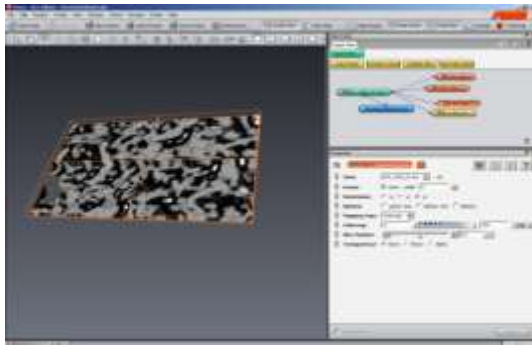


Рисунок 3.4 – Визначення лінійних розмірів частини зрізу шліфу зразка деталі з відходів промислового виробництва

Комбінація структурних складових для деталей конструкційного призначення представлені на рисунку 3.5.



а)



б)

Рисунок 3.5 – Визначення та аналіз структурних складових деталей конструкційного призначення: а) з розміром частинок порошку – 0,1 мм; б) з розміром частинок порошку – 0,063 мм

Кінцевою задачею металографічного аналізу є статистична обробка отриманих даних.

На рисунку 3.6 наведено основні структурні характеристики деталей конструкційного призначення.

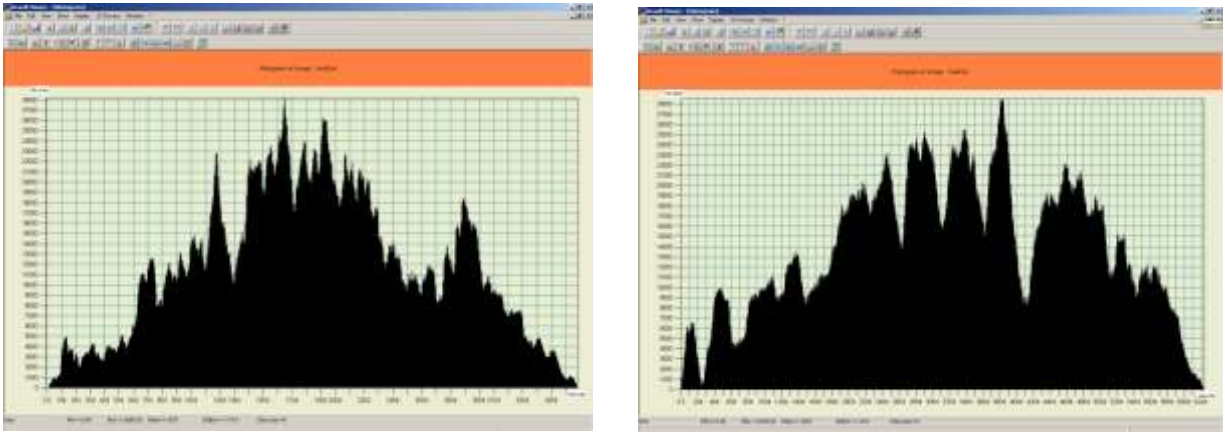


Рисунок 3.8 – Побудова лінійної гістограми пористості деталей конструкційного призначення

Висновки до розділу 3

Застосування прогресивної комп'ютерно-інформаційної технології Avizo® для комплексного дослідження та аналізу структурних властивостей деталей конструкційного призначення дало змогу отримати просторовий розподіл пористості за поперечним перерізом досліджуваного зразка.

Для наочного представлення закономірностей поророзподілу було використано етап кінцевої візуалізації – рендеринг, що забезпечує відтворення тривимірної структури матеріалу.

Застосування процедур рендерингу дозволило оперативно ідентифікувати та проаналізувати сукупність основних структурних складових деталей конструкційного призначення, зокрема фазовий склад матеріалу та конфігурацію меж зерен, що суттєво підвищує інформативність та ефективність структурного аналізу.

РОЗДІЛ 4

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

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

Деталі конструкційного призначення у процесі експлуатації зазнають інтенсивного зношування. У зв'язку з цим актуальною є задача нанесення захисних покриттів, які забезпечують суттєве підвищення зносостійкості деталей. Це тісно пов'язано з особливостями взаємодії контактуючих поверхонь під час їх відносного переміщення [10].

Контактна взаємодія твердих тіл реалізується в окремих локальних зонах, розміри та густина яких визначаються величиною прикладеного навантаження, геометрією мікронерівностей поверхні та фізико-механічними властивостями поверхневого шару матеріалу.

