

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет

Олександр Повстяной
Віктор Рудь
Наталя Імбірович

**КОМП'ЮТЕРНО-ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
В СУЧАСНОМУ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ**

Монографія

Луцьк
РВВ ЛНТУ
2019

УДК 007.2:66-965

П 38

*Затверджено до друку вченою радою
Луцького національного технічного університету
(протокол № 12 від 29.06.2017 р.)*

Рецензенти:

Никифорчин Г. М. – доктор технічних наук, професор, завідувач відділом діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України;

Букетов А. В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії;

Андрущак І. Є. – доктор технічних наук, професор, декан факультету фінансів, обліку, лінгвістики та права Луцького НТУ;

Слабкий А. В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування Вінницького національного технічного університету, директор науково-дослідного виробничого центру машинобудування та транспорту ВНТУ.

Повстяной Олександр

П 38 Комп'ютерно-інформаційні технології в сучасному матеріалознавстві : монографія / Олександр Повстяной, Віктор Рудь, Наталя Імбірович. – Луцьк : РВВ ЛНТУ. – 2019. – 196 с.

ISBN 978-617-672-216-8

Монографія присвячена одному із напрямків сучасного *матеріалознавства* – *комп'ютерного*, а саме вивченню можливостей та оцінці сучасного програмного забезпечення для комп'ютерних засобів дослідження металографічних зображень з метою визначення якісних та кількісних характеристик різноманітних матеріалів.

Коллективна монографія принесе значну користь фахівцям-практикам та теоретикам із матеріалознавства та буде цікава аспірантам, магістрантам, бакалаврам і студентам старших курсів технічних ЗВО, які пов'язані з опануванням сучасного матеріалознавства.

УДК 007.2:66-965

© Повстяной Олександр, Рудь Віктор,
Імбірович Наталя, 2019

© Коренга Ольга (обкладинка), 2019

ISBN 978-617-672-216-8

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ I. РОЛЬ СТРУКТУРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У РОЗВИТКУ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА	8
1.1. Деякі відомості про структуру матеріалів і її вплив на їх властивості.....	8
1.2. Сучасні методи дослідження поверхонь та структур в комп'ютерному матеріалознавстві	9
1.2.1. Контактні методи вимірювання	13
1.2.2. Безконтактні методи вимірювання	13
1.2.3. Мікроскопічний метод	15
1.2.4. Інтерферометричні методи	17
1.2.5. Метод РЕМ	19
1.2.6. Електронографія	21
1.3. Сучасні проблеми та актуальні завдання інформаційного та комп'ютерного матеріалознавства	23
1.4. Висновки та перспективи розвитку фрактографії, топології та аналізу зображень.....	31
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ I	32
РОЗДІЛ II. СУЧАСНІ ПРИКЛАДНІ ПРОГРАМИ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТА ОБРОБКИ МЕТАЛОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ	37
2.1. Прикладна програма „PHOTOM”	40
2.2. Прикладна програма „OPTIMAS”	41
2.3. Прикладна програма „IMAGE EXPERT PRO”	42
2.4. Прикладна програма „ВИДЕОТЕСТ”	43
2.5. Пакет прикладних програм „AVIZO”	44
2.6. Прикладна програма „SMART-EYE”	52
2.7. «Система КОИ».....	55
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ II	58
РОЗДІЛ III. ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛОСТРУКТУР ЗА ЇХ КОЛЬОРОВИМИ 3D-ЗОБРАЖЕННЯМИ	62
3.1. Створення 3D-зображень метало структур.....	64
3.2. Теоретичні передумови для розробки методів і алгоритмів, які дозволяють використовувати кольорові зображення шліфів матеріалів в задачах аналізу структур	68

3.3. Модель і алгоритм обробки кольорових металографічних 3D зображень.....	74
3.4. Практична реалізація обробки 3D зображень при металографічному аналізі за допомогою сучасного спеціалізованого програмного середовища Avizo®	80
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ III	90

РОЗДІЛ IV. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ.....	94
4.1. Комп'ютерно-імітаційне моделювання нанесення захисних покриттів на циліндричну деталь	94
4.1.1. Моделювання товщини комбінованих захисних покриттів.....	97
4.1.2. Визначення товщини комбінованих захисних покриттів	100
4.1.3. Дослідження мікроструктури плазмоелектролітно оксидованого електродугового покриття.....	110
4.1.4. Дослідження на пористість ОКП	112
4.2. Моделювання пористої структури у ППМ	122
4.2.1. Моделювання пористої структури в одношарових фільтруючих порошкових матеріалах	123
4.2.2. Моделювання пористої структури в багатшарових фільтруючих порошкових матеріалах	129
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ IV	139

РОЗДІЛ V. ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ СПЕЦІАЛЬНИХ ПРОГРАМ В КОМП'ЮТЕРНОМУ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ	142
5.1. SolidWorks, як сучасна інформаційна база для Інженерних розрахунків	142
5.2. Можливості та програмна реалізація комп'ютерного комплексу ABAQUS	174
5.3. Моделювання ущільнення порошкового фільтруючого елемента складної форми при радіально-ізостатичному пресуванні методами та засобами скінченних елементів	181
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ V	191

ВСТУП

Сучасна промисловість потребує нових конструкційних і функціональних матеріалів, у тому числі композитних та наноструктурованих. Запроваджуване для задоволення цих запитів технологічне обладнання, автоматизоване та роботизоване оснащене нелінійними приводами, воно дозволяє розробляти принципово нові технології для виробництва матеріалів з підвищеними експлуатаційними властивостями. Приладова база діагностики та наукових досліджень забезпечує дослідження структури нових матеріалів у будь-якому розмірному масштабі від нано- до макро-. Стрімкий розвиток високопродуктивних обчислювальних систем і програмного забезпечення дозволяє проводити комп'ютерне моделювання нових матеріалів і прогресивних технологій. Усі ці перераховані фактори сприяють становленню нової міждисциплінарної галузі науки про матеріали із застосуванням методів комп'ютерного моделювання та електронного дослідження – **Computation Materials Science (CMS)**.

Абревіатура **CMS** активно присутня в зарубіжних виданнях більше п'ятнадцяти років і перекладається на українську мову дослівно як «*комп'ютерне матеріалознавство*».

За кількістю об'єктів і методів дослідження *комп'ютерне матеріалознавство* охоплює велику область сучасних наукових знань, у якій можна виділити напрямки, що мають важливе значення для цифрового матеріалознавства. В першу чергу необхідно згадати про конструювання нових матеріалів зі складною внутрішньою структурою. Засоби моделювання композитних і адитивних конструкційних матеріалів в програмних продуктах дають можливість проводити комп'ютерні експерименти з проєктованими структурами і досліджувати властивості складноструктурованих матеріалів разом з триботехнічними властивостями деталей у складі віртуальних випробувань цифрової моделі виробу.

CMS розглядає технологічні та експлуатаційні питання матеріалознавства і створюваних матеріалів. Обчислювальному моделюванню піддаються матеріали різні за своєю фізичною природою: метали і металеві сплави, неорганічні і органічні матеріали, оксиди і полімери, напівпровідники, ізолятори і надпровідники, кераміка і скло, монокристалічні, аморфні і композитні матеріали, пористі та проникні ма-

теріали тощо. Зміст цих напрямків динамічно змінюється в міру розвитку і запровадження нових аспектів дослідження.

Про нову класифікацію напрямків сучасного матеріалознавства. Існуючі наукові напрямки сучасного матеріалознавства об'єднані нами в три групи за використанням методів й інструментів дослідження, структурна схема яких представлена на рис. 1. У запропонованій нами класифікації виділені три групи наукових напрямків: експериментальне, обчислювальне та інформаційне матеріалознавство. Актуальні напрями розвитку науки про матеріали позначені кольоровими блоками по периметру схеми і віднесені до відповідної групи з однотипним інструментарієм.

Про новий напрям інформаційного матеріалознавства. Нова група напрямків інформаційного матеріалознавства покликана забезпечити інтегровані середовища життєвого циклу виробів необхідними електронними базами даних про матеріали. На рис. 1 блоком-хмаринкою виділено новий та перспективний напрямок на стику обчислювального та інформаційного матеріалознавства – «*комп'ютерне матеріалознавство*».

У даній монографії автори акцентують увагу на тому напрямку матеріалознавства, яке знаходиться на стику з електронними базами матеріалів конструкційного призначення, розглядаючи вплив структурних особливостей у властивостях металевих матеріалів, пористих структур. Такий підхід, зокрема, сприяє побудові комунікативних зв'язків в узагальненому інформаційному просторі між проєктуванням дослідження машинобудівних конструкцій, технологій і матеріалів.

Комп'ютерна модель виробів або технологій в інформаційному просторі CAD/CAE/CAM/PLM включає в себе математичний опис загальних процесів і необхідних закономірностей поведінки матеріалів. Для опису закономірностей поведінки матеріалів можуть використовуватися експериментальні дані, отримані в результаті прямого виміру властивостей. У більшості випадків цих даних недостатньо, тому і потрібне відновлення відсутніх відомостей методами обчислювального матеріалознавства і комп'ютерного моделювання структури і властивостей матеріалів.

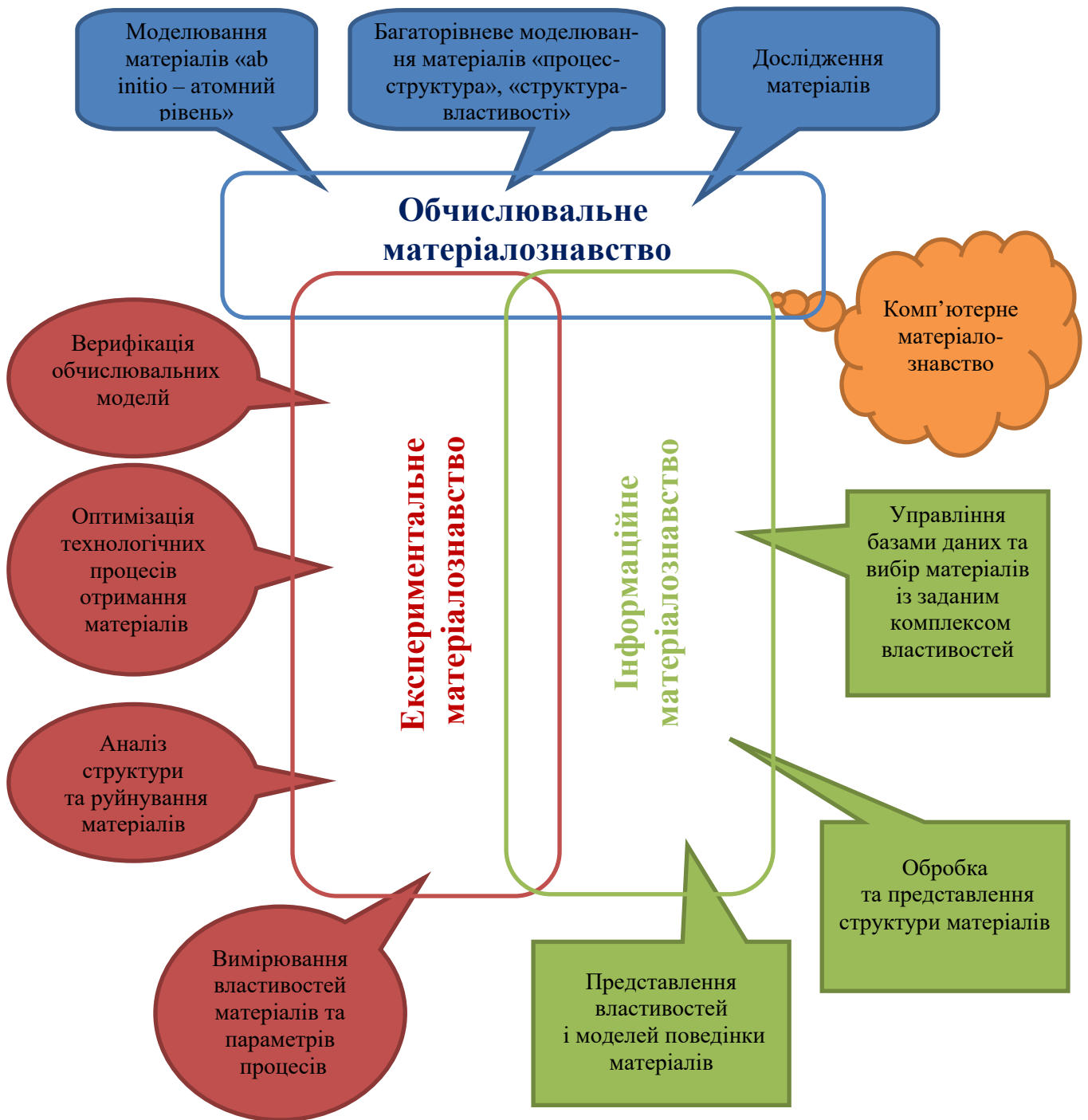


Рис. 1. Класифікація напрямків сучасного матеріалознавства: взаємозв'язані актуальні напрями розвитку науки про матеріали та відносне розміщення в структурі нового наукового напрямку (комп'ютерне матеріалознавство – блок-хмаринка)

Комп'ютерне матеріалознавство використовує високопродуктивне обчислення, суперкомп'ютери й сучасні перспективні технології. Необхідність верифікувати розрахункові моделі пов'язує *комп'ютерне матеріалознавство* з експериментальними дослідженнями матеріалів і комп'ютерним аналізом режимів експлуатації виробів.

РОЗДІЛ I

РОЛЬ СТРУКТУРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У РОЗВИТКУ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА

1.1. Деякі відомості про структуру ППМ та вплив на їх властивості

Важливими задачами технології отримання пористих проникливих матеріалів є визначення основних структурних характеристик, таких як форма та розмір пор, розподіл пористості, які в свою чергу визначають властивості проникливості та фільтрування в цілому.

Створення і розробка таких матеріалів з порошків неможлива без вивчення їх властивостей та взаємозв'язків. Тому, насамперед, при створенні проникливих матеріалів задають тонкість очищення і коефіцієнт проникливості. Спочатку необхідно встановити, які значення пористості, розмірів і форм пор можуть забезпечити необхідні тонкість очистки і проникливість. Далі слід визначити структуроутворюючий елемент і, виходячи з його вигляду і властивостей, технологію виготовлення ППМ. Послідовність створення пористого проникливого матеріалу із заданими властивостями приведено на рис. 1.1.

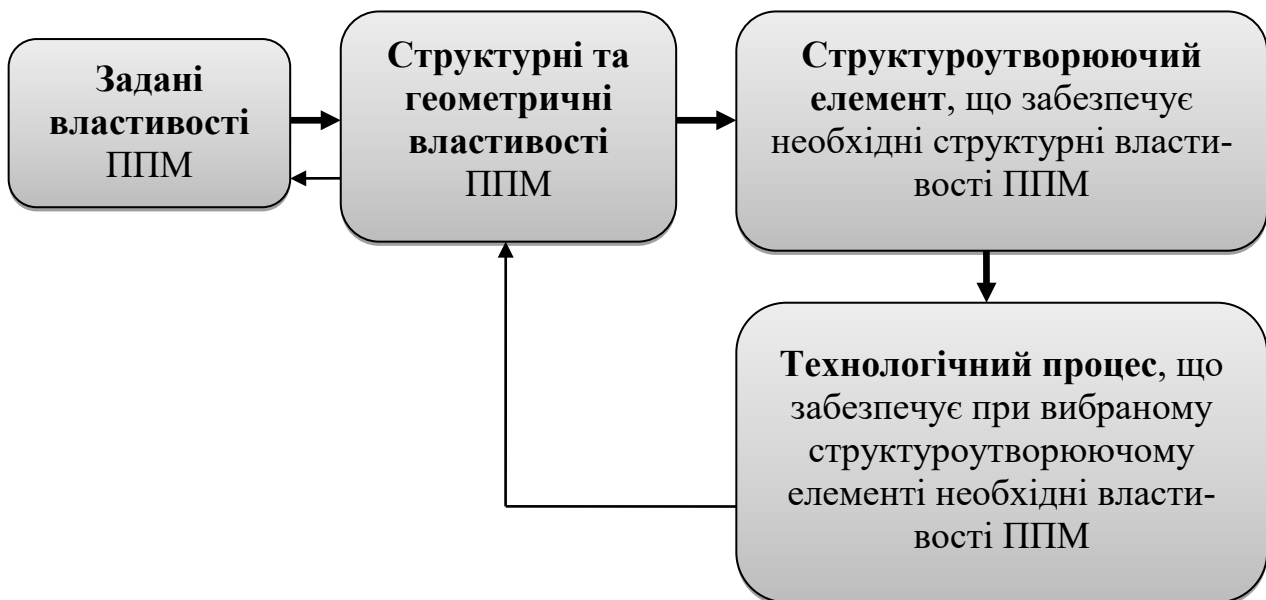


Рис. 1.1. Схема створення пористих проникливих матеріалів із заданими властивостями

Виходячи з цього можна відмітити, що властивості ППМ змінюються залежно від розміру вихідних часток так: збільшення розміру часток призводить до деякого зменшення пористості при значному збільшенні розміру пор, підвищується також коефіцієнт проникливості. Тому на сьогодні представляє інтерес дослідження залежності пористості ППМ від розміру часток, від способу одержання вихідного матеріалу, а особливо від фракційного складу порошку.

Ефективним шляхом пошуку потрібного поророзподілення є побудова теоретичної моделі пористого тіла, на основі якого можна, по-перше, знаходити рівняння, які пов'язують параметри моделі з основними властивостями пористих матеріалів: по-друге, забезпечити прогнозування їх оптимальних властивостей шляхом ціленаправленого формування відповідного поророзподілення і, по-третє, опис самих процесів регулювання поророзподілення фільтруючих матеріалів.

Розроблена класифікація властивостей пористих матеріалів. Її загальний вигляд представлений на рис. 1.2.

Створення та розробка нових пористих проникливих матеріалів неможлива без вимірювання та контролю властивостей вихідних порошків і готових виробів. Деякі методи визначення властивостей порошків та фільтруючих ППМ внесені у ГОСТ або технічні умови, однак є ряд властивостей, дослідження яких не регламентуються цими документами. Так, наприклад, без визначення розподілу пористості по товщині матеріалу неможливо створити високоефективні фільтруючі ППМ з анізотропною пористою структурою для фільтрації рідин та газів; без визначення розподілу локальної проникливості неможливо повно дослідити властивості фільтруючих ППМ і т.д.

1.2. Сучасні методи дослідження поверхонь та структур в комп'ютерному матеріалознавстві

Стрімкий розвиток обчислювальної техніки і методів цифрової обробки зображень останнім часом дав можливість значно розширити автоматизацію науково-дослідних робіт у багатьох областях науки і техніки. Макроскопічна поведінка матеріалу безпосередньо залежить від особливостей його мікроструктури. Кількісний підхід при аналізі дозволяє виявити ту оптимальну структуру, яка відповідає умовам служби матеріалу.



Рис. 1.2. Класифікація властивостей пористих проникливих матеріалів

Вивчення структурних характеристик металів і сплавів – одна з ключових задач сучасного матеріалознавства, на основі якої базується процес створення нових та покращення властивостей вже існуючих матеріалів. Вивчення можливостей та оцінки сучасного програмного забезпечення для комп'ютерних засобів дослідження металографічних зображень з метою визначення якісних та кількісних характеристик різноманітних матеріалів продиктовано науковими та виробничими задачами, які виникли в сучасному матеріалознавстві сьогодення.

У ХХІ столітті впровадження сучасних інформаційних технологій вимагає вдосконалення багатьох традиційних систем обробки та аналізу інформації.

Для виробничого контролю вже не достатньо двовимірних характеристик на основі параметрів шорсткості, необхідним є комплексний тривимірний опис. Одним із ключових моментів сучасного матеріалознавства є мікротопографія, яка включає врахування статистичних характеристик матеріалів.

На сьогодні в багатьох країнах активно здійснюється реалізація національних програм у сфері нанотехнологій. При цьому надзвичайно важливою є задача 3D реконструкції структури та мікроструктури об'єктів на мікронному та субмікронному рівнях. Такі дослідження є особливо важливими в матеріалознавстві, металознавстві, порошковій металургії, мікроелектроніці, машинобудуванні, приладобудуванні, в космічному виробництві, тощо.

Для достовірної оцінки 3D реконструкції мікрооб'єктів потрібно оперувати альтернативними методами з метою їх порівняння та підвищення надійності виконаних кількісних досліджень. Альтернативними методами можуть бути фізичні (томографічні) та фотограмметричні. Фізичні методи мають обмежене застосування, яке зумовлене потребою апріорного постулювання і фізичними умовами формування електронного зонду для електронної мікроскопії растрового типу.

Для тривимірної інтерпретації мікрооб'єктів розроблена низка різноманітних методів. Поряд з класичними контактними методами, які раніше були основними для визначення параметрів і тим самим якостей мікроповерхонь, сюди відносяться численні методи з області оптичної мікроскопії. Для значних збільшень використовуються методи растрово-електронної та скануючої зондової мікроскопії, які з високою роздільною здатністю дозволяють виконувати дослідження на атомарному рівні. Фотограмметричні методи можна використовувати для просторо-

вого аналізу мікрофотографій і знімків електронно-світлових та електронних мікроскопів. Водночас для оптичних досліджень поверхонь вже давно є безліч різноманітних модифікованих методів.

Сучасні методи дослідження 3D-геометрії об'єктів (рис. 1.3) можна розділити на два великі класи: контактні (координатно-вимірювальні машини, щупові прилади, контактні профілометри) і безконтактні, – серед яких найбільш поширеними є методи світлового перерізу, стереоскопічні, інтерференційні і растрові методи. До безконтактних методів належать також і фотограмметричні методи.

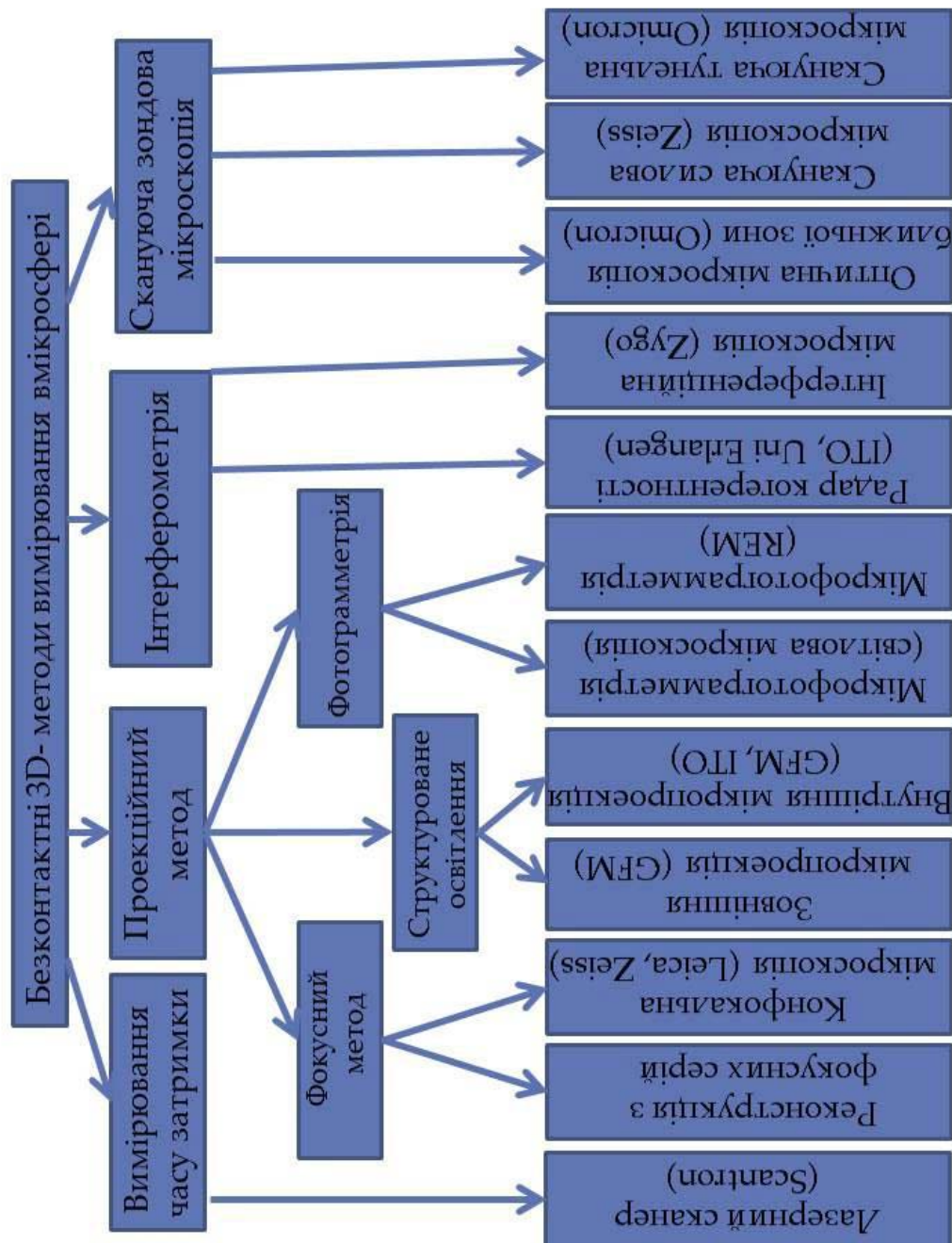


Рис. 1.3. Сучасні методи дослідження 3D-геометрії об'єктів

1.2.1. Контактні методи вимірювання.

Прилади, які базуються на контактних методах вимірювання (профілометр, профілографи), використовуються вже впродовж тривалого часу. Класичною технікою для тривимірного вимірювання мікроповерхонь є контактний (профільний) метод. При цьому поверхня зразка сканується за окремими профілями алмазною голкою, після чого окремі профілі в своїй сукупності відображають модель поверхні, з якої можна визначити, наприклад, 3D-шорсткість (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Профілограф-профілометр для визначення шорсткості та хвилястості поверхонь

Точність методу залежить як від точності позиціонування об'єктного столика і вимірювальної системи, так і від радіуса вістря голки, який зазвичай становить від 5 мкм до 0,1 мкм. Через закруглення вістря голки відбувається згладжування вимірювань, оскільки менші нерівності від діаметра вістря не можна охопити. Цей метод, який переважно використовується для вимірювання шорсткості поверхні, попри високу надійність, має певні обмеження.

1.2.2. Безконтактні методи вимірювання.

Багато задач промислового контролю та проектування вимагають отримання даних про геометричні форми об'єктів у тривимірному просторі. Для вирішення цих задач широко застосовуються безконта-

кні методи вимірювань, серед яких найбільш успішними є оптичні методи.

До методів вимірювання, що працюють у безконтактному режимі, відносять проєкційні методи, інтерферометричні та методи скануючої електронної мікроскопії. Технології, які належать до цих методів, значною мірою залучаються також для визначення топографії поверхні в окремих мікрообластях (рис. 1.5).

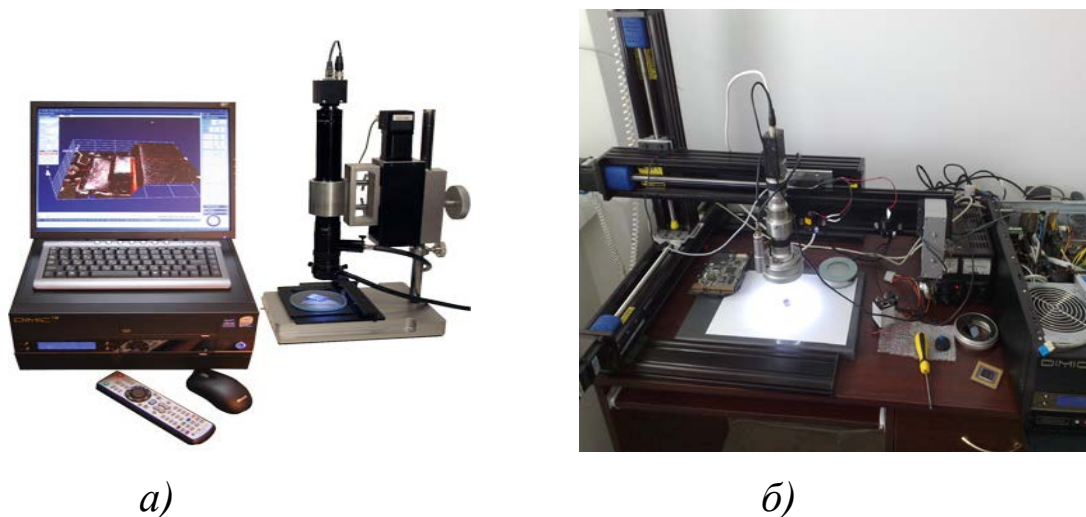
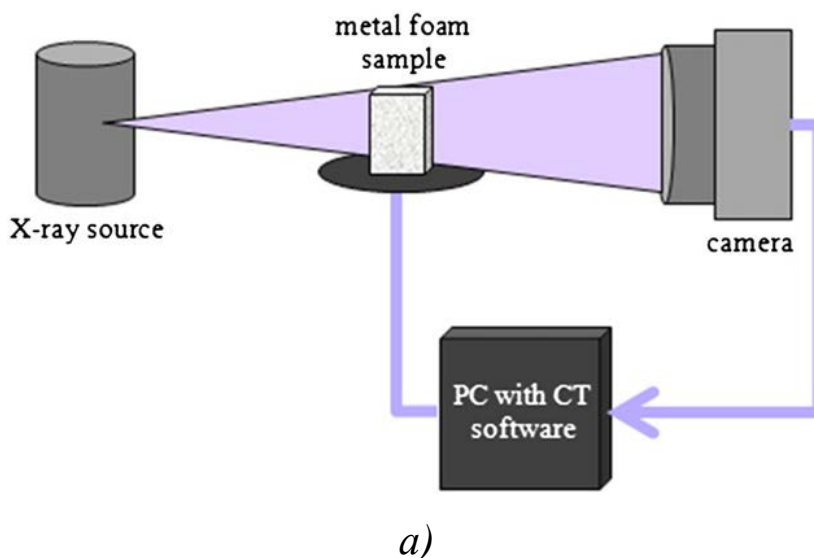


Рис. 1.5. Схема (а) та загальний вигляд (б) модульного комплексу оптичного аналізу зображень Dimic 1000

Водночас деякі методи скануючої зондової мікроскопії дозволяють відтворювати мікротопографію в нанометровому діапазоні, методи електронної мікроскопії дають можливість отримувати просторову інформацію про мікроструктуру (рис. 1.6).





б)

Рис. 1.6. Принципова схема (а) та вид томографа X-ТЕК 225/230 kV СТ (б)

В останні роки набули значного поширення методи вимірювання форми поверхні, які базуються на фазових вимірах. Серед них найбільш відомими є:

- ✓ профілометрія методом фазових кроків (Phase Shifting Profilometry)
- ✓ профілометрія методом Фур'є-перетворень (Fourier Transform Profilometry).

У цих методах використовується спеціальний вид освітлення об'єктів, так зване структуроване світло. На досліджувану дифузно-відображувальну поверхню проєктується періодична структура, часто у вигляді системи паралельних чорно-білих напівтонових чи кольорових смуг. Відображене від об'єкту світло використовується для побудови зображення. Якщо напрямки проєкціювання смуг та реєстрації зображення об'єкта не співпадають, то через паралакси висхідна регулярна система смуг спотворюється і зображення об'єкта нагадує інтерферограму, отриману в пасках максимальної ширини, так званий муаровий ефект.

1.2.3. Мікроскопічний метод.

Одним із основних завдань мікроскопічного методу є визначення структурних та морфологічних характеристик зразків із залученням комп'ютерно-інформаційних технологій. Якісний аналіз проводиться з метою визначення таких структурних параметрів, як-от: периметр,

площа, мінімальний та максимальний діаметри, фактор форми, коефіцієнт форми та ін.

Дослідження проводили за допомогою оптико-програмного комплексу *Micro-optik* (рис. 1.7).

Комплекс *Micro-optik* у своєму складі має мікроскоп *eScope*, за допомогою якого можна безпосередньо вводити структурні характеристики зразків через програмне забезпечення «*SMART-EYE*[®]» у персональний комп'ютер. З метою калібрування мікроскопа на конкретному рівні збільшення зображення використовується калібрувальна лінійка, що дає змогу в автоматичному режимі з великою точністю визначати наступні параметри: периметр частки або пори, площу частки або пори, фактор форми часток, їх ширину та висоту.

Для визначення розмірів і форм часток мікроскопічним методом необхідно приготувати оптико-програмний комплекс *Micro-optik* у такий спосіб. Невелику кількість досліджуваного порошку ретельно перемішати шпателем на склі, після чого зробити з нього борозну 7–8 см, яку необхідно поділити у поперечному напрямку на 7–8 рівних частин. Кожну четверту частину потрібно видаляти за допомогою скляної палички. Кінчиком пера необхідно брати мінімальну кількість порошку і переносити його на предметне скло. На скло нанести краплю гліцерину та обережно розділити зерна (рівномірно) на поверхні скла, після чого накрити покривним склом. Надлишок рідини видаляли за допомогою фільтрувального паперу. Розподіл частинок повинен бути рівномірним по всьому полі зору.

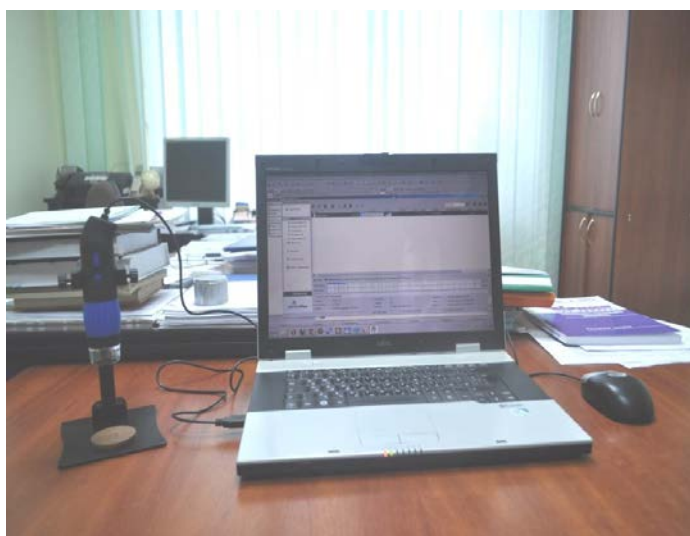


Рис. 1.7. Оптико-програмний комплекс *Micro-optik* для визначення морфології та структури матеріалів

1.2.4. Інтерферометричні методи.

Вимірювання рельєфу поверхні оптичними безконтактними методами в автоматичному режимі з високою точністю є важливим завданням при контролі продукції промислового виробництва. Сучасна інтерференційна профілометрія широко застосовується в метрології, промисловості і наукових дослідженнях.

Інтерференційні методи дають можливість вимірювати рельєф «технічних» поверхонь з роздільною здатністю менше 0,2 мкм, похибкою менше 0,1 мкм і високою продуктивністю (більше 100 точок вимірювання в секунду).

Широке застосування нанотехнологій і наноматеріалів у світовому та вітчизняному промисловому виробництві, постійно зростаючі вимоги до контролю якості промислових виробів машинобудування, електроніки і точної механіки роблять оптичну низько когерентну інтерферометрію одним із найбільш перспективних напрямків сучасного приладобудування.

У зв'язку із розвитком оптико-електронної бази, комп'ютерів та програмного забезпечення апаратура і методи низько когерентної інтерферометрії постійно вдосконалюються. На даний час багато зарубіжних фірм (Zeiss, Zygo, Veeco) пропонують широкий спектр мікроскопів-профілометрів на основі низько когерентної інтерферометрії. Але вони призначені, здебільшого, для роботи в лабораторних умовах. Висока вартість інтерферометричних профілометрів обмежує їх доступність для наукових досліджень і практичного застосування (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Безконтактний інтерференційний тривимірний профілометр «Мікрон-альфа»

Наступним інтерферометричним методом вимірювання поверхні, який також застосовується в мікрообластях, є інтерферометрія спеклів. Спекли виникають через явища інтерференції на оптично шорстких поверхнях, які рефлектують світло дифузно. При шорсткій поверхні, яка освітлюється лазерним променем, цей ефект виражається в тому, що розподіл інтенсивності усередині відблиску є негомогенним.

Системи для визначення топографії поверхні за допомогою структурованого світла найчастіше використовуються для визначення відстаней безпосередньо до поверхні об'єкта зі складним профілем і відзначаються простотою реалізації, потенційно високою точністю (похибки порядку декількох мікрометрів) та швидкодією (до 1000 і більше вимірювань в секунду). Суть проєкційного методу полягає в освітленні поверхні досліджуваного зразка вузьким зондуючим пучком; у формуванні в розсіяному світлі зображення точки оптичною системою, розміщеною під кутом до пучка зондування в реєстрації цього зображення та в розрахунку поверхні.

Конфокальна лазерна скануюча мікроскопія (CLSM або LSM) – це один із методів світлової мікроскопії, який забезпечує опис детермінованих і недетермінованих структур поверхні. Із врахуванням високої швидкодії і великих об'ємів даних найбільш життєздатне рішення забезпечують оптичні вимірювальні системи. Однак, при їх використанні приходиться стикатись з такими явищами, як круті скоси, перемінні відображення, які за обробки та вимірювання поверхонь можуть створити хибні зображення (рис. 1.9).



Рис. 1.9. Скануючий конфокальний мікроскоп LSM 710

Латеральна роздільна здатність LSM обмежується доступною роздільною здатністю світлової мікроскопії і роздільною здатністю скануючого лазера. На відміну від інтерферометричного зображення, цей метод забезпечує надійні дані вимірювань технічних поверхонь, які можна співставити з результатами використання найбільш точних контактних приладів.

Основними перевагами конфокальної мікроскопії у порівнянні зі звичайною світловою мікроскопією є: висока контрастність зображення, отримання «оптичних зрізів» та на їх основі 3D-реконструкція, мультиспектральні дослідження із високим ступенем розподілу сигналів, можливість застосовувати методи цифрової обробки зображень. Недоліками LSM –вимірювань слід вважати складність налаштування та висока вартість обладнання та його експлуатації.

1.2.5. Метод РЕМ.

Растровий електронний мікроскоп застосовують для роботи зі збільшенням від 50 до 100 тис. крат, при цьому глибина різкості в 300–500 раз більша, як у світлових мікроскопів (рис. 1.10). Зразок може бути нахилений до 45 градусів відносно горизонтальної площини із утриманням фокуса по всій поверхні. Завдяки великій глибині фокуса РЕМ створює «об'ємність» зображення і суттєво полегшує кількісну 3D-інтерпретацію мікротопографії зламів. На таких мікроскопах проводиться пряме дослідження поверхні зламу без приготування спеціальних реплік чи тонких фольг, як це потрібно в просвічуючій електронній мікроскопії. За допомогою РЕМ можна отримати 3D-картину зламу, здійснювати сучасні фрактографічні дослідження не тільки для аналізу причин руйнування матеріалів, але і для контролю якості виробів, а також як засіб для вивчення експлуатаційних властивостей металів та управління ними.

Метод растрової електронної мікроскопії дає можливість вивчати мікротопографію (фрактографію) поверхонь зразків руйнування (зламів) після випробувань і, здійснивши класифікацію видів руйнування, за типом зламу можна стверджувати про енергоємності процесів руйнування.



Рис. 1.10. Растровий електронний мікроскоп JSM-7401

РЕМ дає можливість вивчати поверхню металоконструкцій з метою виявлення мікротріщин, здійснювати кількісну оцінку шорсткості металу, вивчати кінетику росту тріщини в зразку та встановлювати місця зародження магістральних тріщин, напрям та швидкість їх поширення, вивчати вплив фазових включень на механізми руйнування, досліджувати зв'язок мікротопографії зламів з вихідною структурою, вивчати морфологію фазових складових та їх об'ємну конфігурацію на поверхні протравлених мікрошліфів та зламів.

У машинобудуванні, при експлуатації деталей та виробів, у випадку аварійної ситуації найбільш часто в зламах виявляють втомлений механізм руйнування. Фрактографічний аналіз зламів випробовуваних втомлених зразків дає можливість стверджувати, що зі збільшенням довжини магістральної тріщини та зменшенням поперечного перерізу зразка на його поверхні завжди формуються три характерні зони руйнування: зона зародження втомленої тріщини, зона її стабільного поширення (з наявними полями втомних боріздов) і область остаточного руйнування, яка відповідає швидкому квазікристалічному руйнуванню зразка.

Методи опрацювання РЕМ-стереозображень базуються на їх фотограмметричній обробці. При цьому найважливішим завданням є визначення проєкції чи апіорний математичний опис процесу утворення зображення. В РЕМ зображення формується електронно-оптичним шляхом і його відмінність полягає в тому, що тут не існує променів, що йдуть від об'єкта до його зображення, як це має місце в ПЕМ або світлових мікроскопах.

1.2.6. Електронографія.

Електронографія, спираючись на досягнення американських учених Девіссона і Джермера (Davisson and Germer) та англійця Томсона (G.P. Thomson), швидко розвивалася не тільки в напрямі фізичних досліджень, але й як практичний метод, який доповнював рентгенівський. Особливого значення він набув у дослідженні надтонких плівок і поверхневих шарів, завдяки чому посідає важливе місце в багатьох академічних, наукових і промислових лабораторіях.

За Де-Бройлем (основна гіпотеза даного методу), електрони, що рухаються, мають хвильові властивості, тобто здатні дифрагувати й інтерферувати. На цьому ґрунтується застосування електронних променів для мікроскопічного дослідження в електронному мікроскопі та для *електронографії* – дифракційного вивчення структури речовини в приладі для дифракції електронів – *електронографі*.

Основними задачами електронографічного аналізу переважно є такі ж, як і для рентгеноструктурного: визначення кристалічної структури, фазовий аналіз і знаходження орієнтацій та текстури в зразках.

Внаслідок сильного поглинання електронів речовиною навіть при найбільшій енергії 100 кеВ, яка використовується у звичайній електронографії, вони не проникають у речовину більш як на декілька тисяч ангстрем. Тому об'єктами дослідження є шари, які за товщиною не перевищують 10–5 см. Вони або утворюються природним шляхом (наприклад, як окисні на поверхні твердих тіл), або виготовляються штучно. Шари різноманітних речовин товщиною $\leq 10^{-5}$ см, утворених різними способами, називаються тонкими плівками і є типовими об'єктами електронографії. Досліджують також високодисперсні порошки, особливо останнім часом, у зв'язку з бурхливим розвитком нанотехнологій.

У зв'язку з цим, розроблено два основні методи електронографування: “на проходження (просвічування)” та “на відбивання”. У першому випадку, як зазначалося, електрони проходять через тонкий об'єкт. У другому – дифракційну картину формує пучок електронів, який ковзає уздовж поверхні масивного зразка. При цьому найбільш імовірною є дифракція електронів від надтонких виступів на поверхні зразка. Тобто дифракція “на відбивання” насправді є дифракцією “на проходження” від надтонких утворень уздовж траєкторії пучка електронів на поверхні (рис. 1.11). Це дозволяє одержати дані про структуру поверхні реального твердого тіла.

Найчастіше для таких досліджень використовують плоско шліфовану поверхню або природні грані кристалів.

Шліфовка повинна бути дуже тонкою, бо при грубій дифракційні картини незадовільні. У випадку дослідження полікристалічних шліфів оптимальна ширина зразка, тобто довжина траєкторії пучка вздовж поверхні, повинна бути 8–10 мм. За меншої ширини дифракційні картини не дуже різкі, а при більшій – утворюється велика тінь від самого зразка, губляться внутрішні відбивання та слід первинного пучка.

Для дослідження граней монокристалів ширина зразка може бути значно меншою, наприклад, 3–4 мм.

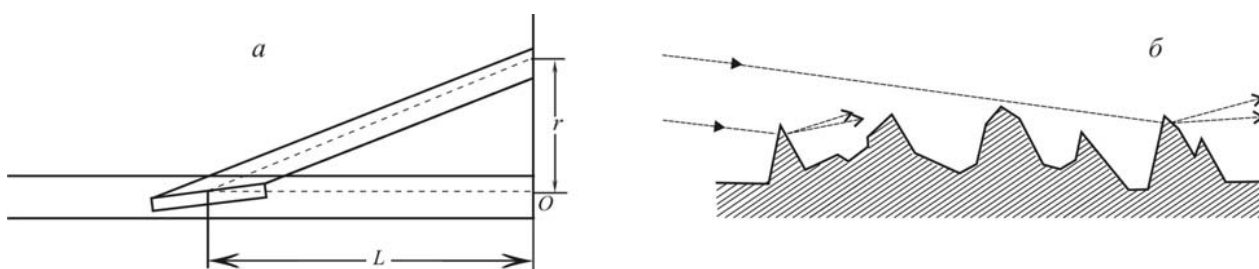


Рис. 1.11. Метод відбивання від плоского шліфа. *a* – хід електронних променів: *O* – положення первинного пучка на фотопластинці; *r* – радіус дифракційного кільця; *L* – віддаль зразок-фотопластинка.
б – дифракція електронів від виступів поверхні

Приготування об'єктів для дифракції “на відбивання”. Для цього дослідження зразки зручно готувати як металографічні шліфи. Після травлення шліфа та його промивання для видалення залишків травника та випадкових забруднень, на половину шліфа наносять плівку-стандарт для визначення сталої приладу. Для цього найпростіше “за-

фарбувати” половину шліфа олівцем із грифелем м’якістю не менше 2М, тобто у такий спосіб нанести графітове покриття на частину поверхні. Можна також нанести на половину шліфа плівку-стандарт методом вакуумного випаровування і конденсації.

Для попередження забруднення поверхні усі операції слід виконувати швидко, щоби звести перебування щойно приготованого шліфа на повітрі до мінімуму. Надалі шліф закріплюють у тримачі зразків, вводять у електроннограф і відкачують камеру об’єктів на вакуум.

1.3. Сучасні проблеми та актуальні завдання інформаційного комп’ютерного матеріалознавства

Дослідження матеріалів у різних галузях промисловості є актуальною світовою тенденцією і реалізується використанням методів обчислювального матеріалознавства зі застосуванням комп’ютерного металографічного аналізу.

З однієї сторони необхідно створити методи інформаційного матеріалознавства для вибору матеріалів на етапі концептуального проектування виробів та формування баз даних матеріалів, а також створення ефективних алгоритмів обробки моделей поведінки матеріалів та перевірки достовірності щодо розрахунку матеріалів на навантаження. З іншої сторони необхідно вдосконалювати методи обчислювального матеріалознавства для комп’ютерного моделювання структури та властивостей матеріалів, орієнтуючись на отримання нових, більш досконалих матеріалів. Побудова такої методології спільної роботи цих різних та протилежних напрямків вимагає прикладних теоретичних та експериментальних досліджень на перетині обчислювального та інформаційного матеріалознавства з виходом на комп’ютерне матеріалознавство з метою оптимізації конструкцій та матеріалів в цілому.

Проблеми консолідації ускладнюються нелінійним характером і невизначеністю взаємозв’язку «структура матеріалу» «службове призначення». Заважають успішній консолідації наступні джерела помилок комп’ютерного моделювання в додатках до задач матеріалознавства:

1. З врахуванням того, що реконструкція обчислювальних 3D-моделей мікроструктури за експериментальними 2D-зображеннями

для комп'ютерної оцінки властивостей вимагає великих витрат часу і машинних ресурсів, сумарний обсяг роботи з формування взаємозв'язків «структура матеріалу» «службове призначення» часто є нездійсненним.

2. Неповна інформація про параметри обчислювальної моделі через невідповідність і неадекватність даних, включаючи опис граничних умов. Так, довгостроковий характер взаємодії дефектів і регулярної структури матеріалів при експлуатації вимагає комплексного бачення та загального уявлення.

3. Неоднозначна математична модель існуючих явищ після спрощень і апроксимацій. Наприклад, з'являється невизначеність при передачі даних параметрів структури з накопиченими похибками у багаторівневих структурних моделях.

4. Похибки, що обумовлені генерацією розрахункової сітки і вибором чисельних методів вирішення. Як правило, проблеми виникають через велику кількість обчислювальних рівнянь при комп'ютерній обробці нелінійних, багатокритеріальних моделей поведінки матеріалів.

5. Інструментальні похибки вимірювання фізико-механічних властивостей матеріалів. Оскільки властивості матеріалів і моделі їх поведінки у вигляді дискретних або аналітичних функцій є вхідною інформацією на симуляцію конструкцій і технологій, то очевидно, що потрібна оцінка впливу похибки цих вхідних даних на похибку розрахункової оцінки дефектності, напружено деформованого стану і руйнування виробу.

Для комп'ютерного моделювання матеріалів в обчислювальному матеріалознавстві використовуються методи молекулярної динаміки, кінцево-елементне та ієрархічне моделювання. *Молекулярна динаміка* розглядає процеси в нанометричному масштабі і моделює взаємодію атомів. *Кінцево-елементне моделювання* працює на макромасштабному рівні і прогнозує поведінку матеріалу з позицій суцільних середовищ. Між цими масштабними рівнями знаходяться ієрархічні методи, які покликані зв'язати різні за теоретичними основам нано- та макромасштабні моделі поведінки матеріалів. Названі методи поки знаходяться на початку свого розвитку. Важливе завдання інтеграції методів обчислювального матеріалознавства в комп'ютерне полягає в тому, щоб зв'язати макроскопічну поведінку матеріалів і конструкцій зі зміною внутрішньої структури.

Принципово важливою складовою частиною комп'ютерного матеріалознавства стають бази даних, у тому числі відомості про різні властивості матеріалів, які необхідні для розробки технологічних процесів, деталей. Організація достовірних баз даних матеріалів залишається невирішеною проблемою комп'ютерного матеріалознавства деталей, конструкцій та технологій.

Ієрархічні рівні в комп'ютерному матеріалознавстві представлені нами на рис. 1.12. Використовуючи кінцево-елементні методи аналізу досліджуємо вузол, окремі частини вузла та деталі. Застосовувані методи конструювання та комп'ютерного аналізу виробів є багаторівневими, але ігноруються проблеми конструювання матеріалів із врахуванням матеріалознавчих питань структури матеріалів для конкретних деталей.

У свою чергу, критичним аспектом обчислювального матеріалознавства, що перешкоджає успішній інтеграції з матеріалознавчими прикладними програмами, є прагнення швидше до кількісного опису структури матеріалу на різних ієрархічних рівнях, аніж до детального аналізу властивостей і моделей поведінки структури в форматі вхідних даних для комп'ютерного аналізу. Останній клас задач необхідно вирішувати із залученням методології інформаційного матеріалознавства в рамках пропонованої концепції консолідованого аналізу, яка полягає в новому узагальнюючому підході до обробки інформації про властивості і моделі поведінки матеріалів для матеріалознавчого комп'ютерного аналізу.

Формування та структурування інформації про матеріали для паралельного комп'ютерного моделювання технологій та навантажених конструкцій є актуальною проблемою, яку можуть і успішно вирішують успішно матеріалознавці. Необхідно створювати і добудовувати до прикладних програм електронні бази даних, що містять повну інформацію про структуру, технологічні та експлуатаційні властивості матеріалу. Проблема безпосереднього застосування результатів і методів обчислювальних матеріалів у комп'ютерному матеріалознавстві полягає в тому, що зв'язок між структурою матеріалу, що моделюється, та комплексом необхідних механічних та функціональних властивостей неоднозначний і для більшості матеріалів не встановлюється повністю. Разом з тим існують спроби формалізувати та інтегрувати комп'ютерне моделювання, спираючись на структурні аспекти матеріалів.

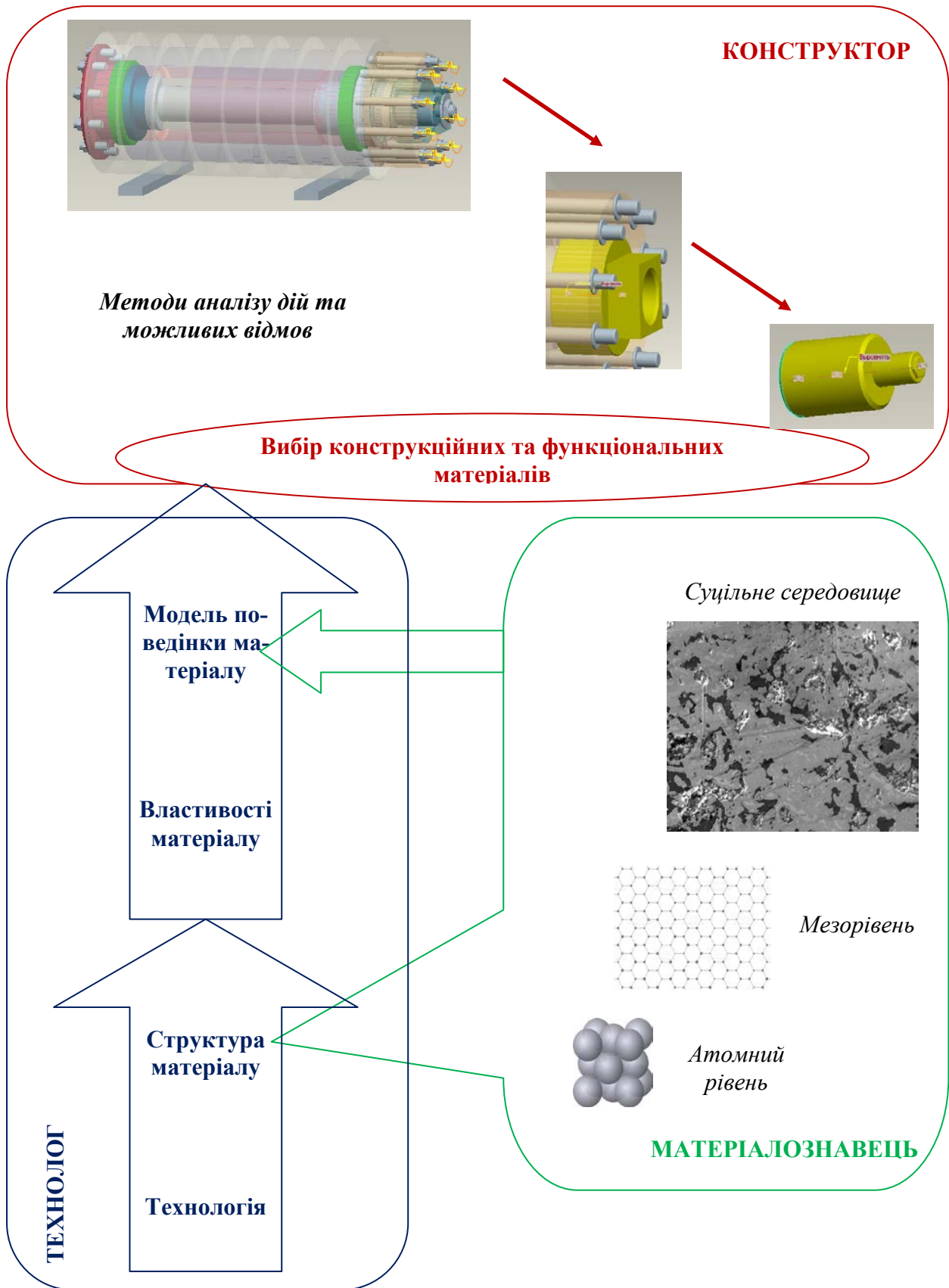


Рис. 1.12. Інформаційна структура в багаторівневому комп'ютерному матеріалознавстві при моделюванні матеріалів, технологій та виробів

Типова схема створення нових матеріалів за допомогою комп'ютерного матеріалознавства предствлена на рис. 1.13. Використання інформації про властивості матеріалів у типових прикладних програмах містить ряд протиріч та невирішеених задач з наступними структурними аспектами:

1. Перш за все, нелінійна, нерівновісна поведінка матеріалів, яка потребує додаткових зусиль при аналізі навантаження, що може непередбачувано впливати на початкові умови у комп'ютерних моделях.

2. Неоднозначність апроксимації структури матеріалу при переході до цифрового представлення мікроструктури.

3. Залежність справжніх характеристик матеріалу, таких як границя міцності, пористість, ресурс роботи від розподілу параметрів мікроструктури, що обумовлює термін використання матеріалу.

4. Метастабільність та тривала за часом зміна мікроструктури при експлуатації матеріалу.

5. Похибки в описі мікроструктури матеріалу параметрам комп'ютерної моделі.

Комп'ютерне матеріалознавство є складовою частиною науково-дослідної роботи і мало пов'язане в даний час з виробничою практикою через недостатній розвиток модельних уявлень та складності теоретичних питань.

Інтеграція результатів моделювання структури і властивостей нових виробів та створення для цього методології комп'ютерного матеріалознавства є ключовим фактором підвищення якості проєктованих деталей. При проєктуванні виникає необхідність здійснити вибір матеріалу та аналіз їх механічних та функціональних властивостей. У зв'язку з цим слід розглянути комп'ютерні методи дослідження структури та властивостей матеріалів конструкційного призначення.

Важливою сферою дослідження і науковим завданням матеріалознавств є вивчення взаємозв'язку між структурою і властивостями матеріалів. Металеві матеріали становлять переважний клас конструкційних матеріалів у машинобудуванні, основним службовим призначенням яких є здатність нести силове навантаження. Внутрішня структура значно впливає на механічні властивості металевих матеріалів. Тому дослідження, прогнозування і спрямоване формування характеристик міцності, довговічності, зносостійкості та інших експлуатаційних властивостей неодмінно пов'язане з пошуком фізичної

природи змін структури матеріалів під впливом технологічних та експлуатаційних навантажень.



Рис. 1.13. Типова схема створення нових матеріалів за допомогою комп'ютерного матеріалознавства

Традиційно наукові завдання матеріалознавства вирішуються з використанням різних експериментальних методів дослідження структури і властивостей матеріалів. Особливістю останнього часу є швидкий розвиток комп'ютерів і програмних комплексів, які стають унікальним дослідницьким інструментом для проведення комп'ютерних експериментів. Так, застосування комп'ютерних інструментів для дослідження високотемпературних, проникних, корозійних процесів найчастіше є безальтернативним засобом і може сприяти виявленню

факторів, відповідальних за утворення дефектів. Актуальність комп'ютерних експериментів обумовлена також впровадженням інтегрованих програмних середовищ у вигляді прикладних програм.

Сучасне матеріалознавство, пов'язуючи фізико-механічні властивості металевих матеріалів перш за все з їх структурою, виділяє чотири розмірних рівні: наноскопічний, мікроскопічний, мезоскопічний і макроскопічний. *Наноскопічний рівень* розглядає структурні питання для групи атомів, *мікроскопічний* – для граткових дефектів всередині кристалів, *мезоскопічний* – для групи кристалів у полікристала, *макроскопічний* – для деталі в цілому або порівнянної за розмірами полікристалічного зразка. З позицій комп'ютерного матеріалознавства виникає необхідність позначити відносний внесок перерахованих рівнів структурної ієрархії в моделі поведінки матеріалів при симуляції технологій і конструкцій в умовах навантаження.

Інтеграція ієрархічних структурних моделей у процесі вдосконалення металевих матеріалів та комп'ютерної симуляції макровиробів вимагає розвитку наступних теоретичних основ:

1. Зв'язок багатофазної структури з властивостями матеріалу, включаючи пластичність, руйнування, корозію.
2. Кількісні параметри, які забезпечують чутливість виробів під навантаженням на різні зміни структурної моделі матеріалу.
3. Моделі, що передбачають руйнування та деградацію матеріалу з врахуванням мікроструктури.
4. Кількісна оцінка впливу різноманітних включень, сумішей, дефектів.

Статистичні методи комп'ютерного матеріалознавства для кількісної оцінки мікроструктури матеріалів активно розвиваються в даний час і закордонними вченими, які прагнуть сформувані бази даних, що зв'язують мікроструктуру, властивості та технологічні процеси за допомогою кореляційних функцій і дозволяють давати кількісні прогнози поведінки матеріалу в умовах навантаження, виходячи з локального оточення на рівні мікроструктури. За оцінкою цитованих зарубіжних фахівців в області комп'ютерного матеріалознавства, консолідовані методи аналізу структури, властивостей, технологічних процесів і поведінки матеріалів під впливом навантаження знаходяться на початковій стадії розвитку. Методологічним недоліком пропонованих концепцій є, зокрема, надмірний обсяг повного набору необхідних статистичних даних, що перевищує обчислювальні можливості сучасних суперкомп'ютерів.

Побудова тривимірних моделей при мікроструктурі залишається важливим завданням систем аналізу прогресивних матеріалів. Незважаючи на успіхи в експериментальній роботі обговорюваної методології, створення тривимірних моделей високовартісне (спеціальні пакети прикладних програм) і не надто швидко просувається. Більше того, піддаються експериментальному дослідженню тестові зразки матеріалу, що обмежені за розмірами робочої зоною приладів, що в свою чергу викликає сумніви щодо адекватності отриманих результатів та їх застосування до аналізу варіативності мікроструктури матеріалу у виробі.

На часі постало питання про розвиток нових комп'ютерних методів проєктування з урахуванням мікроструктури конструкційного матеріалу. Для цього технологічні процеси, мікроструктуру металевих матеріалів і експлуатаційні властивості об'єднують у відповідні поля і прагнуть формалізувати як прямі, так і зворотні зв'язки між цими полями, щоб мінімізувати робочі ресурси комп'ютерів для обробки обчислювальних моделей. У сучасних наукових працях основний акцент зроблений на анізотропні металеві матеріали, в яких стан матеріалу визначається ортогональним тензором напружень, що відображає локальну орієнтацію вхідного матеріалу в кожному окремому елементі дискретизації мікроструктури.

Необхідністю сформулювати точний двонаправлений зв'язок між інформаційними полями «структура» «властивості» «процеси» обумовив розвиток математичних методів опису багаторівневих ефектів у рамках виділеного напрямку на перетині обчислювального та інформаційного матеріалознавства (Microstructure Knowledge Systems) – комп'ютерне матеріалознавство (Computer Material Science). У цьому напрямку увага зосереджується на локалізації даних і розглядається просторовий розподіл поверхні відгуку (напруги, деформації) мікроструктури на макронавантаження, тобто на навантаження, які прикладені до деталі або зразка на макро-. Такий підхід дозволяє корелювати різні характеристики руйнування матеріалу з особливостями мікроструктури, що утворюють концентратори напружень та ініціюють руйнування. Більш того, це автоматично приведе до створення точних моделей для комп'ютерної симуляції процесів.

Саме тому оптимізація технологічних процесів на макрорівні ведеться в кінцево-елементних програмах, а вдосконалення структури і процесів на мікрорівні здійснюється переважно експериментальними методами.

1.4. Висновки та перспективи розвитку фрактографії, топології та аналізу зображень

Висока роздільна здатність та особливо велика глибина фокуса, простота підготовки об'єктів досліджень, широкі можливості елементного аналізу при використанні різних систем реєстрації рентгенівського випромінювання дозволяють успішно використовувати метод мікро-, та макрофрактографічного аналізу в матеріалознавчих дослідженнях для вивчення структури та елементного складу поверхонь зношування, тертя, руйнування, корозії, хімічної взаємодії, включень і т.д.

Оптичні методи аналізу зображень дозволяють одержувати тривимірну оцінку довільних поверхонь і, отже, значно розширює можливості фрактографічних досліджень.

Проте для комплексного вивчення поверхні матеріалів за електронним зображенням необхідно розробляти різноманітні методики розрахунку комплексних характеристик, які б визначали найбільш загальні властивості поверхні, що характеризують її стан і стан мікропараметрів, що можливо при наявності відповідних алгоритмів і програмного забезпечення, а також при проведенні сертифікації поверхонь у мікро- та нанометровому діапазоні відповідно до норм і вимог міжнародних стандартів.

Методами оптичної електронної мікроскопії успішно вирішуються задачі фізичного матеріалознавства, для яких кількісний аналіз зображень тонкої структури чи рельєфу поверхні із застосуванням вимірів є найбільш доцільним, а в ряді випадків і домінуючим. Електронно-мікроскопічні дослідження уможливають аналіз об'ємної картини рельєфу поверхні матеріалів різноманітного призначення.

Сучасні методи фрактографії, топології та аналізу зображень характеризуються високою точністю, достовірністю та доступністю для широкого кола спеціалістів в одержанні кількісної інформації при металографічному дослідженні.

Цифрова обробка зображень дозволяє суттєво збільшити можливості проведення мікроскопічних досліджень. Поєднання методів фототриграмметрії та топології є перспективним у сьогоденні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ I

1. Белов С. В., Витязь П. А., Шелег В. К. и др. Пористые проницаемые материалы. Справочник. – М. : Металлургия, 1987. – 332 с.
2. Белов С. В. Пористые металлы в машиностроении. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1981. – 247 с.
3. Витязь П. А., Капцевич В. М., Шелег В. К. Пористые порошковые материалы и изделия из них. – Минск : Вышэйшая школа, 1987. – 161 с.
4. Силаев А. Ф., Данилова О. П., Громова О. П. Материалы с капиллярными структурами для фильтрации жидкостей и газов // Порошковая металлургия. – 1978. – № 9. – С. 45–49.
5. Красовицкая Н. Ю. Фильтр из прокатного пористого металла // Порошковая металлургия. – 1979. – № 9. – С. 59–60.
6. Мороз А. Л. О некоторых свойствах проницаемых материалов из металлического порошка // Порошковая металлургия. – 1978. – № 4. – С. 25–29.
7. Григорьев А. К., Грохопольский Б. П. Порошковая металлургия композиционных материалов. – М. : Ленинздат, 1982. – 97 с.
8. Мазюк В. В., Пилиневич Л. П., Рак А. Л., Савич В. В., Тумилович М. В. Пористые порошковые материалы с анизотропной поровой структурой для фильтрации жидкостей и газов / Под ред. Витязя П. А. – Минск : Тонпик, 2005. – 251с.
9. Шибряев Б. Ф. Пористые проницаемые порошковые материалы. – М. : Металлургия, 1982. – 168 с.
10. Андриевский Р. А. Пористые материалы в машиностроении. – М. : Машиностроение, 1976. – 184 с.
11. Шелег В. К., Капцевич В. М., Кусин Р. А. Спеченные проницаемые материалы и их применение в технике // Совершенствование производства изделий порошковой металлургии в республике. – Минск : БелНИИНТИ, 1981. – 48 с.
12. Соколов В.Н. Новый метод трехмерной реконструкции нано- и микрорельефа по сериям разнофокусных РЭМ-стереоизображений / Разгулина О. В., Юрковец Д. И., Чернов М. С. // Материалы XXIII рос. конф. по РЭМ. Тезисы докладов. – Черноголовка, 2010. – С.78.

13. STAMPFL, J., S. SCHERER, M. GRUBER, O. KOLEDNIK: Determination of the fracture toughness with automatic image processing. *Int. J. Frac.*, 78:35–44, 1996 – P.139.
14. Vishnyakov G. N. The IASTED International Conference on signal and image processing. / Levin G. G., Loshchilov K. E., Sukhrukov K. A. // *Fouriersynthsis profilometry*, 2005. – С.103-105.
15. Дюков В. Г., Кудеяров Ю. А. Растровая оптическая микроскопия. – М. : Наука, 1992. – 207 с.
16. Степаненко В. А. Растровая и трансмиссионная стереоскопическая фрактография усталостных изломов // *Проблемы прочности*, 1979. – № 12. – С. 89–91.
17. Кожан В. П, Корній В. В, Русин Б. П. Реконструкція форми поверхні матеріалів за їх зображеннями // *Вісник Нац. Університету „Львівська політехніка”, „Автоматика, вимірювання та керування”*. – 2005. – № 530. – С.116–120.
18. Zheltov S. Yu., Knyaz V. A., Stepanyants D. G. Automated photogrammetric system for photorealistic skull 3’D reconstruction: Videometrics and Optical Methods for 3’D Shape Measurements. // *Proceeding of SPIE*. – 2001. – Vol. 4309. – Pp. 336–345.
19. Степаненко В. А. Метод та практичне застосування стереоскопічної фрактографії / В. А. Степаненко // *Металознавство та обробка металів*. – 1995. – №1. – С. 51–54.
20. Serra J. *Image Analysis and Mathematical Morphology*. – London : Academic Press., 1992. – P. 329.
21. Дорожинський О. Л., Тукай Р. *Фотограмметрія*. – Львів. Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2008. – 330 с.
22. Рудзит Я. А. Шероховатость поверхностей / Кризберг Ю. А. // *Микрогеометрия и эксплуатационные свойства машин*. – Зинате, 1983. – С. 55.
23. Simov S., Simova S. Electron microscope study of surface topography by geometrical determination of metric characteristics of surface elements // *J. of Microscopy*, 1985. – V. 137. – Pt.1. – P. 47–55.
24. Дуда Р., Харт П. *Распознавание образов и анализ сцен*. – М. : Мир, 1976. – 511 с.
25. Robinson G. M., Perry D. M. and Peterson R. W. Optical interferometry of surfaces. – *Sci. Am.*, 265, July 1991. – P. 67–71.
26. Whitehouse D. *Handbook of Surface Metrology*. – Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1994. – 988 p.

27. Zolochevkaja O. V., Gnalovskij S. O. A holographic interferometer on the basis of multimode light guiding bundles // *Proceedings SPIE*, – 1995. – P. 694–697.
28. Maune M. Photogrammetric Self-Calibration of Scanning Electron Microscopes // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. – 1976. – V. 42, №9. – P. 1161–1172.
29. Ковалев А. А., Сухоруков К. А. Восстановление формы волнового фронта при больших измерениях фазы // *Измерительная техника*. – 2004. – №4 – С. 17–19.
30. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Степанов А. А. Новые методы обработки изображений. – НЗНТ, Серия : Авиационные системы / ГосНИИАС. – 1992. – № 4. – С. 21.
31. Мельник В. Н. Некоторые вопросы стереофрактографической обработки РЭМ-снимков / Соколов В. Н. // *Изв. РАН, сер. физич.*, 1992. – С. 122–126.
32. Голубев В. Исследование телевизионных методов обработки изображений в растровой электронной микроскопии: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1980. – 20 с.
33. Путятин Е. П. Обработка изображений в робототехнике / Путятин Е. П., Аверин С. И. – М. : Машиностроение, 1990. – 320 с.
34. Линдли Крейг Практическая обработка изображений на языке Си. – М. : Мир, 1996. – 416 с.
35. M. Andersson, B. Holmquist, J. Lindquist, O. Nilsson, K. G. Wahlund Analysis of film coating thickness and surface area of pharmaceutical pellets using fluorescence microscopy and image analysis, *J. Pharm. Biomed.* 22 (2000). – P. 325–339.
36. Стась О. М. Комп'ютерні методи дослідження в металографічному аналізі / Стась О. М., Гаврилюк В. П. // *Методи дослідження та контролю якості металів*. – 2000. – № 1–2. – С. 48–52.
37. Повстяной О. Ю. Анализ современных методов визначення структури та топології поверхонь матеріалів. / О. Ю. Повстяной, В. Д. Рудь, Ю. А. Мельник, Н. Ю. Імбирович // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – №2. – Київ, «Институт Электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины», 2014. – С. 37–42.
38. Повстяной О.Ю. Застосування комп'ютерного моделювання для візуалізації трьохмірних даних при дослідженні властивостей пористих проникливих матеріалів / Повстяной О. Ю., Куц Ю. В.,

- Імбірович Н. Ю. // Наукові нотатки. – Випуск 50. – Луцьк : РВВ ЛНТУ, 2015. – С. 159–165.
39. Антонов В. Н., Львович Н. Я., Чопоров О. Н. и др. Высокоэффективные технологии как неотъемлемая часть развития современного общества / Повстяной А. Ю., Куц Ю. В. и др. // авт. кол. монография. – Одесса : КУПРИЕНКО С. В., 2015. – 220 с.: ил. табл.
 40. Технології, структура, властивості пористих проникних матеріалів: Монографія / Рудь В. Д., Повстяной О. Ю., Заболотний О. В., Богінський Л. С. – Луцьк : РВВ ЛНТУ. – 2016. – 200 с.
 41. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №64608. Комп'ютерна програма «Перетворення растрових зображень у векторний формат» / Р. Г. Редько, О. Ю. Повстяной, О. І. Редько, Р. М. Полінкевич. Дата реєстрації 23.03.2016 р.
 42. Ogorodnikova O. M. Possibilities of Siemens PLM software for robotics research and production management // Advanced computer and information technologies: Proceedings of Russian-Korea scientific workshop (Ekaterinburg, 16–18 May 2012). Ekaterinburg: UrFU, 2012. P. 122–128.
 43. Pollock T. M., Allison J. E., Backman D. G., Boyce M. C., Gersh M., Holm E. A., et al. Integrated computational materials engineering: A transformational discipline for improved competitiveness and national security /Washington: National Academies Press. 2008. – 152 p.
 44. Prusov E.S. Modern Methods of Metal Matrix Composite Alloys Production and New Approaches to Realization of Reinforcing Scheme // Machines, Technologies, Materials. – 2014. – Iss.1. – P. 11–13.
 45. Wang M.Y., Williams J.J., Jiang L. et al. Three Dimensional (3D) Microstructural Characterization and Quantitative Analysis of Solidified Microstructures in Magnesium-Based Alloys // Metallography, Microstructure and Analysis. 2012. Vol.1. Issue. 1. pp. 7–13.
 46. Ohser J., Schladitz K. 3D Images of Materials Structures: Processing and Analysis. – 2009. Wiley-VCH Verlag GmbH. Berlin. – 341 p.
 47. Tolnai D., Townsend P., Requena G. et al. In situ synchrotron tomographic investigation of the solidification of an AlMg4.7Si8 alloy // Acta Materialia. – 2012. – 60. 6–7. – P. 2568–2577.
 48. Wismans J. G. F., Van Dommelen J. A. W. et al. Computed Tomography-based Modeling of Structured Polymers // Journal of Cellular Plastics. – 2009. – Vol. 45. – № 2. – P. 157–179.

49. Перфильев Д. А. Описание структуры и алгоритм анализа микро-структурных металлографических изображений деформируемых алюминиевых сплавов: Дис. канд. техн. наук: 05.13.17; – Защищена 09.12.2005; Утв.09.03.2006. – Красноярск, 2007. – 124 с.: ил.- Библиогр.: с. 5–48.
50. Szala J. Zastosowanie metod komputerowej analizy obrazu do ilościowej oceny struktury materialow. – W. Politechnika Slaska, Zeszyty naukowe, 2000. – № 1518. – 167 s.
51. Чубов А.А. Автоматизация металлографического анализа и контроля сплавов с использованием методов цифровой обработки оптических изображений микроструктур: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / А. А. Чубов. – М., 2007. – 359 с.
52. Стась О. М. Комп'ютерні методи дослідження в металографічному аналізі / Стась О. М., Гаврилюк В. П. // Методи дослідження та контролю якості металів. – 2000. – № 1–2.–С. 48–52.
53. Lungarella, M., Pegors, T., Bulwinkle, D., Sporns, O.: Methods for Quantifying the Informational Structure of Sensory and Motor Data. Neuroinformatics 3, 243–262 (2005)
54. Paul, C.: Morphology and Computation. In: Proceedings of the International Conference on the Simulation of Adaptive Behaviour, Los Angeles, CA, USA, pp. 33–38 (2004).

РОЗДІЛ II

СУЧАСНІ ПРИКЛАДНІ ПРОГРАМИ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТА ОБРОБКИ МЕТАЛОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Стрімкий розвиток обчислювальної техніки і методів цифрової обробки зображень останнім часом дав можливість значно розширити автоматизацію науково-дослідних робіт у багатьох областях науки і техніки. Макроскопічна поведінка матеріалу безпосередньо залежить від особливостей його мікроструктури. Кількісний підхід при аналізі дозволяє виявити ту оптимальну структуру, яка в найбільшій мірі відповідає умовам служби матеріалу.

З іншого боку, успішне вирішення основних задач розвитку промисловості світу на сучасному етапі визначається підвищенням конкурентоспроможності продукції, яку випускають. Це висуває високі вимоги до чистоти матеріалів, рідких та газоподібних робочих середовищ технологічних процесів, надійність та довговічність роботи машин, приладів та пристроїв тощо.

Порошкова металургія кожним розробленим новим технологічним процесом демонструє переваги, які дозволяють отримувати матеріали з іншими кращими чи зовсім властивостями, або виготовляти вироби найбільш економічно вигідним способом..

Створення та розробка нових, високоефективних ФМ неможлива без вимірювання та контролю властивостей вихідних порошків і готових виробів. ФМ характеризуються рядом структурних та експлуатаційних параметрів, які, зазвичай, визначаються властивостями вихідних порошків та технологією їх виготовлення. До важливих характеристик ФМ відносять: пористість, її розподіл по об'єму ФМ, її вид (відкрита, закрита, тупикова); форма, розміри пор (середні та максимальні); коефіцієнт звивистості пор; коефіцієнт регулярності пористої структури, коефіцієнт проникливості, питома поверхня, механічна міцність, корозійна стійкість та ін.

Вивчення структурних характеристик ФМ – одна з ключових задач сучасного матеріалознавства, на основі якої базується процес створення нових та покращання властивостей уже існуючих матеріалів. Реалізація високоякісного металографічного аналізу пов'язана з відомими труднощами, що зумовлені великим фізичним навантаженням на організм дослідника (особливо органи зору), суб'єктивністю спостережень та невеликою швидкістю процесу дослідження. Засто-

сування приладів, які працюють на основі лінійної механічної розгортки оптичних об'єктів вносить свої обмеження на інтерпретацію сигналів, що одержуються, а також позбавляє можливості „інтелектуального” втручання в процес вимірів.

Так як невеликі зміни при аналізі та обробці зображень мають великий вплив на подальшу долю готового виробу, методи неруйнівного та швидкого контролю, які визначають та аналізують дані зміни, можуть бути успішно використані як інструмент контролю якості продукту.

По суті, оцінка властивостей структури ФМ має подвійну мету: з одного боку, це оцінка адекватності процесу управління структурою, з іншого боку, це забезпечення оптимальної продуктивності готового виробу.

Вивчення можливостей та оцінки сучасного програмного забезпечення для комп'ютерних засобів дослідження металографічних зображень з метою визначення якісних та кількісних характеристик ФМ продиктовано науковими та виробничими задачами, які виникли в сучасному матеріалознавстві.

Металографічні зображення можуть бути представлені комбінацією різноманітних структурних складових при різному співвідношенні: фазами, які характеризуються різноманітними розмірами; формою та кольором, а також межами зерен, що можуть бути представлені або окремими лініями на зображенні, або покривати зображення безперервною сіткою. Комбінація цих структурних складових може дати дуже непросту картину, для інтерпретації якої програма, що аналізує, повинна володіти чималою часткою правильності виконання. Тому основну вимогу до якісного аналізу зображень можна сформулювати і поставити так: на отриманій під мікроскопом фотографії необхідно виділити структурні складові, а після цього класифікувати їх за яскравістю, розміром та формою. Практична реалізація цього питання включає в себе вже класичні на сьогодні задачі як-от: сегментація, фільтрування недоліків та виділення об'єктів з фону, визначення меж об'єктів, розпізнавання образів. Для успішного проведення металографічного аналізу основним залишається питання надійності сегментації зображення. Через складність металографічних зображень немає жодної можливості заздалегідь визначити характеристики об'єктів. Тому процес сегментації повинен бути адаптивним і по можливості виділяти на зображенні всі об'єкти, які цікавлять, незалежно

від їхніх розмірів або яскравості. При цьому повинна залишатись можливість втручання оператора в процес розпізнавання для корекції об'єкта.

Тому вивчення і вдосконалення металографічних методів та комп'ютерних засобів для вимірювання, аналізу, визначення, обробки та прогнозування властивостей та структури ППМ є досить актуальною практичною задачею.

Сучасний етап розвитку програмного забезпечення характеризується разом з підвищенням функціональності і такими тенденціями, як:

- ✓ простота в експлуатації;
- ✓ збільшення продуктивності самою системою;
- ✓ зниження вимог до професійного рівня користувача.

На сьогоднішній день існує багато різноманітних прикладних програм для аналізу зображень. Науспішнішими стають продукти, які найбільш зрозумілі в експлуатації.

Зі врахуванням функціональних можливостей серед різноманіття програмного забезпечення для аналізу зображень найбільш успішними є наступні прикладні програми – „*PHOTOM*”, „*OPTIMAS*”, „*ВИДЕОТЕСТ*”, „*IMAGE EXPERT PRO*”, „*AVIZO*”, „*SMART-EYE*” та багато інших.

В арсеналі даних сучасних програм є всі необхідні для обробки технічних зображень алгоритми: високочастотного та низькочастотного фільтрування, виділення меж зображень, арифметичних та логічних операцій, корекції яскравість/контраст та ін.

На основі аналізу вищеприведених алгоритмів дані програми дозволяють обчислити середню яскравість кожного об'єкта за шкалою яскравостей, що визначена у системах. За допомогою даної схеми у всіх прикладних програмах даної специфіки запропоновано наступну послідовність алгоритмів для обробки і одержання характеристик металографічної структури:

1. Фільтрування зображення з метою видалення випадкового шуму.
2. Попередня сегментація, яка направлена на виділення однорідних областей.
3. Корекція об'єкта з метою визначення порогу яскравостей.
4. Остаточна сегментація з використанням визначеного фонового значення, що дозволяє повністю визначити об'єкти.

5. Аналіз виділених об'єктів з метою визначення їхніх параметрів.

Кінцевою задачею металографічного аналізу слід вважати статистичну обробку отриманих у процесі вимірювання характеристик об'єктів, визначення середніх значень цих величин, а також побудова графічних залежностей для візуалізації процесу аналізу.

2.1. Прикладна програма „PHOTOM”

Найбільш простою в користуванні та визначенні даних характеристик є програма „PHOTOM”, яка призначена для фотометрії. Завантаження чорно-білих зображень здійснюється у форматі .BMP та .JPG. Дана програма здійснює розрахунок оптичної густини фотографій, яка розраховується з урахуванням фону як по середньому (по виділеній області), так і по окремій фотографії (рис. 2.1).

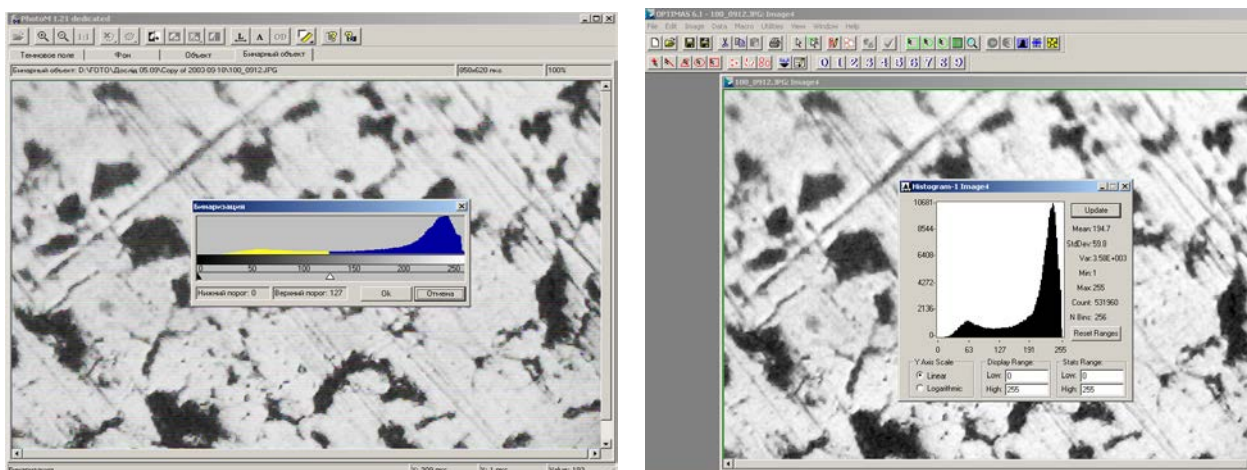


Рис. 2.1. Генерування бінарного зображення та побудова гістограм аналізу структури мікрошліфу фільтруючого матеріалу отриманого з порошку сталі ШХ15

Крім розрахунку оптичної густини, можна інвертувати, збільшувати контраст та згладжувати зображення, генерувати бінарне зображення, визначати відстані між об'єктами та здійснювати розрахунок площі необхідної області на фотографії. Також передбачений режим калібрування для перерахунку всіх координат у метричні одиниці (мікрони).

2.2. Прикладна програма „OPTIMAS”

Аналізатор зображень „*OPTIMAS*” являє собою інтеграцію сучасних методів з обробки зображень, які створені на базі потужних математичних методів перевірених на практиці. Ряд унікальних функцій і методів роботи розроблені спеціально для цієї програми: створені дві панелі керування: стандартні настройки і настройки користувача – стандартна дає кнопочвий доступ до обробки файлу, буфера обміну та друкуючих дій, настройка користувача дозволяє призначати аж до двадцяти інших макрокоманд до панелей користувача; існує автоматичний поріг для багатофазових зображень; можливість відображення гістограм, завдяки використанню більш гнучкого та функціонального інструментального засобу графічного дисплею гістограми (рис. 2.2); підтримання автоматичної сегментації зображення у конкретизованій кількості інтенсивності.

Вмонтований механізм автоматизації абсолютно прозорий для користувача і дозволяє без надмірних зусиль на програму накопичувати та аналізувати дані з багатьох точок зору, отримувати інтегральні характеристики та порозподілення.

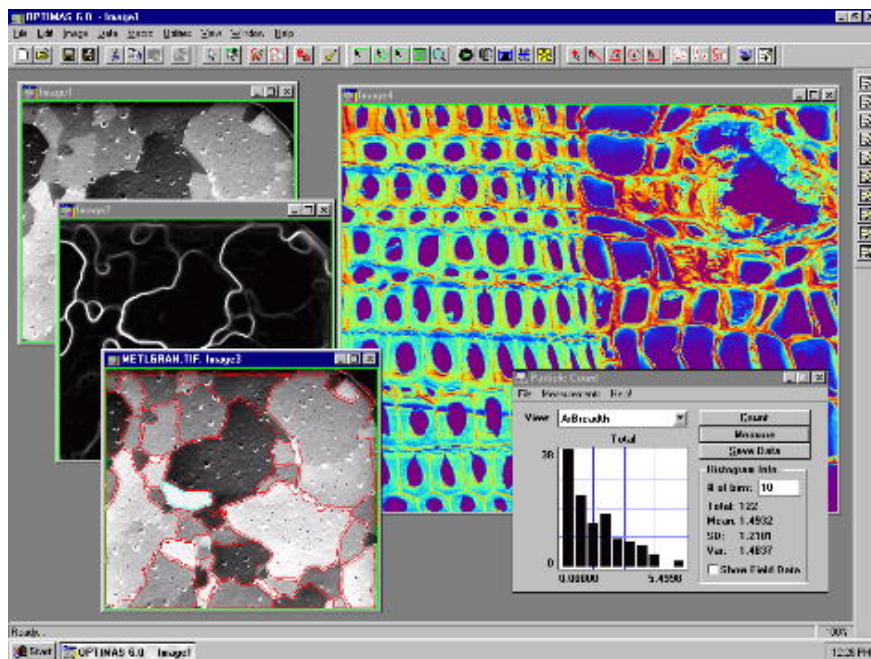


Рис. 2.2. Підтримання автоматичної сегментації зображення з відображенням зон частинок порошку фільтруючого матеріалу

2.3. Прикладна програма „IMAGE EXPERT PRO”

Результатом роботи програми „*IMAGE EXPERT PRO*” є отримання якісних та кількісних характеристик структур. Для матеріалознавця в даному випадку може бути розподілення зерен за балами, процентне відношення фаз у структурі, кількість включень та розподілення їх за розміром і формою, аналіз текстур, пористості та ін. Цей аналізатор металографічних зображень дозволяє створювати і зберігати схеми дій, які виконуються над зображеннями, а потім застосувати ці схеми до подібних зображень. Отримані дані можуть бути представлені у вигляді гістограм, а також таблиць, зображень, середніх або загальних даних за всіма об'єктами або індивідуально по кожному.