Одним із ефективних способів підвищення експлуатаційних характеристик деталей є електрометалізація – метод нанесення металевих покриттів на металеві поверхні. Для нанесення корозійностійких захисних покриттів на деталі конструкційного призначення також використовуються метод плазмоелектролітного оксидування (ПЕО). Властивості одержаних покриттів при цьому визначаються складом електроліту та технологічними режимами процесу ПЕО [6].

У межах виконання кваліфікаційної роботи було реалізовано нанесення комбінованих захисних покриттів на деталі конструкційного призначення, а саме на втулки. Досліджувані зразки виготовлено з відходів промислового виробництва у вигляді порошку сталі ШХ15, які наведено на рисунку 4.1.

Подальше вивчення процесів напилення захисних покриттів зумовило необхідність розроблення відповідного програмно-інформаційного забезпечення.

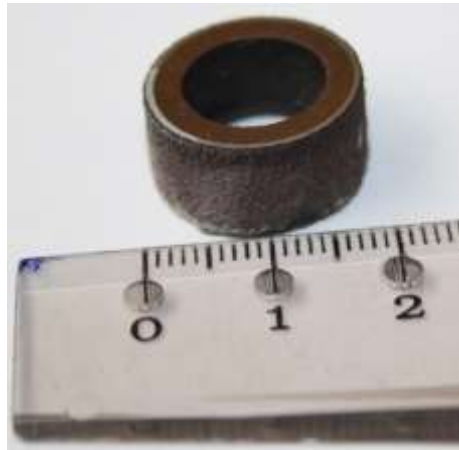


Рисунок 4.1 – Загальний вигляд втулок з комбінованим покриттям

До основних вихідних даних для розроблення програмного забезпечення належать час нанесення покриття, товщина захисного шару та тип застосовуваної технології напилення. При цьому програмний продукт повинен характеризуватися універсальністю, простотою використання та ергономічністю інтерфейсу.

Для реалізації програмного забезпечення було обрано мову програмування JavaScript, яка є динамічною інтерпретованою об'єктно-орієнтованою мовою та широко використовується у веб-орієнтованих застосунках. Сценарії JavaScript інтегруються безпосередньо в HTML-документи або підключаються до них, що забезпечує гнучкість реалізації та ряд переваг порівняно з традиційними серверними CGI-сценаріями.

Для моделювання та порівняльного аналізу процесів формування захисних покриттів методами плазмоелектролітного оксидування та електрометалізації в розробленому програмно-інформаційному середовищі (рис. 4.2) передбачено введення відповідних початкових даних. До них належать геометричні параметри деталі — внутрішній і зовнішній діаметри, висота, а також технологічні характеристики процесів напилення, зокрема:

1. Продуктивність напилення.
2. Товщина дефектного шару.
3. Інтенсивність зношування поверхні.
4. Густина матеріалу.

5. Швидкість обертання деталі.
6. Швидкість переміщення металізатора відносно напилювальної поверхні.

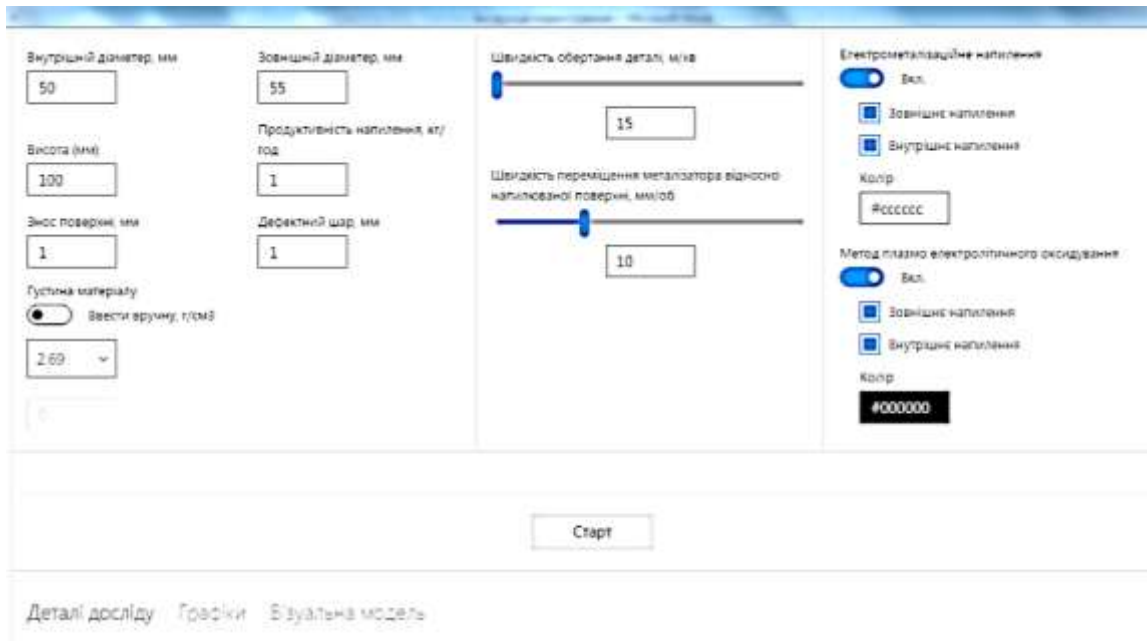


Рисунок 4.2 – Інтерфейс програми «Моделювання процесу напилення на деталь конструкційного призначення»

Після введення початкових параметрів у програмному середовищі здійснюється інтерактивне обчислення основних характеристик процесу нанесення покриття (рис. 4.3).

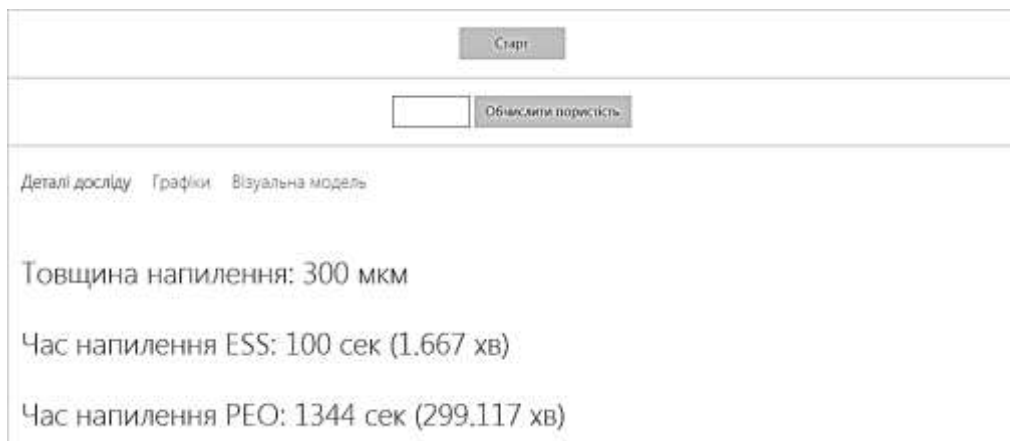


Рисунок 4.3 – Результати обчислення параметрів напилення захисного покриття на деталь

Для побудови графічних залежностей у програмному забезпеченні реалізовано спеціалізований модуль «Chart», який забезпечує візуалізацію залежності товщини покриття від часу його нанесення як для електродугового напилення, так і для плазмоелектролітного окисування (рис. 4.4).