Ця програма у порівнянні з попередніми має такі нововведення: вмонтовано засоби роботи з відеокамерою, можливість калібрування оптичної системи комплексу, динамічний режим перегляду для більшості методів, автоматичне розділення перекриваючих об'єктів, комплексне відображення результатів, тонка настройка режимів виводу результатів і особлива відмінність – можливість повністю автоматичного формування якісного різкого зображення трьохмірності об'єкта (рис. 2.3).

Широкий набір функцій з обробки зображень і виділення цікавлять структурних елементів дозволяють використовувати аналізатор для вирішення широкого кола завдань матеріалознавства, серед яких можна назвати такі: аналіз неметалевих включень, аналіз графітових включень, аналіз зерен структури, визначення кількості альфафази, аналіз мікроструктури сталей, аналіз глибини безвуглецевого шару, аналіз підшипникової сталі, аналіз пористості. Оптимальне використання інструментів мінімізує застосування ручних операцій. Ще на стадії попередньої обробки можна, наприклад, усунути дефекти освітленості шліфа. Для виділених об'єктів на зображеннях розраховується кілька десятків кількісних параметрів, їх добірка і точність виведення налаштовують металознавців під конкретні види аналізу зображень. Отримані кількісні дані інтерпретуються і представляються відповідно до вимог міжнародних стандартів, є можливість самостійно налаштувати аналізатор на вимоги потрібних нормативних документів (рис. 2.4).

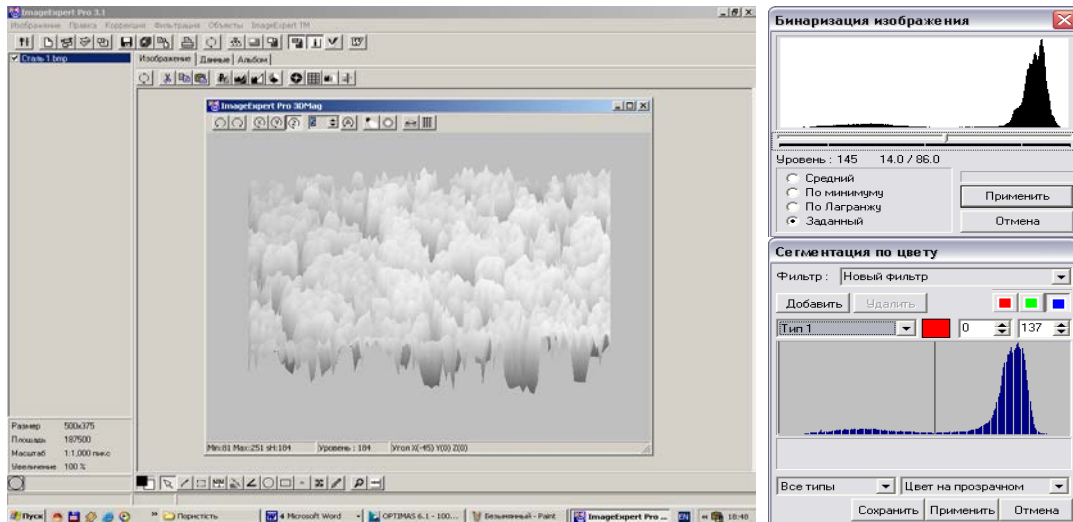


Рис. 2.3. Автоматичне формування якісного зображення трьохмірності об'єкта структури мікросліфу пористого проникливого матеріалу з представленням результатів

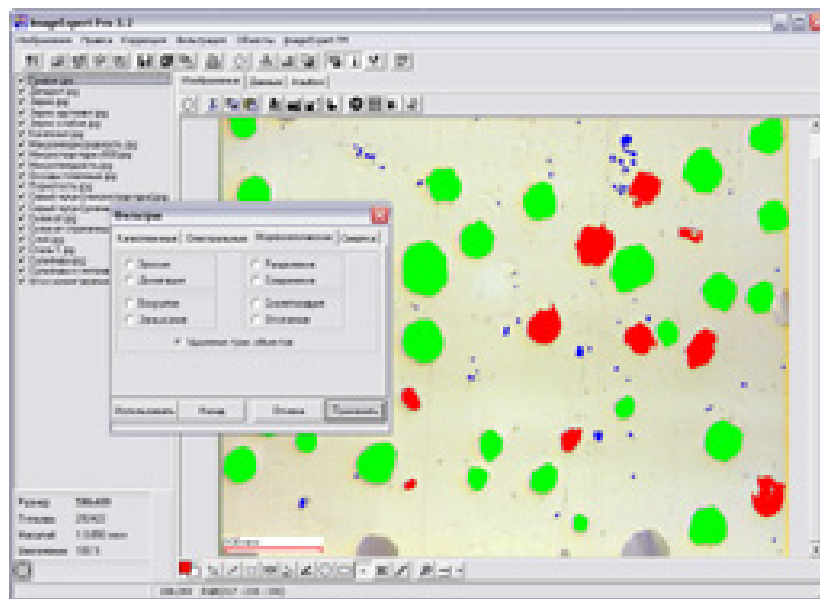


Рис. 2.4. Аналізатор для вирішення широкого кола завдань матеріалознавства у програмі „IMAGE EXPERT PRO”

2.4. Прикладна програма „ВИДЕОТЕСТ VT5”

Суттєвою відмінністю програми „**ВИДЕОТЕСТ VT5**” від вищепредставлених, у яких процес сегментації побудований за принципом адаптивної бінаризації, є розподіл об'єктів за визначенням їхньої середньої яскравості (рис. 2.5).

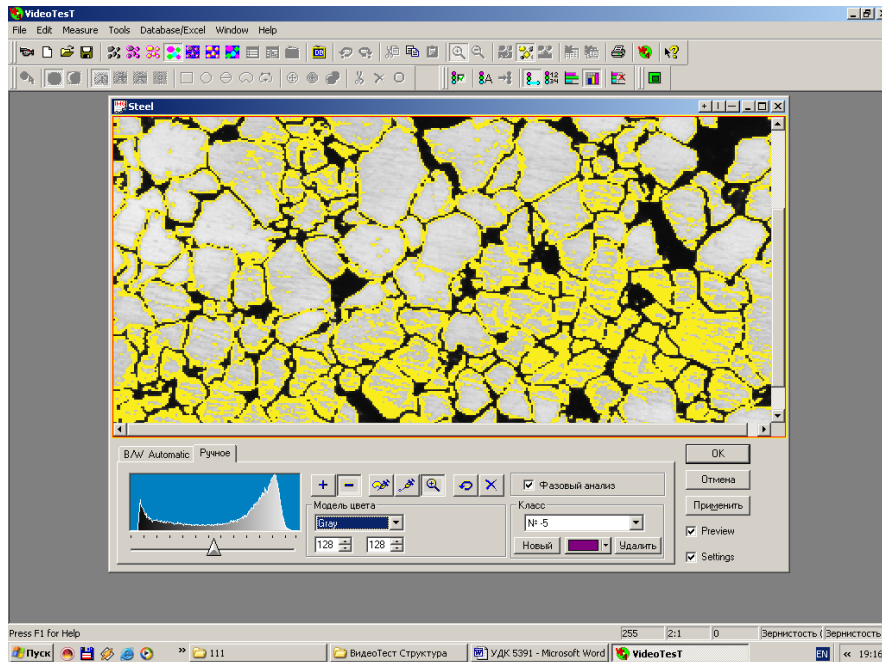


Рис. 2.5. Визначення розподілу об'єктів зображення за їхньою середньою яскравістю за допомогою програми „ВИДЕОТЕСТ VT5”

Пероговатою даної програми є можливість здійснення фазового аналізу будь-якого матеріалу, нанесення на зображення масок для визначення розміру пор та пористості сплаву. Специфічною особливістю даного програмного продукту є можливість управління процесом росту тонкоплівкового покриття зі стабільними функціональними властивостями.

Багато задач промислового контролю та проектування вимагають отримання даних про геометричні форми об'єктів у тривимірному просторі. Для вирішення цих задач широко застосовуються безконтактні методи вимірювань, серед яких найбільш успішними є оптичні методи.

2.5. Пакет прикладних програм «AVIZO»

Серед найпрогресивніших та найпродуктивніших прикладних програм для обробки та аналізу металографічних зображень з можливістю візуалізації тривимірних об'єктів за двомірними фотографіями є *Avizo*[®]. Це універсальний комерційний програмний додаток для наукової, промислової візуалізації та аналізу різноманітних точних даних (рис. 2.6).

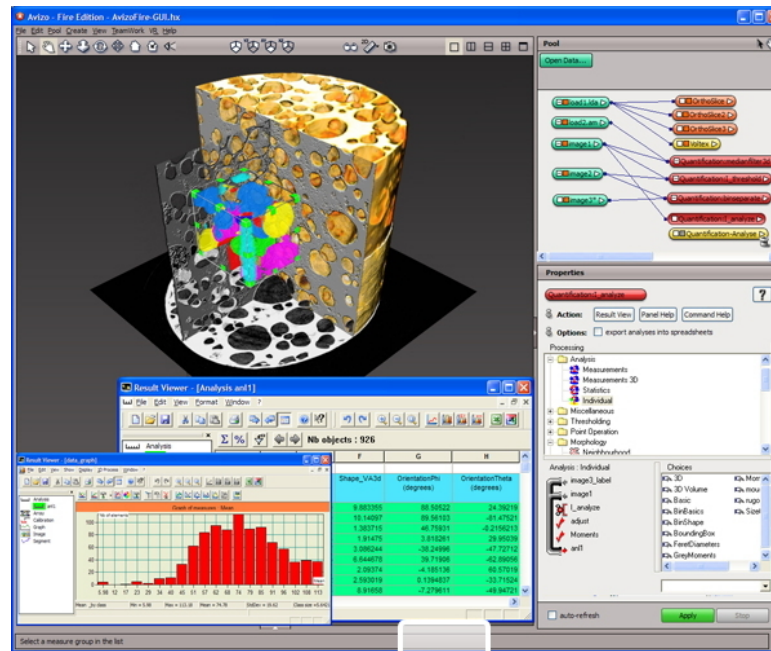


Рис. 2.6. Загальний вигляд головного вікна одного з модулів Avizo®

Avizo® розроблений FEI Visualization Sciences Group і був спочатку розроблений і створений для візуалізації та аналізу певних груп даних.

VSG Avizo® – програмне рішення для 3D візуалізації, обробки та аналізу наукових і виробничих даних з простим у використанні графічним інтерфейсом користувача, цілком підходить для візуалізації тривимірних даних матеріалознавства, геофізики, навколишнього середовища або будь-яких інших технічних даних.

Avizo® є модульним і об'єктно-орієнтованим програмним забезпеченням. Його основні компоненти – це системні модулі та об'єкти даних. Модулі використовуються для візуалізації об'єктів даних та для виконання обчислювальних операцій над ними.

Один з найбільш інтуїтивних і найбільш потужних методів для візуалізації даних 3D-зображення у даному програмному продукті є прямо-об'ємний рендерінг. Параметри випромінювання та поглинання світла віднесені до кожної точки обсягу. Моделювання пропускання світла через певний обсяг зображення дозволяє відображати дані з будь-якого напрямку погляду без побудови проміжних полігональних моделей. Avizo® здатний виконувати прямий рендерінг у режимі реального часу, навіть для дуже великого обсягу даних. Таким чином, обсяг надання інформації можете миттєво виділити відповідні області необхідних даних.

Металографічні зображення можуть бути представлені комбінацією різноманітних структурних складових при різному співвідношенні: фазами, які характеризуються різноманітними розмірами, фо-

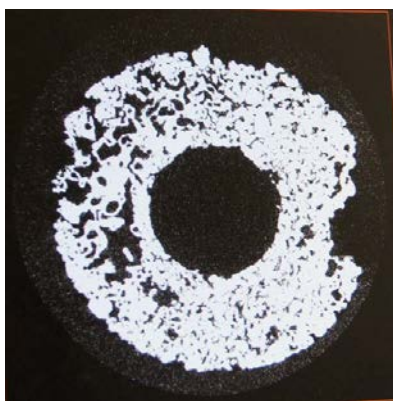
рмою та кольором, а також межами зерен, що можуть бути представлені або окремими лініями на зображенні, або покривати зображення безперервною сіткою. Тому основну вимогу до якісного аналізу зображень можна сформулювати і поставити так: на отриманій під мікроскопом фотографії необхідно виділити структурні складові, а після цього класифікувати їх за яскравістю, розміром та формою. Практична реалізація цього питання включає в себе задачі, які вже стали класичними як-от: сегментація, фільтрування дефектів та виділення об'єктів з фону, визначення меж об'єктів, розпізнавання образів.

Суть роботи «*AVIZO*» ґрунтується на системному розумінні морфології та мікроструктури дослідного зразка. Ці знання мають першочергове значення при оцінці якості готового продукту.

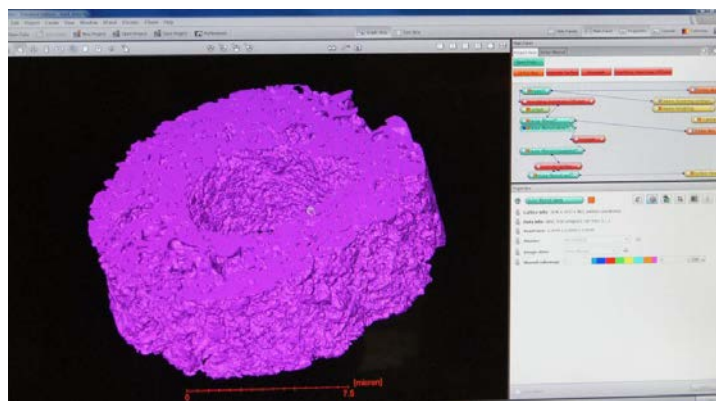
Для повної та якісної оцінки зразка необхідно визначити та дослідити основні морфологічні параметри структури, а саме:

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

Утворення 3D-зображення за допомогою програмного середовища «*AVIZO*» здійснюється шляхом накладання плоских поперечних розрізів відповідного діапазону по висоті готового пористого порошкового матеріалу (рис. 2.7).



а)



б)

Рис. 2.7. Візуалізація отриманого зображення поперечного перерізу пористого порошкового матеріалу: а) 3D-зображення з використанням AVIZO); б) рентгенограма

За допомогою програмного забезпечення *Avizo*[®] ми отримали точні розміри певної ділянки зрізу (рис. 2.8). У середовищі *Avizo*[®] можливо вимірювати лінійні, кутові та полярні розміри. Також можливо проводити розрахунок об'єму, площі, периметра об'єкта.

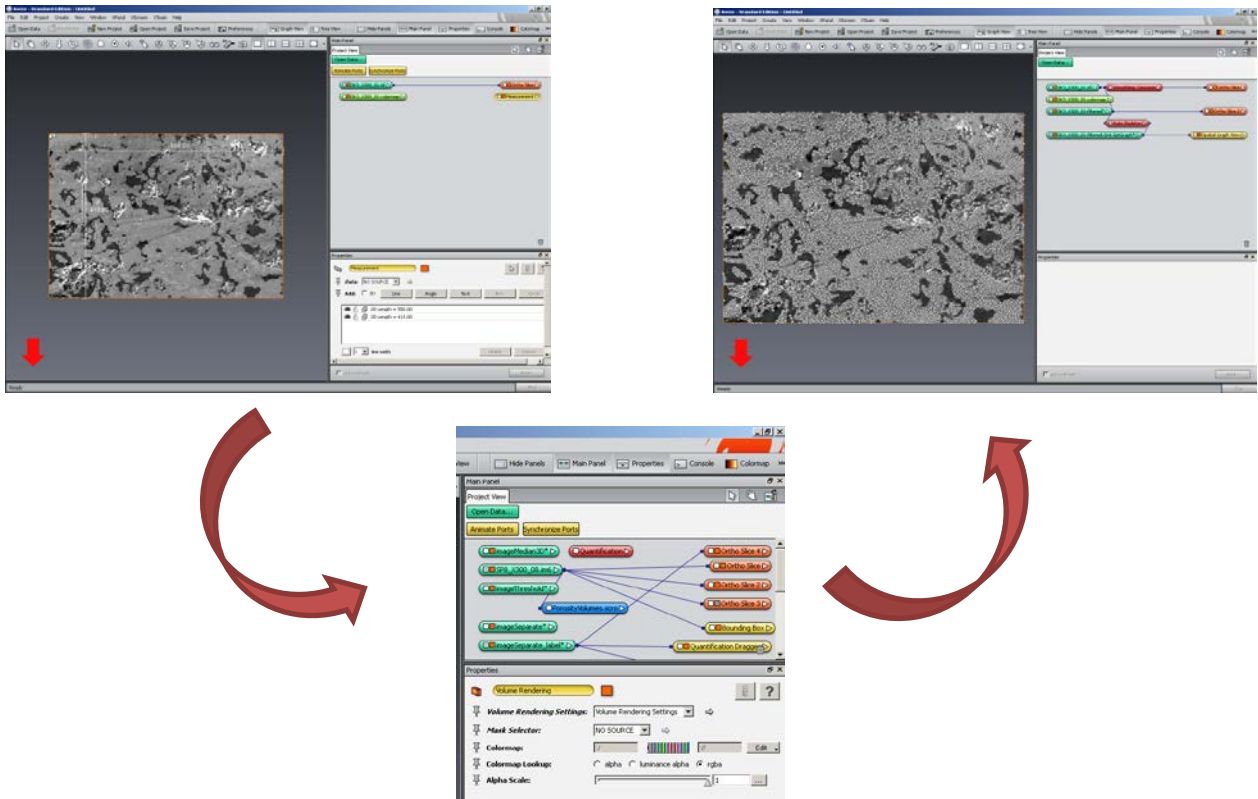


Рис. 2.8. Визначення лінійних розмірів та встановлення відповідних зв'язків між даними частини зрізу шліфу ППМ за допомогою *Avizo*[®]

Визначення зносостійкості – важлива характеристика будь-якого виробу. Зношування поверхні призводить до зниження функціональних якостей ППМ і до втрати їх споживчої цінності. Підвищенню зносостійкості виробів сприяють як застосування матеріалів з високою зносостійкістю, так і конструктивні рішення, що забезпечують компенсацію зносу, резервування зносостійкості, загальне поліпшення умов тертя (застосування високоякісних мастильних матеріалів, захисту від абразивного впливу).

За допомогою програми *Avizo*[®] можна визначити найбільш слабкі місця ППМ, які можуть призвести до руйнування конструкції. На рис. 2.9. червоним кольором позначено найбільш уразливі місця виготовленого ППМ з відходів промислового виробництва.

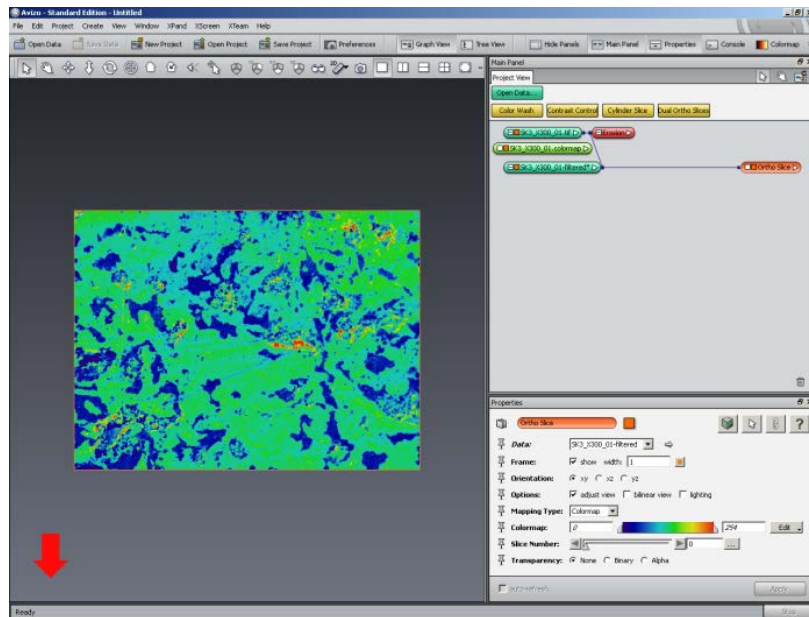
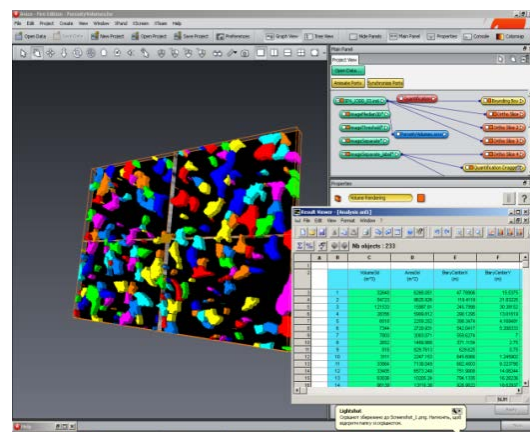
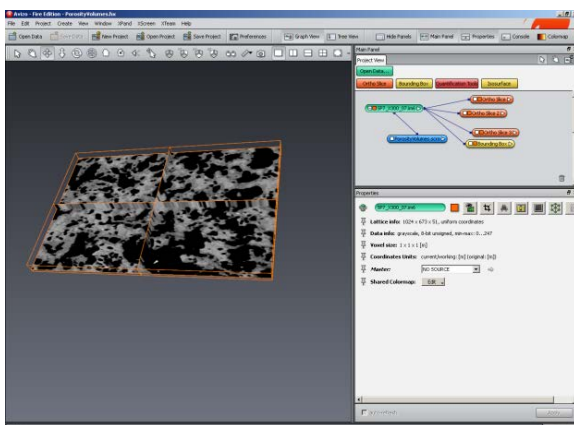
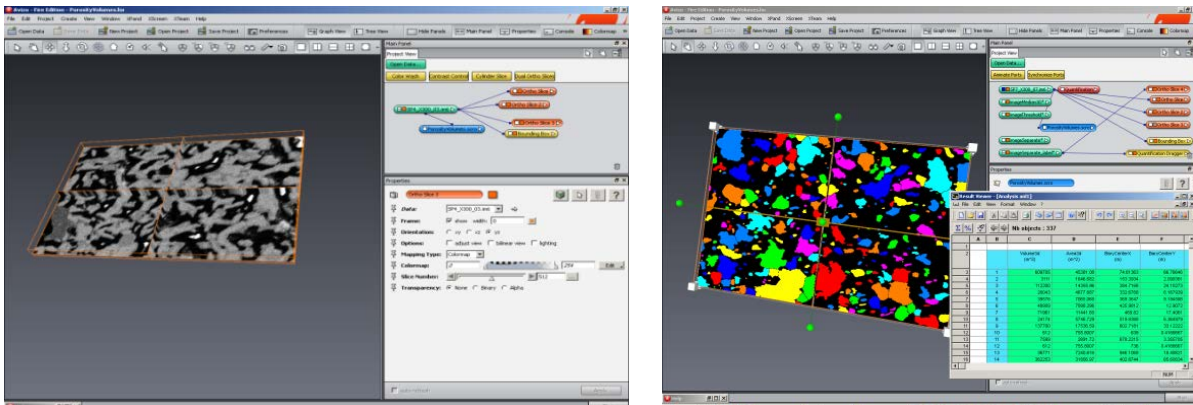


Рис. 2.9. Визначення зносостійкості та «проблемних» місць у структурі ППМ

Вивчення можливостей та оцінки сучасного програмного забезпечення для комп'ютерних засобів дослідження металографічних зображень з метою визначення якісних та кількісних характеристик металів або сплавів продиктовано науковими та виробничими задачами, які виникли в сучасному матеріалознавстві. У *Avizo*[®] металографічні зображення шліфів ППМ представлені комбінацією різноманітних структурних складових при різному співвідношенні: фазами, які характеризуються різноманітними розмірами, формою та кольором, а також межами зерен, що представлені або окремими лініями на зображенні, або безперервною сіткою, що покриває зображення. Комбінація цих структурних складових (площинні та просторові) для ППМ з відходів промислового виробництва представлені на рис. 2.10.



a)



б)

Рис. 2.10. Визначення та аналіз структурних складових (пористість, максимальний та мінімальний діаметр пор, максимальні та мінімальні розміри частинок) ППМ у форматі 3D-зображення:

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

Кінцевою задачею металографічного аналізу за допомогою прикладних програм слід вважати статистичну обробку отриманих даних у процесі вимірювання характеристик об'єктів, визначення середніх значень цих величин, а також побудову графічних залежностей для візуалізації процесу аналізу.

Вмонтований механізм автоматизації у **Avizo**[®] абсолютно прозорий для користувача і дозволяє без надмірних зусиль накопичувати та аналізувати дані з багатьох точок зору, отримувати інтегральні характеристики та порозподілення, універсальний інструмент для якісного аналізу зображення в науці та на виробництві, однаково незамінний як при аналізі лабораторних структур, так і при кількісному аналізі у відповідності з українськими та міжнародними стандартами.

VSG Avizo[®] має гнучкий набір додаткових модулів, кожен з яких має свій інтерфейс і певний набір інструментів для візуалізації різних типів даних:

Avizo[®] **Standard** містить повний набір інструментів для 3D візуалізації, обробки, аналізу та презентації будь-яких типів даних (рис. 2.11):

- імпорт великої кількості типів даних;
- сучасна тривимірна візуалізація;
- з'єднання з сервером Matlab для детального аналізу;
- сегментація і відновлення 3D моделей.

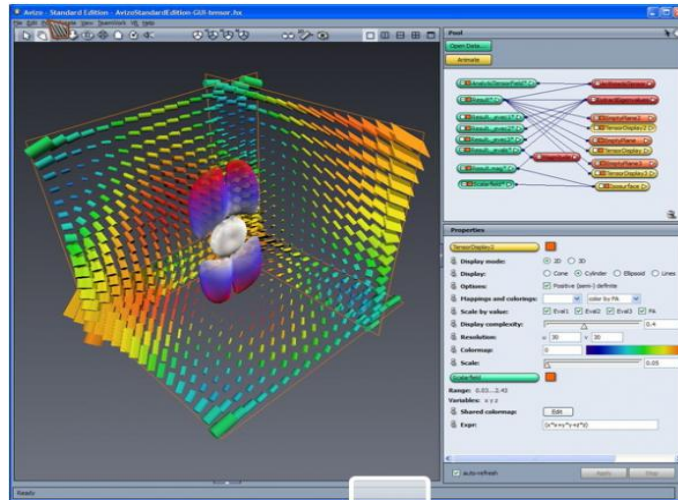


Рис. 2.11. Приклад роботи модуля Avizo[®] Standard

Avizo[®] Earth програма для інтерактивної візуалізації, аналізу, порівняння та підготовки презентацій на основі геофізичних даних. Avizo[®] Earth – це ефективне рішення, що дозволяє імпортувати, управляти і інтерактивно візуалізувати складні геофізичні дані з декількох джерел в єдине оточення (рис. 2.12):

- унікальна технологія управління пам'яттю;
- легке управління даними;
- завантажники для горизонтів і розломів;
- потужний редактор палеток;
- візуалізація горизонтів і контроль якості;
- виділення геологічних тіл;
- багатопрофільне дерево проектів;
- підготовка професійних презентацій;
- висновок проектів на системи віртуальної реальності.

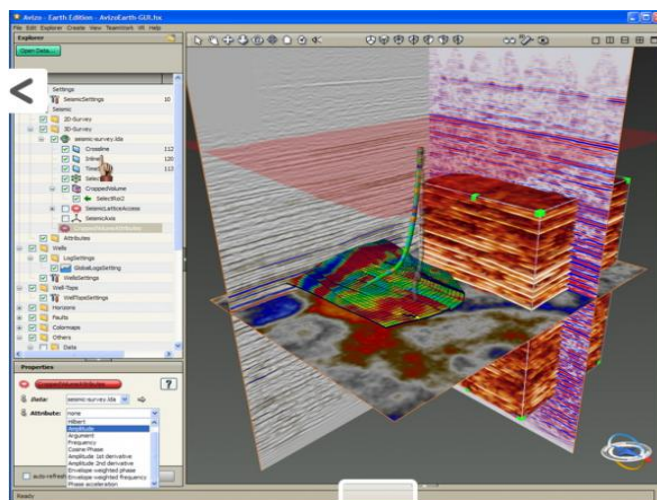


Рис. 2.12. Приклад роботи модуля Avizo[®] Earth

Avizo® Fire – це широкий набір інструментів для завантаження, візуалізації та отримання якісної і кількісної інформації за різними типами даних (рис. 2.13). За допомогою програми **Avizo® Fire** можна візуалізувати дані в таких галузях науки, як промислова томографія, кристалографія, розвиток мікроструктур, нано структури, проводити неруйнуючі дослідження та аналіз томографії керна:

- імпорт та обробка 3D зрізів;
- сегментація і виділення неоднорідностей;
- повне дослідження 3D даних;
- статистичний аналіз;
- створення презентацій, звітів і віддалений доступ до проєктів.

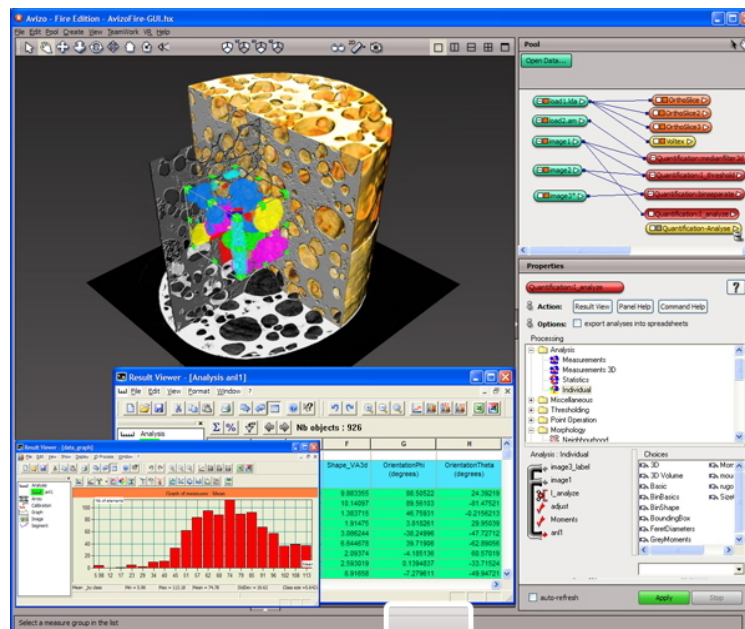


Рис. 2.13. Приклад роботи модуля **Avizo® Fire**

Avizo® Wind – це широкий набір інструментів для візуалізації та аналізу даних обчислювальної термодинаміки, виробничого моделювання, мікроструктурного прогнозування, нелінійних структур і геотехнічних проблем (рис. 2.14):

- імпорт великої кількості типів даних;
- просунута візуалізація пост-процесів;
- дослідження і аналіз;
- створення презентацій і спільна робота над проєктами;
- 3D моделювання.

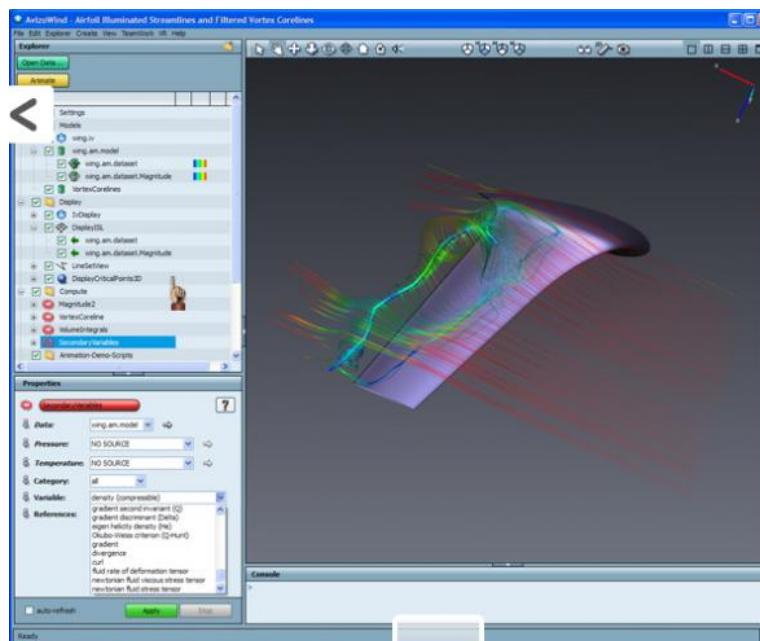


Рис. 2.14. Приклад роботи модуля **Avizo®** Wind

Застосування прикладної сучасної програми **Avizo®** для дослідження та комплексного аналізу структурних властивостей пористих проникливих матеріалів дало змогу отримати достовірні дані – розподіл пористості по січенню зразка. Для візуалізації поророзподілення було застосовано етап кінцевої візуалізації – рендерінг. Це дало змогу миттєво визначити комбінацію різноманітних структурних складових ППМ при різному співвідношенні: фази, а також межі зерен. Тому на сьогодні **Avizo®** – найпрогресивніша та найпродуктивніша прикладна програма для обробки та аналізу металографічних зображень з можливістю візуалізації тривимірних об’єктів за двомірними фотографіями.

2.6. Прикладна програма «**SMART-EYE®**»

Взагалі якісний аналіз зображення готового виробу – пористого проникливого матеріалу – проводиться з метою визначення таких параметрів об’єктів, як середня яскравість, периметр, площа, мінімальний та максимальний діаметри, фактор форми, коефіцієнт форми та ін. За допомогою іншої прикладної програми «**SMART-EYE®**» можливо визначити дані характеристики, необхідні для якісної та кількісної оцінки структури будь-якого матеріалу, в тому числі й пористого (рис. 2.15).

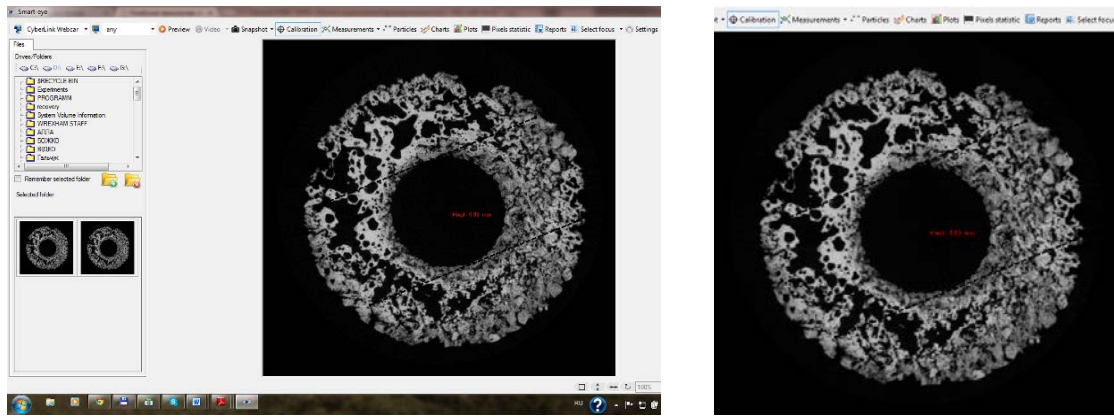


Рис. 2.15. Процес калібрування зразка та введення реальної розмірності за допомогою програми «SMART-EYE®»

Кінцевою задачею металографічного аналізу за допомогою «SMART-EYE®» слід вважати статистичну обробку отриманих у процесі вимірювання характеристик об'єктів, визначення середніх значень цих величин, а також побудова графічних залежностей для візуалізації процесу аналізу (рис. 2.16).

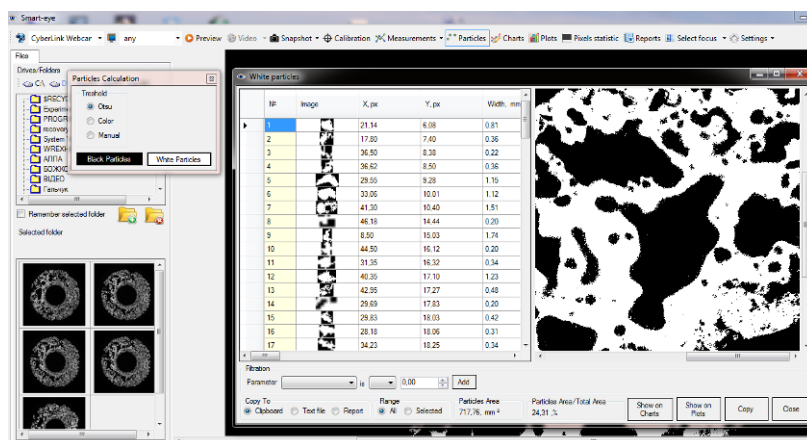


Рис. 2.16. Визначення форми та розмірів пор дослідного зразка ППМ

Для того, щоб отримати більш адекватну оцінку отримання результатів за допомогою «SMART-EYE®» необхідно провести бінарізацію зображення. Суть бінарізації заключається у розгляді всієї безлічі ймовірних варіантів декількома незалежними полями. У даному випадку бінарізація полягає у перетворенні сірої картини зображення мікросліфа у растрову чорно-білу.

Аналіз зразків ППМ здійснювався за стандартною методикою. Шліфи зразків досліджували за допомогою мікроскопа моделі MMR-4

при збільшенні $\times 600$ та $\times 800$. З метою отримання чіткого зображення границь зерен шліфи протравлювали 4 % розчином соляної кислоти. Площинну пористість визначали за мікрофотографіями шліфів за допомогою програми «*SMART-EYE*[®]». Слід відмітити, що програмне забезпечення «*SMART-EYE*[®]» дозволяє визначити необхідні характеристики для якісної та кількісної оцінки структури будь-якого матеріалу, в тому числі і пористого.

За допомогою програмного забезпечення «*SMART-EYE*[®]» визначили розподіл пористості, який змінюється в межах від 50 % до 70 %. У свою чергу, об'ємну пористість обчислювали ваговим методом за геометричними параметрами зразків.

На рис. 2.17 наведена структура зразків ППМ при збільшенні 600, спечених пічним методом. За допомогою програмного продукту «*SMART-EYE*[®]» провели морфологічний аналіз рельєфу поверхні зразків. На рис. 4.18 наведено характер поверхні зразків після пічного спікання (до і після травлення).

Необхідно наголосити, що поверхня мікрошліфа (рис. 2.17) неоднорідна, і її різні складові мають різний електродний потенціал. У свою чергу, після травлення мікроструктура зразків являє собою комплекс мікрогальванічних елементів. У результаті цього на поверхні утворюється мікрорельєф. Морфологічний аналіз рельєфу поверхні зразків приведений на рис. 2.18.

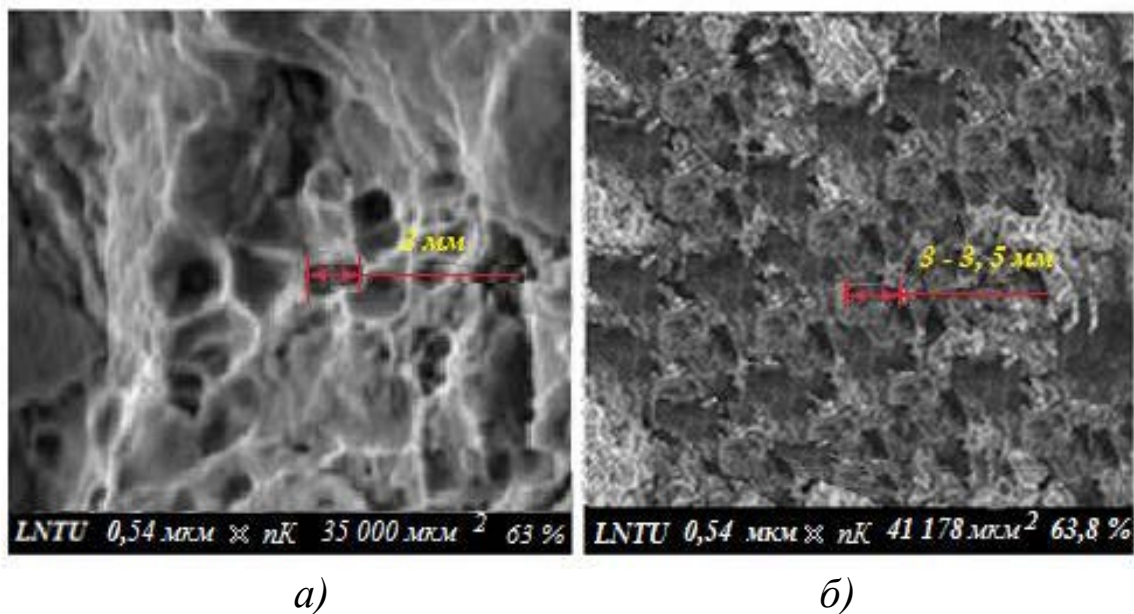
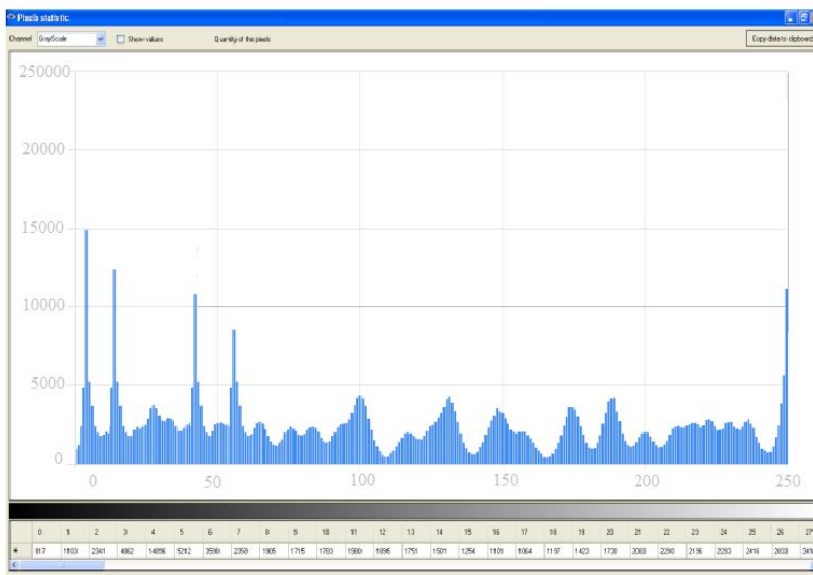
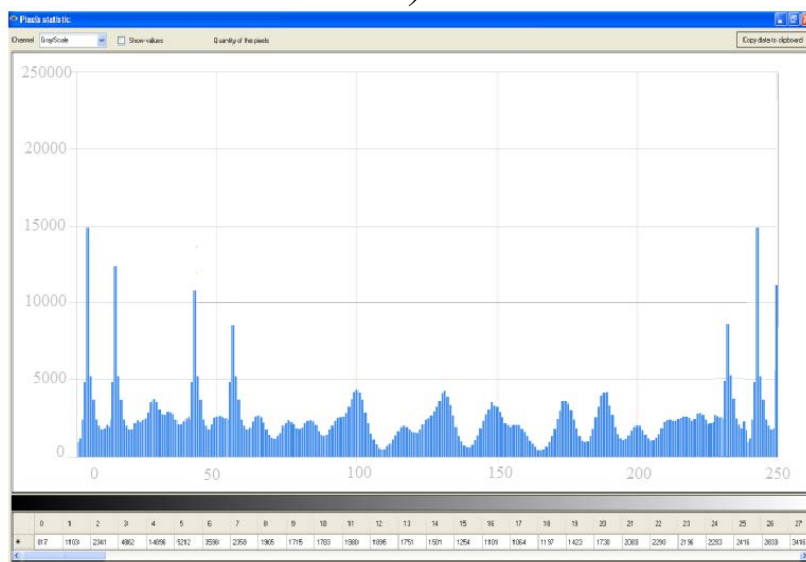


Рис. 2.17. Структура зразка ППМ, спеченого пічним методом при збільшенні 600, де: а) до травлення, б) після травлення



а)



б)

Рис. 2.18. Рельєф поверхні ППМ при збільшенні 600:
а) до травлення, б) після травлення

2.7. «Система КОИ»

Розроблена комп'ютерна програма для обробки зображень і кількісної оцінки параметрів мікроструктури «Система КОИ». Програма написана на мові Сі++ із застосуванням програмного пакету Borland С ++ Builder. Вона (рис. 2.19) служить для розрахунку об'ємної частки і середнього розміру частинок структури і дозволяє проводити ро-

зрахунок за кількома сотнями січних (залежить від дозволу фотографії) в одному полі зору.

Алгоритм роботи програми полягає в наступному: в цифровому вигляді досліджуване зображення представляється у вигляді великої кількості точок – пікселів, розташованих послідовно у вигляді горизонтальних ланцюжків. Безпосередньо файл містить коди кольорів пікселів, а їх координати виходять автоматично. Програма витягає коди кольорів, порівнює із заданими користувачем значеннями і, в залежності від результату, додає до банку даних білої або чорної фази. Так збирається інформація про кількість чорної і білої фази, відсоток сірої фази обчислюється як залишок.

Однією з можливостей, реалізованих в розробленій програмі, є побудова з її допомогою гістограми за довжиною частинок для різних досліджуваних фаз. Це дозволяє провести більш повні дослідження розподілу включень в досліджуваних зразках за формою і розмірами в залежності від швидкостей охолодження.

Для побудови гістограми за шуканою фазою програма сканує зображення в горизонтальному напрямку в виділеній користувачем області, виробляючи лінійний пошук ланцюжків пікселів, що потрапляють в інтервал кольорів, заданий налаштуваннями рівня яскравості фази. Знайшовши такі ділянки, вимірюється їх довжина в пікселях. Сканування зображення ведеться багаторазово разів (порядку декількох сотень). Після первинної обробки зображення програмою проводиться математичний розрахунок отриманих даних. Знаходиться максимальне значення, і весь інтервал розмірів частинок ділиться на десять рівних відрізків. Далі обчислюється кількість лінійних ділянок, які потрапили в кожен з розмірних діапазонів. За отриманими даними будується гістограма. Гістограма білої або чорної фази виходить шляхом лінійного пошуку одноколірних ланцюжків пікселів, з обчисленням їх довжини і сортуванням за розмірами. Загальна кількість точок для білої і чорної фази (порядку декількох десятків тисяч точок) сортується і підсумовується (рис. 2.19).

Для оцінки параметрів форми включень по фотографії мікроструктури матеріалів був створений додатковий модуль до проісанної вище програми. Він дозволяє оцінювати середнє відхилення форми частинок від сферичної. Це завдання особливо важлива при оцінці механічних властивостей матеріалів, коли від форми низькоміцних включень залежить міцність виробу в цілому.

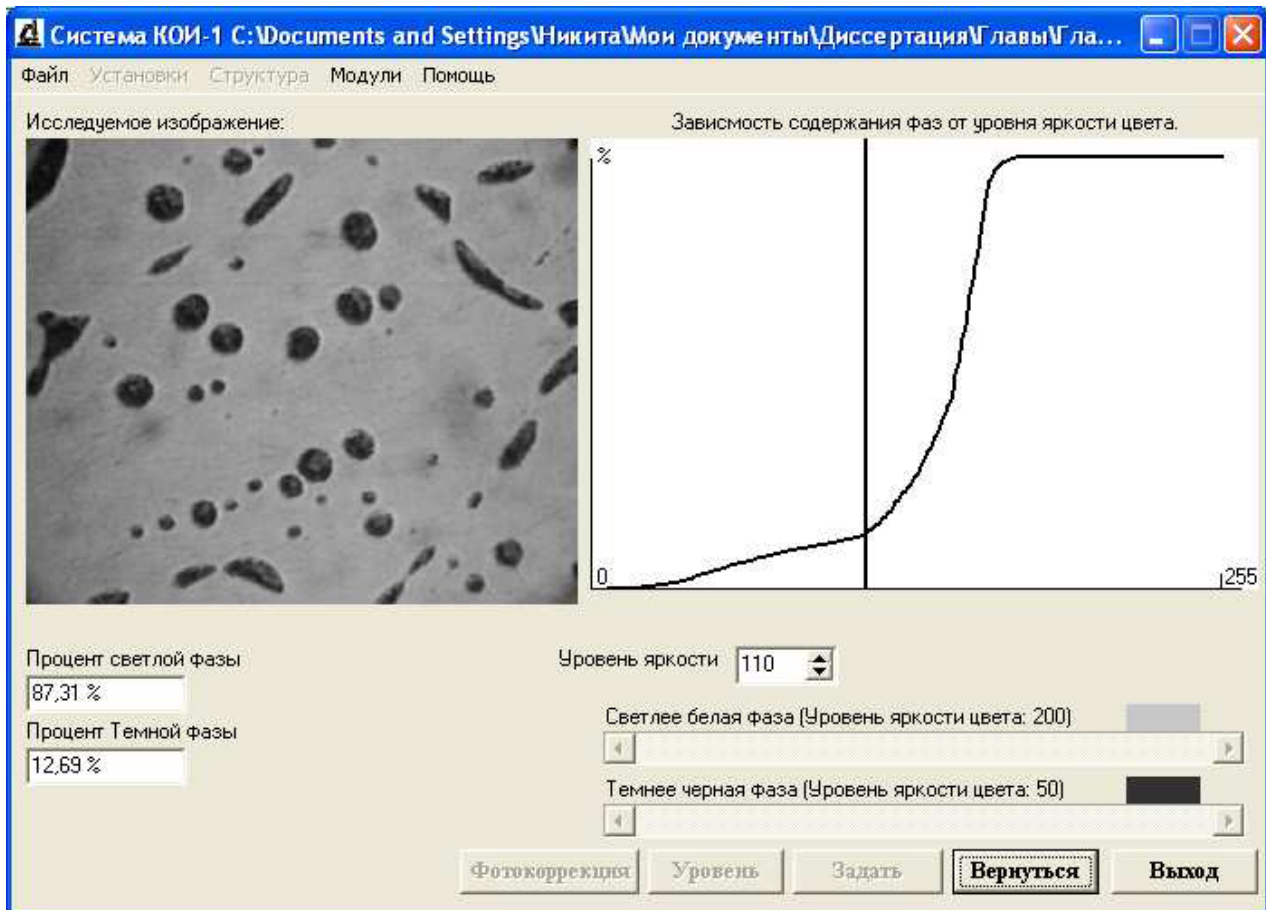


Рис. 2.19. Інфтерфейс програми «Система КОИ»

Таким чином, описані програмні продукти для металографічного аналізу „PHOTOM”, „OPTIMAS”, „ВИДЕОТЕСТ”, „IMAGE EXPERT PRO”, „AVIZO”, „SMART-EYE®”, «Система КОИ» є досить ефективними при вирішенні складних задач сучасного комп’ютерного матеріалознавства. Дані програмні забезпечення для аналізу мікрозображень – це універсальний інструмент для якісного аналізу зображення в науці та на виробництві, в рівній мірі незамінний як при аналізі лабораторних структур, так і при кількісному аналізі у відповідності з українськими та міжнародними стандартами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ II

1. Путятин Е. П. Обработка изображений в робототехнике / Путятин Е. П., Аверин С. И. – М. : Машиностроение, 1990. – 320 с.
2. M. Andersson, V. Holmquist, J. Lindquist, O. Nilsson, K.G. Wahlund, Analysis of film coating thickness and surface area of pharmaceutical pellets using fluorescence microscopy and image analysis, J. Pharm. Biomed. 22 (2000) P. 325–339.
3. Стась О. М. Комп'ютерні методи дослідження в металографічному аналізі / Стась О. М., Гаврилюк В. П. // Методи дослідження та контролю якості металів. – 2000. – №1–2. – С. 48–52.
4. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature. – N. Y. : Freeman. – San Francisco. – 1982. – P. 351.
5. Повстяной О. Ю. Комп'ютерні методи дослідження в металографічному аналізі за допомогою прикладних програм / Повстяной О. Ю., Заболотний О. В., Чміль І. І. // Наукові нотатки. – Луцьк : ЛДТУ, 2004. – Випуск 15. – С. 244–251
6. Vodla KK, Murthy JY, Garimella SV. Microtomography-based simulation of transport through open-cell metal foams. Numer Heat Transfer Part A 2010;58(7):527.
7. L. A. Feldkamp, L. C. Davis, J. W. Kress, Practical cone beam algorithm, J. Microsc. 185 (1997) 67–75.
8. Whitehouse D. Handbook of Surface Metrology // Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1994. –988 p.
9. Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology. – London : Academic Press.,1992. – P.329.
10. Stampfl J. Determination of the fracture toughness with automatic image processing / Stampfl J., S. Scherer, M. Gruber, O. Kolednik: Int. J. Frac., V. 2–44, 1996 – P. 139.
11. Boukhair, A., Haessler, A., Adloff, J.C., Nourreddine, A., 2000. New code for digital imaging system for track measurements. Nucl. Instrum. Methods B 160, 550–555.
12. Zhang Z., Marshall A.G. A universal algorithm for fast and automated charge state deconvolution of electrospray mass-to-charge ratio spectra // J. Am.Soc. Mass Spec. 1998. – V. 9. – P. 225–233.
13. Toda T. 3D video system using Grating Image / T.Toda, S.Takahashi, F.Iwata // Proc. SPIE 2406, – 1995. PP. 191–198.

14. Ревенчук І. А. Математичні моделі геометричних перетворювань при візуалізації 3D об'єктів / І. А. Ревенчук // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2013. – № 11. – С. 54-58.
15. Eberly, David H.: «3D Game engine design. Practical approach to real*time computer graphics», 2nd ed., 2007, Morgan Kaufmann publishers. 2. Muller, Thomas: «Real*time rendering», 3rd ed., 2008
16. Farin G. Mathematical Principles for Scientific Computing and Visualization / G. Farin, D. Hansfor . – Peters, Ltd. 2008. – 275 p.
17. О.Ю.Ровстяной «Review of the current software for computer based research in the processing of metallographic images» / О.Ю.Ровстяной, Yu.V.Kuts // Canadian scientific journal. – Issue 2. – 2014. – P.54-63.
18. Куц Ю. В. Сучасні методи дослідження мікроструктур за допомогою комп'ютерного матеріалознавства з використанням прикладних програм / Куц Ю. В., Повстяной О. Ю. // Наукові нотатки. – Випуск 45. – Луцьк : РВВ ЛНТУ, 2014. – С. 323–329.
19. Повстяной О. Ю. Аналіз сучасних методів визначення структури та топології поверхонь матеріалів. / О. Ю. Повстяной, В. Д. Рудь, Ю. А. Мельник, Н. Ю. Імбирович // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – №2. – Київ, «Институт Электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины», 2014. – С. 37–42.
20. Комп'ютерна оцінка фазового складу матеріалу за кольоровим зображенням шліфів / Б. П. Русин, В. Г. Іванюк, Г. Лау, В. М. Довгуник, В. В. Корній // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – №5. – С. 77–80.
21. Романюк О. Н. Прискорене визначення дифузної складової кольору при зафарбовуванні тривимірних графічних фігур / О. Н. Романюк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2006. – № 2 (12). –С. 71–76.
22. Повстяной О. Ю. Морфологічний опис, аналіз та обробка зображень мікроструктури сопел для піскостуменевої обробки, які виготовлені методами порошкової металургії / В. А. Сичук, В. Д. Рудь, О. В. Заболотний // Наукові нотатки. – Луцьк : ЛНТУ, 2013. – Випуск 41. – С. 203–210.
23. Повстяной О. Ю. Удосконалення технології отримання пористих проникливих матеріалів з відходів промислового виробництва: Дис. канд. техн. наук. – Луцьк, 2007. – 151 с.

24. Повстяной О. Ю. Застосування комп'ютерного моделювання для візуалізації трьохмірних даних при дослідженні властивостей пористих проникливих матеріалів / Повстяной О. Ю., Куц Ю. В., Імбірочич Н. Ю. // Наукові нотатки. – Випуск 50. – Луцьк : РВВ ЛНТУ, 2015. – С. 159–165.
25. Технології, структура, властивості пористих проникливих матеріалів : монографія / Рудь В. Д., Повстяной О. Ю., Заболотний О. В., Богінський Л. С. – Луцьк : РВВ ЛНТУ. – 2016. – 200с.
26. Шиберко В. В. Застосування комп'ютерно-інформаційних технологій для визначення характеристик структурно-неоднорідних матеріалів / В. В. Шиберко, В. Д. Рудь, Н. Т. Рудь // Актуальні проблеми економіки : науковий економічний журнал. Київ : РВР С. А Європін. – К. : Національна академія управління, 2013. – Вип. № 12 (150). – С. 317–324.
27. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610217. Система компьютерной обработки изображений (Система КОИ) / Ю. П. Егоров, Н. В. Мартюшев. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.01.2014.
28. Середенко Ю. А. Методи дослідження морфологічних характеристик порошків / Ю. А. Середенко. – М. : Комп'ютерно- інформаційні технології, 2002. – 440 с.
29. Антонов И. В. Численные методы моделирования микроструктуры зернистых материалов с помощью микроскопической техники / И. В Антонов, Е. Ю Нурканов, М. С. Петров. – М. : Порошковая металлургия, 2004. – 350 с.
30. 1st International Conference on Tomography of Materials and Structures: Book of Abstracts. 1–5 July, 2013. Ed. By Veerle Cnudde. University of Ghent, Belgium. – 374 p.
31. Ohser J., Schladitz K. 3D Images of Materials Structures: Processing and Analysis. – 2009. Wiley-VCH Verlag GmbH. Berlin. – 341 p.
32. Peyrin F., Engelke K. CT Imaging: Basics and New Trends. In: Handbook of Particle Detection and Imaging. – Springer-Verlag, Berlin, 2012. – P. 883–915.
33. Prusov E.S. Modern Methods of Metal Matrix Composit Alloys Production and New Approaches to Realization of Reinforcing Scheme // Machines, Technologies, Materials. – 2014. – Iss.1. – P. 11–13.

34. A Erhardt, G. Zinser, D. Komitowski, and J. Bille. Reconstructing 3D light microscopic images by digital image processing. *Applied Optics*, 24: P. 194–200, 2014.
35. Wang M.Y., Williams J.J., Jiang L. et al. Three Dimensional (3D) Microstructural Characterization and Quantitative Analysis of Solidified Microstructures in Magnesium-Based Alloys // *Metallography, Microstructure and Analysis*. – 2012. – Vol. 1. – Iss. 1. – P. 7–13.
36. Калініна Н. Ю. Система інваріантних ознак просторових форм кольорових зображень / Н. Ю.Калініна // *Праці Таврійського держ. агротехнологічного університету*. – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – Вип. 4, т. 50. – С. 199–204.
37. База данных микроструктур металлов и сплавов [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.microstructure.ru>.
38. Математические методы и алгоритмическое обеспечение анализа и распознавания изображений в информационно-телекоммуникационных системах : (Монография) / Васильев В. Н., Гуров И. П., Потапов А. С.; СПбГУ ИТМО, С-П.; 2008. – 46 с. – Бібліогр.: – с. 22.
39. Перфильев Д. А. Описание структуры и алгоритм анализа микроструктурных металлографических изображений деформируемых алюминиевых сплавов: Дис. канд. техн. наук: 05.13.17; – Защищена 09.12.2005; Утв.09.03.2006. – Красноярск, 2007. – 124 с.: ил. – Библиогр.: с. 5–48.

РОЗДІЛ III

ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛОСТРУКТУР ЗА ЇХ КОЛЬОРОВИМИ 3D-ЗОБРАЖЕННЯМИ

На сучасному етапі розвитку науки про матеріали активно розробляються нові підходи до оцінки структурно-морфологічних характеристик матеріалів і виробів, які засновані на вивченні структури в трьох вимірах. Успіхи останніх років, досягнуті в цій сфері, послужили основою для становлення такого напрямку матеріалознавства, як **«3D Materials Science»**, або **«тривимірне матеріалознавство»**. Одним з найбільш вагомих чинників, що сприяють швидкому розвитку цього нового науково-практичного спрямування, стало використання методів комп'ютерної томографії для дослідження об'ємної структури матеріалів.

Про зростаючий інтерес до вивчення матеріалів із застосуванням комп'ютерної томографії свідчить проведення з цієї тематики конференцій світового рівня. Так, у європейських країнах можна відзначити проведення в 2012 році конференції з промислової комп'ютерної томографії в Австрії, в рамках якої функціонувала секція з неруйнівного контролю і тривимірного вивчення матеріалів. У 2013 році в Бельгії відбулася міжнародна конференція з томографії матеріалів і структур, яка зібрала понад 250 учасників з 28 країн світу. Але першою спеціалізованою конференцією з тривимірного матеріалознавства слід вважати 1st International Conference on 3D Materials Science (США, Seven Springs, 2012), на якій було доведено, що поява можливостей для дослідження матеріалів у трьох вимірах відкрила нову еру в науці про матеріали.

Методи томографії, що застосовуються для збору проєкційних даних про структуру матеріалу, систематизовані в таблиці 3.1 у залежності від впливу на досліджуваний зразок. Область використання кожного з методів визначається характеристикою матеріалу зразків і специфікою вирішуваних завдань.

Основною метою використання томографії в матеріалознавстві є якісна і кількісна оцінка різних елементів внутрішньої будови матеріалів і виробів, що включають як структурні складові, так і дефекти мікро- і макроструктури. Параметри, що аналізуються за допомогою комп'ютерної томографії, можуть включати розподіл, форму і розмі-

ри структурних елементів, їх орієнтацію, об'ємну частку та ін. Привабливість використання рентгенівської комп'ютерної томографії для вирішення різних матеріалознавчих задач полягає в оперативності проведення досліджень, зниженні трудовитрат при підготовці зразків, отриманні детальної інформації про об'ємну будову досліджуваних об'єктів.

Таблиця 3.1

Морфологічний інструментарій тривимірного моделювання

<i>Напрямок роботи</i>	<i>Методи та інструменти</i>	<i>Результати та їх представлення</i>
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

Застосування традиційних якісних методик (візуальний контроль, рентгенівська радіографія, ультразвук і ін.) далеко не завжди дозволяє повноцінно охарактеризувати дефекти у виробках з функціональ-

них матеріалів. Використання комп'ютерної томографії для вирішення цих завдань дозволяє з прецизійною точністю визначити розмір і розташування порожнин, сторонніх включень, області зі зниженою щільністю, пористість та інші порожниноутворення. Отримана при цьому інформація необхідна при розробці основних напрямів удосконалення технології виробництва матеріалів.

Аналітичні можливості комп'ютерної томографії зарекомендували її як ефективний засіб не тільки неруйнівного контролю нових матеріалів, але і тривимірної візуалізації їх структури, що дозволяє поряд з виявленням неоднорідностей та інших дефектів встановити характер просторового розподілу, форму, розміри та інші морфологічні характеристики різних структурних складових.

3.1. Створення 3D-зображень металоструктур

Тривимірна графіка – розділ комп'ютерної графіки, сукупність прийомів та інструментів (як програмних, так і апаратних), призначених для зображення об'ємних об'єктів. Найбільше застосовується для створення зображень на площині екрана або аркуша друкованої продукції в архітектурній візуалізації, кінематографі, телебаченні, відеоіграх, друкованій продукції, а також у науці та промисловості.

Тривимірне зображення на площині відрізняється від двовимірного тим, що включає побудову геометричної проєкції тривимірної моделі (сцени) на площину (наприклад, екран комп'ютера) за допомогою спеціалізованих програм. При цьому модель може, як відповідати об'єктам з реального світу (автомобілі, будівлі, ураган, астероїд), так і бути повністю абстрактною (проєкція чотиривимірного фрактала).

Для одержання тривимірного зображення на площині потрібні наступні кроки [9]:

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

Сцена (віртуальний простір моделювання) включає в себе кілька категорій об'єктів:

- геометрія (побудована за допомогою різних технік моделей);
- матеріали (інформація про візуальні властивості моделі, наприклад, колір, структура);
- джерела світла (налаштування напрямку, потужності, спектра освітлення);
- віртуальні камери (вибір точки та кута побудови проєкції);
- сили та дії (налаштування динамічних спотворень об'єктів, застосовується в основному в анімації);
- додаткові ефекти (об'єкти, що імітують атмосферні явища: світло в тумані, хмари, полум'я і пр.).

Завдання тривимірного моделювання – описати ці об'єкти і розмістити їх “у сцені” з допомогою геометричних перетворень відповідно з вимогами щодо майбутнього зображення.

Рендеринг. На цьому етапі математична (векторна) просторова модель перетворюється на плоску (растрову) картинку. Якщо потрібно створити відео, то рендериться послідовність таких картинок – кадрів. Як структура даних, зображення на екрані представлено матрицею точок, де кожна точка визначена принаймні трьома числами: інтенсивністю червоного, синього і зеленого кольорів. Таким чином, рендеринг перетворює тривимірну векторну структуру даних у плоску матрицю пікселів. Цей крок часто вимагає дуже складних обчислень, особливо коли потрібно створити ілюзію реальності. Найпростіший вид рендеринга – це побудувати контури моделей на екрані комп'ютера за допомогою проєкції. Звичайно, цього недостатньо і потрібно створити ілюзію матеріалів, з яких виготовлені об'єкти, а також розрахувати спотворення цих об'єктів за рахунок прозорих середовищ (наприклад, рідини в склянці).

Існує декілька технологій візуалізації, часто комбінованих разом. Наприклад: Z-буфер (використовується в **OpenGL** і **DirectX 10**)/

Сканлайн (*scanline*) – він же *Ray casting* («кидання променя», спрощений алгоритм зворотного трасування променів) – розрахунок кольору кожної точки картинку побудовою променя з точки зору спостерігача через уявний отвір в екрані на місці цього пікселя "в сцену" до перетину з першою поверхнею. Колір пікселя буде таким же, як колір цієї поверхні (іноді з урахуванням освітлення і т. д.).

Трасування променів (рейтрейсінг, англ. *Raytracing*) – те ж, що і сканлайн, але колір пікселя уточнюється за рахунок побудови додаткових променів (відображених, заломлених і т. д.) від точки перетину променя погляду. Незважаючи на назву, застосовується тільки зворотне трасування променів (тобто саме від спостерігача до джерела світла), пряме вкрай неефективне і споживає занадто багато ресурсів для отримання якісної картинки.

Глобальне освітлення – розрахунок взаємодії поверхонь і середовищ у видимому спектрі випромінювання за допомогою інтегральних рівнянь.

Внаслідок великого обсягу однотипних обчислень рендеринг можна розбивати на потоки (розпаралелювати). Тому для візуалізації дуже актуальне використання багатопроцесорних систем. Останнім часом активно ведеться розробка систем візуалізації використовують **GPU** замість **CPU**, і вже сьогодні їх ефективність для таких обчислень набагато вище. До таких систем належать:

- Refractive Software Octane Render
- AAA studio FurryBall
- RandomControl ARION (гібридна)

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

Сучасне програмне забезпечення дозволяє використовувати незалежно від алгоритму моделювання різноманітні підходи для побудови 3D-моделі зображення.

Існує істотна відмінність між глибинним формуванням зображень (ГФЗ) і об'ємним (ОФЗ). ОФЗ для поверхневих структур не залежить від хвильового числа. Однак для об'ємних структур існує проблема зникнення ОФЗ залежно від радіального хвильового числа.

Спостерігаючи такі структури оком або за допомогою камери, ми не зможемо бачити дрібні деталі. Проекційні системи формування зображення не розробляються для зображення істинних 3D об'єктів. Тому об'ємне формування зображень вимагає інших методів.

Глибинне формування зображень окремої непрозорої поверхні вимагає деякої додаткової інформації, крім яскравості в кожному пікселі зображення. Існує чотири основні принципи глибинного формування зображень.

Визначення глибини зображення за методом триангуляції. Якщо ми спостерігаємо об'єкт з двох різних точок огляду, розділених базовою лінією, то об'єкт буде видно під різними кутами до базової лінії з двох положень. Цей метод відомий як триангуляція і становить один з основних методів в геодезії, картографії та металографії.

Визначення глибини зображення за методом часу польоту. Це ще один простий принцип вимірювання відстані. Спочатку посиляється сигнал, далі він поширюється з характерною йому швидкістю до об'єкта, відбивається і повертається назад до камери. Час проходження прямо пропорційний сумі відстаней між відправником і об'єктом (одержувачем).

Визначення глибини зображення за фазою – інтерферометрія. Інтерферометрію можна розглядати як особливий вид вимірювання відстані за методом часу польоту. Цей метод вимірює відстані в частках довжини хвилі випромінювання за допомогою вимірювання не тільки амплітуди (енергії) випромінювання, але також і його фази. Фазові вимірювання можливі за допомогою накладення когерентного випромінювання. Світло має довжини хвиль у діапазоні від 400 до 700 нм. Тому інтерферометричні вимірювання відстаней за допомогою світла дозволяють вимірювати відстані в нанометричному діапазоні (10^{-9} м).

Визначення глибини зображення по когерентності. Ще однією характеристикою випромінювання є довжина когерентності, тобто максимальна різниця ходу, при якому все ще можливе когерентне накладення.

Довжину когерентності можна легко виміряти завдяки можливості створювати інтерференційні картини. Довжини когерентності становлять всього кілька довжин хвиль. Даний метод визначення глибини зображення заповнює проміжок у діапазоні відстаней, який може вимірюватися між інтерферометричними методами і методами часу польоту.

Глибинне формування зображень характеризується двома базовими величинами – глибинним дозволом σ_z , і діапазоном глибин Δ_z . Глибинний дозвіл позначає статистичну помилку вимірювання глибини i , таким чином, мінімальний розв'язок різниць глибин зображення.

Діапазон глибин Δ_z дорівнює різниці між мінімальною і максимальною глибинами, які можна виміряти методом глибинного формування зображень. Отже, відношення діапазону глибин і глибинного дозволу, Δ_z / σ_z позначає динамічний діапазон глибинного формування зображень.

3.2. Теоретичні передумови для розробки комплексу методів і алгоритмів, які дозволять використовувати кольорові ознаки зображень мікрошліфів металів і сплавів у задачах аналізу металоструктур

Будь-який метод ідентифікації структури металів та сплавів у оптичного мікроскопічного аналізу ґрунтується на деякому поданні зображень. Існують методи зіставлення, що використовують самі пікселі з відповідними їм значеннями інтенсивності, методи, що здійснюють пошук відповідності між точками контурів або крайовими точками, різними структурними або геометричними елементами, а також між мітками, що позначають конкретні фізичні об'єкти [13]. Але всі існуючі системи автоматичного аналізу не вирішують задачу у комплексі, їх головним недоліком є вузька спрямованість і мала гнучкість. Такі системи реалізують лише базові методики, і лише деякі з них повністю автоматизовані.

В існуючих сучасних програмних забезпеченнях для комп'ютерних засобів дослідження металографічних зображень за основу взято наступний алгоритм розпізнання [14]. Нехай $B(i, j)$ – вихідне зображення, значення $B(i, j)$ – дорівнює яскравості в точці $(i, j) \in D$, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, m$.

Зображення $B(i, j)$ реальної сцени і сукупність зображень окремих об'єктів:

$$B(i, j) = H_1(i, j) + H_2(i, j) + \dots + H_s(i, j) \quad (3.1)$$

де s – число об'єктів сцени;

$H_k(i, j)$ – зображення k -го об'єкта ($k = 1 \dots s$).

Задача розпізнання зображення буде в даному випадку складатися із знаходження всіх об'єктів $H_k(i, j)$, що визначаються з критеріїв однорідності області [14]:

$$\frac{\max_{P \in R} |f(P) - m|}{T} \quad (3.2)$$

де T – порогове значення;

R – визначена в R область;

m – середнє значення пікселів області P ;

$f(P)$ – функція розподілу яскравості.

На основі вищеприведеного алгоритму дані програми дозволяють обчислити середню яскравість кожного об'єкта по шкалі яскравостей, що визначена у системах. За допомогою даної схеми у виділених програмах для аналізу зображень запропоновано наступну послідовність алгоритмів для обробки і одержання характеристик металографічної структури:

1. Фільтрування зображення з метою вилучення випадкового шуму.
2. Попередня сегментація, яка направлена на виділення однорідних областей.
3. Корекція об'єкта з метою визначення порогу яскравостей.
4. Остаточна сегментація з використанням визначеного фонового значення, що дозволяє повністю визначити об'єкти.
5. Аналіз виділених об'єктів з метою визначення їхніх параметрів.

Взагалі якісний аналіз зображення проводиться з метою визначення наступних параметрів об'єктів: середня яскравість, периметр, площа, мінімальний та максимальний діаметри, фактор форми, коефіцієнт форми та ін. За допомогою вищеприведених прикладних програм можливо визначити дані характеристики, необхідні для якісної та кількісної оцінки структури будь-якого матеріалу.

Основним об'єктом дослідження металографічного аналізу є зображення шліфа металу. При цьому точність і робастність методу фотограмметричного мікроаналізу прямо залежить від ефективності використаного подання зображення. Такі подання описують як низькорівневі ознаки зображень (значення інтенсивності окремих пікселів), так і високорівневі ознаки (структурні елементи і їх групи). Один з низькорівневих методів автоматичного металографічного

мікроаналізу – пошук інваріантних ознак, на базі яких відбувається ідентифікація зображень або структурних складових зображення. При цьому за введення в систему автоматичного аналізу зображення мікрошліфу підлягають впливу негативних факторів, які призводять до змазаності, появи малоконтрастних і зашумлених ділянок та інших геометричних та фотометричних викривлень.

Інформаційно-математична модель подана у кольорових металографічних зображень у форматі RGB, яка інваріантна стосовно їхніх афінних і фотометричних перетворень. Ця модель визначає моменти кольору M_{pq}^{abc} для інваріантної області Ω наступним чином:

$$M_{pq}^{abc} = \iint_{\Omega} x^p y^q [R(x,y)]^a [G(x,y)]^b [B(x,y)]^c dx dy \quad (3.3)$$

Інваріантні характеристики зображень у цій математичній моделі визначаються рівнянням афінно-інваріантної квадратики:

$$I = \left(X_{\frac{N}{2}, \frac{N}{2}} \right)^2 - 2 \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} (-1)^k \frac{\left(\frac{N}{2}\right)! \left(\frac{N}{2}\right)!}{\left(\frac{N}{2}-k-1\right)! \left(\frac{N}{2}+k+1\right)!} X_{\frac{N}{2}-k-1, \frac{N}{2}+k+1} X_{\frac{N}{2}+k+1, \frac{N}{2}-k-1} \quad (3.4)$$

де I – інваріантна ознака, яка визначається еталонним зображенням.

За допомогою цієї моделі відбувається ідентифікація зображень мікрошліфів металів та сплавів за їх інваріантними ознаками, які визначені для всього зображення. Крім того, однією із задач металографічного аналізу є виділення об'єктів на зображенні мікрошліфу металу, для яких необхідно підрахувати значення ознак, на основі яких відбувається розуміння зображення, тобто визначення структурних складових, виділення дефектів і т.п., а також підрахунок різних характеристик зображення (наприклад, відносної долі фази, розміру і кількості включень і т.д.). Система інваріантних ознак зображень на основі моделі подання в форматі RGB не вирішує цієї задачі.

Відбивна здатність – це здатність металу відбивати світлові хвилі певної довжини, які сприймаються оком людини як колір, деякі з цих кольорів зазначені у таблиці 3.2.

Чисті метали у виробництві і в декоративно-прикладному мистецтві майже не використовуються. Для виготовлення різних виробів використовують сплави, кольорові характеристики яких значно відрізняються від основного металу.

Сприйняття коліру людиною відповідно до металу

<i>Метал</i>	<i>Колір</i>
Магній	Біло-сірий
Алюміній	Сірувато-білий
Титан	Сірувато-білий
Залізо	Блакитно-біли
Мідь	Червонувато-рожевий
Цинк	Блакитно-білий
Срібло	Білий
Олово	Сірувато-білий
Золото	Жовтий
Свинець	Сірувато-білий

На сьогодні металографічний аналіз використовує кольорові зображення мікрошліфів таких сплавів, як сірі чавуни, сталі та мідні сплави. Кристалічні решітки структурних компонентів цих сплавів можуть відбивати світло в оптичному діапазоні із довжиною хвилі від 380 до 740 нм, тобто кольори від червоного до фіолетового. Кожен з кольорів оптичного діапазону має фізичні характеристики, які можна кількісно виміряти, а саме: спектральний склад, яскравість, насиченість і освітленість.

Для вирішення цих задач були досліджені існуючі кольорові моделі подання цифрових зображень. Була обрана модель **HSV** як та, що є найдоцільнішою для задач виділення об'єктів на зображенні мікрошліфу металу. Колір, поданий у цій моделі, отримується нелінійним перетворенням кольору в моделі **RGB**. Кожна точка кольорового простору моделі **RGB** має однозначне відображення у просторі **HSV** і навпаки. **HSV** (англ. **H**ue, **S**aturation, **V**alue – тон, насиченість, значення) або **HSB** (англ. **H**ue, **S**aturation, **B**rightness – відтінок, насиченість, яскравість) – кольорова модель, у якій координатами кольору є: Hue – кольоровий тон; Saturation – насиченість, чим більший цей параметр, тим «чистіший» колір, тому іноді цей параметр називають чистотою кольору, а чим ближчий цей параметр до 0, тим ближчий колір до нейтрального сірого; Value – значення кольору або Brightness – яскравість.

Розробка і тестування алгоритму кольорової сегментації відбувалось на основі зображень мідних сплавів, отриманих за допомогою

оптичного мікроскопу, який укомплектований системами для отримання зображень на просвіт і відображення, у світлому і темному полі зору, і підключеною до нього цифровою фотокамерою, яка забезпечує розподільну здатність цифрової фотографії не гірше, ніж розподільна здатність мікроскопу, із спеціальним додатковим окуляром для з'єднання із мікроскопом і макрофотографуванням.

Вихідне зображення є двовимірним сигналом, контури на зображеннях – одновимірним сигналом, а найнижче за рівнем абстракції піксельне подання зображень є безрозмірним (або, умовно, із розмірністю, що дорівнює нулеві). Методи отримання таких подань можуть бути різними. В якості основи структурних подань зображень можуть бути використані кольорові сегменти на зображенні, що будуються в рамках ознакового підходу.

Позначимо через b_1, b_2, \dots, b_L – ознаки кольорових сегментів, де L – кількість класів кольорових сегментів зображення, що розпізнається. Встановимо, що ознаки для кожного класу визначає вектор математичного очікування образів із цього класу:

$$b_i = \frac{1}{L_i} \sum_{s \in \Omega} S_{j,i}, i = 1, 2, \dots, L, j = 1, 2, \dots, n \quad (3.5)$$

де n – кількість пікселів, що належать i – му кольоровому сегменту, на площі зображення Ω .

Форма гістограми розподілення кольорів надає багато інформації про об'єкт. Для того, щоб охарактеризувати гістограму розподілення введемо наступні параметри:

Розподілення вирогідностей значень параметра Hue кольорової моделі **HSV** першого порядку:

$$P(b) = \frac{n(b)}{N}, \quad (3.6)$$

де $n(b)$ – кількість точок, які потрапили в сегмент b , $0 \leq b \leq m$;

N – повна кількість точок об'єкту.

Середнє значення:

$$\bar{b} = \sum_{b=0}^{L-1} bP(b), \quad (3.7)$$

На основі параметрів $P(b)$ і b було визначено, що при вирішенні задачі ідентифікації мідних сплавів необхідна і достатня кількість

рівнів сегментації за кольором у просторі **HSV** дорівнює $L = 12$ по компоненті Hue (кольоровий тон). При цьому, результати досліджень виявили, що найбільша частина інформації про колір зображення мікрошліфу мідних сплавів міститься у таких кольірних сегментах: 1, 2, 3, 4, 7, 8, 11, 12. Результат розподілення кольорів по цих сегментах на зображенні для виділення його структурних компонентів приведений у таблиці 3.2

Таблиця 3.2

Розподіл кольорів за сегментами

	1	2	3	4	7	8	11	12
Hue (0...360)	0...30	30...60	60...90	90...120	180...210	210...240	300...330	330...360
Колір	Червоний	Жовтогарячий	Жовтий	Зелений	Блакитний	Синій	Фіолетовий	Червоний

На жаль, у більшості випадків структурні подання, що залучаються, не повністю інваріантні по відношенню до умов формування зображень. У зв'язку із цим на зображеннях, отриманих у різних умовах, структурні елементи виділяються по-різному, що зменшує вірогідність коректного співставлення і знижує його точність. Тим не менш, структурні методи прийнято вважати одними із найбільш правильних. Тому, виходячи із запропонованого методу сегментації за кольором на базі математичної моделі ідентифікації цифрових фотографічних зображень і знайдених у її рамках афінно- і фотометрично-інваріантних багатовидів на основі семіінваріантних характеристик кольорових зображень, було апробовано комп'ютерну технологію структурного аналізу на прикладі сучасного пакету прикладних програм *Avizo*[®], що використовує систему інваріантних ознак по кольірних сегментах зображень для більш точної ідентифікації і визначення структури різних металів та матеріалів за їх кольоровими зображеннями (п. 3.4).

3.3. Модель і алгоритм обробки кольорових металографічних 3D зображень

Вивчення структурних характеристик металів і сплавів – одна з ключових задач сучасного матеріалознавства, на основі якої базується процес створення нових та покращання властивостей вже існуючих матеріалів. Реалізація високоякісного металографічного аналізу пов'язана з відомими труднощами, що зумовлені великими фізичним навантаженням на організм дослідника (здебільшого органи зору), суб'єктивністю спостережень та невеликою швидкістю процесу дослідження. Застосування приладів, які працюють на основі лінійної механічної розгортки оптичних об'єктів вносить свої обмеження на інтерпретацію сигналів, що одержуються, а також позбавляє можливості „інтелектуального” втручання в процес вимірів.

Вивчення можливостей та оцінки сучасного програмного забезпечення для комп'ютерних засобів дослідження металографічних зображень з метою визначення якісних та кількісних характеристик металів або сплавів продиктовано науковими та виробничими задачами, які виникли в сучасному матеріалознавстві.

Металографічні зображення можуть бути представлені комбінацією різноманітних структурних складових при різному співвідношенні: фазами, які характеризуються різноманітними розмірами, формою та кольором, а також межами зерен, що можуть бути представлені або окремими лініями на зображенні, або покривати зображення безперервною сіткою. Комбінація цих структурних складових може дати дуже складну картину, для інтерпретації якої програма, що аналізує, повинна володіти чималою часткою „здорового глузду”. Тому основну вимогу до якісного аналізу зображень можна сформулювати і поставити так: на отриманій під мікроскопом фотографії необхідно виділити структурні складові, а після цього класифікувати їх за яскравістю, розміром та формою. Практична реалізація цієї задачі включає в себе такі завдання, які вже стали класичними, як-от: сегментація, фільтрування вад та виділення об'єктів з фону, визначення меж об'єктів, розпізнавання образів. Для успішного проведення металографічного аналізу основним залишається питання надійності сегментації зображення. Через складність металографічних зображень немає жодної можливості заздалегідь визначити характеристики об'єктів. Тому процес сегментації повинен бути адаптивним і по можливості виділяти на зображенні всі об'єкти, які цікавлять, незалежно від їхніх розмірів або яскравості. При цьому повинна залишатись можливість

втручання оператора в процес розпізнавання, принаймні для корекції об'єкту.

За останні роки область застосування цифрової обробки зображень, котрі несуть інформацію про фізичні процеси в металографії, значно збільшилась. Цьому сприяло застосування нових пристроїв і програм обробки в системах обробки зображень. Тим не менше, залишаються певні недоліки в роботі зазначених систем обробки інформації, і на їх усунення направленні зусилля значної частини дослідників, які працюють у цій галузі.

Гострою залишається проблема дослідження пористості різноманітних проникних матеріалів під час їх експлуатації. Дослідження пористості пов'язане з дослідженням металографічних зображень, на яких зафіксований стан пор на поверхні матеріалу. Параметри пор, зафіксовані на зображеннях, можуть використовуватись для прогнозу проникності, надійності пористих елементів.

Одним з методів прогнозування пористості у ППМ є дослідження металографічних зображень, на яких зафіксований стан поверхні ППМ на їх окремих ділянках. Ручна обробка великої кількості зображень є достатньо трудомісткою і дає можливість, в більшості випадків, отримати інформацію про сам характер пороутворення лише у площині зображення. Адаптація та застосування сучасних методів автоматизованої обробки зображень до конкретних задач в області металографії дозволяє значно підвищити ефективність роботи операторів із зображеннями та отримати з них більше інформації про об'єкти досліджуваної сцени. Зокрема, є можливість отримання інформації про тривимірну структуру об'єктів на зображеннях, базуючись на інформації двовимірних зображень чи їх серій, що дуже тяжко і навіть практично неможливо зробити вручну. Тому створення моделі і алгоритмів обробки для вирішення проблеми оцінки пористості ППМ за її двовимірними кольоровими зображеннями є актуальною та практичною задачею сьогодення.

Система отримання і обробки інформації зображень матеріалів з аналізом тривимірної структури поверхні повинна містити джерело світла. Досліджуваний зразок матеріалу освітлюється джерелом некогерентного світла. Відбите від поверхні зразка світло сприймається відеокамерою і передається для аналізу у комп'ютер. При відновленні тривимірної структури поверхні об'єктів розглядають два типи відбиття: дифузне і дзеркальне. Об'єкти з дифузним відбиттям, що вібивають однакову світлову інтенсивність у всіх напрямках спосте-

реження, є простіші для аналізу та відновлення 3D інформації зображень.

Можна підтвердити, що для дифузної моделі відбиття інтенсивність точки поверхні визначається наступним рівнянням:

$$I_{\lambda} = I_a + I_{p\lambda} k_d (N \times L) \quad (3.8)$$

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:

$$N_j = \left\{ \frac{-p}{\sqrt{p^2+q^2+1}}, \frac{-q}{\sqrt{p^2+q^2+1}}, \frac{1}{\sqrt{p^2+q^2+1}} \right\}, \quad (3.9)$$

де похідні:

$$p = \frac{dz}{dx}, \quad (3.10)$$

$$q = \frac{dz}{dy}, \quad (3.11)$$

N_j – одиничний вектор нормалі до поверхні в досліджуваній точці;

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

Нехай в приймачі маємо джерело світла з такими параметрами, що $L=(0,0,1)$, тоді (3.8) з (3.9 – 3.11) приймає вигляд:

$$I_{\lambda} = I_a + I_{p\lambda} k_d \frac{1}{\sqrt{p^2+q^2+1}}, \quad (3.12)$$

З (3.12) видно, що отримано рівняння з чотирма невідомими p , q , k_d , I_a . Для обчислення похідних вектора нормалі 3D простору необхідно визначити значення I_a і дифузного коефіцієнту k_d . Як правило, це здійснюють експериментальним шляхом.

Для виділення сегментів зображення, де відсутні зміни дифузійного коефіцієнта k_d , необхідно провести відповідну кольорову селекцію зображення. У результаті селекції отримується просторовий

сегмент зображення з нахилоною площиною з інтенсивністю $I_{\lambda k_d}$ (3.12). У зазначеному просторовому сегменті для точки, яка лежить на площині (в площині розташована пора), потрібно визначити k_d :

$$k_d I_{p\lambda} = (I_{\lambda k_d} + I_a) \sqrt{\operatorname{tg}^2 \theta + 1}, \quad (3.13)$$

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

Далі можна визначити інтенсивність фону на основі аналізу інформації про два зображення. Сформуємо штучне затінення пори досліджуваного зразка ППМ, з якого і отримується зображення.