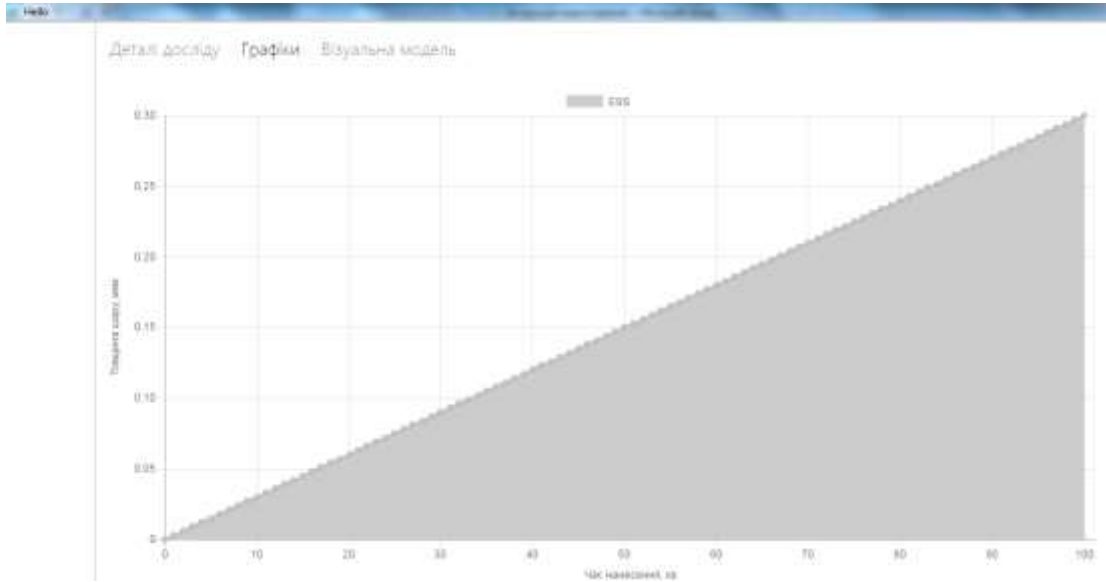


Рисунок 4.4 – Залежність товщини напилення відносно часу нанесення

Модуль «Clearness» призначений для підвищення наочності процесу комп'ютерного моделювання та візуального відображення формування захисного шару на поверхні деталі (рис. 4.5).

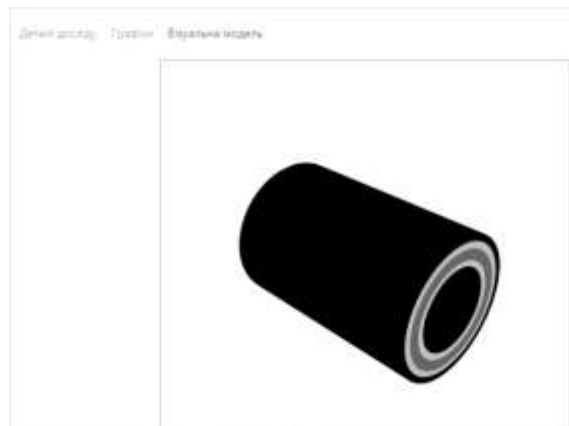


Рисунок 4.5 – Комп'ютерне моделювання процесу нанесення покриття

Розроблене програмне забезпечення є зручним та простим у використанні і має низку переваг, зокрема:

1. Можливість моделювання деталей заданої конфігурації з проведенням віртуальних експериментів, що дозволяє суттєво скоротити часові витрати на дослідження.
2. Універсальність застосування для моделювання процесів напилення на деталях різного типу, включаючи корпусні елементи, вали, шестерні та інші конструкційні компоненти.

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

Моделювання процесу пресування пористої структури матеріалу здійснювалося із застосуванням пакета прикладних програм MatLab. Додатково було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення мовою програмування C++, що дозволило реалізувати алгоритми моделювання та обчислення основних фізико-структурних характеристик пористих матеріалів із високою обчислювальною ефективністю.

Досліджувана деталь конструкційного призначення, виготовлена з пористого матеріалу, має форму витягнутого кругового циліндра (рис. 4.6). У зв'язку з цим моделювання виконувалося для таких основних геометричних параметрів технологічного процесу: діаметр оправки – 40 мм, діаметр армованої еластичної оболонки – 80 мм.

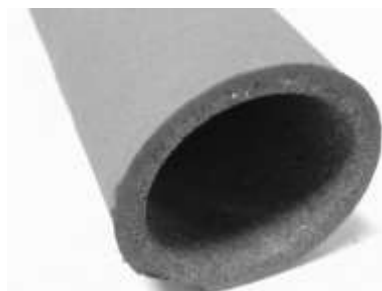


Рисунок 4.6 – Деталь конструкційного призначення (пористий матеріал)

Ø40×220 мм

Для початку роботи з програмним комплексом користувач повинен ввести початкові дані для моделювання. З цією метою редагується файл Begin.txt, у якому задаються необхідні параметри багат шарового фільтра (рис. 4.7). Після введення вихідних даних програмне забезпечення здійснює послідовне обчислення структурних характеристик матеріалу.

```
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
```

Рисунок 4.7 – Ввід початкових даних та процес обчислення структурних характеристик деталі

Результати моделювання подано у вигляді графічних залежностей, що відображають розподіл пористості та радіальної швидкості в об'ємі деталі (рис. 4.8).