Приймачем отримуються два зображення одного і того ж досліджуваного металографічного об'єкта з порами. Базове зображення не має затінення. Друге з отриманих зображень має штучне затінення пори. Таким чином, у системі обробки за зображенням пори із затіненням можна визначити значення інтенсивності фону цілого зображення.

Щоб отримати оцінку вектора нормалі пори, розглянемо наступний клас пор. Нехай площина, на якій є пори, розташована горизонтально на висоті z_{β} .

Для аналізу скористаємось рис. 5.1, де схематично перерізами типу $Pr(x, y)$, представлено пору, яка розташована горизонтально на висоті z_{β} . Перерізи пори зроблені площинами паралельними площині YOZ , сліди яких є на площині XOY прямі паралельні вісі OY .

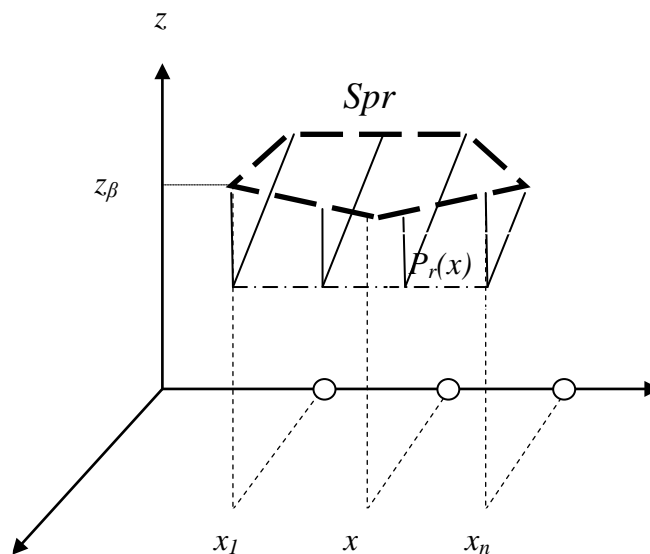


Рис. 3.1. Зображення пори за допомогою перерізів площини

Загальна аналітична модель пори з врахуванням висоти Z_β матиме вигляд:

$$Z_{\beta pr} = Z_\beta + Z_{pr}, \quad (3.14)$$

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 повністю над площиною XOY ;
- переріз тріщини $Pr(x, y)$ не залежить від x , для всіх x , що належать відрізку $[x_1, x_n]$.

У цьому випадку повинна виконуватися умова:

$$P_r(x_a, y) = P_r(x_b, y), \quad (3.15)$$

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

Перевірку цієї умови можна реалізувати програмно. З розгляду рис. 3.1 видно, що існує зона значень $[x < x_1; x > x_n]$, де умова (3.15) не виконується.

При виконанні (3.15) для точок пори, що належать перерізу $P_r(x, y)$, $x \in [x_1, x_n]$ похідна (3.10):

$$p = p(x, y) = 0, \quad (3.16)$$

Підставивши (5.16) у (5.12) та (5.13), отримаємо:

$$q = q(x, y) = \sqrt{\frac{(tg^2\theta + 1)(I_{\lambda kd} - I_a)}{(I_\lambda - I_a)^2}} - 1, \quad (3.17)$$

де $I_\lambda = I_\lambda(x, y)$.

Звідси отримаємо вираз для оцінки похідних вектора нормалі пори для класу горизонтально розташованих пор, який скорочено позначатимемо Prg .

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

$$z(x_{pr}, y_{pr}) = z_{pr} + \int_{x_0}^{x_{pr}} \frac{df(x, y_0)}{dx} + \int_{y_0}^{y_{pr}} \frac{df(x_{pr}, y)}{dy} dy, \quad (3.18)$$

де y_{cr} – відома вертикальна координата відносно поверхні площини елемента ППМ $z_{cr} = f(x_0, y_0)$ в точці (x_0, y_0) , що належить проекції підсегмента пори на площину XOY . З (5.14) видно, що:

$$Z_{prt} = f(x, y_{tnm}) = Z_{prb} = f(x, y_{bnm}) = \rho \approx 0, \quad (3.19)$$

Оцінка вертикальної координати в сегменті пори Seg_{nm} в 3D-просторі (3.18) з врахуванням (3.17), приймає таку форму:

$$z(x, y_{\sigma}) = \int_{y_{bnm}}^{y_{\sigma}} \frac{df(x, y)}{dy} dy = \int_{y_{bnm}}^{y_{\sigma}} \left(\sqrt{\frac{(tg^2\theta+1)(I_{\lambda kd} - I_a)^2}{(I_{\lambda}(x, y) - I_a)^2}} - 1 \right) dy, \quad (3.20)$$

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

$$S_{nm} = - \int_{y_{bnm}}^{y_{tnm}} \int_{y_{bnm}}^{y_{\sigma}} \frac{df(x_{nm}, y)}{dy} dy dy_{\sigma} = \int_{y_{bnm}}^{y_{tnm}} [y - y_{tnm}] \frac{df(x_{nm}, y)}{dy} dy, \quad (3.21)$$

За [36] маємо оцінку об'єму підсегмента пори Seg_{nm} :

$$V_{nm} = (b_{nm} - a_{nm}) S_{nm} = (b_{nm} - a_{nm}) \int_{y_{bnm}}^{y_{tnm}} [y - y_{tnm}] \frac{df(x_{nm}, y)}{dy} dy, \quad (3.22)$$

Нехай підсегмент пори Seg_{nm} представлено відеосигналом (3.17), тоді підставимо (3.17) в (3.22) і отримаємо оцінку об'єму підсегмента пори Seg_{nm} :

$$V_{nm} = (b_{nm} - a_{nm}) \times \int_{y_{bnm}}^{y_{tnm}} [y - y_{tnm}] \left[\sqrt{\frac{(tg^2\theta+1)(I_{\lambda kd} - I_a)^2}{(I_{\lambda}(x, y) - I_a)^2}} - 1 \right] dy, \quad (3.23)$$

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

$$\hat{V} = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M V_{nm}, \quad (3.24)$$

На краях пори обчислення об'єму доцільно зробити інтерполяцією значень об'єму. Для кожного краю пори така інтерполяція

значень об'єму є лінійною і визначається об'ємом крайнього підсегмента і нульовим значенням об'єму на кордоні пори. На початку пори інтерполяція значень об'єму визначається об'ємом V_{00} . На кінці пори інтерполяція значень об'єму 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 (3.24), що дає оцінку об'єма пори в цілому:

$$V = V_{ss} + V_{end} + \hat{V}, \quad (3.25)$$

На основі запропонованих розрахунків люмінаційної моделі зображення пористої поверхні ППМ, а також методики оцінки параметрів пори, апробовано програмне забезпечення для аналізу 3D зображень – *Avizo*[®]. Дана методика дозволяє визначити довжину, об'єм пори, а також глибину пороутворення. А оцінка зміни кольору – встановлювати фазовий склад матеріалу ППМ.

3.4. Практична реалізація обробки 3D зображень при металографічному аналізі за допомогою сучасного спеціалізованого програмного середовища *Avizo*[®]

Оскільки етап кінцевої візуалізації є найтрудомісткішим етапом формування тривимірних зображень і становить 60–80 % від загального обсягу обчислень, доцільним є використання новітніх методів і засобів, які б забезпечили суттєве спрощення процедур рендерінгу як на програмному, так і апаратному рівнях, що дасть змогу досягти потрібної динаміки реалістичних зображень у реальному часі та значно скоротити тривалість візуалізації складних проєктів, що в свою чергу призводить до більш точного аналізу властивостей готових виробів.

Саме і тому дослідження та аналіз властивостей пористих проникних матеріалів за рахунок формування тривимірних зображень у процесі реалізації етапів кінцевої візуалізації з використанням сучасного спеціалізованого програмного середовища *Avizo*[®] для отримання достовірних реалістичних структурних даних і описано у даному пункті монографії.

Серед найпрогресивніших та найпродуктивніших прикладних програм для обробки та аналізу металографічних зображень з можливістю візуалізації тривимірних об'єктів за двомірними фотографіями

є *Avizo*[®]. Це універсальний комерційний програмний додаток для наукової та промислової візуалізації та аналізу різноманітних точних даних

Avizo[®] розроблений *VSG Visualization Sciences Group* і був спочатку розроблений і створений для візуалізації та аналізу певних груп даних.

VSG Avizo[®] – програмне рішення для 3D візуалізації, обробки та аналізу наукових і виробничих даних з простим у використанні графічним інтерфейсом користувача, цілком підходить для візуалізації тривимірних даних матеріалознавства, геофізики, навколишнього середовища або будь-яких інших технічних даних.

Avizo[®] є модульним і об’єктно-орієнтованим програмним забезпеченням. Його основні компоненти – це системні модулі та об’єкти даних. Модулі використовуються для візуалізації об’єктів даних та для виконання обчислювальних операцій над ними.

Один з найбільш інтуїтивних і найбільш потужних методів для візуалізації даних 3D-зображення у даному програмному продукті є прямо-об’ємний рендерінг. Параметри випромінювання та поглинання світла віднесені до кожної точки обсягу. Моделювання пропускання світла через певний обсяг зображення дозволяє відображати дані з будь-якого напрямку погляду без побудови проміжних полігональних моделей. *Avizo*[®] здатний виконувати прямий рендерінг у режимі реального часу, навіть для дуже великого обсягу даних. Таким чином, обсяг надання інформації можете миттєво виділити відповідні області необхідних даних.

Металографічні зображення можуть бути представлені комбінацією різноманітних структурних складових при різному співвідношенні: фазами, які характеризуються різноманітними розмірами, формою та кольором, а також межами зерен, що можуть бути представлені або окремими лініями на зображенні, або покривати зображення безперервною сіткою. Тому основну вимогу до якісного аналізу зображень можна сформулювати і поставити так: на отриманій під мікроскопом фотографії необхідно виділити структурні складові, а після цього класифікувати їх за яскравістю, розміром та формою. Практична реалізація цього питання включає в себе задачі, які вже стали класичними, як-от: сегментація, фільтрування вад та виділення об’єктів із фону, визначення меж об’єктів, розпізнавання образів.

Вивчення структурних характеристик матеріалів – одна з головних задач матеріалознавства, адже на її основі базується процес створення нових та покращання властивостей вже існуючих матеріалів.

Сучасний етап розвитку матеріалознавства нерозривно пов'язаний з виготовленням пористих проникливих матеріалів різної форми і різного призначення. Сьогодні важко назвати галузь промисловості, де не використовуються ППМ. Відомо, що основні експлуатаційні характеристики виробів із ППМ (проникливість, ресурс роботи, тонкість очистки, механічна міцність та ін.) безпосередньо визначаються організацією їх пористого простору, причому вироби з ППМ з градієнтною пористою структурою володіють більш високими експлуатаційними характеристиками у порівнянні з ППМ з однорідним поророзподіленням. Тому для їх якісної та надійної роботи і проводять візуалізацію та аналіз структур ППМ.

У Луцькому НТУ під керівництвом *д.т.н., професора, заслуженого діяча науки та техніки Рудя Віктора Дмитровича* проводяться широкомасштабні та комплексні роботи з проєктування, виготовлення, дослідження, аналізу та застосування пористих проникливих матеріалів. Зокрема, для очищення технічних рідин та масел виготовляють ППМ з відходів промислового виробництва, а саме з порошку сталі ШХ15. За своїми властивостями і складом він нічим не відрізняється від компактної сталі, проте він є досить дешевим при виготовленні, що дозволяє виробництву значно зекономити на ППМ.

Утворення 3D зображення за допомогою програмного середовища *Avizo*[®] здійснюється шляхом накладання плоских поперечних розрізів відповідного діапазону по висоті готового пористого порошкового матеріалу (рис. 3.2).

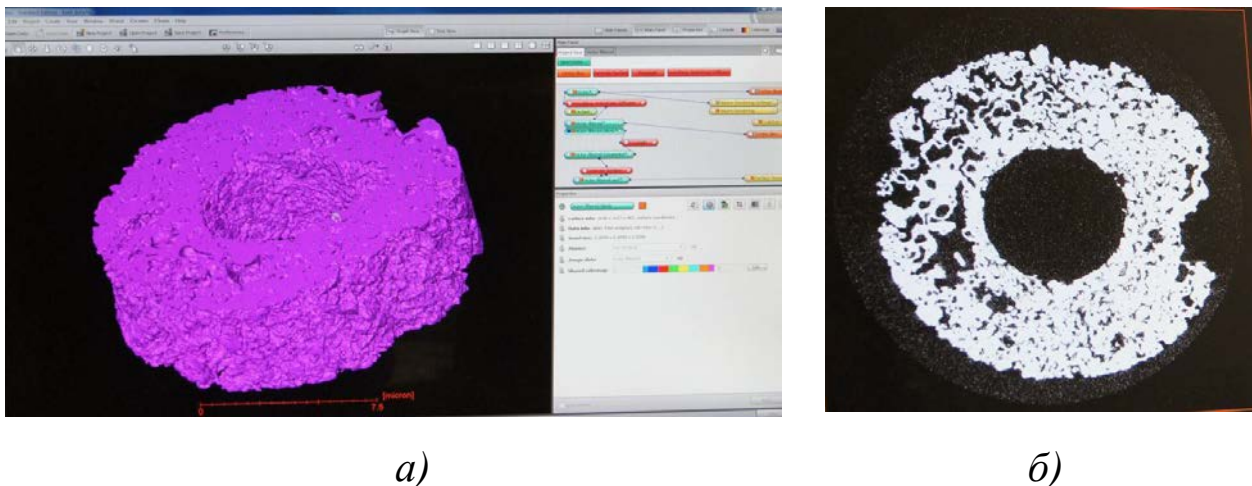


Рис. 3.2. Візуалізація отриманого зображення поперечного перерізу пористого порошкового матеріалу:
а) 3D-зображення з використанням AVIZO; б) рентгенограма

Суть роботи *Avizo*[®] ґрунтується на системному розумінні морфології та мікроструктури дослідного зразка. Ці знання мають першочергове значення при оцінці якості готового продукту. Для повної та якісної оцінки зразка необхідно визначити та дослідити основні морфологічні параметри структури, а саме:

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

На рис. 3.3 показані структури ППМ з відходів промислового виробництва, які отриманні методом сухого радіально-ізостатичного пресування. Із даного зображення видно пористість ППМ та мікропористість частинок.

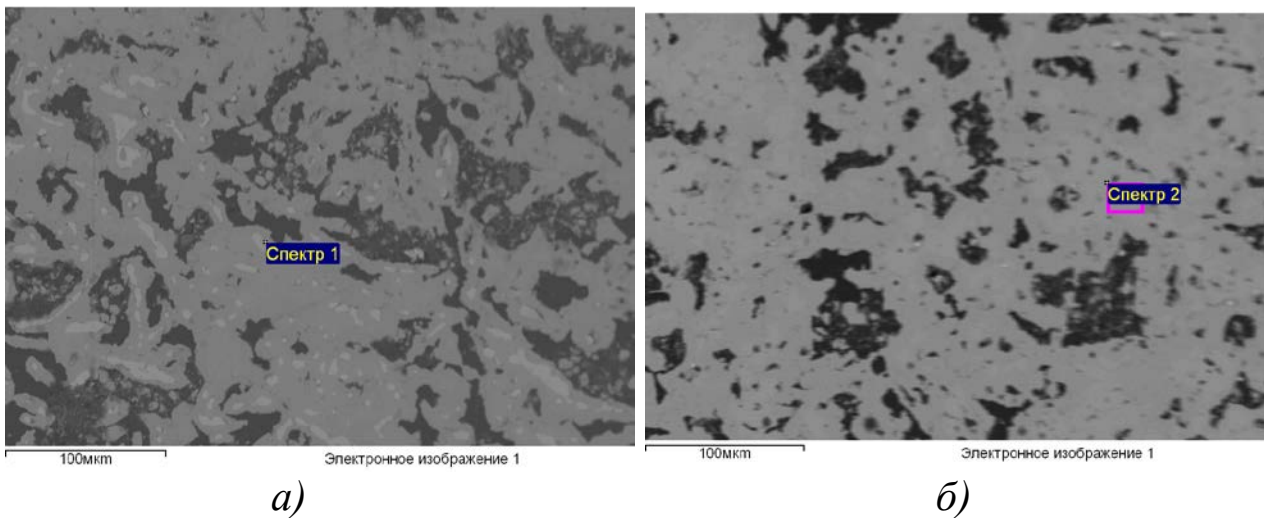


Рис. 3.3. Мікроструктура ППМ з відходів промислового виробництва:
а) розмір частинок вихідного порошку – 0,1 мм
б) розмір частинок вихідного порошку – 0,063 мм

За допомогою програмного забезпечення *Avizo*[®] ми отримали точні розміри певної ділянки зрізу (рис. 3.4). У середовищі *Avizo*[®] можливо вимірювати лінійні, кутові та полярні розміри. Також можливо проводити розрахунок об'єму, площі, периметра об'єкта.

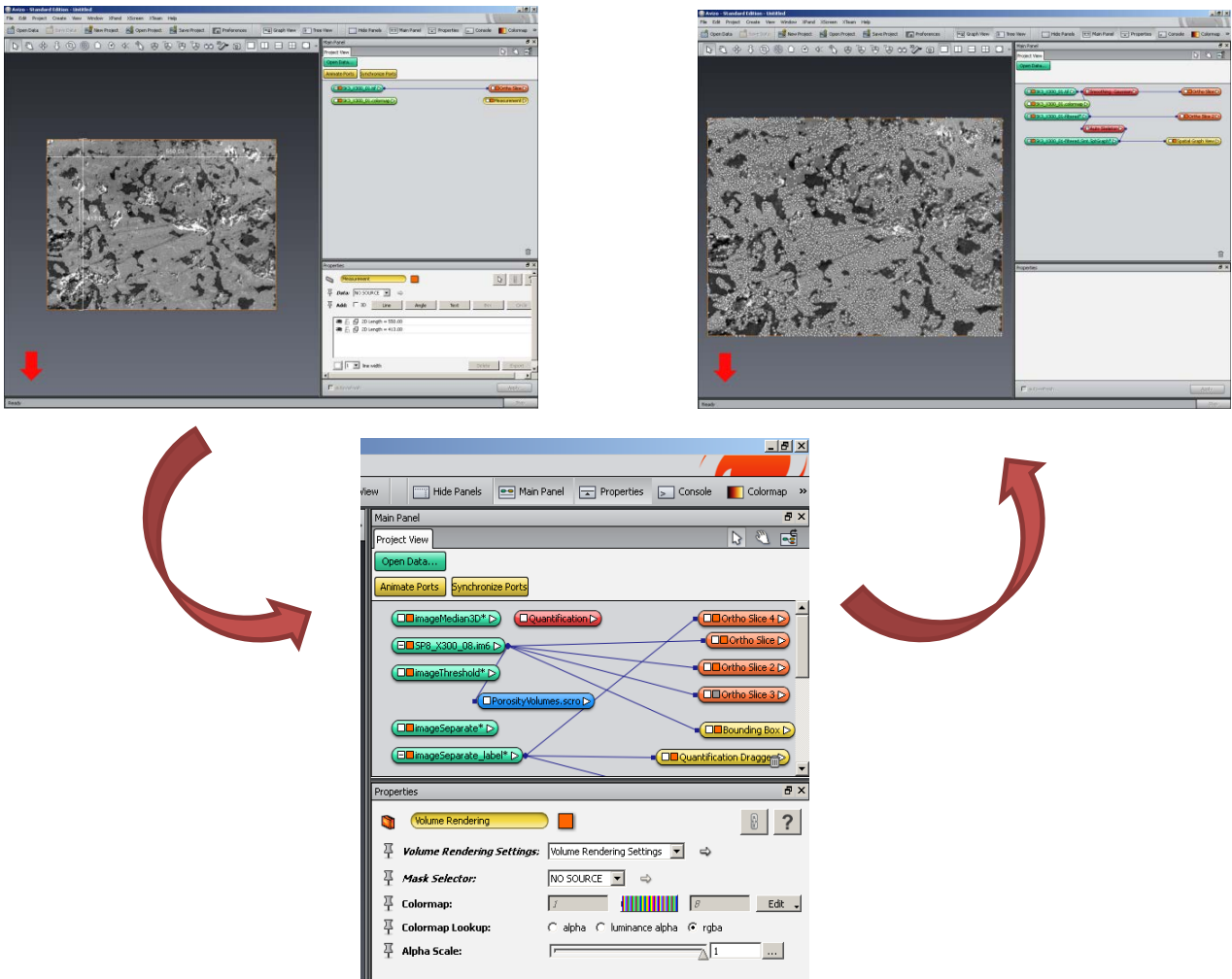


Рис. 3.4. Визначення лінійних розмірів та встановлення відповідних зв'язків між даними частини зрізу шліфу ППМ за допомогою *Avizo*[®]

Зносостійкість – важлива характеристика будь-якого виробу. Зношування поверхні призводить до зниження функціональних якостей ППМ і до втрати їх споживчої цінності. Підвищенню зносостійкості виробів сприяють як застосування матеріалів з високою зносостійкістю, так і конструктивні рішення, що забезпечують компенсацію зносу, резервування зносостійкості, загальне поліпшення умов тертя (застосування високоякісних мастильних матеріалів, захисту від абразивного впливу).

За допомогою програми *Avizo*[®] можна визначити найбільш слабкі місця ППМ, які можуть призвести до руйнування конструкції. На рис. 3.5 червоним кольором показано найбільш уразливі місця виготовленого ППМ з відходів промислового виробництва.

Вивчення можливостей та оцінки сучасного програмного забезпечення для комп'ютерних засобів дослідження металографічних зо-

бражень з метою визначення якісних та кількісних характеристик металів або сплавів продиктовано науковими та виробничими задачами, які виникли в сучасному матеріалознавстві.

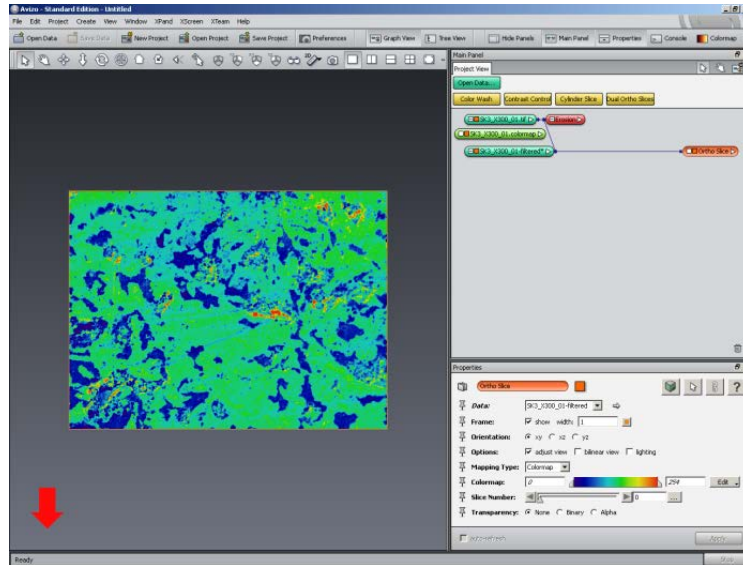
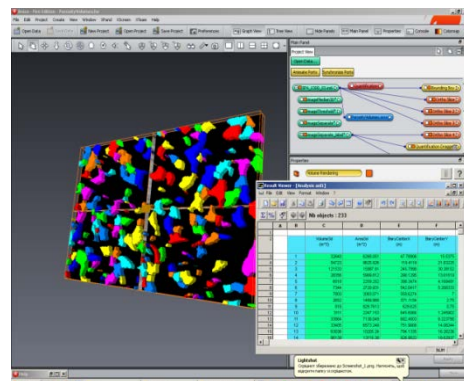
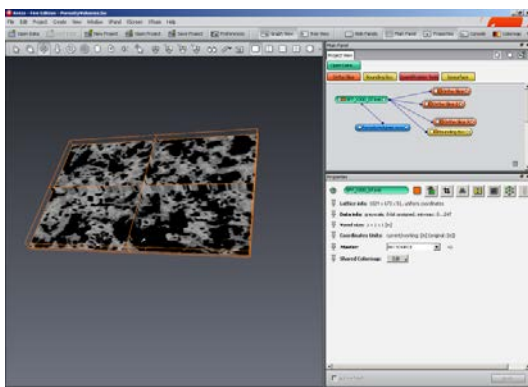
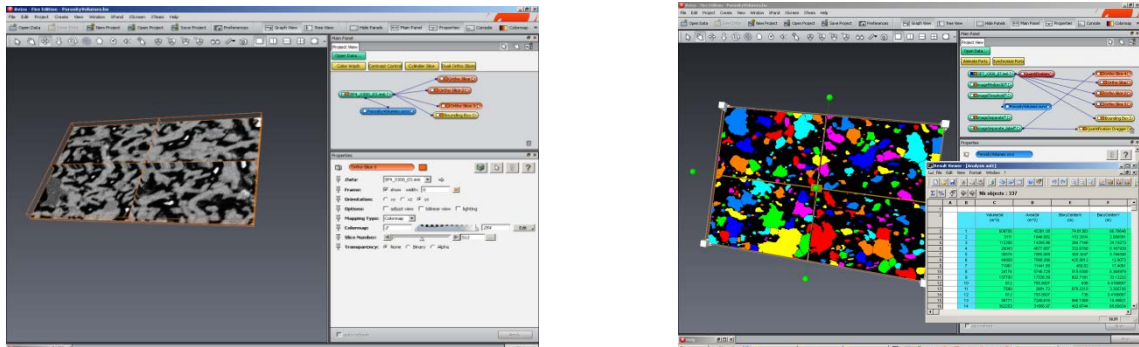


Рис. 3.5. Визначення зносостійкості та «проблемних» місць у структурі ППМ

У *Avizo*[®] металографічні зображення шліфів ППМ представлені комбінацією різноманітних структурних складових при різному співвідношенні: фазами, які характеризуються різноманітними розмірами, формою та кольором, а також межами зерен, що представлені або окремими лініями на зображенні, або покривають зображення безперервною сіткою. Комбінація цих структурних складових (площинні та просторові) для ППМ з відходів промислового виробництва представлені на рис. 3.6.



a)



б)

Рис. 3.6. Визначення та аналіз структурних складових (пористість, максимальний та мінімальний діаметри пор, максимальні та мінімальні розміри частинок) ППМ у форматі 3D-зображення:

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

Кінцевою задачею металографічного аналізу за допомогою прикладних програм слід вважати статистичну обробку отриманих у процесі вимірювання характеристик об'єктів, визначення середніх значень цих величин, а також побудова графічних залежностей для візуалізації процесу аналізу.

На рис. 3.7 наведено основні структурні характеристики пористого проникного матеріалу, які визначили за допомогою Avizo®.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
		Volume (µm³)	Area (µm²)	Perim.Cnt (n)	Perim.CntV (n)	Perim.CntZ (n)	Mean	FractVol (point)	FractPer (point)	FractVolZ (point)	Index	
1												
2												
3	1	75803	110330.71	17.40594	25.08911	25	1.430975	1	1	1	1	
4	2	200379	216893.05	281.8398	32.28124	25	1.140484	250	1	1	1	
5	3	306396	23028.98	399.5407	30.04849	25	0.8229914	210	1	1	1	
6	4	61860	9727.752	442.2950	14.91094	25	1.000944	424	1	1	1	
7	5	75480	11052.78	491.7381	14.12223	25	1.023784	488	1	1	1	
8	6	95700	13661.263	602.7786	15.22871	25	3.087143	582	1	1	1	
9	7	32130	7427.826	865.8973	8.89828	25	2.037928	659	1	1	1	
10	8	11373	4655.953	766.9014	2.876024	25	2.602024	744	1	1	1	
11	9	150348	18681.87	859.9088	20.24763	25	0.9782277	826	1	1	1	
12	10	49480	5046.162	987.7883	9.147998	25	3.638251	989	1	1	1	
13	11	81096	12089.98	61.84287	29.40482	25	1.717246	87	4	1	1	
14	12	3774	1716.381	583.8814	7.718216	25	7.627027	885	5	1	1	
15	13	963	637.2882	211.3988	6.818295	25	16.48881	212	2	1	1	
16	14	171972	19633.88	783.98	48.4	25	1.872526	787	14	1	1	
17	15	9231	2868.116	118.8874	22.40084	25	3.31547	116	1	1	1	
18	16	8943	3223.708	156.8548	37.60194	25	6.010263	153	25	1	1	
19	17	6783	2846.972	842.2288	35.97984	25	19.87689	840	25	1	1	
20	18	14178	3884.32	604.8453	35.16345	25	2.769187	388	29	1	1	
21	19	34833	8288.929	1181.464	35.52416	25	1.914058	176	30	1	1	
22	20	169180	21023.86	438.8881	81.97888	25	2.880853	429	30	1	1	
23	21	125471	16571.2	537.0258	48.47975	25	1.226786	319	32	1	1	
24	22	32836	8762.474	684.2818	48.33072	25	3.037817	680	36	1	1	
25	23	86488	8984.684	1029.46	67.30088	25	1.922522	1019	40	1	1	
26	24	95319	12782.46	325.2836	74.88971	25	1.339189	346	54	1	1	
27	25	226232	27515.83	647.8324	110.8482	25	1.100813	890	56	1	1	
28	26	30957	6738.979	588.4333	89.80178	25	2.171326	578	60	1	1	
29	27	39626	7045.875	151.1883	71.4547	25	2.520077	102	63	1	1	
30	28	59676	8827.386	17.83844	86.12025	25	1.388874	1	65	1	1	
31	29	11322	3270.883	628.8814	75.5991	25	7.488488	627	67	1	1	
32	30	11628	3286.388	981.2398	82.20176	25	3.889124	863	71	1	1	
33	31	88527	11784.77	788.7385	87.43848	25	1.538058	787	75	1	1	
34	32	82879	10763.02	985.6279	94.11881	25	1.48879	985	76	1	1	
35	33	236448	24837.6	262.7883	114.22027	25	1.882191	268	77	1	1	
36	34	126715	16486.86	537.0282	122.6613	25	1.716024	628	79	1	1	
37	35	14178	3786.188	1017.888	96.06296	25	2.847482	1025	81	1	1	
38	36	39870	5762.365	917.6388	98.11911	25	1.808985	915	86	1	1	
39	37	60288	9574.97	742.4262	108.055	25	1.978074	730	90	1	1	
40	38	262215	32741.28	82.08875	128.0853	25	1.484817	83	94	1	1	
41	39	123620	16224.57	384.8812	133.2084	25	1.888088	887	97	1	1	
42	40	67677	10232.42	886.4786	119.4820	25	1.876413	880	99	1	1	
43	41	36558	8821.842	870.8868	115.8686	25	1.548842	887	103	1	1	
44	42	7153888	24.47628	24.47628	136.1088	25	2.888888	137	116	1	1	
45	43	4347	1913.016	447.2716	118.0819	25	1.532191	444	119	1	1	
46	44	22542	4888.541	585.0724	140.882	25	1.868778	581	130	1	1	
47	45	74288	11888.43	418.4888	154.8828	25	1.882042	482	138	1	1	
48	46	87888	18888.88	488.4888	188.8888	25	1.178888	1888	144	1	1	

Рис. 3.7. Основні структурні характеристики пористого проникного матеріалу, які визначили за допомогою Avizo®.

Вмонтований механізм автоматизації в *Avizo*[®] абсолютно прозорий для користувача і дозволяє без надмірних зусиль накопичувати та аналізувати дані з багатьох точок зору, отримувати інтегральні характеристики та порозподілення (рис. 3.8, 3.9). універсальний інструмент для якісного аналізу зображення в науці та на виробництві, однаково незамінний як при аналізі лабораторних структур, так і при кількісному аналізі у відповідності з українськими та міжнародними стандартами.

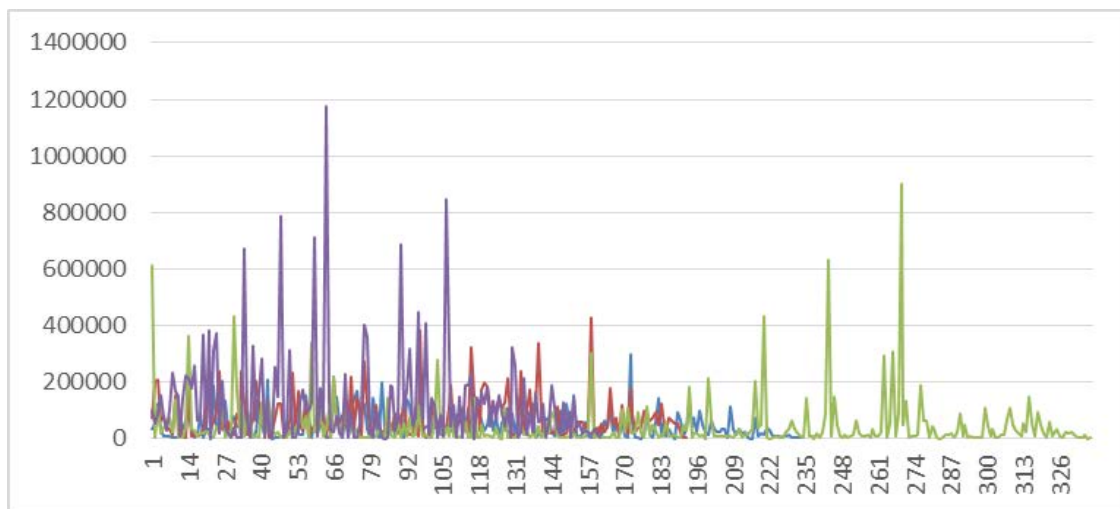
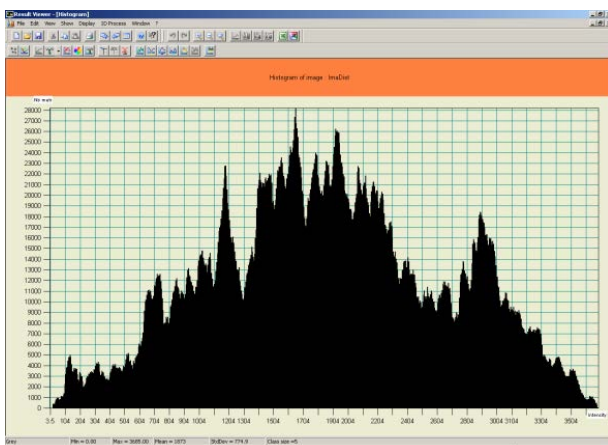
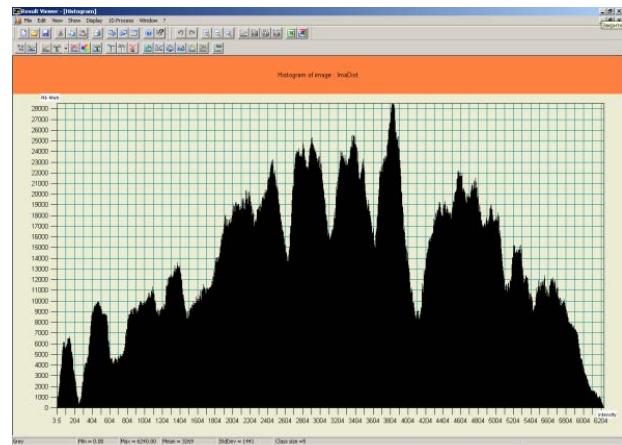


Рис. 3.8. Розподіл зміни пористості по січенню ППМ (розмір частинок вихідного порошку – 0,063 мм)



а)



б)

Рис. 3.9. Побудова та відображення лінійної гістограми пористості по січенню ППМ:

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

Сегментація зображень – одна з головних задач розпізнавання зображень в металографічному аналізі. Це своєрідне розділення зображення на декілька областей, які відрізняються один від одного елементарними ознаками, такими як яскравість, колір, текстура, форма тощо.

Сегментація дозволяє 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. Тому завдання сегментації є надзвичайно важливою задачею.

Існує велика кількість алгоритмів сегментації. Найбільш відомі серед них:

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

Усі ці алгоритми використовують один і той же принцип: угруповання в області пікселів, які розташовані поруч один з одним і мають рівні яскравості, що відрізняються не більше ніж на певне число. Це число називається *порогом сегментації*. Залежно від порога сегментації можна отримати абсолютно різні результати сегментації зображення: різну кількість сегментів, різні параметри сегментів і т.д.

Вибір порога – головна проблема алгоритмів сегментації. Використання різних порогів сегментації дозволяє отримати різноманітні результати.

Автоматичний вибір оптимального порога – дуже складне завдання. Запропонований метод дозволяє сегментувати зображення без вибору порога. При цьому формується база сегментів, що дозволяє зберігати їх атрибути для подальшого аналізу (рис. 3.10).

Застосування прикладної сучасної програми *Avizo*[®] для дослідження та комплексного аналізу структурних властивостей пористих проникливих матеріалів дало змогу отримати достовірні дані – розподіл пористості по січенню зразка. Для візуалізації пороросподілення було застосовано етап кінцевої візуалізації – рендерінг. Це дало змогу миттєво визначити комбінацію різноманітних структурних складових ППМ при різному співвідношенні: фази, а також межі зерен. Тому, на сьогодні *Avizo*[®] – найпрогресивніша та найпродуктивніша прикладна програма для обробки та аналізу металографічних

зображень з можливістю візуалізації тривимірних об'єктів за двомірними фотографіями.

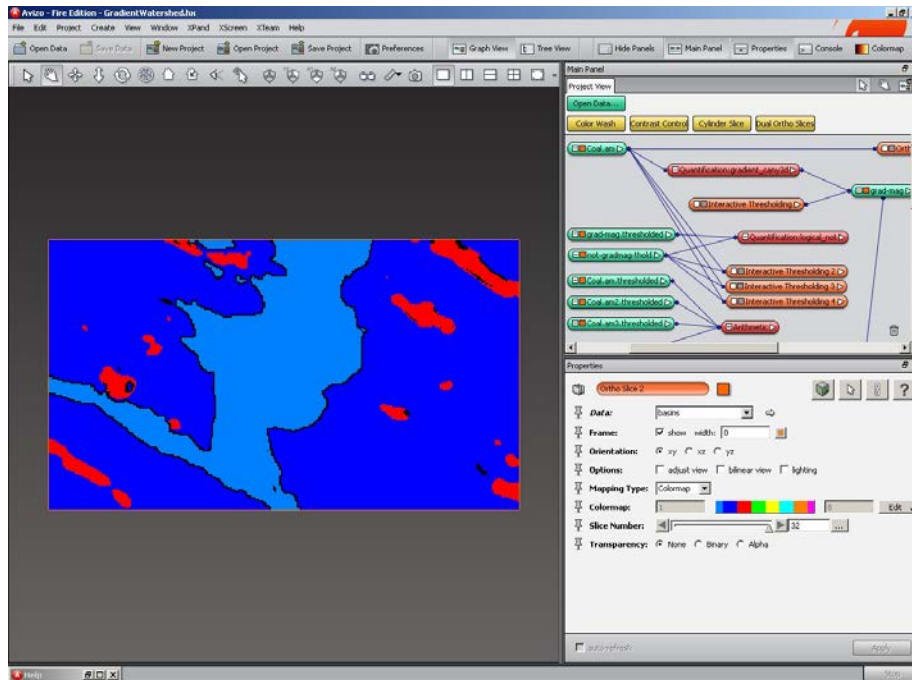


Рис. 3.10. Процес сегментації металографічного зображення зрізу ППМ у Avizo®

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ III

1. Conference on Industrial Computed Tomography: Proceedings. 19–21 Sept., 2012. University of Applied Sciences Upper Austria. Ed. by J. Kastner. Shaker Verlag GmbH. 428 p.
2. 1st International Conference on Tomography of Materials and Structures: Book of Abstracts. 1–5 July, 2013. Ed. By Veerle Cnudde. University of Ghent, Belgium. – 374 p.
3. Ludwig W., King A., Reischig P. et al. New Opportunities for 3D Materials Science of Polycrystalline Materials at the Micrometre Lengthscale by Combined Use of X-ray Diffraction and X-ray Imaging // *Materials Science and Engineering: A*. 524. – 2009. – P. 69–76.
4. Prusov E.S. Modern Methods of Metal Matrix Composit Alloys Production and New Approaches to Realization of Reinforcing Scheme // *Machines, Technologies, Materials*. – 2014. – Iss.1. – P. 11–13.
5. Maire E. et al. On the Application of X-ray Microtomography in the Field of Materials Science // *Advanced Engineering Materials*. – 2001. – Vol. 3. – Iss. 8. – P.539–546.
6. Midgley P.A., Dunin-Borkowski R.E. Electron Tomography and Holography in Materials Science // *Nature Materials*. – 2009. – Vol. 8. – P. 271–280.
7. Ohser J., Schladitz K. 3D Images of Materials Structures: Processing and Analysis. – 2009. Wiley-VCH Verlag GmbH. Berlin. – 341 p.
8. Peyrin F., Engelke K. CT Imaging: Basics and New Trends. In: *Handbook of Particle Detection and Imaging*. – Springer-Verlag, Berlin, 2012. – P. 883–915.
9. C. M. Close and D. K. Frederick. *Modelling and Analysis of Dynamic Systems*. Houghton Mifflin, Boston, 2008. – P. 235–254.
10. P.-E. Danielsson, Q. Lin, and Q.-Z. Ye. Efficient detection of second degree variations in 2D and 3D images. Technical Report LiTH-ISYR-2155, Department of Electrical Engineering, Linköping University, S- 58183 Linköping, Sweden, 2009.
11. A Erhardt, G. Zinser, D. Komitowski, and J. Bille. Reconstructing 3D light microscopic images by digital image processing. *Applied Optics*, 24: P. 194–200, 2014.

12. Wang M. Y., Williams J. J., Jiang L. et al. Three Dimensional (3D) Microstructural Characterization and Quantitative Analysis of Solidified Microstructures in Magnesium-Based Alloys // *Metallography, Microstructure and Analysis*. – 2012. – Vol. 1. – Iss. 1. – P. 7–13.
13. Путятин Е. П., Аверин С. И. *Обработка изображений в робототехнике*. – М. : Машиностроение, 2000. – 320 с.
14. Калініна Н. Ю. Ідентифікація мікроструктури металів і сплавів за допомогою інваріантних ознак їх RGB-зображень / Н. Ю. Калініна // *Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць*. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 78–85.
15. Калініна Н. Ю. Система інваріантних ознак просторових форм кольорових зображень / Н. Ю. Калініна // *Праці Таврійського держ. агротехнологічного університету*. – Мелітополь : ТДАТУ, 2011. – Вип. 4, т. 50. – С. 199–204. 17. База даних мікроструктур металів і сплавів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.microstructure.ru>.
16. Математические методы и алгоритмическое обеспечение анализа и распознавания изображений в информационно-телекоммуникационных системах: (Монография) / Васильев В. Н., Гуров И. П., Потапов А. С.; СПбГУ ИТМО, С-П.; 2008. – 46 с. – Бібліогр.: – с.22.
17. Чубов А. А. Автоматизация металлографического анализа и контроля сплавов с использованием методов цифровой обработки оптических изображений микроструктур: Дис. канд. техн. наук: 05.13.06; – Защищена 09.12.2005; Утв.09.03.2006. – М., 2007. – 359 с.: ил.- Библиогр.: с. 14-33, 49-55.
18. Перфильев Д. А. Описание структуры и алгоритм анализа микроструктурных металлографических изображений деформируемых алюминиевых сплавов: Дис. канд. техн. наук: 05.13.17; – Защищена 09.12.2005; Утв.09.03.2006. – Красноярск, 2007. – 124 с.: ил.- Библиогр.: с.5-48.
19. Myshkin N. K., Kong H., Gngoriev A.Ya., Yoon E.-S. The use of color in wear debris analysis // *Elsevier Wear*. – 2001. – v.251. – P. 1218–1226.

20. Szala J. Zastosowanie metod komputerowe analizy obrazu do ilosciowej oceny struktury materialow. – W. Politechnika Slaska, Zeszyty naukowe, 2000. – №1518. – 167 p.
21. Русин Б. П., Іванюк В. Г., Лау Г., Довгунік В. М., Корній В. В. Комп'ютерна кількісна оцінка фазового складу матеріалу за кольоровим металографічним зображенням // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – №5. – С. 77–80.
22. Andrea Basso, Hans Peter Graf, Dave Gibbon, Eric Cosatto, Shan Liu Virtual Light: Digitally- Generated Lighting For Video Conferencing Applications // ICIP 2001. – 2011. – P. 1085–1088.
23. Shintaro Watanabe, Koji Miyajima Detecting Building Changes Using Epipolar Constraint From Aerial Images Taken At Different Positions // ICIP 2001. – 2011. – P.201-204.
24. Повстяной О. Ю.. Морфологічний опис, аналіз та обробка зображень мікроструктури сопел для піскостуменевої обробки, які виготовлені методами порошкової металургії / В. А. Сичук, В. Д. Рудь, О. В. Заболотний // Наукові нотатки. – Луцьк : ЛНТУ, 2013. – Випуск 41. – С. 203–210.
25. Повстяной О.Ю. Удосконалення технології отримання пористих проникливих матеріалів з відходів промислового виробництва: Дис...канд. техн. наук. – Луцьк, 2007. –151 с.
26. Povstyanou O.Yu. «Review of the current software for computer based research in the processing of metallographic images» / O. Yu. Povstyanou, Yu.V. Kuts // Canadian scientific journal. – Issue 2. – 2014. – P. 54–63.
27. Куц Ю. В. Сучасні методи дослідження мікроструктур за допомогою комп'ютерного матеріалознавства з використанням прикладних програм / Куц Ю. В., Повстяной О. Ю. // Наукові нотатки. – Випуск 45. – Луцьк : РВВ ЛНТУ, 2014. – С. 323–329.
28. Ревенчук І. А. Математичні моделі геометричних перетворювань при візуалізації 3D об'єктів / І. А. Ревенчук // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2013. – № 11. – С. 54–58.
29. Eberly, David H.: «3D Game engine design. Practical approach to real*time computer graphics», 2nd ed., 2007, Morgan Kaufmann publishers. 2. Muller, Thomas: «Real*time rendering», 3rd ed., 2008.

30. Русин Б. П., Іванюк В. Г., Іванюк Д. В. Завадостійкий алгоритм з сферично-орієнтованою селекцією компонентів кольорового зображення // Радіоелектроніка і інформатика. – 2005. – № 2. – С. 101–106.
31. Русин Б. П., Іванюк В. Г., Корній В. В. Частотно-кольорова селекція тріщин металографічного зображення // Радіоелектроніка і інформатика. – 2006. – № 1. – С. 96–101.
32. Корній В. В. Модель і алгоритм обробки кольорових металографічних 3D зображень // Комп'ютинг (International Journal of Computing), 2008, том 7, випуск1, С. 164–170
33. С. М. Close and D. К. Frederick. Modelling and Analysis of Dynamic Systems. Houghton Mifflin, Boston, 2008.
34. 3D Imaging of Strengthening Particles in Cr-V-Mo (13НМФ) Steel Using FIB/SEM Tomography, by Władysław Osuch et al., 2012, Solid State Phenomena, P.186-200.
35. Комп'ютерна оцінка фазового складу матеріалу за кольоровим зображенням шліфів / Б. П. Русин, В. Г. Іванюк, Г. Лау, В. М. Довгунік, В. В. Корній // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – №5. – С. 77–80.
36. Романюк О. Н. Прискорене визначення дифузної складової кольору при зафарбовуванні тривимірних графічних фігур / О. Н. Романюк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2006. – № 2 (12). – С. 71–76.
37. Патент України № 63558 А МПК 7 В22F9/04. Спосіб отримання металевого порошку з шламових відходів підшипникового виробництва / В. Д. Рудь, Т. Н. Гальчук, О. Ю. Повстяной ; Заявл. 06.05.03; опубл. 15.01.04. Бюл. №1, 2004.
38. Реут О. П. Сухое изостатическое прессование уплотняемых материалов / Реут О. П., Богинский Л. С., Петюшик Е. Е. – Минск : Дэбор, 1998. – 258 с.

РОЗДІЛ IV

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Комп'ютерне моделювання – метод розв'язування задачі аналізу або синтезу складної системи, що ґрунтується на використанні її комп'ютерної моделі. Сутність комп'ютерного моделювання полягає у відшуканні кількісних і якісних результатів із залученням наявної моделі. Якісні висновки, зроблені на підставі такого дослідження, дають змогу розкривати невідомі досі властивості складної системи: її структуру, динаміку розвитку, стійкість, цілісність тощо. Кількісні висновки мають переважно характер прогнозу майбутніх чи пояснення минулих значень змінних, що характеризують систему.

Комп'ютерний напрям моделювання в науці отримав назву *обчислювального експерименту*. *Обчислювальний експеримент (computational experiment)* – це методологія дослідження, заснована на вивченні математичної (інформаційної) моделі за допомогою логіко-математичних алгоритмів на комп'ютері.

Комп'ютерне моделювання (обчислювальний експеримент) має істотні переваги перед натурним експериментом. По-перше, не потрібно проводити експеримент на реальних фізичних, економічних чи інших об'єктах, тому затрати на різні комп'ютерні експерименти набагато менші, ніж на натурні. Масштаби експериментів можна вибрати на свій розсуд, при цьому є можливість проведення багатократних дослідів із поступовими змінами вхідних даних задачі. По-друге, проведення реальних експериментів у деяких галузях науки небезпечне (екологія, ядерна фізика) або неможливе (астрофізика). По-третє, у процесі побудови математичних моделей для проведення обчислювального експерименту і під час їхнього дослідження можна проаналізувати і зрозуміти характеристики досліджуваного об'єкта.

4.1. Комп'ютерно-імітаційне моделювання нанесення захисних покриттів на циліндричну деталь

Методи та технологічні процеси порошкової металургії дозволяють широко використовувати відходи виробництва: стружку, мета-

лобрухт, обрізки, які після розплаву розпиляються в порошок із заданими фізико-хімічними і технологічними властивостями. Отримані порошки можна використовувати для виготовлення композиційних матеріалів триботехнічного та конструкційного призначення. Утилізація шліфувальних відходів підшипникового виробництва дозволяє отримувати порошки високолегованої підшипникової сталі ШХ15.

Деталі конструкційного призначення в різноманітних вузлах і механізмах піддаються зношуванню. З метою вирішення цієї проблеми актуальним є нанесення комбінованого захисного покриття, що значно підвищить зносостійкість деталей в умовах реверсивного тертя.

На даний час розглядаються питання, пов'язані з процесом взаємодії поверхонь, що контактують у процесі їхнього взаємного переміщення. Створення і підбір триботехнічних матеріалів базуються на вирішенні взаємопов'язаних задач на основі вивчення механіки тертя і фізико-хімічних явищ, що відбуваються на поверхні.

Контакт взаємодії твердих тіл спостерігається лише в окремих зонах, розміри і густина розміщення яких залежать від величини прикладеного навантаження, а також від напруженодеформованого стану контактів. Ці контакти залежать від геометричної форми мікронерівностей і механічних властивостей поверхневого шару.

Електрометалізація є одним із способів нанесення металевих покриттів на металеві і неметалеві поверхні. Цей метод широко застосовують для створення захисних зносостійких та антикорозійних покриттів на сталях.

Для нанесення корозійностійкого захисного електрометалізаційного покриття на деталях конструкційного призначення широко використовують метод вакуумно-дугового напилення та плазмоелектролітного оксидування (ПЕО), який є одним із найбільш сучасних і перспективних методів отримання на поверхні металів і сплавів захисних шарів, що мають комплекс важливих характеристик. Властивості отриманих покриттів визначаються складом електроліту і режимами процесу ПЕО.

Авторами було нанесено комбіноване захисне покриття на деталі конструкційного призначення – втулки, що працюють в умовах реверсивно-поступального тертя. Втулки були виготовлені з відходів промислового виробництва, а саме порошка сталі ШХ15 з добавлянням міді та без неї (рис. 4.1).

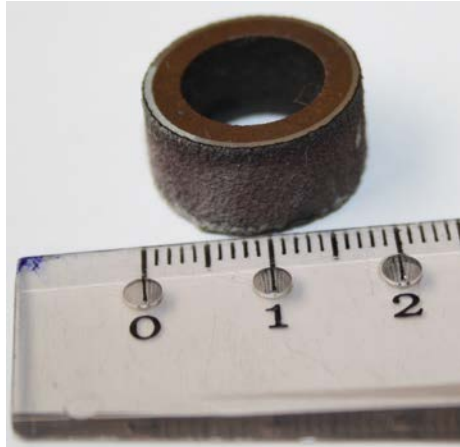


Рис. 4.1. Загальний вигляд втулок після нанесення комбіновано покриття

На цьому етапі було вивчено проблему напилення на деталь та постало питання розробити програмне забезпечення, яке буде моделювати та досліджувати процес нанесення на деталь захисного покриття. Це значно зменшить витрати часу на обчислення.

Дане програмне забезпечення такої складної проблеми повинно якомога повніше відбивати всі основні фактори й взаємозв'язки, що характеризують реальні ситуації, критерії та обмеження. У нашому випадку – це час нанесення, товщина захисного шару та вид покриття. До того ж програма має бути наскільки універсальною (щоб охоплювати якнайширше коло близьких за призначенням об'єктів), настільки й простою (щоб сприяти виконанню необхідних досліджень з мінімальними затратами).

Сьогодні існує багато комп'ютерно-імітаційних систем і ресурсів, але не всі з них можуть виконувати інженерні розрахунки. Під час розробки нашого проєкту ми зупинили свій вибір на мові програмування високого рівня, а саме *Java Script*.

Java Script – це динамічна мова програмування. Це інтерпретована мова програмування з об'єктно орієнтованими можливостями.

На стороні клієнта *Java Script* є найбільш поширеною формою мови. Сценарій повинен бути включений у систему або на який посилається HTML-документа для коду, який буде інтерпретуватися браузером. Це означає, що вебсторінка не обов'язково повинна бути статичним HTML, але може включати в себе програми, які взаємодіють з користувачем, управління браузером, і динамічно створювати контент HTML.

Java Script на стороні клієнта – механізм, що забезпечує безліч переваг в порівнянні з традиційними CGI серверних сценаріїв.

Безпосередній зворотний зв'язок для користувачів – вони не повинні чекати перезавантаження сторінки, щоб побачити, що вони забули щось ввести.

4.1.1. Моделювання товщини комбінованих захисних покриттів.

Для відтворення та порівняння захисного покриття методом ПЕО і електрометалізаційним методом у розробленому програмному забезпеченні (рис. 4.2) необхідно задати дані, які виведені на табло. Задано: внутрішній діаметр деталі, зовнішній діаметр, висоту деталі, а також характеристики, які стосуються методів напilenня:

- продуктивність напilenня
- дефектний шар
- знос поверхні
- густину матеріалу
- швидкість обертання деталі
- швидкість переміщення металізатора відносно напильовальної поверхні.

Внутрішній діаметр, мм 50	Зовнішній діаметр, мм 55	Швидкість обертання деталі, м/хв 15	Електрометалізаційне напilenня Вкл. <input checked="" type="checkbox"/> Зовнішнє напilenня <input checked="" type="checkbox"/> Внутрішнє напilenня Колір #CCCCCC
Висота (мм) 100	Продуктивність напilenня, кг/год 1	Швидкість переміщення металізатора відносно напильованої поверхні, мм/об 10	Метод плазми електролітичного окисдування Вкл. <input checked="" type="checkbox"/> Зовнішнє напilenня <input checked="" type="checkbox"/> Внутрішнє напilenня Колір #000000
Знос поверхні, мм 1	Дефектний шар, мм 1		
Густина матеріалу <input checked="" type="radio"/> Ввести вручну, г/см ³ 2.69			

Деталі досліджу Графіки Візуальна модель

Рис. 4.2. Інтерфейс програми «Комп'ютерно-імітаційне моделювання для напilenня захисних середовищ на деталь»

Після введення всіх необхідних початкових даних проводимо інтерактивне обчислення параметрів напилення (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)

Рис. 4.3. Результати обчислення параметрів напилення захисного покриття на втулку

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

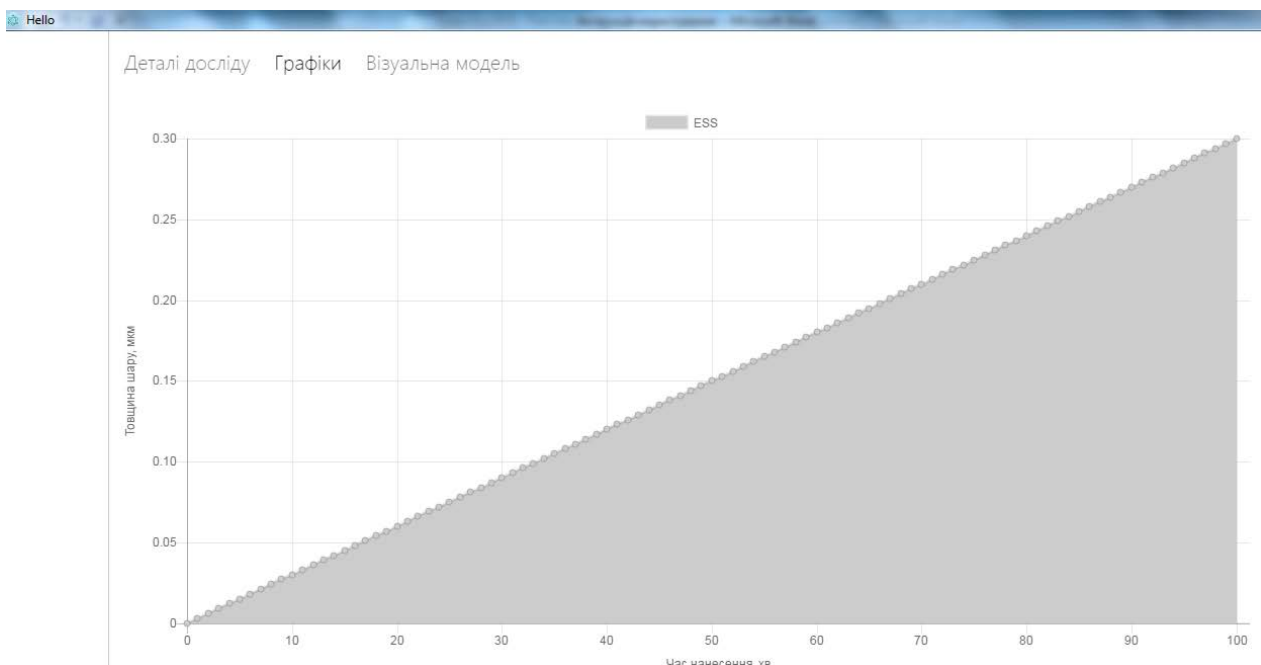


Рис. 4.4. Графічна залежність товщини електродугового напилення відносно часу нанесення

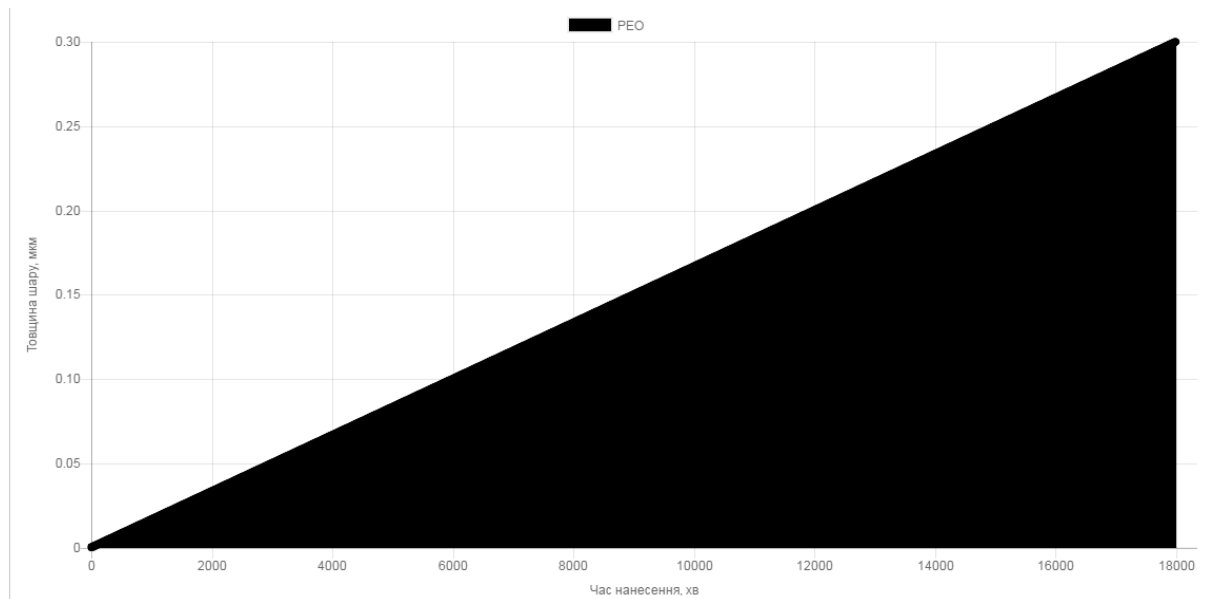


Рис. 4.5. Графічна залежність товщини плазмоелектролітного оксидування відносно часу нанесення

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

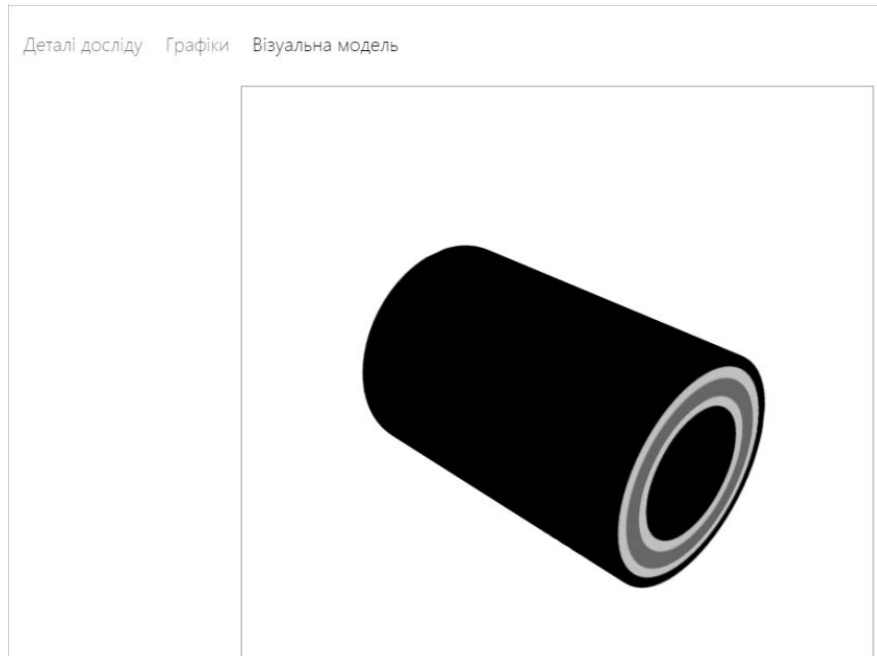


Рис. 4.6. Наочність комп'ютерного моделювання процесу нанесення покриття

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

- можна змодельовати деталь потрібної конфігурації і тільки тоді робити натурні експерименти, що значно зекономить час;
- можна моделювати напилення на різного роду деталей – втулку, вал, підшипник тощо.

4.1.2. Визначення товщини комбінованих захисних покриттів.

Однією з важливих параметрів покриття є його товщина, яку визначали на металографічному мікроскопі МИМ-10. Комбіноване захисне покриття, утворене двома видами покриттів: напиленим електродуговим і плазмоелектролітним оксидокерамічним шаром (ОКП), досліджували на спресованих втулках різного складу. Під № 1 було позначено деталь, основний матеріал якої був спресований порошок зі сталі ШХ15, а під № 2 – основа складається зі порошку ШХ15 та включень міді. Спочатку визначали товщину електродугового покриття. Для точності результатів проводили мінімум три дослідження на одному зразку. Перше значення товщини для зразка № 1 становило 83 мкм, друге – 78 мкм, третє – 86 мкм. Середнє значення товщини становить 82,8 мкм.

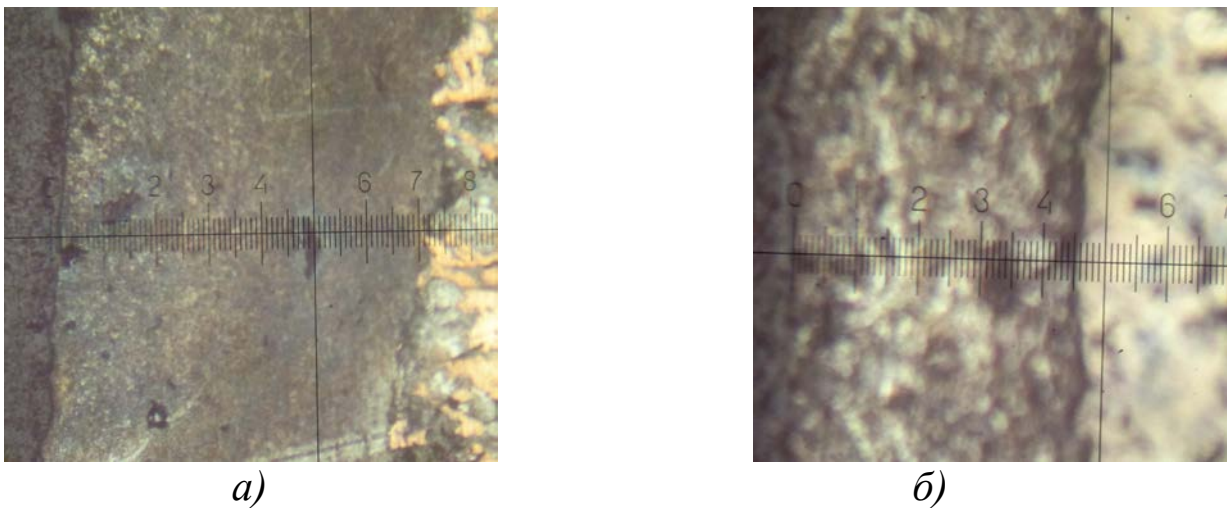


Рис. 4.7. Зображення товщини електрометалізаційного покриття:
а) зразок № 1; б) зразок № 2, $\times 100$

Аналогічно визначалась товщина зразка №2. Перше значення товщини становило 43 мкм, друге – 49 мкм, третє – 45 мкм. Середнє значення товщини становить 45,6 мкм.

Дослідження товщини другого шару покриття (оксидокерамічного) визначали аналогічним способом. Отже, середня товщина електродугового покриття становить 82,8 мкм, а середня товщина оксидокерамічного шару становить 25 мкм (рис. 4.8).

Отже, середня товщина комбінованого захисного покриття зразка №1 становить 107,8 мкм.

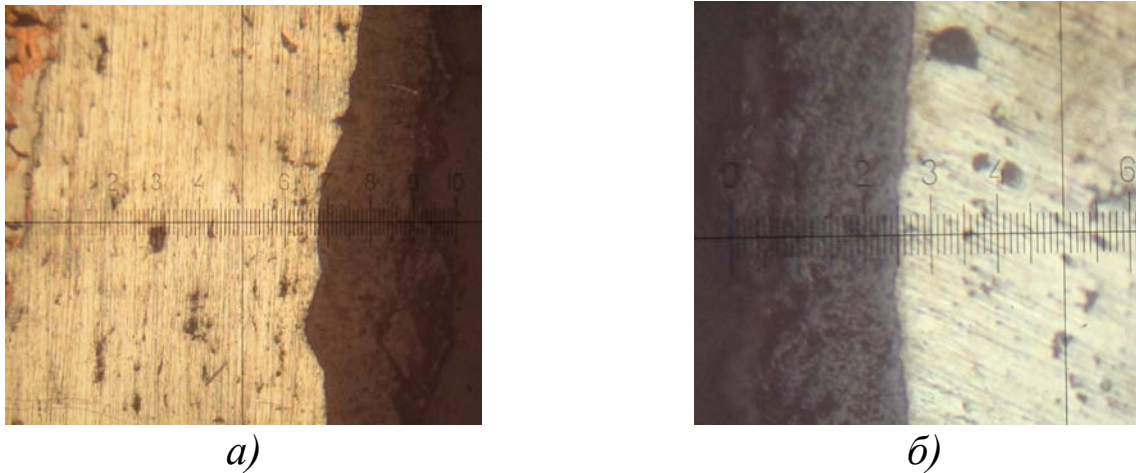


Рис. 4.8. Зображення товщини: *а)* напиленого електрометалізаційного покриття, $\times 100$; *б)* оксидокерамічного покриття, $\times 100$

Середня товщина електродугового покриття становить 45,6 мкм, а середня товщина оксидокерамічного шару становить 25 мкм (рис. 4.8).

Отже, середня товщина комбінованого захисного покриття зразка №2 становить 70,6 мкм (рис. 4.9).

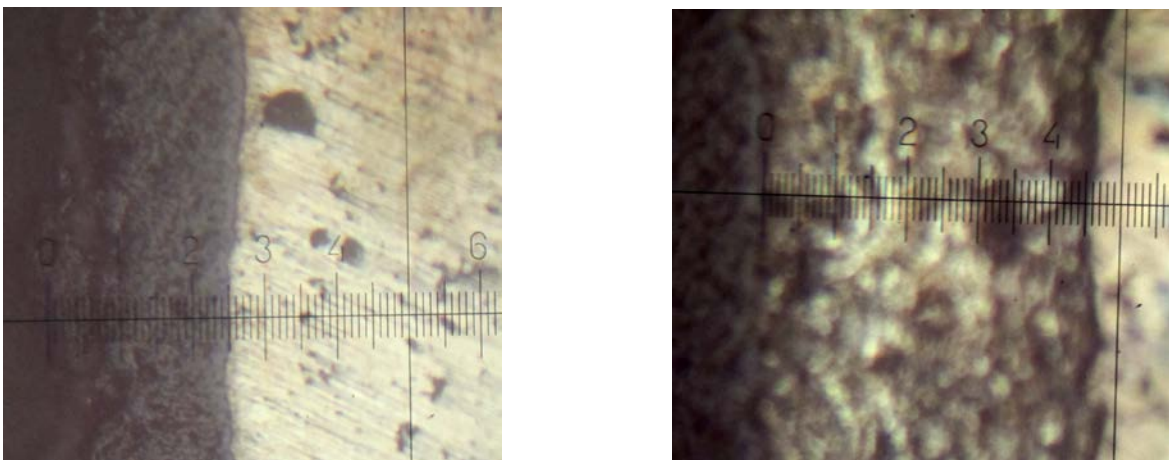


Рис. 4.9. Зображення товщини: *а)* оксидокерамічного покриття, $\times 100$; *б)* напиленого електрометалізаційного покриття, $\times 100$

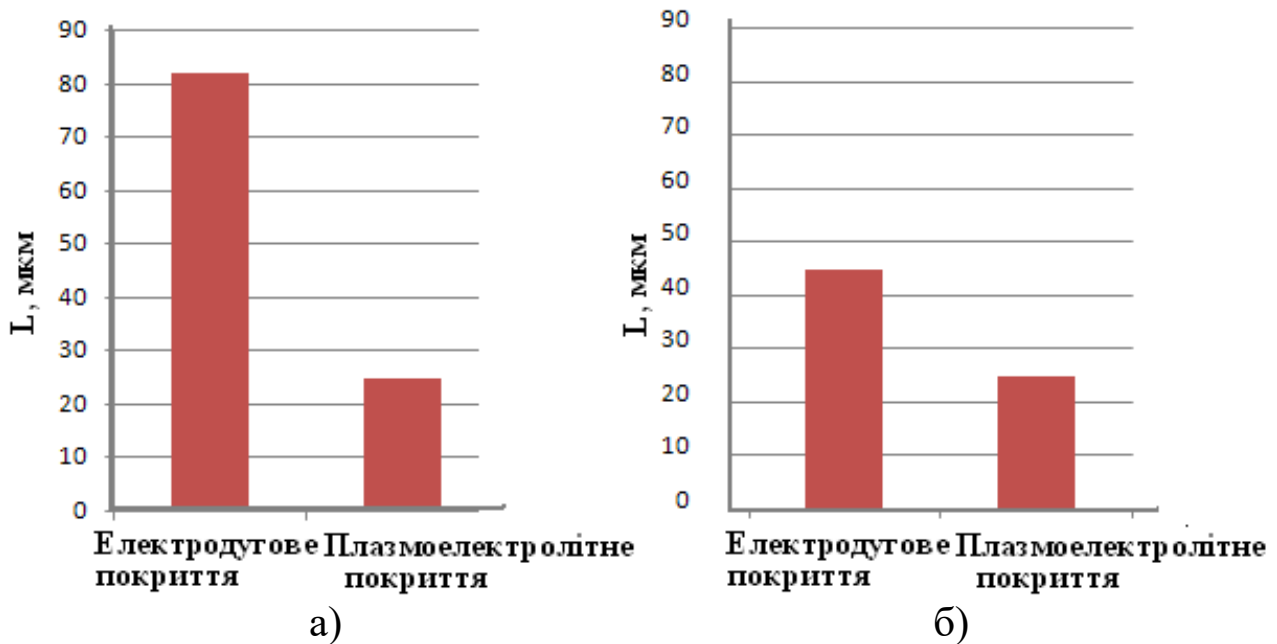


Рис. 4.10. Графічна залежність товщини покриття від методу нанесення: а) зразка № 1; б) зразка № 2

На основі отриманих даних можна зробити висновок про те, що товщина електрометалізаційного покриття залежить від складу основного металу спресованої втулки.

Отже, провівши певні експерименти, було встановлено, що на товщину покриттів суттєво впливає хімічний склад основного металу спресованої втулки.

Таким чином досліджено, що електрометалізаційне покриття утворюється приблизно у два рази тоншим для втулки, в складі якої міститься мідь.

Однак товщина електродугового покриття в лужному електроліті на обох втулках однакова.

Товщина ОКП, як зазначалось вище, яка визначає їх функціональні властивості, значною мірою залежить від режимів синтезу та складу основного металу. Визначення їх взаємного впливу є необхідним для встановлення оптимальних режимів формування покриттів.

Такий параметр встановлювали на цирконієвому сплаві складу Zr-2,5%Nb. Синтез ОКП проводили в лужних електролітах, основним складом яких є КОН та рідке скло з концентрацією відповідно 3...10 г/л та 2...15 г/л з додаванням перекису водню, гліцерину, оксиду хрому за густини струму 5...20 А/дм², що узгоджується з попередніми дослідженнями.

На основі проведених досліджень встановлені оптимальні параметри процесу синтезу і склади електролітів для отримання ОКП з пропонованими властивостями.

Було виявлено, що товщина ОКП t пов'язана з часом обробки τ : Із збільшенням часу обробки товщина покриття зростає. На рис. 4.11. показані залежності товщини оксидокерамічного покриття t від часу синтезу його τ в менш та більш концентрованих електролітах. Так за меншої концентрації електроліту за той самий час отримаємо покриття меншої товщини.

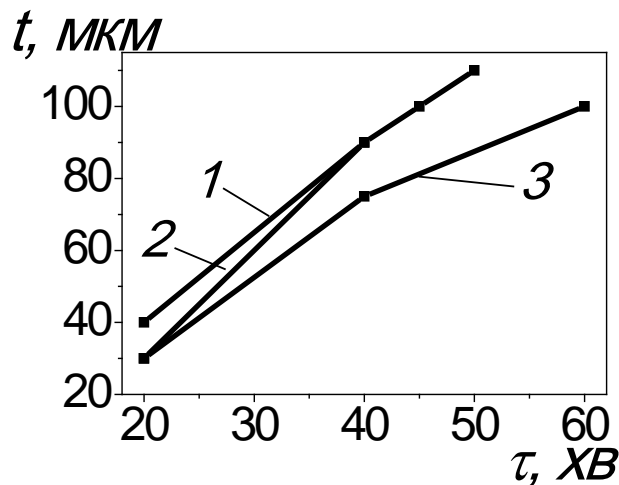


Рис. 4.11. Залежність $t - \tau$ для ПЕО сплаву Zr-2,5%Nb: 1 – 10 г/л КОН + 15 г/л р.с. + 0,1 г/л CrO₃ + 10 г/л гліцерину + 10 г/л H₂O₂;
2 – 10 г/л КОН + 15 г/л р.с. + 0,1 г/л CrO₃ + 10 г/л гліцерину;
3 – 10 г/л КОН + 15 г/л р.с. + 0,1 г/л CrO₃.

Так, покриття, синтезоване за однакового співвідношення струмів, проте в електролітах різної концентрації, росте з різною швидкістю.

Залежність росту ОКП на цирконієвому сплаві від часу синтезу є специфічною. На початку процесу синтезу в електроліті складу 10г/л КОН+15г/л р.с.+0,1г/лGrO₃ (рис. 4.12) він росте зі швидкістю 5 мкм/хв (для співвідношень струмів $I_a/I_c = 20/20$ та $10/15$ А/дм²). Покриття в такому ж електроліті за менших струмів $I_a/I_c = 10/10$ А/дм² росте повільніше (3 мкм/хв). Однак, швидкість росту покриття зменшується за подальшого синтезу приблизно в 2 рази (табл. 4.1).

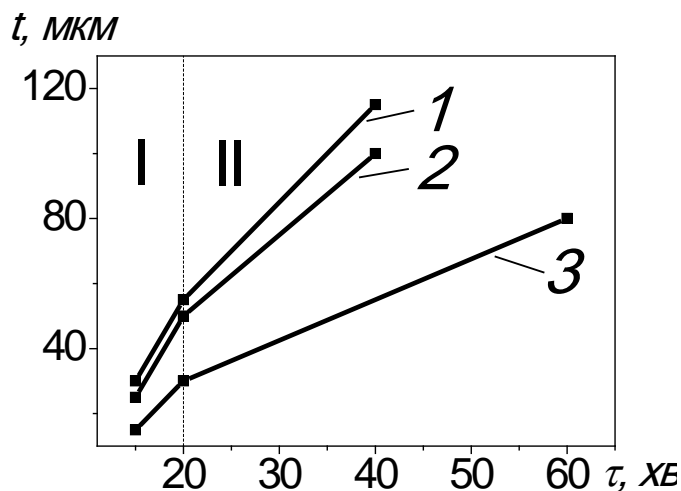


Рис. 4.12. Залежність росту покриття від часу в електроліті 10г/л КОН+15г/л р.с.+0,1г/л GrO₃ за різних густин струмів (див. табл. 4.1)

В електроліті складу 10г/л КОН+15г/л р.с.+0,1г/л GrO₃+10г/л гліцерину (рис. 4.13) досягти бажаної товщини покриття за той самий час можна значно швидше. Після 20 хв синтезу швидкість росту його уповільнюється у 2...3 рази.

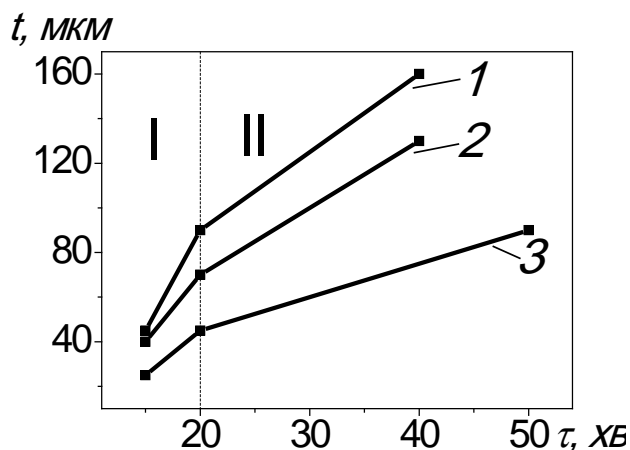


Рис. 4.13. Залежність росту покриття від часу в електроліті 10г/л КОН+15г/л р.с.+0,1г/л GrO₃+10г/л гліцерину за різних густин струмів (див. табл. 4.1)

Аналіз товщин одержаних покриттів показує, що на сплаві Zr-2,5%Nb максимальна швидкість формування іскрового покриття в електроліті складу 10г/л КОН+15г/л р.с.+0,1г/л GrO₃ становить 5 мкм/хв, а в електроліті 10г/л КОН+15г/л р.с.+0,1г/л GrO₃+10г/л

гліцерину становить 9 мкм/хв. Такі значення в подальшому спадають та відповідають найбільшим густинам струмів. Отже, щоб синтезувати покриття найбільшої товщини, потрібно поєднувати співвідношення густин струмів зі складом електроліту.

Таблиця 4.1

Швидкість росту покриття на цирконієвому сплаві

№	I_a/I_c , А/дм ²	склад електроліту, г/л						
		КОН	рідке скло	CrO ₃	КОН	рідке скло	CrO ₃	гліцерин
		10	15	0,1	10	15	0,1	10
V_{gI} , МКМ/ХВ		V_{gII} , МКМ/ХВ		V_{gI} , МКМ/ХВ		V_{gII} , МКМ/ХВ		
1	20/20	5,0	3,0	9,0	3,5			
2	10/15	5,0	2,5	6,0	3,0			
3	10/10	3,0	1,2	4,0	1,5			

Збільшення густини струму ПЕО також прискорює ріст покриття, проте для цирконієвого сплаву його швидкість нерівномірна, зменшуючись у процесі оксидування.

Діаграма швидкості росту ОКП на цирконієвому сплаві в залежності від концентрації електроліту та співвідношення густини струму за один і той самий час приведена на рис. 4.14.

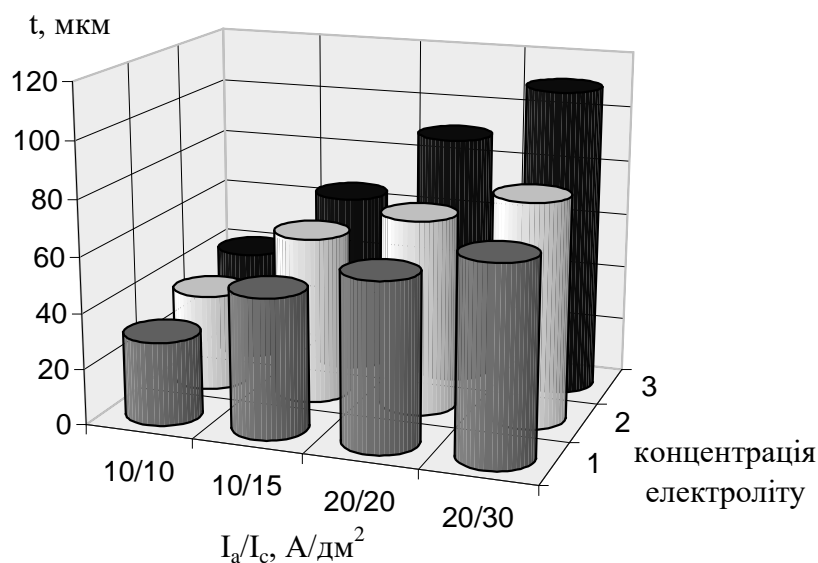


Рис. 4.14. Вплив параметрів обробки на товщину покриття, синтезованого на цирконієвому сплаві протягом 20 хв (див. табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Склад використовуваних електролітів

№	Склад електроліту, г/л				
	КОН	рідке скло	CrO ₃	гліцерин	H ₂ O ₂
1	10	15	0,1	–	–
2	10	15	0,1	10	–
3	10	15	0,1	10	10

Нижче подані режими синтезу спресованої втулки.

Таблиця 4.3

Режими синтезу втулок

Зразок, №	Хімічний склад Спресованої втулки	Електроліт	Співвідношення густини струму, А/дм ²	Час синтезу τ, хв
1	ШХ15+графіт+ мідь	3 грами/літр КОН+2 гра- ми/літр рідкого скла	20	80
2	ШХ15+графіт	3 грами/літр КОН+2 гра- ми/літр рідкого скла	20	150

Далі буде проводитись опис кожного із досліджуваних зразків окремо.

Дослідження зразка № 1.

У мікроструктурі втулки, спресованої зі сталюого порошку спостерігаються мідні включення, включення графіту та фериту (рис. 4.16 а).

Після здійснення електродугового напилення, яке проводилось за режимів, описаних у розділі II, видно, що межа напилення покриття є досить рівною і чітко видимою (рис. 4.16 б). Це пояснюється рівномірністю напилення електрометалізаційного покриття.

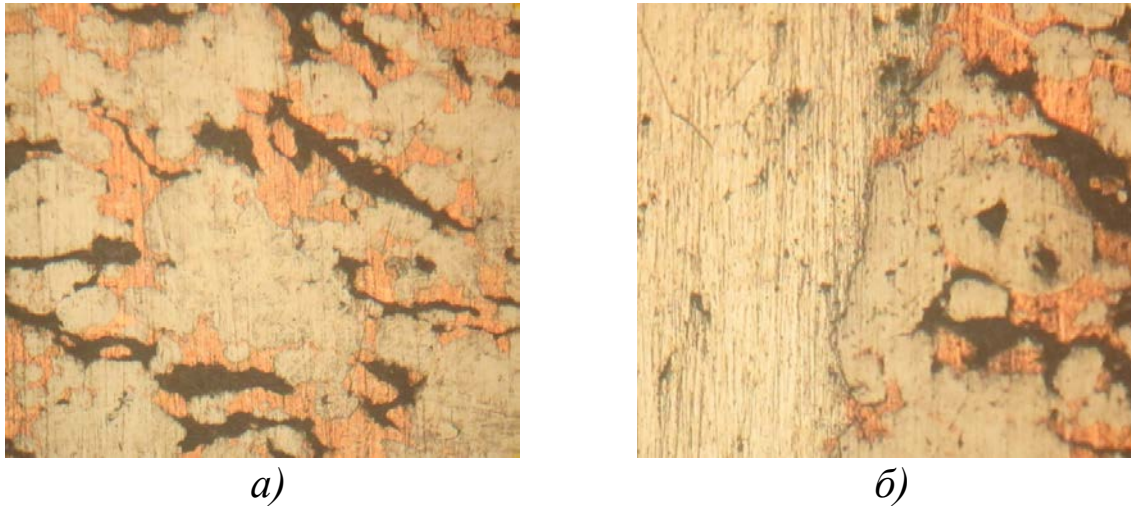


Рис. 4.16. Мікроструктура зразка:
а) до електрометалізаційного напилення; б) Мікроструктура зразка після електрометалізаційного напилення, $\times 100$

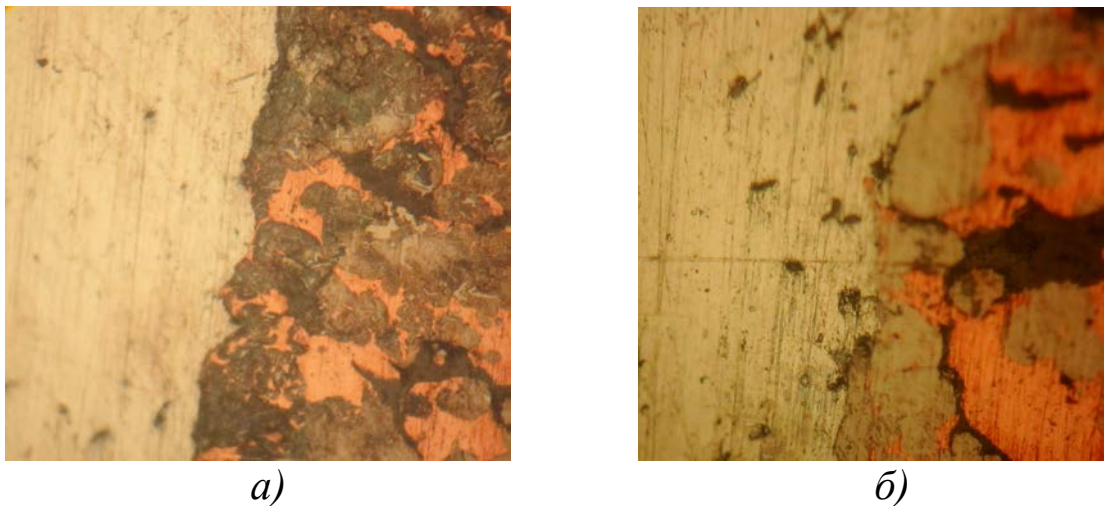


Рис. 4.17. Мікроструктура зразка після електрометалізаційного напилення:
а) $\times 250$; б) $\times 400$

При збільшенні розмірів фотографій видно рівну границю напиленого шару. Межа напилення огинає зерна основного металу. Графітові зерна розміщені нерівномірно по об'єму металу.