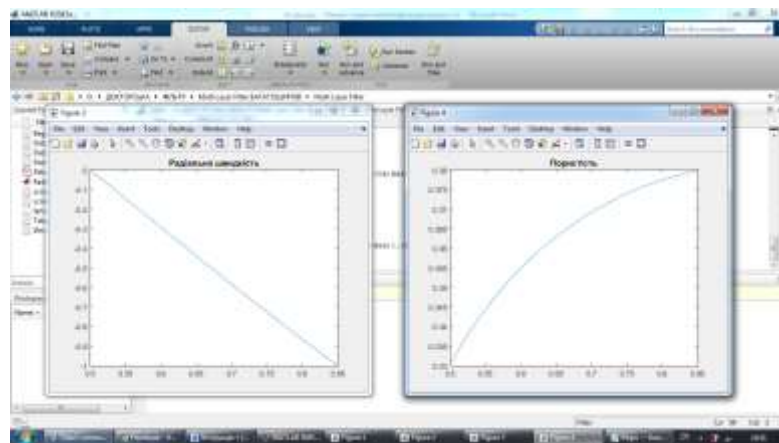


Рисунок 4.8 – Виведення графічних залежностей впливу радіальної швидкості та розподілу пористості при пресуванні деталі конструкційного призначення

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

SolidWorks є сучасним програмним комплексом систем автоматизованого проєктування, призначеним для автоматизації робіт на етапах конструкторської та технологічної підготовки виробництва. Даний програмний продукт забезпечує проєктування й комп'ютерне моделювання виробів різного функціонального призначення та будь-якого рівня складності.

SolidWorks належить до систем гібридного параметричного проєктування та призначений для створення тривимірних моделей деталей і вузлів, а також для формування конструкторської документації [11]. У програмному середовищі реалізовано принципи тривимірного твердотілого й поверхневого параметричного моделювання, що дозволяє інженеру створювати об'ємні деталі та компоувати складальні одиниці у вигляді повноцінних 3D-моделей.

Проєктування та виготовлення деталей конструкційного призначення з пористих матеріалів неможливе без контролю та кількісного визначення властивостей вихідних порошкових матеріалів і готових виробів. Однією з найважливіших характеристик пористих матеріалів є розподіл локальної проникності або узагальнений коефіцієнт проникності.

На сьогодні відомо ряд методів визначення проникності пористих матеріалів [12], серед яких найбільш ефективним є метод визначення коефіцієнта проникності з використанням удосконаленої експериментальної установки, загальний вигляд якої представлено на рисунку 4.9.

Засоби, що надаються системою SolidWorks, дозволяють ефективно розв'язувати зазначену задачу шляхом проведення чисельного моделювання та прогнозування зазначених параметрів. У процесі комп'ютерного моделювання стає можливим дослідження характеру втрат швидкості й тиску, а також оперативне коригування геометричних або технологічних параметрів системи з метою їх мінімізації.



Рисунок 4.9 – Загальний вигляд установки для визначення проникливості пористого матеріалу

Функціональні можливості SolidWorks дозволяють розглядати дану систему не лише як інструмент автоматизованого проєктування, але й як потужну комп'ютерно-інформаційну платформу для проведення інженерних досліджень і розрахункового аналізу.

Змодельовану комплексну систему для визначення інтегральних характеристик пористого матеріалу представлено на рисунку 4.10. Рух водного середовища у моделі візуалізується за допомогою напрямних стрілок, колір яких змінюється залежно від величини швидкості та тиску потоку у відповідних зонах системи.

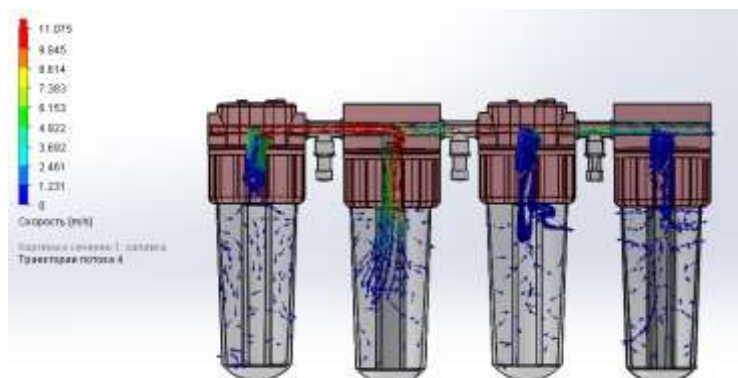


Рисунок 4.10 – Напрямки руху потоку води в системі із 4-х зразків

Графічні залежності швидкості руху потоку та перепаду тисків по довжині поперечного перерізу системи наведено на рисунках 4.11 та 4.12.