Структура основного металу зразка не змінилась, а структура напиленого електрометалізаційного шару стала темнішою та більш однорідною (рис. 4.18).

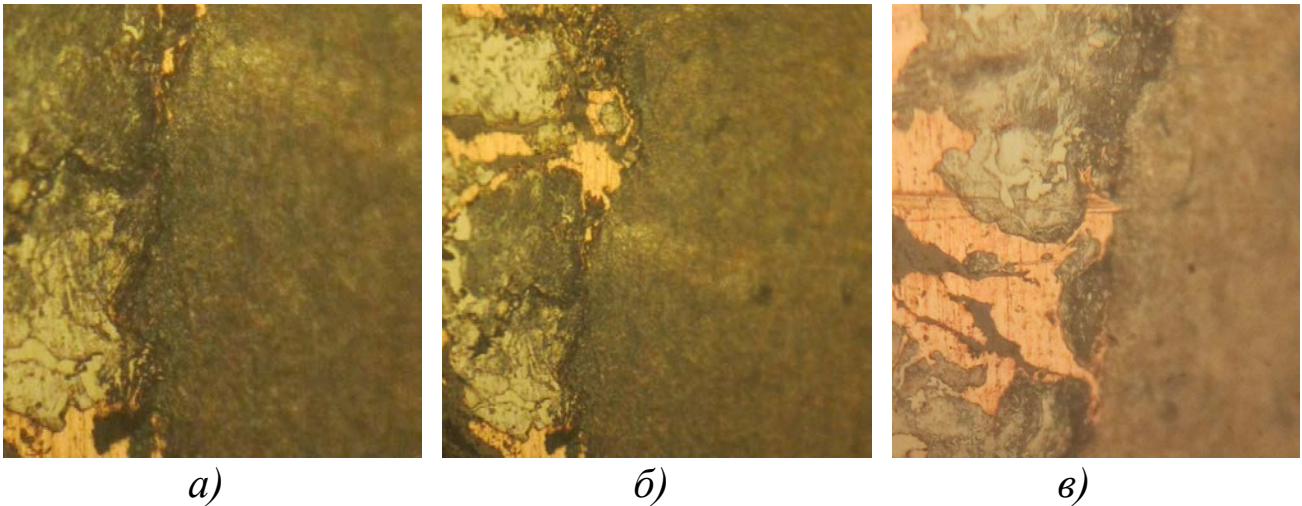


Рис. 4.18. Мікроструктура зразка після травлення:
а) $\times 100$; б) $\times 250$; в) $\times 400$

Дослідження зразка № 2.

У структурі спресованої втулки спостерігаються незначні графітові включення (рис. 4.19 а). Структура більш однорідна. Після здійснення електродугового напилення, яке проводилось за режимів, описаних у попередньому дослідженні, видно, що межа напилення покриття є досить рівною і чітко видимою (рис. 4.19 б).

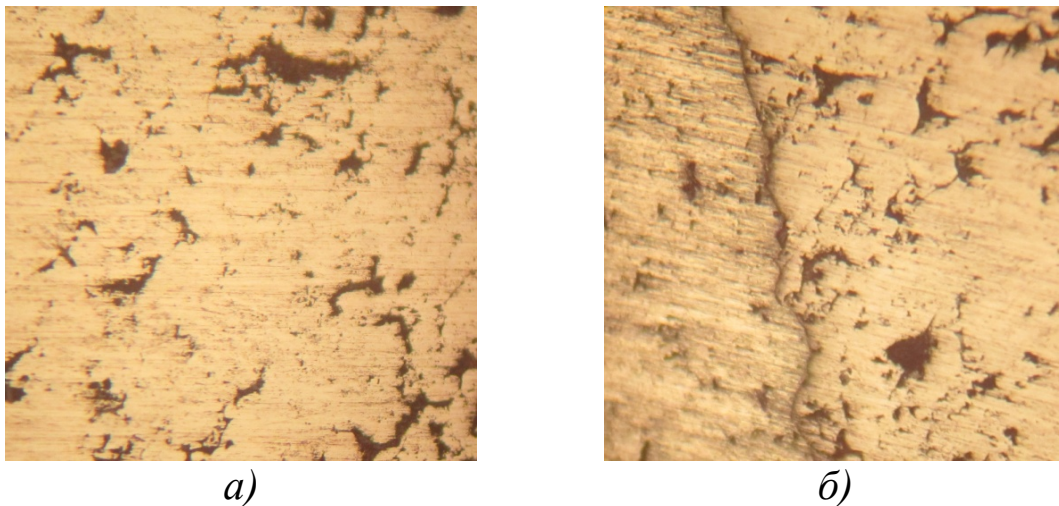


Рис. 4.19. Мікроструктура зразка:
а) до електрометалізаційного напилення;
б) мікроструктура зразка після електрометалізаційного
напилення, $\times 100$

Межа, яка розділяє напилене електрометалізаційне покриття, не широка, що говорить про досить високу адгезію такого покриття.

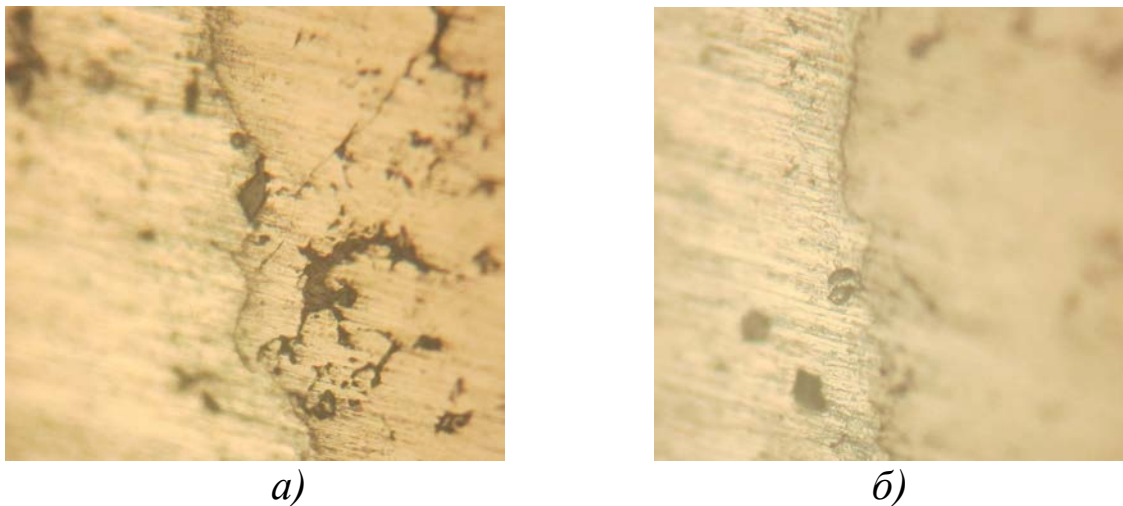


Рис. 4.20. Мікроструктура зразка після електрометалізаційного наплення:
а) $\times 250$; б) $\times 400$

Протравивши зразок 0,5...3 % спиртовим розчином плавикової кислоти HF, спостерігаємо чітку границю між покриттям і основним металом зразка (рис. 4.21). Видно також, що наплений шар біля самої границі є дещо темніший.

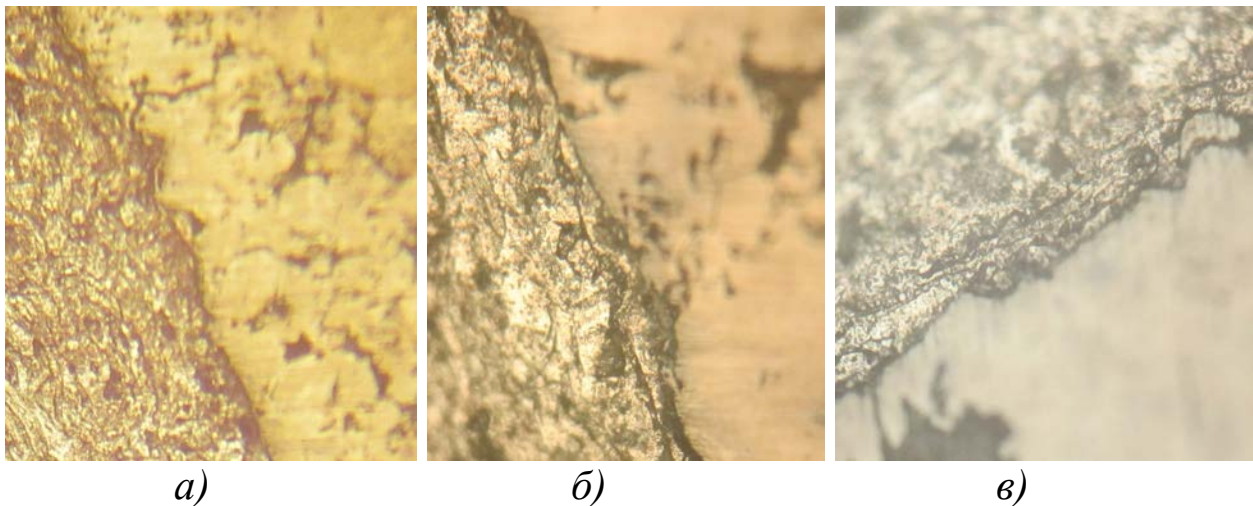


Рис. 4.21. Мікроструктура зразка після травлення: а) $\times 100$; б) $\times 250$; в) $\times 400$

При збільшенні концентрації спиртового розчину чітко видн мікроструктуру напленого електродугового покриття. Вона характерна наявністю зерен основного металу покриття Al та включеннями, які розміщені вздовж границі між основним металом зразка.

4.1.3. Дослідження мікроструктури плазмоелектролітно оксидованого електродугового покриття.

Мікроструктура плазмоелектролітно оксидованих покриттів має вигляд однорідної, характерна деякою пористістю (рисунок 4.22 а). Після травлення спостерігаємо більш чітку межу розподілу напиленого електрометалізаційного покриття і покриття, яке виникає в результаті плазмоелектролітного оксидування.

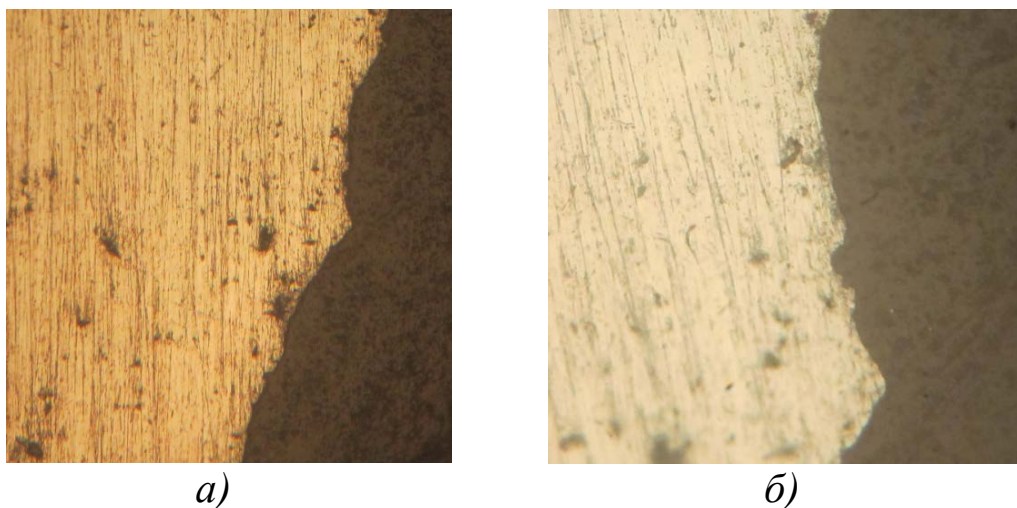


Рис. 4.22. Мікроструктура оксидокерамічного покриття на напиленому електрометалізаційному шарі:
а) $\times 250$; б) $\times 400$

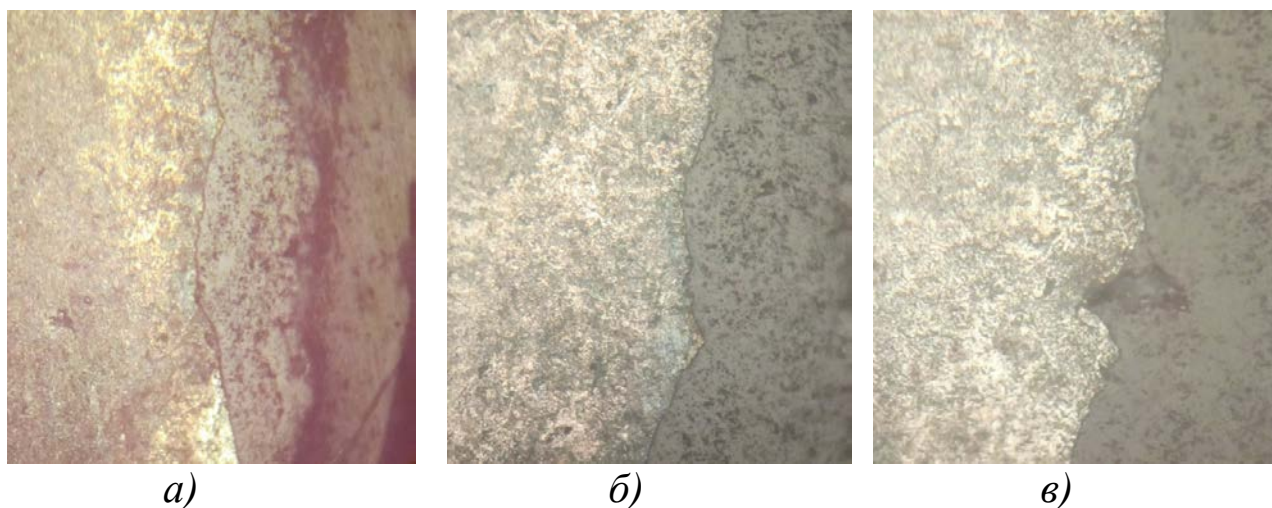


Рис. 4.23. Мікроструктура оксидокерамічного покриття на напиленому електрометалізаційному шарі після травлення:
а) $\times 100$; б) $\times 250$; в) $\times 400$

Після травлення бачимо чітку межу розподілу електрометалізаційного та оксидокерамічного покриття. Правий край електродугового покриття дещо світліший від лівого. Це зумовлено реакціями окислення, які проходять під час синтезу. Також значне підвищення температури спричиняє зміну структури напиленого покриття. Зерна на оксидокерамічному покритті не виділяються.

Мікроструктура оксидокерамічного покриття характерна своєю однорідністю. Границя між електродуговим та плазмоелектролітним покриттям чітка і рівна (рис. 4.23). Поверхня покриття виглядає об'ємною та рельєфною. Це є наслідком активних окисних процесів, які відбуваються під час синтезу, залежать від сили струму, складу електроліту та часу синтезу. Також мікроструктура характеризується відсутністю зерен.

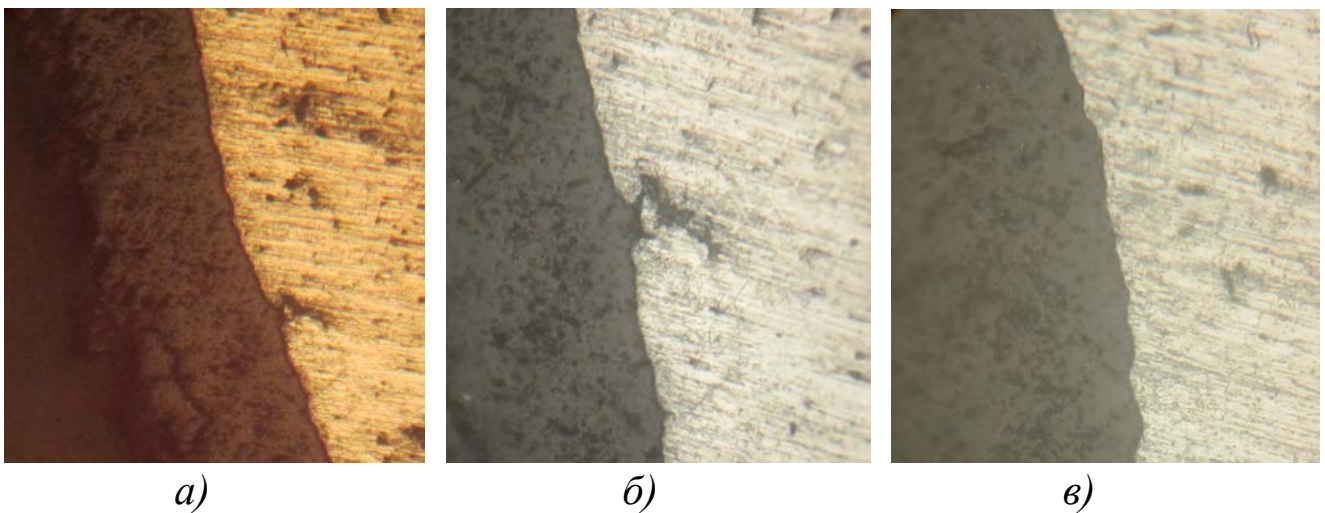


Рис. 4.24. Мікроструктура плазмоелектролітно оксидованого електродугового покриття *a)* $\times 100$; *б)* $\times 250$; *в)* $\times 400$

Після травлення ми спостерігаємо, що границя між покриттями стала чіткіше виражена. Біля неї покриття є світлішим, а край покриття значно темніший. Це пояснюється тим, що спочатку синтез відбувається дуже повільно, а після електричного пробую пришвидшується.

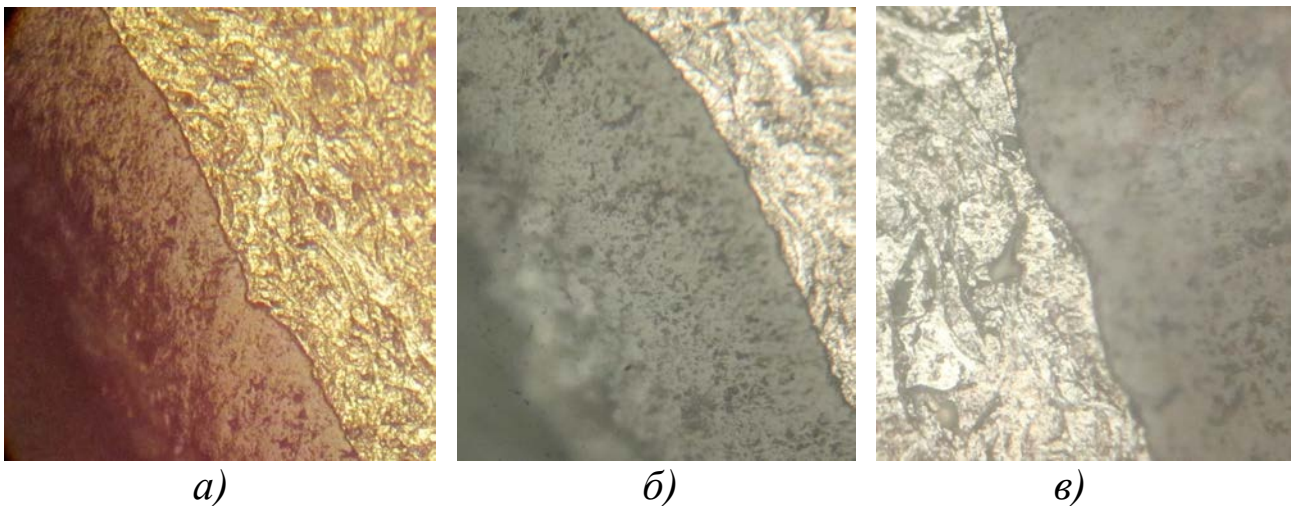


Рис. 4.25. Мікроструктура оксидокерамічного покриття на напиленому електрометалізаційному шарі після травлення: а) $\times 100$; б) $\times 250$; в) $\times 400$

4.1.4. Дослідження на пористість ОКП.

Пористість є однією з важливих характеристик покриття, від якої в значній мірі залежать його фізико-хімічні характеристики. У випадку плазмоелектролітного оксидування пористість покриття характеризується режимами синтезу і може бути оптимізованою при детальному вивченні умов синтезу на ОКП. Пористість впливає на захисні властивості покриття (його стійкість до спрацьовування і корозії, тепло та електропровідність та ін.).

Вказану характеристику досліджували методом гідростатичного зважування.

ГОСТ 18898-73 визначає послідовність і умови вимірювання пористості цим методом. Суть методу гідростатичного зважування (рис. 4.26) полягає у визначенні маси зразка зважуванням на повітрі і знаходженням його об'єму шляхом повторного зважування зразка в рідині із відомою густиною.

Густина також є важливою характеристикою покриттів. Величину її потрібно знати для визначення загальної пористості покриття.



Рис. 4.26. Гідростатичне зважування



Рис. 4.27. Зважування пікнометра з рідиною та зразком

Густина може бути визначена різними методами, але найбільш поширеним є метод пікнометрії (рис. 4.27). Щоб визначити густину твердого тіла пікнометричним методом, виконують чотири зважуван-

ня. Спочатку зважують досліджуваній зразок та сухий пікнометр на повітрі, потім зважують пікнометр, наповнений дистильованою водою (або іншою допоміжною рідиною відомої густини), в повітрі. Останнім зважуванням є зважування пікнометра, наповненого рідиною із зануреним у нього твердим тілом, у повітрі.

Значення істинної густини визначали за формулою:

$$\rho = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1 - m_4 + m_3} \rho_p, \quad (4.1)$$

де m_1 – маса сухого пікнометра;

m_2 – маса пікнометра з рідиною;

m_3 – маса сухого пікнометра зі зразком;

m_4 – маса пікнометра з рідиною та зразком;

ρ_p – густина рідини, якою заповнюється пікнометр.

Визначали істинну густину для трьох зразків. Оскільки дослідження для зразка № 1 проводили п'ять разів, то середні значення для обрахунків є такими: $m_1 = 48,11$ г; $m_2 = 147,92$ г; $m_3 = 51,58$ г; $m_4 = 149,54$ г. Отже, істинні густини, обраховані за формулою (4.1), мають наступні значення: $1,875$ г/см³, $1,864$ г/см³, $1,846$ г/см³, $1,912$ г/см³ та $1,881$ г/см³.

Середнє значення ρ для зразка № 1 було наступні:

$$\rho = \frac{51 - 48,11}{147,92 - 48,11 - 149,54 + 51,58} \times 0,001 = 1,875 \text{ г/см}^3.$$

Дослідження для зразка № 2 також проводили п'ять разів, середні значення для обрахунків є такими: $m_1 = 48,11$ г; $m_2 = 147,92$ г; $m_3 = 51$ г; $m_4 = 149,35$ г. Отже, істинні густини, обраховані за формулою (4.1), мають наступні значення: $1,993$ г/см³, $1,959$ г/см³, $1,932$ г/см³, $2,003$ г/см³ та $1,979$ г/см³.

Середнє значення ρ для зразка № 2 було наступним:

$$\rho_2 = \frac{51 - 48,11}{147,92 - 48,11 - 149,35 + 51} \times 0,001 = 1,979 \text{ г/см}^3.$$

Середні значення після п'яти досліджень зразка № 3 є такими: $m_1 = 48,11$ г; $m_2 = 147,92$ г; $m_3 = 51,44$ г; $m_4 = 149,54$ г. Отже, істинні густини, обраховані за формулою (4.1), мають наступні значення: $1,947$ г/см³, $1,923$ г/см³, $1,964$ г/см³, $1,936$ г/см³ та $1,972$ г/см³.

Середнє значення ρ для зразка № 3 було наступні:

$$\rho_3 = \frac{51 - 48,11}{147,92 - 48,11 - 149,54 + 51,44} \times 0,001 = 1,947 \text{ г/см}^3.$$

Для визначення пористості синтезованих покриттів обраховували середню густину методом гідростатичного зважування. Середню густину знаходили за формулою:

$$\rho_0 = \frac{m}{\frac{m_1 - m_2}{\rho_s} - \frac{m_1 - m}{\rho_n}}, \quad (4.2)$$

де m_1 – маса зразка покритого парафіном;

m_2 – маса зразка покритого парафіном та зваженого у воді;

m – маса зразка зваженого на повітрі;

ρ_s – густина води; ρ_n – густина парафіну на поверхні зразка.

Дослідження пористості для трьох зразків проводили п'ять разів. Середні значення для зразка № 1 є такими: $m_1 = 3,87$ г; $m_2 = 1,64$ г; $m = 3,47$ г; $\rho_s = 1$ г/см³; $\rho_n = 0,907$ г/см³. Середні густини, обраховані за формулою (4.2), мають наступні значення: $1,939$ г/см³, $1,903$ г/см³, $1,962$ г/см³, $1,915$ г/см³ та $1,956$ г/см³.

Отже середня густина для зразка № 1 має значення:

$$\rho_0 = \frac{3,47}{\frac{3,87 - 1,64}{1} - \frac{3,87 - 3,47}{0,907}} = 1,939 \text{ г/м}^3.$$

Середні значення для зразка № 2 є такими: $m_1 = 3,3$ г; $m_2 = 1,46$ г; $m = 2,88$ г; $\rho_s = 1$ г/см³; $\rho_n = 0,907$ г/см³. Середні густини, обраховані за формулою (4.2), мають наступні значення: $2,087$ г/см³, $2,043$ г/см³, $2,121$ г/см³, $2,064$ г/см³ та $2,103$ г/см³.

Середня густина для зразка № 2 має значення:

$$\rho_0 = \frac{2,88}{\frac{3,3 - 1,46}{1} - \frac{3,3 - 2,88}{0,907}} = 2,087 \text{ г/м}^3.$$

Середні значення для зразка № 3 є такими: $m_1 = 3,79$ г; $m_2 = 1,64$ г; $m = 3,33$ г; $\rho_e = 1$ г/см³; $\rho_n = 0,907$ г/см³. Середні густини, обраховані за формулою (4.2), мають наступні значення: 2,027 г/см³, 2,004 г/см³, 2,045 г/см³, 2,018 г/см³ та 2,036 г/см³.

Середня густина для зразка № 3 має значення:

$$\rho_3 = \frac{3,33}{\frac{3,79 - 1,640}{1} - \frac{3,79 - 3,33}{0,907}} = 2,027 \text{ г/м}^3.$$

Пористістю називають відношення об'єму пор в матеріалі до об'єму матеріалу, її значення визначали за формулою:

$$P_e = \frac{V_{пор}}{V_0}, \quad (4.3)$$

де $V_{пор}$ – об'єм пор у матеріалі;

V_0 – об'єм матеріалу (зразка).

Об'єм пор у матеріалі знаходимо за формулою:

$$V_{пор} = V_0 - V_{II},$$

де V_{II} – об'єм парафіну;

V_0 – об'єм матеріалу (зразка).

Об'єм зразка знайдемо за формулою:

$$V_0 = \frac{m_1 - m_2}{\rho_e} - \frac{m_1 - m}{\rho_{II}},$$

де m – маса зразка на повітрі;

m_1 – маса зразка, покритого парафіном;

m_2 – маса зразка з парафіном, зваженого у воді;

ρ_e – густина води;

ρ_{Π} – густина парафіну на поверхні зразка.

Середні значення для визначення об'єму зразка № 1 є такими:
 $m_1 = 3,87$ г; $m_2 = 1,64$ г; $m = 3,47$ г; $\rho_s = 1$ г/см³; $\rho_{\Pi} = 0,907$ г/см³.

Об'єм зразка № 1 має таке значення:

$$V_0 = \frac{3,87 - 1,64}{1} - \frac{3,87 - 3,47}{0,907} = 1,79 \text{ см}^3.$$

Середні значення для визначення об'єму зразка № 2 є такими:
 $m_1 = 3,30$ г; $m_2 = 1,46$ г; $m = 2,88$ г; $\rho_s = 1$ г/см³; $\rho_{\Pi} = 0,907$ г/см³.

Об'єм зразка № 2 має таке значення:

$$V_0 = \frac{3,3 - 1,46}{1} - \frac{3,3 - 2,88}{0,907} = 1,38 \text{ см}^3.$$

Середні значення для визначення об'єму зразка № 3 є такими:
 $m_1 = 3,79$ г; $m_2 = 1,64$ г; $m = 3,33$ г; $\rho_s = 1$ г/см³; $\rho_{\Pi} = 0,907$ г/см³.

Об'єм зразка № 3 має таке значення:

$$V_0 = \frac{3,79 - 1,64}{1} - \frac{3,79 - 3,33}{0,907} = 1,64 \text{ см}^3.$$

Об'єм парафіну на поверхні зразка можна визначити таким чином:

$$V_{\Pi} = \frac{m_{\Pi}}{\rho_{\Pi}},$$

де m_{Π} – маса парафіну;

ρ_{Π} – густина парафіну.

Об'єм парафіну на поверхні зразка №1 є таким:

$$V_{\Pi} = \frac{0,4}{0,907} = 0,44 \text{ см}^3.$$

Об'єм парафіну на поверхні зразка №2 є таким:

$$V_{\Pi} = \frac{0,42}{0,907} = 0,46 \text{ см}^3.$$

Об'єм парафіну на поверхні зразка №3 є таким:

$$V_{\Pi} = \frac{0,46}{0,907} = 0,507 \text{ см}^3.$$

Отже, середні значення для визначення об'єму пор у зразкові №1 є такими: $V_{\Pi} = 0,44 \text{ см}^3$; $V_0 = 1,79 \text{ см}^3$.

Значення об'єму пор у зразкові №1 є таким:

$$V_{\text{пор}} = 1,79 - 0,44 = 1,35 \text{ см}^3.$$

Середні значення для визначення об'єму пор у зразкові №2 є такими:

$$V_{\Pi} = 0,46 \text{ см}^3; V_0 = 1,38 \text{ см}^3.$$

Значення об'єму пор у зразкові №1 є таким:

$$V_{\text{пор}} = 1,38 - 0,46 = 0,92 \text{ см}^3.$$

Середні значення для визначення об'єму пор у зразкові №3 є такими:

$$V_{\Pi} = 0,507 \text{ см}^3; V_0 = 1,64 \text{ см}^3.$$

Значення об'єму пор в зразкові №3 є таким:

$$V_{\text{пор}} = 1,64 - 0,507 = 1,123 \text{ см}^3.$$

Середні значення для визначення пористості для зразка №1 будуть такими: $V_{\text{пор}} = 1,35 \text{ см}^3$; $V_0 = 1,79 \text{ см}^3$. Значення пористості, обрховані за формулою (4.3), мають наступні значення: 0,75 %, 0,73 %, 0,77 %, 0,76 % та 0,74 %.

Середнє значення пористості в зразкові № 1 є таким:

$$\Pi_6 = \frac{1,35}{1,79} = 0,75 \text{ \%}.$$

Середні значення для визначення пористості для зразка №2 будуть такими: $V_{пор} = 0,92 \text{ см}^3$; $V_0 = 1,38 \text{ см}^3$. Значення пористості, обчислені за формулою (4.3), мають наступні значення: 0,67 %, 0,63 %, 0,7 % та 0,65 %.

Середнє значення пористості в зразкові № 2 є таким:

$$P_{\epsilon} = \frac{0,92}{1,38} = 0,67 \text{ \%}.$$

Середні значення для визначення пористості для зразка №3 будуть такими: $V_{пор} = 1,123 \text{ см}^3$; $V_0 = 1,643 \text{ см}^3$. Значення пористості, обчислені за формулою (4.3), мають наступні значення: 0,69 %, 0,67 %, 0,71 %, 0,65 % та 0,68 %.

Середнє значення пористості в зразкові №3 є таким:

$$P_{\epsilon} = \frac{1,123}{1,643} = 0,68 \text{ \%}.$$

Метою проведених досліджень було дослідити вплив режимів синтезу на водопоглинання ОКП. Об'ємне водопоглинання зразка визначається експериментально і розраховується за формулою:

$$W_0 = \frac{W_m \times \rho_0}{\rho_{\epsilon}}, \quad (4.4)$$

де W_m – водопоглинання за масою;

ρ_{ϵ} – густина води;

ρ_0 – середня густина матеріалу.

Водопоглинання зразка за масою визначимо за формулою:

$$W_m = \frac{m_{\epsilon} - m_c}{m_c} \times 100 \text{ \%},$$

де m_{ϵ} – маса водо насиченого зразка;

m_c – маса сухого зразка.

Оскільки дослід проводили п'ять разів, то середні значення для зразка №1 будуть такими: $m_{\epsilon} = 3,04 \text{ г}$; $m_c = 3,04 \text{ г}$. Отже, значення водопоглинання зразка №1 за масою буде таким:

$$W_m = \frac{3,04 - 3,03}{3,03} \times 100 = 0,33 \%$$

Середні значення для зразка №2 будуть такими: $m_g = 1,73$ г;
 $m_c = 1,71$

Отже, значення водопоглинання зразка №2 за масою буде таким:

$$W_m = \frac{1,73 - 1,71}{1,71} \times 100 = 0,58 \%$$

Середні значення для зразка №3 будуть такими: $m_g = 2,95$ г;
 $m_c = 2,94$ г. Отже, значення водопоглинання зразка №3 за масою буде таким:

$$W_m = \frac{2,95 - 2,94}{2,94} \times 100 = 0,3 \%$$

Після п'яти проведених досліджень трьох зразків середні значення для об'ємного водопоглинання зразка №1 є такими: $W_m = 0,33 \%$; $\rho_0 = 1,939$ г/см³. Значення водопоглинання, обраховані за формулою (4.4) були такими: 0,64 %, 0,62 %, 0,66 %, 0,63 % та 0,65 %.

Середнє значення водопоглинання зразка №1 є таким:

$$W_0 = \frac{0,33 \times 1,939}{1} = 0,64 \%$$

Середні значення для об'ємного водопоглинання зразка №2 є такими: $W_m = 0,58 \%$; $\rho_0 = 1,939$ г/см³. Значення водопоглинання, обраховані за формулою (4.4), були такими: 1,22 %, 1,2 %, 1,23 %, 1,19 % та 1,21 %.

Середнє значення водопоглинання зразка №2 є таким:

$$W_0 = \frac{0,58 \times 2,087}{1} = 1,21 \%$$

Середні значення для об'ємного водопоглинання зразка №3 є такими: $W_m = 0,3 \%$; $\rho_0 = 2,027$ г/см³. Значення водопоглинання, обра-

ховані за формулою (4.4), були такими: 0,62 %, 0,64 %, 0,58 %, 0,6 % та 0,61 %.

Середнє значення водопоглинання зразка №3 є таким:

$$W_0 = \frac{0,3 \times 2,027}{1} = 0,61 \%$$

У таблиці 4.4 та на рис. 4.28 приведені результати показників істинної густини, середньої густини, пористості та об'ємного водопоглинання для досліджуваних зразків.

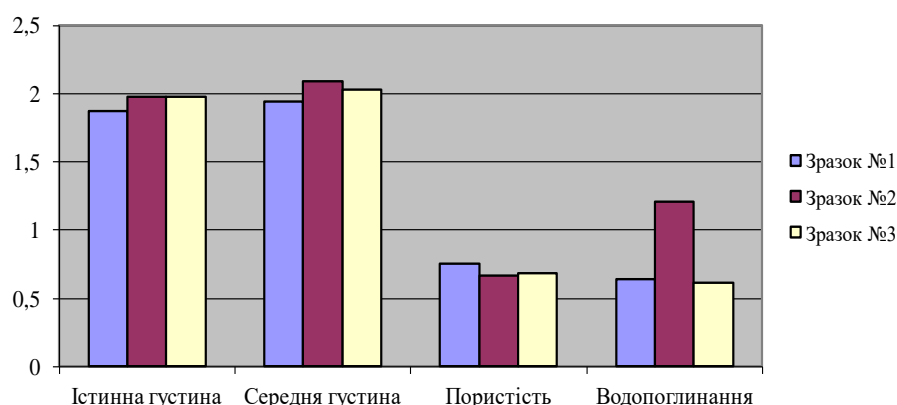


Рис. 4.28. Результати істинної густини, середньої густини, пористості та водопоглинання

Таблиця 4.4

Результати дослідів

№ п/п	Істинна густина ρ г/см ³	Середня густина ρ_0 г/см ³	Відкрита пористість P_B %	Водопроникність W_0 %
Зразок №1	1,875	1,939	0,75	0,64
Зразок №2	1,979	2,087	0,67	1,21
Зразок №3	1,947	2,027	0,68	0,61

Отже, експериментально встановлено, що найвище значення пористості мають ОКП, синтезовані в електроліті 10 г/л КОН та 15 г/л рідкого скла за часу синтезу 20 хв. Найвище значення істинної густини, середньої густини та водопоглинання та найменше значення товщини та пористості показали ОКП, синтезовані в електроліті 3 г/л КОН та 2 г/л рідкого скла. Найменше значення істинної та середньої

густин показали ОКП, синтезовані в електроліті 10 г/л КОН та 15 г/л рідкого скла за часу синтезу 20 хв.

Розроблений метод комп'ютерного моделювання дозволив не тільки визначити розподіл пористості та інших характеристик порошкового проникного матеріалу, але й встановити взаємозв'язок між технологічними режимами їх отримання і експлуатаційними характеристиками.

Радіальна швидкість дає можливість керувати розподілом пористості у багат шаровому ППМ та дозволяє аналізувати фактори, які сприяють неоднорідності розподілу густини.

4.2. Моделювання пористої структури у ППМ

Науково-технічний прогрес у машинобудуванні, приладобудуванні, авіаційній, хімічній та інших галузях промисловості в значній мірі визначається досягненнями у створенні та застосуванні нових матеріалів: пористих, проникних, композитів, кераміки тощо. На даний час частка нових матеріалів у загальній структурі конструкційних матеріалів складає 30 % та має тенденцію до приросту.

Велика потреба на сучасному етапі розвитку техніки у ППМ, з однієї сторони, та успішне їх використання у конструкціях для кожної конкретної області застосування, з іншої, зумовлюють наявність різних видів таких матеріалів із широким діапазоном експлуатаційних властивостей. Переваги пористих проникних матеріалів з металевих порошоків над неметалічними полягають ще й у їх відносно високій фільтруючій здатності, високій продуктивності, можливості багаторазової регенерації, легкої механічної обробки та великому терміні служби.

Для отримання фільтруючих ППМ з високою проникливістю необхідно використовувати порошки з великим розміром частинок, у той же час як для отримання високої тонкості очистки необхідно використовувати порошки з малим розміром частинок. Ці протиріччя зумовлюють необхідність пошуку нових технологічних прийомів і методів, які б дозволили створювати такі структури ППМ, що забезпечать найбільш оптимальне поєднання експлуатаційних характеристик.

Крім того, слід відзначити, що практика застосування нових матеріалів на основі металевих порошків показує, що реалізація в повному об'ємі їх міцнісних і експлуатаційних характеристик потребує суттєвого збільшення рівня прогнозування фізико-механічних властивостей матеріалів та розробки нових методів моделювання, який включає комплексний аналіз процесів формування матеріалів.

Як свідчить вітчизняний та світовий досвід останніх років, успіх розв'язання проблем, які виникають при створенні нових матеріалів, вимірюється якістю та ступенем прогнозування процесів та явищ, які супроводжують ці технології. Втім, прогнозування та моделювання в порошковій галузі потребують подальшого вдосконалення теоретичних уявлень та їх втілення у вигляді якісних методів та алгоритмів, які реалізуються за допомогою сучасних обчислювальних середовищ, програм та візуальних пакетів із застосуванням відповідної комп'ютерної техніки.

Саме тому розробка сучасного програмного забезпечення для прогнозування, моделювання, аналізу та дослідження структури пористої структури багат шарового фільтруючого матеріалу з металевих порошків, який отриманий методом сухого радіально-ізостатичного пресування, є одним з актуальних питань сучасного матеріалознавства.

Сучасні проблеми технологій деформаційної переробки пористих середовищ сьогодні вирішуються на основі застосування комп'ютерного моделювання. Його впровадження стало можливим завдяки істотному прогресу в розумінні основних особливостей поведінки порошкових матеріалів у процесі їх компактування, ущільнення та пресування, досягнутого в останні десятиліття.

4.2.1. Моделювання пористої структури в одношарових фільтруючих порошкових матеріалах.

Для практичного створення потрібної пористої структури ППМ, яка буде відповідати оптимальному поєднанню експлуатаційних характеристик, необхідно встановити взаємозв'язок між технологічними режимами їх отримання і експлуатаційними характеристиками.

На основі континуальної теорії пластичності пористого тіла, виготовленого методом радіально-ізостатичного пресування, розроблена теоретична методика прогнозування розподілу пористості за перерізом ППМ. При цьому був отриманий результат, який має відносно

простий аналітичний вигляд, що дозволяє аналізувати фактори, які сприяють неоднорідності розподілу густини пористого тіла.

Поведінку пористого пустотілого фільтрувального матеріалу описано визначальними співвідношеннями наступним чином: припускаємо, що пористий пустотілий циліндр (рис. 4.29) перебуває під дією радіального обтиснення, яке прикладене на його зовнішній поверхні $r=R_2$. Його внутрішня поверхня також циліндрична з радіусом $r=R_1$ є нерухомою. Завдяки опору, який чинить металевий порошок радіальному переміщенню, у ньому виникають напруження $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\varphi$.

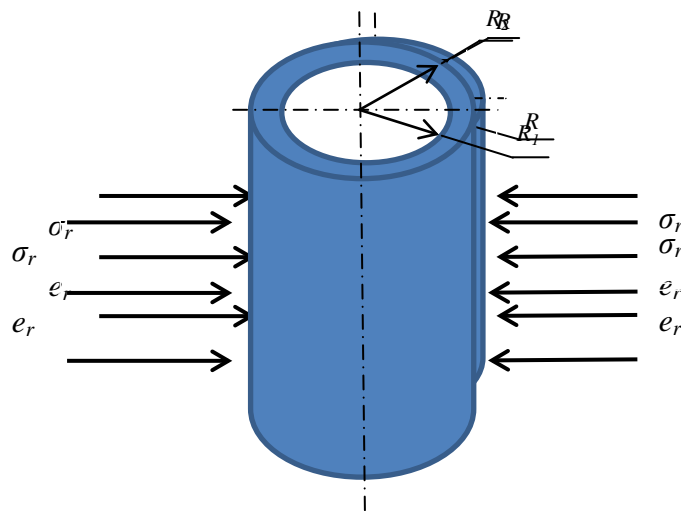


Рис. 4.29. Геометрична модель процесу прикладання напружень на пористий циліндр

Внаслідок певних розрахунків та спрощень набувають конкретного вигляду вирази для середнього тиску та інтенсивності девіатора напружень:

$$p = \frac{1}{3} \left(\frac{e_r(\sigma_r + 2\sigma_\varphi) - e_\varphi(2\sigma_r + \sigma_\varphi)}{e_r - e_\varphi} \right) \quad (4.5)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{e_r^2 + (e_r - e_\varphi)^2 + e_\varphi^2}}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{e_r - e_\varphi} \quad (4.6)$$

Далі використовується теорія пластичності ізотропних пористих тіл, фізичні рівняння якої, подано у вигляді:

$$\frac{p^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\varphi} = (1 - \theta)\sigma_m \quad (4.7)$$

$$\frac{p}{\tau} = \frac{\psi \epsilon}{\varphi \gamma} \quad (4.8)$$

Матеріальні функції пористості φ, ψ приймаються у вигляді $\varphi = 1, \psi = \frac{a}{\theta}$. Відмітимо, що прийнятий вигляд цих функцій не суперечить відомим експериментальним даним, а з іншого боку сприяє отриманню простого розв'язку, який легко аналізується.