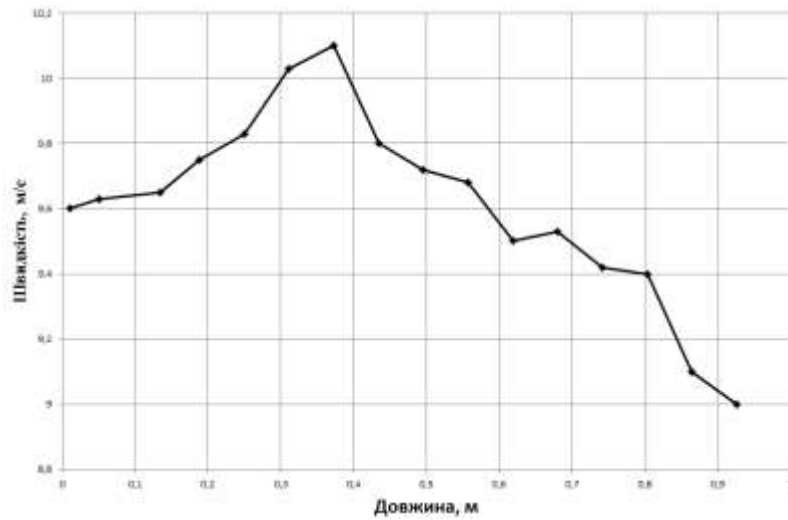


Рисунок 4.11 – Графік залежності швидкості руху води в системі із 4-х зразків

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.

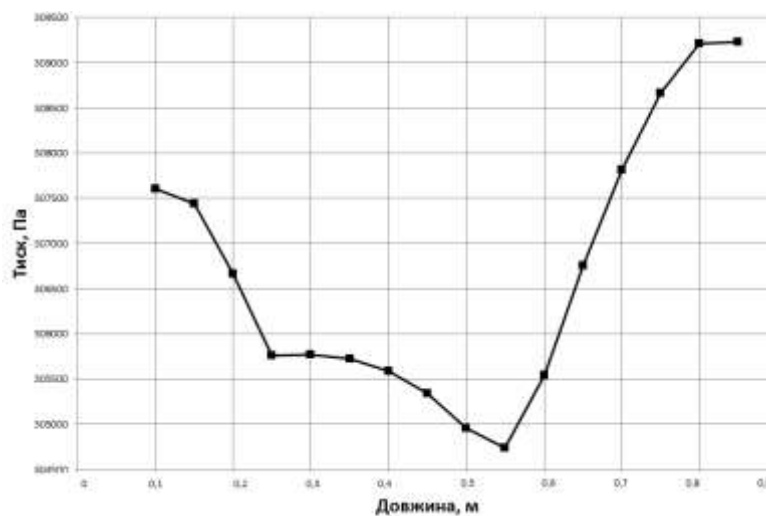


Рисунок 4.12 – Графік залежності перепаду тисків у системі із 4-х зразків

Застосування системи параметричного проектування SolidWorks для моделювання експериментальної установки на етапах конструкторської та технологічної підготовки виробництва продемонструвало можливість істотного скорочення часових і трудових витрат на виконання проектно-розрахункових робіт, а також підвищення точності та інформативності досліджень.

Висновки до розділу 4

Застосований метод комп'ютерного моделювання дав змогу не лише визначити розподіл пористості та інші структурні характеристики пористого матеріалу, але й установити взаємозв'язки між експлуатаційними властивостями і технологічними режимами формування матеріалу. Отримані результати є важливими для оптимізації параметрів технологічного процесу, прогнозування робочих характеристик деталей конструкційного призначення та підвищення їх надійності в умовах експлуатації.

Визначення залежності швидкості руху води від координати перерізу свідчить про зростання швидкості потоку у напрямку до зовнішньої поверхні зразка. При цьому значення швидкості змінюється в діапазоні від 1 до 10,2 м/с. Аналогічно, з графіку перепаду тисків випливає, що величина тиску також зростає ближче до краю зразка, що узгоджується з характером руху потоку в пористому середовищі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У процесі виконання даної кваліфікаційної роботи було здійснено комплекс експериментальних, розрахункових та комп'ютерно-моделювальних досліджень, за результатами яких сформульовано такі основні висновки:

1. Проаналізовано, систематизовано та обґрунтовано застосування сучасних комп'ютерно-інформаційних технологій, методів і технічних засобів, що використовуються для визначення основних структурних та експлуатаційних властивостей деталей конструкційного призначення.

2. Розглянуто та узагальнено методи й інструментальні засоби обчислювального матеріалознавства, які застосовуються для комп'ютерного моделювання структури і властивостей металевих матеріалів на різних масштабних рівнях.

3. Розроблено модель та алгоритм обробки кольорових металографічних тривимірних зображень, призначених для аналізу структурної організації деталей конструкційного призначення, а також здійснено їх практичну програмну реалізацію з використанням сучасних засобів обробки зображень.

4. Виконано комп'ютерне моделювання технологічних процесів виготовлення деталей конструкційного призначення та досліджено вплив цих процесів на їх властивості, зокрема змодельовано процеси нанесення захисних покриттів з метою підвищення зносостійкості деталей; здійснено моделювання та визначення основних структурно-фізичних властивостей пористих матеріалів; реалізовано комплексний підхід до контролю та прогнозування властивостей пористих матеріалів із використанням комп'ютерно-інформаційних технологій.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гуржій А. М., Возненко Л. І., Поворознюк Н. І., Самсонов В. В. Основи інформаційних технологій: навч. посіб. для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти. Київ: Літера ЛТД, 2023. 288 с.
2. Повстяной О. Ю. Багатошарові пористі проникні матеріали з регульованою пористістю з відходів промислового виробництва : дис...докт. техн. наук: 05.02.01 / Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України. Київ, 2021. 345 с.
3. Повстяной О. Ю, Рудь В. Д., Імбірович Н. Ю., Гальчук Т. Н., Четвержук Т. І., Смаль М. В., Дзюбинський А. В. Оптимізація властивостей багатошарових поруватих проникних матеріалів. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. Том 56. № 4. 2020. С. 88-92.
4. Oleksandr Povstyanou, Oleg Zabolotnyi, Victor Rud Andriy Kuzmov, Halyna Herasymchuk. Modeling of processes for creation new porous permeable materials with adjustable properties. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE-2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Vol. 1. 2020. Pp. 456-465. doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_46.
5. Povstyanou O., Imbirovich N., Tkachuk V., Redko R., Priadko, O. Theoretical and Experimental Studies of the Properties of Porous Permeable Materials Obtained from Industrial Waste. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Vol. 4. Pp. 519-528. DOI: 10.1007/978-3-031-06025-0_51.
6. Qin S., Lv P., Li S., Li, Y. Casting process of gate valve steel based on ProCAST simulation. *In Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1798 (1). DOI:10.1088/1742-6596/1798/1/012013
7. Свяцький В. В. Вплив вогнища деформації на енергосилові параметри процесу пресування. Organization of scientific research in modern conditions. *Conference Proceedings Seattle: KindleDP*. 2020. Pp. 78-82.

8. Свяцький В. В. Аналіз моделювання енергосилових параметрів процесу прямого пресування. *Прикладні науково-технічні дослідження*: зб. матеріалів IV міжнар. наук.-прак. конф. Тези доповідей, Івано-Франківськ: ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника». Т. 1. 2020. С. 72-74.

9. Ваць Д. М. Моделювання ущільнення порошкових фільтруючих елементів при радіально-ізостатичному пресуванні. *Actual problems of automation and control*: матеріали XIII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів. Випуск № 13. Луцьк: ЛНТУ, 2025. С. 12-17.

10. Михайлов А. О. Розроблення методів проектування ресурсозберігаючих технологій виготовлення деталей обладнання харчових виробництв: дис. ... д-ра філос.: спец. 133 «Галузеве машинобудування»: Нац. ун-т харч. технол. Київ. 2021. 142 с.

11. Tamal Ghosh, Nilanjan Santra, Nijhuma Kayal Remediation of industrial solid waste in fabrication of porous alumina ceramic filter and their efficacy in aerosol filtration and removal of oil from wastewater. *Materials Science and Engineering*. Vol. 317. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2025.118202>.

12. Chao Wang, Guogang Xu, Xinyue Gu, Yuanhui Gao, Peng Zhao. High value-added applications of coal fly ash in the form of porous materials: A review. *Ceramics International*. Vol. 47. Issue 16. 2021. Pp. 22302-22315 <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.070>.