Підставляючи значення φ та ψ та знаючи, що пористість відповідає рівномірному її розподілу, отримуємо:

$$p_{\text{rad}} = -\sqrt{1 - \theta_0}\sigma_m \sqrt{\frac{1}{\epsilon} + \frac{a}{\theta_0}} \quad (4.9)$$

Після нескладних математичних розрахунків та знаючи, що значення пористості θ вже є наступним наближенням до істинного поля густини, отримуємо рівняння уточненого поля густини:

$$\theta = \frac{a(\sigma_m^2 - \tau^2)}{p^2 + a\sigma_m^2} \quad (4.10)$$

Після підстановки у нього отриманих значень для p, τ, p_{rad} , маємо:

$$\theta = \frac{\alpha \left(\sigma_m^2 - \left(-\frac{\sqrt{\frac{18R_1^4}{\epsilon} + \tau^4}}{1 + \epsilon\chi} p_{\text{rad}} \right)^2 \right)}{\left(\frac{\epsilon\chi}{1 + \epsilon\chi} p_{\text{rad}} \right)^2 + a\sigma_m^2} \quad (4.11)$$

Для конкретних обчислень перш за все необхідно знайти величину θ_0 , яка є нульовим наближенням до пористості. Із цією метою використовуємо закон збереження маси:

$$\theta_0 = 1 - \frac{R_{2i}^2}{R_2^2} (1 - \theta_i) \quad (4.12)$$

Тут і надалі R_{2i} – це початковий радіус заготовки перед радіально-ізостатичним навантаженням, θ_i – початкова пористість.

Параметр a визначається із експерименту на всебічне стиснення, апроксимуючи криву «тиск–пористість» у вигляді $P = \frac{a}{\theta}$.

Параметр σ_m доцільно вважати рівним тиску, який відповідає зменшенню пористості на 25 % від початкового значення.

Вигляд розрахункової залежності пористості наведений на рис. 4.30. Як видно з розрахунків та з проведення практичного дослідження, пористість змінюється при зміні радіуса циліндричної заготовки ППМ (пустотілого циліндра), який виготовлений методом радіально-ізостатичного пресування.

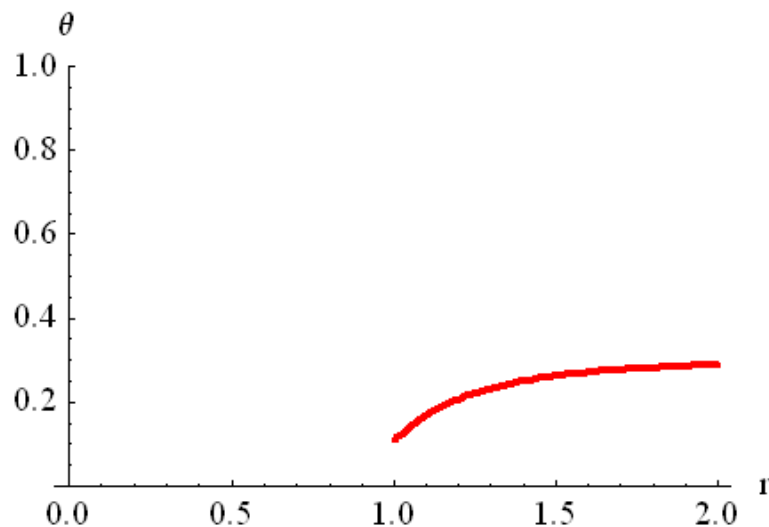


Рис. 4.30. Залежність пористості θ від радіусу r (см) заготовки

Моделювання пористої структури конкретного ППМ з порошку сталі ШХ15 здійснювалося в пакеті прикладних програм *MatLab*. За описаною вище методикою авторами було розроблено програмне забезпечення на мові програмування C++ (програма «FiltrN»), що і дало змогу змоделювати процес радіально-ізостатичного пресування з заданою пористістю ППМ. Оскільки фільтр має форму витягнутого кругового циліндра (рис. 4.31), то моделювання проводилось для на-

ступних параметрів технологічного процесу: діаметр оправки – 40 мм, діаметр армованої еластичної оболонки – 80 мм.

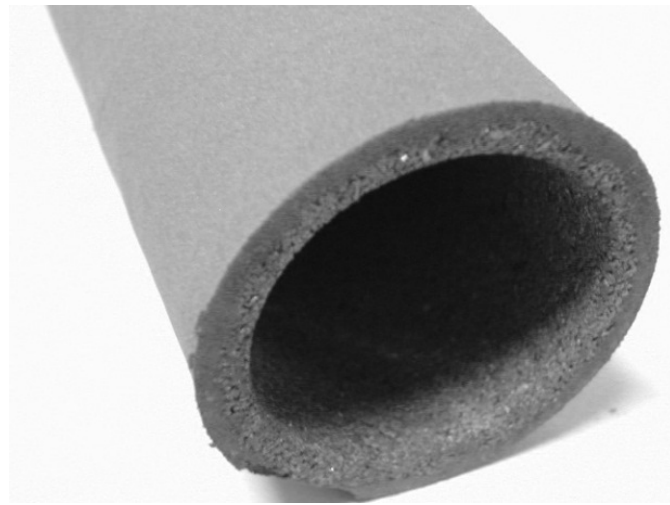


Рис. 4.31. ППМ з порошку сталі ШХ15 $\text{Ø}40 \times 220$ мм виготовлений методом сухого радіально-ізостатичного пресування

Порошок засипається в простір між оправкою та еластичною оболонкою. Відносна насипна густина порошку ШХ15 становила 20 %, тобто початкова пористість становить 0,8.

Для початку роботи з програмою необхідно ввести початкові дані для моделювання. Для цього редагуємо файл *Begin.txt*, вводячи необхідні параметри для моделювання багатошарового фільтра (рис. 4.32).

```
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
```

a)

```

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)

Рис. 4.32. Ввід початкових даних (а) та процес обчислення (б) структурних характеристик ППМ

Визначений за результатами наших розрахунків розподіл пористості та радіальної швидкості при моделюванні радіально-ізостатичного пресування ППМ показаний на рис. 4.33.

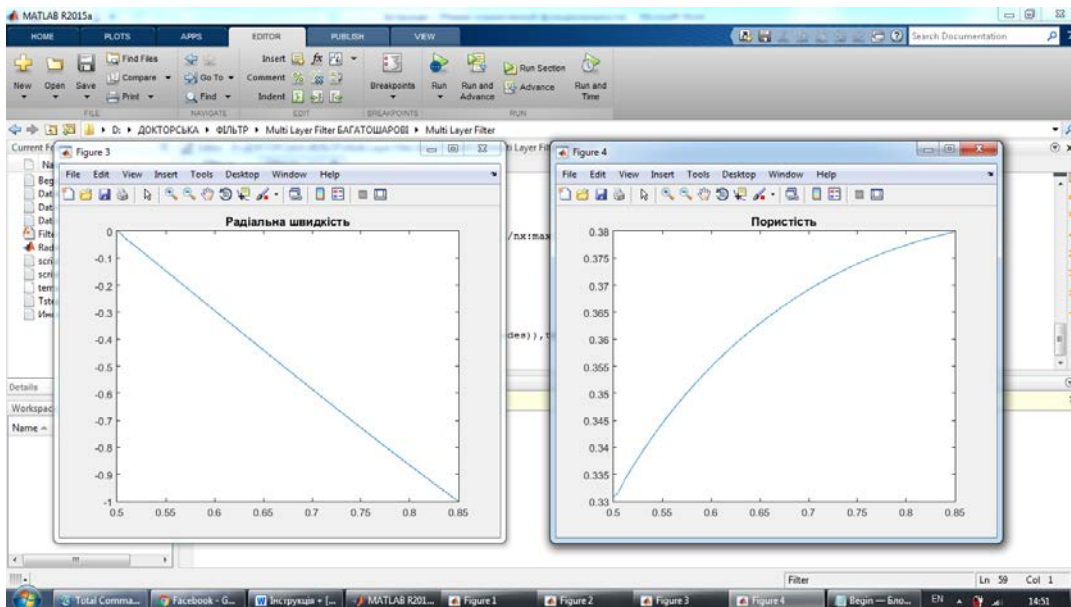


Рис. 4.33. Виведення графічних залежностей впливу радіальної швидкості та розподілу пористості при моделюванні радіально-ізостатичного пресування ППМ

Розроблений метод комп'ютерного моделювання дозволив не тільки визначити розподіл пористості та інших характеристик порошкового проникного матеріалу, але й встановити взаємозв'язок між технологічним режимом їх отримання і експлуатаційними характеристиками.

Радіальна швидкість дає можливість керувати розподілом пористості у ППМ та дозволяє аналізувати фактори, які сприяють неоднорідності розподілу густини.

4.2.2. Моделювання пористої структури в багат шарових фільтруючих порошкових матеріалах.

Перспективними методами отримання ППМ (пористих проникливих матеріалів), є методи, спрямовані на створення ППМ з градієнтними властивостями, у яких розміри та кількість пор змінюються в напрямку фільтрації. У таких ППМ тонкість фільтрації буде визначатися шаром з мінімальним розміром пор, проникливістю є інтегральна величина, яка визначається пористою структурою всього матеріалу а забруднювач у процесі фільтрування розподіляється по всьому об'ємі фільтруючого елемента, що дозволяє збільшити ресурс роботи фільтра.

Для практичного створення потрібної пористої структури ППМ, яка буде відповідати оптимальному поєднанню експлуатаційних характеристик, необхідно встановити взаємозв'язок між технологічним режимом їх отримання і експлуатаційними характеристиками. Авторами на теоретичних засадах континуальних моделей поведінки пористого середовища при холодному пресуванні за допомогою методу скінчених елементів розроблена теоретична методика прогнозування розподілу пористості по перерізу фільтра. На основі розробленої методики було створене програмне забезпечення, яке дозволяє за допомогою зручного графічного інтерфейсу здійснювати розрахунок параметрів багат шарових фільтрів при радіальному ізостатичному пресуванні.

Пластична складова поведінки матеріалу описується визначальними співвідношеннями узагальненої моделі Cam – Clay, у формі, поданій в роботах М. Б. Штерна, В. Д. Рудя та ін.

$$\frac{(p + p_0)^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\phi} = (1 - \theta) \left(\frac{\sigma_0}{1 + m} \right)^2 \quad (4.13)$$

де $p = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$ – шарова складова тензору напружень,

$\tau = \frac{1}{\sqrt{3}}\sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)}$ – інтенсив-

ність дівіатору напружень;

θ – пористість;

σ_0 – напруження течії нестисливої твердої фази. Інші змінні та параметри, які містяться в (4.13), виражаються за допомогою співвідношень:

$$\psi = \frac{2(1-\theta)^3}{3\theta}, \quad \varphi = (1-\theta)^2 \quad (4.14)$$

$$p_0 = m\sigma_0\sqrt{(1-\theta)\psi} \quad (4.15)$$

$$\sigma_0(\omega) = a + b\omega^\alpha \quad (4.16)$$

де ω -еквівалентна деформація твердої фази пористого тіла, яка приймається у вигляді:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{\sqrt{1-\theta}}\sqrt{\psi(e^{pl})^2 + \varphi(\gamma^{pl})^2} \quad (4.17)$$

де $e = e_{11}^{pl} + e_{22}^{pl} + e_{33}^{pl}$ – об'ємна складова тензору швидкостей незворотних деформацій;

$\gamma = \frac{1}{\sqrt{3}}\sqrt{(e_{11}^{pl} - e_{22}^{pl})^2 + (e_{22}^{pl} - e_{33}^{pl})^2 + (e_{33}^{pl} - e_{11}^{pl})^2 + 6((e_{12}^{pl})^2 + (e_{23}^{pl})^2 + (e_{31}^{pl})^2)}$ – дівіатор-

на складова того ж тензору;

a, b – початкова границя текучості та коефіцієнт зміцнення, матеріалу твердої фази пористого тіла відповідно;

m – параметр, що характеризує різноопірність пористого матеріалу при розтягуванні та стисненні.

Така поведінка може бути викликана різними чинниками структури пористого тіла: наявністю плоских дефектів (тріщин) або зародженням нових пор. Припускається, що m задовільняє нерівність: $0 \leq m \leq 1$.

У рамках моделі, яка описана рівняннями (4.13) – (4.16), поточний стан пористого середовища при пружньопластичному деформуванні визначається трьома параметрами: θ, ω, m . Еволюція параметра ω описується рівнянням (4.17), в той час як еволюційне рівняння для пористості безпосередньо випливає із закону збереження маси:

$$\frac{d\theta}{dt} = (1 - \theta)e^{pl} \quad (4.18)$$

Контури рівних значень пластичного потенціалу (контури навантаження) при різних значеннях θ та m в координатах (p, τ) наведені на рисунках 4.34 та 4.35.

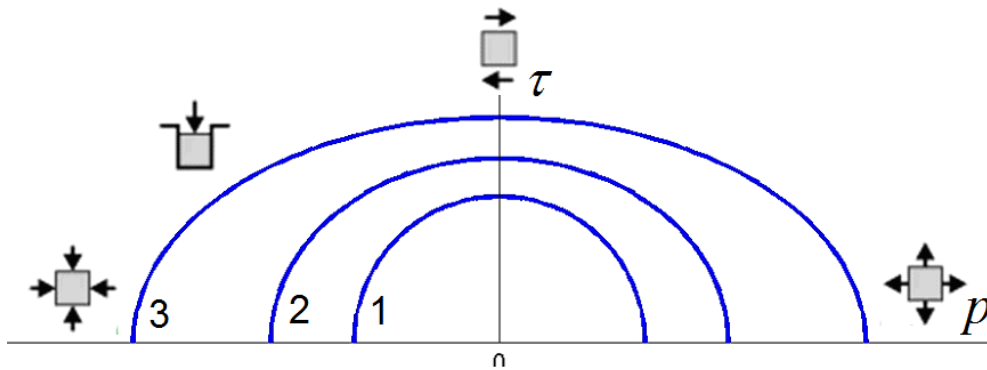


Рис. 4.34. Поверхні текучості при $m=0$, для пористостей:
1 – 0,4; 2 – 0,3; 3 – 0,2

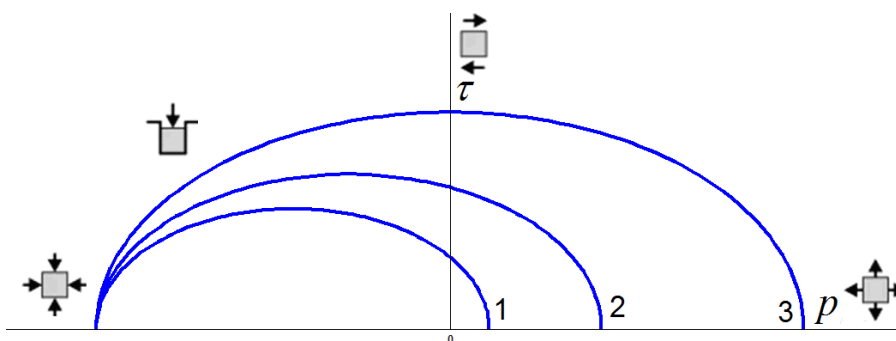


Рис. 4.35. Поверхні текучості для пористості 0,2 при різних m :
1) $m = 0,8$; 2) $m = 0,4$; 3) $m = 0$

Припускається, що незворотна складова тензору швидкостей деформацій пов'язана з напруженнями принципом нормальності:

$$e_{ij}^{pl} = \lambda \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}}; \quad \lambda > 0 \quad (4.19)$$

де Φ – пластичний потенціал, який визначається рівнянням:

$$\Phi(\sigma_{ij}) = \frac{(p + p_0)^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\varphi} - (1 - \theta) \left(\frac{\sigma_0}{1 + m} \right)^2 \quad (4.20)$$

λ – додатній множник, який підлягає виключенню.

Звертає на себе увагу та обставина, що для $m \neq 0$ контури поверхонь навантажень або рівних значень потенціалу Φ не є симетричними відносно девіаторної площини $p = 0$. Безпосередньо з принципу нормальності випливає, що в цьому випадку спостерігається наявність розпушення: швидкість зміни об'єму додатня за відсутності середнього тиску (дилатансія 2-го роду). Тому в подальшому викладі параметр m пов'язується як з вмістом площинних макродефектів, або можливістю їх утворення внаслідок внутрішньої декогезії, так і схильністю до дилатансії.

Для використання у методі скінчених елементів визначальні співвідношення (4.9) – (4.16) регуляризувалися за допомогою нелінійно-в'язких наближень наступного вигляду (при $m=0$).

$$\sigma_{ij} = \sqrt{1 + n^2} \frac{\left[\varphi e_{ij} + \left(\psi + \frac{\varphi}{3} \right) e \delta_{ij} \right]}{\sqrt{\psi e^2 + \varphi \gamma^2 + n^2}} \quad (4.21)$$

При цьому вводився параметр n , який відповідав за міру швидкісної чутливості матеріалу. При $n = 0$ реологічна модель (4.21) стає ідеально-пластичною, а при збільшенні n поведінка матеріалу асимптотично наближається до лінійно-в'язкого випадку. Параметр n вводився для регуляризації ідеально-пластичної крайової задачі, яка в математичному плані не є коректною (тобто при малих змінах крайових умов розв'язок задачі може сильно мінятися), і для її розв'язку небажано застосовувати напряду такі методи, що застосовуються для розв'язання пружних або в'язких задач. Для розгляду жорсткопластичної поведінки матеріалу бралось досить мале n ($n = 0,1$).

Всі обчислення, що супроводжують даний аналіз виконані на основі однієї з версій методу скінчених елементів (МСЕ). Аналіз картини плинну порошку при пресуванні проводиться в рамках уявлень Ейлера. Поля швидкостей розглядаються в поточній системі координат. На відміну від більшості версій МСЕ, що використовуються в даний час, є вільною від урахування пружної складової деформацій. Подібне припущення пов'язане з тим, що пружні характеристики порошку і пористої заготовки забезпечують дуже малі пружні деформації, що на декілька порядків менше, ніж пластичні. Ця обставина звільняє від необхідності залучати до розгляду поняття і методи, специфічні для механіки скінчених деформацій, зокрема зв'язані з вибором відповідної міри скінчених деформацій і актуальних напружень. Як наслідок, основні розв'язувальні рівняння, що впливають із відповідного варіаційного принципу (або принципу віртуальних потужностей), а також із визначальних рівнянь, формулюються щодо вузлових швидкостей. На підставі отриманих полів швидкостей одночасно обчислюються пористість у кожному елементі.

Для розв'язку початково-крайових задач використовуються процедури покрокового інтегрування цих рівнянь, що є кінетичними для таких параметрів, як пористість. Після їх виконання отримані значення використовуються для формування матриці жорсткості для системи рівнянь щодо вузлових швидкостей. Як впливає з аналізу системи визначальних рівнянь, дана матриця сама залежить від шуканих вузлових швидкостей, у силу чого задача їх визначення є нелінійною на кожному кроці і вимагає використання ітераційних процедур. Тут використана процедура градієнтного спуску, що сполучена зі спеціальним способом завдання нульового наближення.

Для моделювання, аналізу та оптимізації процесів отримання складових пористих циліндрів методом радіального ущільнення порошків розроблена система «Математика ФІЛЬТР».

Теоретичне підґрунтя наступне – передбачається, що при засипці порошку в спеціальну капсулу є можливість створити сукупність циліндричних шарів, що містять різні типи порошків, що володіють різними механічними характеристиками. Система «Математика ФІЛЬТР» може також використовуватися для аналізу процесу радіального ущільнення системи коаксіальних, вкладених один в одного пористих циліндрів, що мають різну початкову пористість. Дана система моделює процеси перерозподілу щільності, а також зміну геоме-

тричних параметрів порошкових або пористих шарів, якщо капсула піддається радіальному обтисненню зовнішніми силами. Також допускається визначення розподілу щільності (пористості) в радіальному напрямку в усі моменти деформування, а також зміна товщини шарів, якщо задані початкові значення щільності, вихідні положення розділових ліній шарів і реологічні характеристики матеріалів у спеціальній формі.

Основу розрахунків становить теорія пластичного деформування і нелінійної в'язкої течії стискуваних матеріалів, яка розроблена в розділі II. Система реалізована в середовищі «Математика-3». Необхідні для реалізації обчислювальні процедури, що включають покрокове інтегрування та ітерації, пов'язані з рішенням системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, розроблені додатково.

Для запуску системи «Математика ФІЛЬТР» необхідно ввести початкові значення щільності кожного шару і координати ліній, що розділяють циліндричні шари. Реологічні характеристики матеріалу вводяться спеціальним чином. Передбачається, що поведінка матеріалу частинок порошку або каркаса пористого тіла в кожному шарі описується рівнянням (4.22).

$$\sigma = \sqrt{1 + n^2} \sigma_k \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + n^2 \gamma_k}}, \quad (4.22)$$

де n – часове відчуття;

σ_k , γ_k – параметри апроксимації, які визначаються з аналізу кривої напруження-швидкість деформування для матеріалу частинок порошку ППМ

При цьому константа σ_k може розглядатися як напруженість течії. Для процесів холодної деформації можна вважати $n=1$. Система дозволяє також враховувати наявність осьового притиску капсули, для чого спільно зі швидкістю радіального обтиснення v допускається введення осьової швидкості деформації e_z . Система використовується для розрахунку і оптимізації процесів отримання фільтрів на основі порошкових матеріалів при радіально-ізостатичному пресуванні (рис. 4.36).

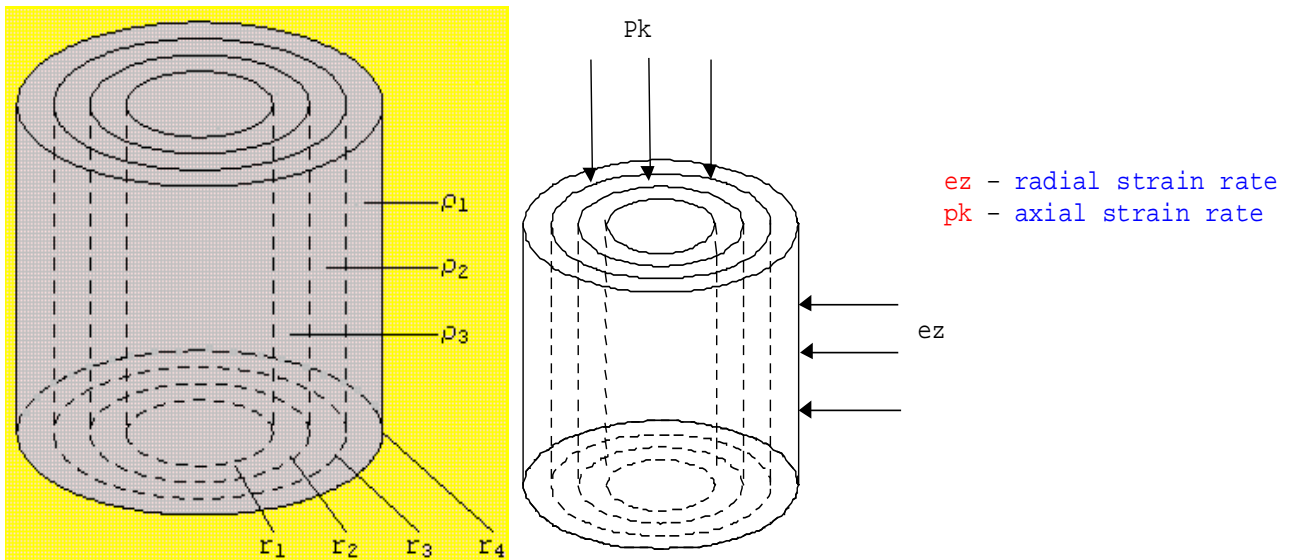


Рис. 4.36. Моделювання багат шарового ППМ з відпорними радіусами кожного циліндру та їх густини при радіально-ізостатичному пресуванні

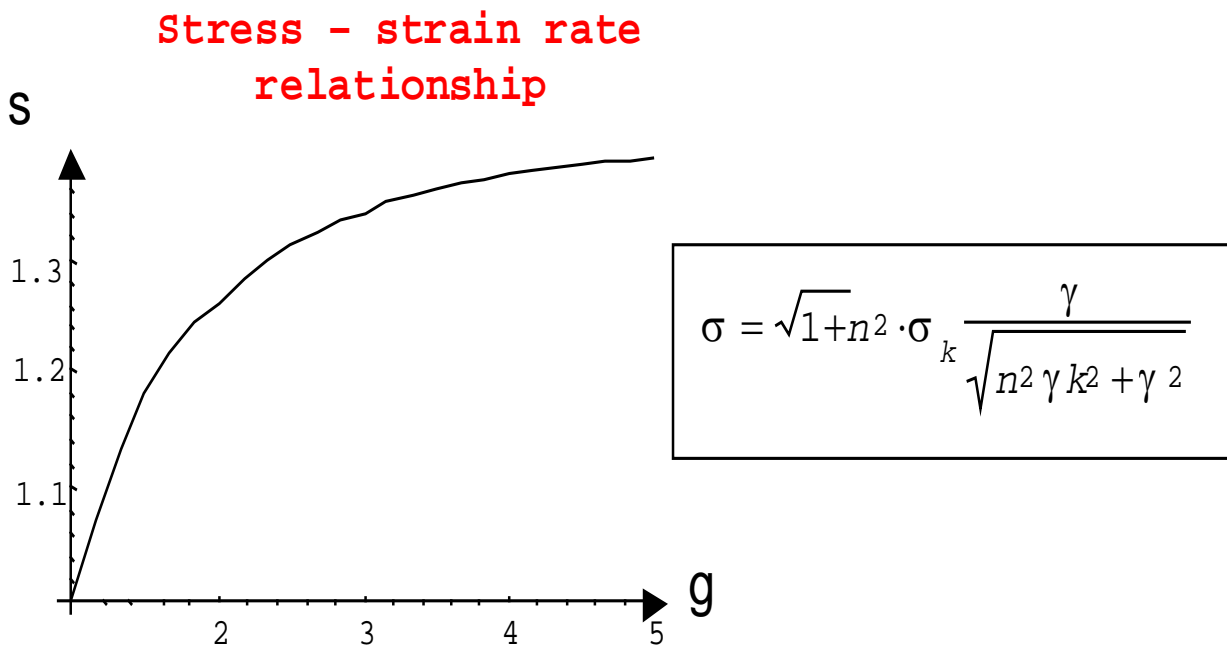


Рис. 4.37. Розрахункова залежність напруження від швидкості деформації ППМ

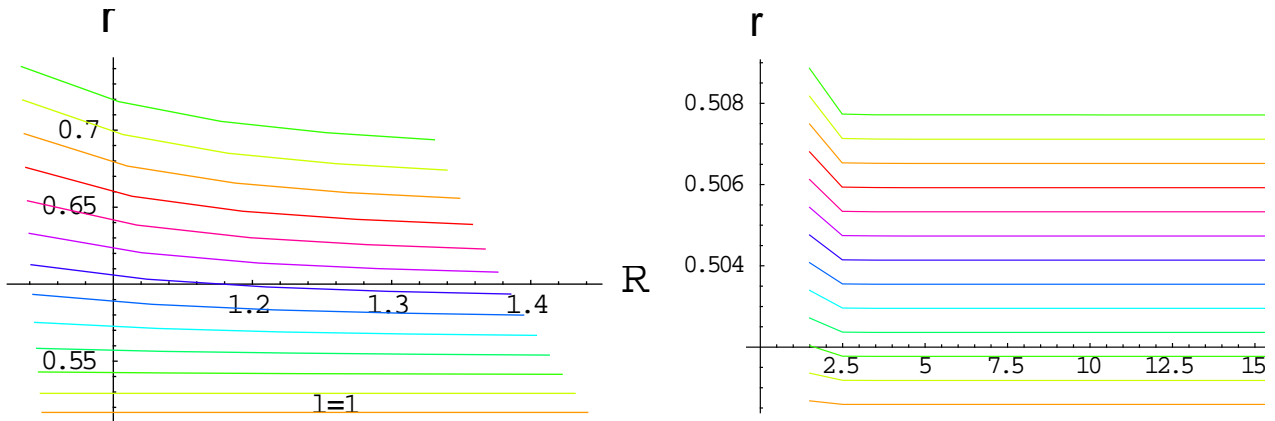


Рис. 4.38. Розподіл густини по радіусу кожного шару ППМ в різний момент часу деформування

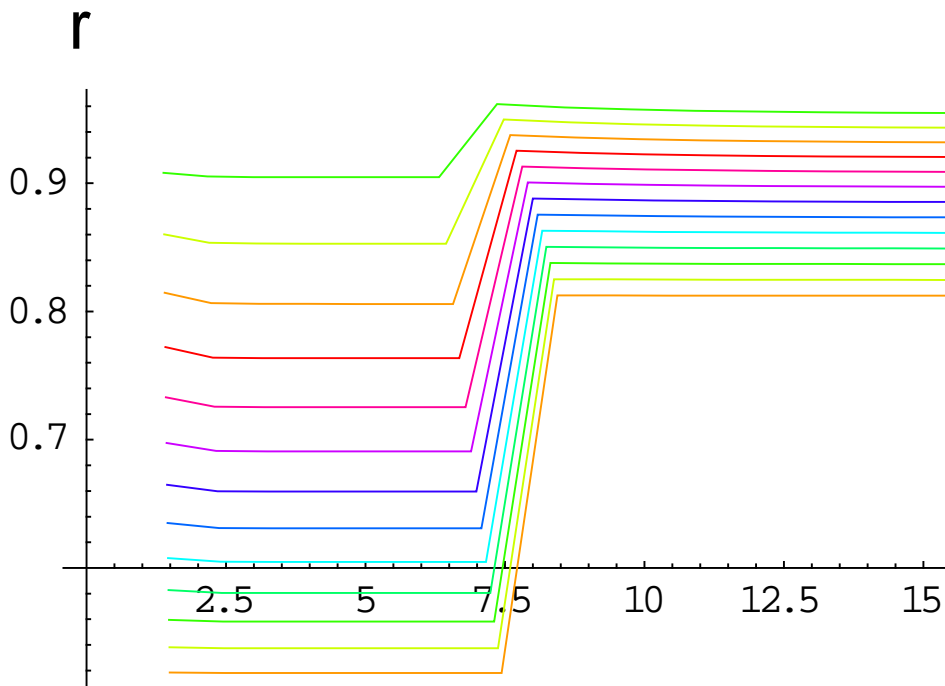


Рис. 4.39. Узагальнений розподіл густини по радіусу кожного шару ППМ в різний момент часу деформування

Проведене моделювання підтвердило нерівномірність розподілу пористості і якісно відповідає розрахунковим даним (рис. 4.37–4.39).

Процес ущільнення протікає аналогічно процесу накопичення деформацій. На ділянках ППМ, які розташовані ближче до зовнішньої поверхні (останні шари), спостерігається збільшення пористості. Вивчено вплив густини на розподіл пористості ППМ.

В областях, розташованих біля осі стержня капсули, величина накопиченої деформації нижча (рис. 4.39). Наявність протитиску підвищує загальний рівень накопиченої деформації та приводить до більш рівномірного її розподілу. При цьому підвищується рівень накопиченої деформації в областях, розташованих біля осі стержня капсули.

Моделювання пористої структури складових пористих циліндрів ППМ з порошку сталі ШХ15 здійснювалося у пакеті прикладних програм *MatLab*. За описаною вище методикою авторами було розроблено програмне забезпечення на мові програмування C++ (програма «FiltrTotal»), що і дало змогу змоделювати процес радіально-ізостатичного пресування з заданою пористістю ППМ кожного шару окремо.

На рис. 4.40 представлено зовнішній вигляд програми «FiltrTotal», яка дозволяє оптимізувати процес отримання складових пористих циліндрів методом радіального ущільнення порошків.

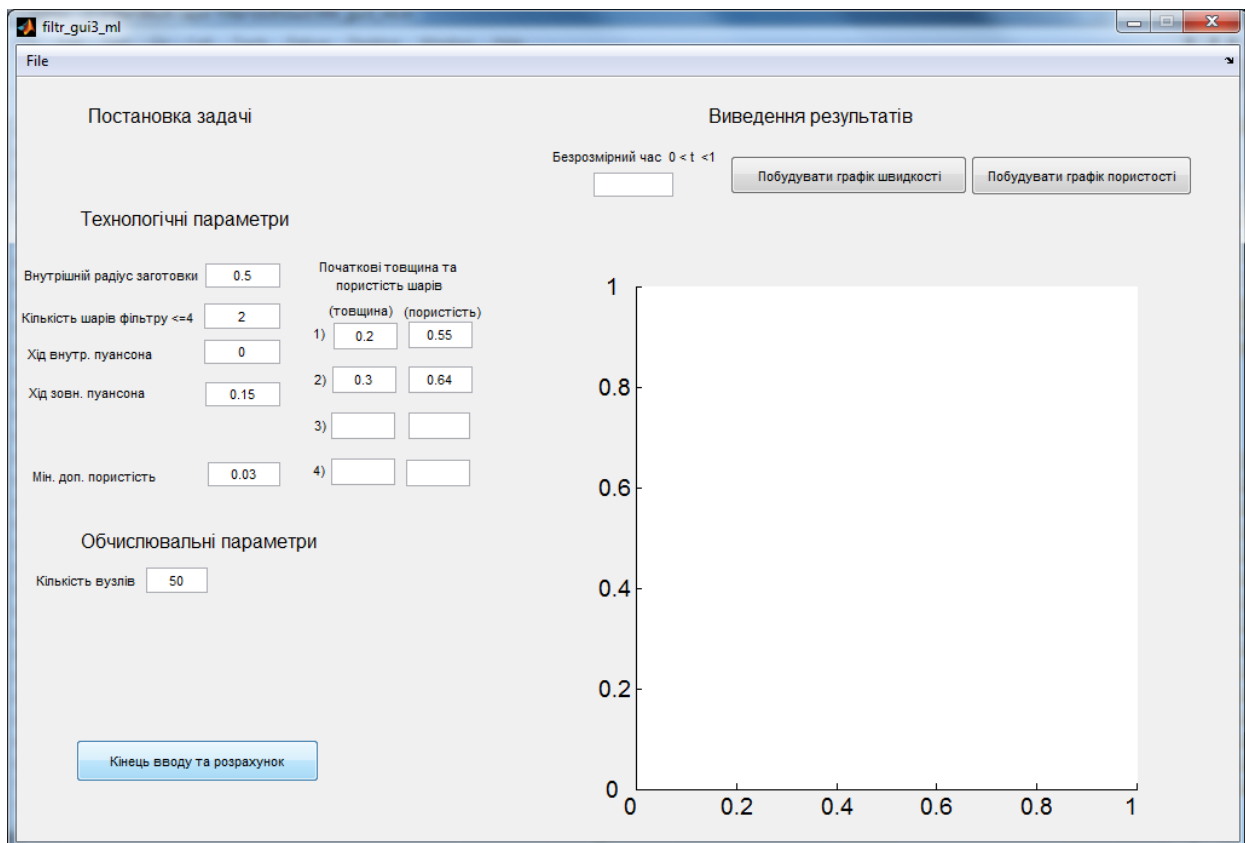


Рис. 4.40. Зовнішній вигляд програми «FiltrTotal»

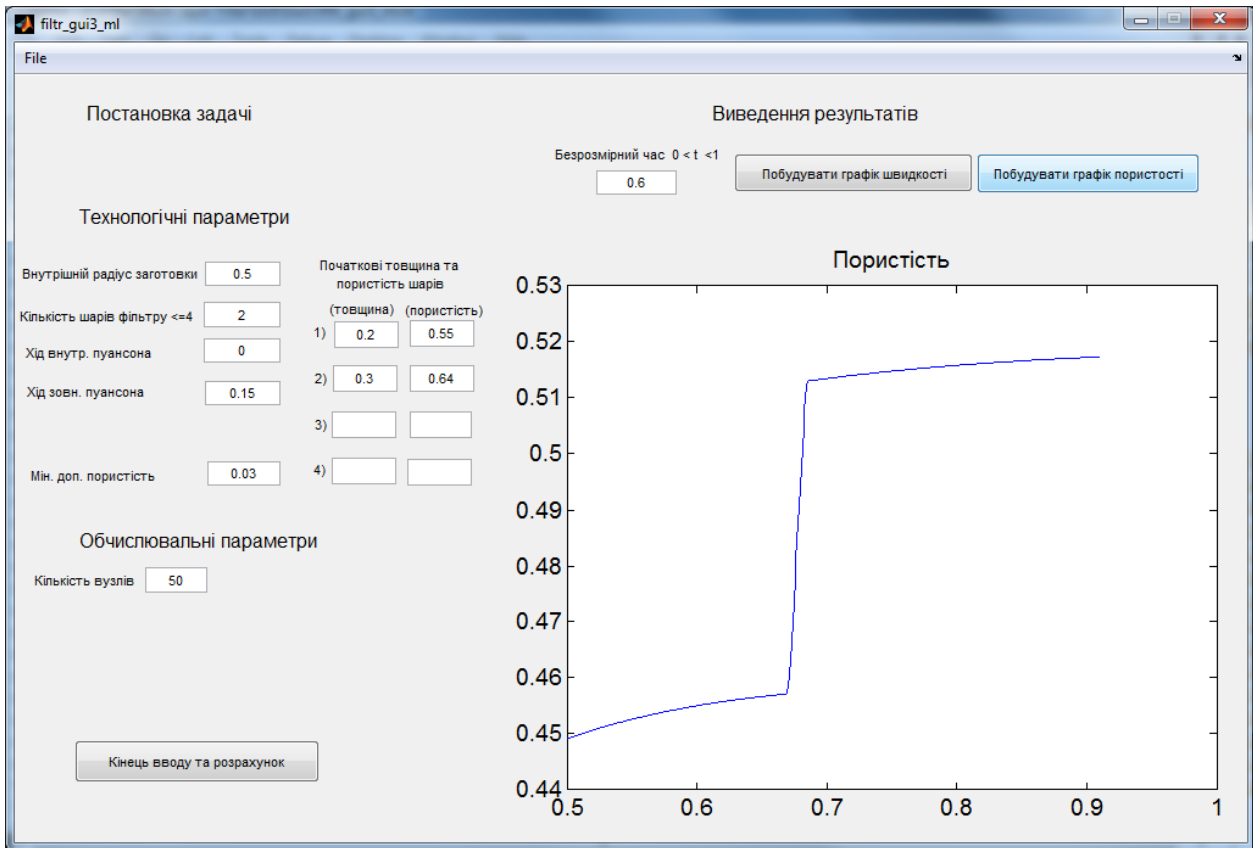


Рис. 4.41. Визначення пористості ППМ у заданий момент часу (в режимі «реального» часу)

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ IV

1. Денисова Н. Е. Триботехническое материаловедение и трибология: Учебное пособие / Н. Е. Денисова. – Пенза : ПГУ, 2006. – 248 с.
2. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / [Зозуля В. Д., Шведков Е. Л., Ровинский Д. Я., Браун Э. Д.] – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Наукова думка, 1990. – 264 с.
3. Патент України № 63558 А МПК 7 В22F9/04. Спосіб отримання металевого порошку з шламових відходів підшипникового виробництва / В. Д. Рудь, Т. Н. Гальчук, О. Ю. Повстяной; Заявл.06.05.03; опубл. 15.01.04. Бюл. №1, 2004.
4. Електродугові відновні та захисні покриття/ [Похмурський В. І., Студент М. М., Довгунік В. М., Похмурська Г. В., Сидорак І. Й] – Львів: Національна академія наук України, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка, 2005. – 192 + вклейка 8 с.
5. Імбірович Наталія Юріївна. Розроблення оксидокерамічних покриттів на цирконієвих та титанових сплавах плазмоелектролітною обробкою : Дис... канд. техн. наук: 05.02.01 / Луцький держ. технічний ун-т. – Луцьк, 2006. – 125 арк. : рис., табл. – Бібліогр.: арк. 110–124.
6. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №71207. Комп'ютерна програма «Комп'ютерно-імітаційне моделювання для напилення захисних середовищ на деталь / Куц Ю. В., Повстяной О. Ю. Дата реєстрації 29.03.2017 р.
7. Витязь П. А. Фильтрующие материалы: свойства, области применения, технология изготовления / Витязь П. А., Капцевич В. М., Кусин Р. А. – Мн. : НИИ ПМ с ОП, 1999. – 304 с.
8. Антонов В. Н., Львович Н. Я., Чопоров О. Н. и др. Высокоэффективные технологии как неотъемлемая часть развития современного общества / Повстяной А. Ю., Куц Ю. В. и др. // авт.кол.монография. – Одесса : КУПРИЕНКО С. В., 2015. – 220 с.: ил.табл.
9. Технології, структура, властивості пористих проникних матеріалів: Монографія / Рудь В. Д., Повстяной О. Ю., Заболотний О. В., Богінський Л. С. – Луцьк : РВВ ЛНТУ. – 2016. – 200 с.

10. Повстяной О. Ю. Удосконалення технології виготовлення пористих порошкових матеріалів з використанням відходів промислового виробництва: дис. ... канд. техн. наук. – Луцьк, 2007. – 170 с.
11. Повстяной О. Ю. Визначення розподілу густини пористого проникного циліндра за радіусом при радіально-ізостатичному пресуванні / Повстяной О. Ю., Рудь В. Д. // Наукові нотатки. – Випуск 54. – Луцьк : РВВ Луцький НТУ, 2016. – С. 246–252.
12. Штерн М. Б. Развитие теории пластичности пористых тел // Порошковая металлургия. – № 9. – 1992. – С. 19–29
13. Штерн М. Б., Дудунов В. Д. Определение ресурса пластичности порошковых материалов на основе модели пластического течения пористых тел. I. Критерий исчерпания ресурса пластичности // Порошковая металлургия. – 1999. – №11/12. – С. 31–40.
14. Штерн М. Б. Про залежність густини – тиск та розподілі густини при пресуванні порошків / Штерн М. Б. // Порошкова металлургія. – 2014 – №03/04. – С. 19–29.
15. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №68843. Комп'ютерна програма «Моделювання пресування одношарових фільтрів (Фільтр1)» / О. Ю. Повстяной, А. В. Кузьмов, Ю. В. Куц Дата реєстрації 29.11.2016 р.
16. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №68842. Комп'ютерна програма «Моделювання пресування багатошарових фільтрів (Фільтр N)» / О. Ю. Повстяной, А. В. Кузьмов. Дата реєстрації 29.11.2016 р.
17. Григорьев А. К., Грохопольский Б. П. Порошковая металлургия композиционных материалов. – М.: Ленинздат, 1982. – 97 с.
18. Тодоров Р. П., В. П. Георгиев В. П., Косторнов А. Г. и др. Регулярность структуры пористых материалов из порошка бронзы // Порошковая металлургия. – 1986. – № 3. – С. 69–71.
19. Гатушкин А. А., Солонин С. М. Двухслойные фильтры для очистки жидкости // Порошковая металлургия. – 1964. – № 7. – С. 36–40.
20. Способ изготовления двухслойных металлических мембран: А.с. 1720798 СССР, МКИ В22F7/02 / Капцевич В. М., Галкин А. Е., Сорокина А. Н. и др. // Открытия. Изобретения. – 1982. – № 11. – С. 43–44.

21. Штерн М. Б. Определяющие уравнения для уплотняемых пластичных пористых тел // Порошковая металлургия. – 1981. – № 4. – С. 17–23.
22. Мидуков В. З., Рудь В. Д. О состоянии экспериментальных исследований пластических деформаций пористых металлов // В кн. Реологические модели и процессы деформирования порошковых, пористых и композиционных материалов. Киев : Наук. Думка, 1985. – 164 с.
23. Скороход В. В., Реологические основы теории спекания. – Киев : Наук. Думка, 1972. – 151 с.
24. Штерн М. Б. Развитие теории прессования порошков и теории пластичности пористых тел // Порошковая металлургия. – 1992. – №9. – С. 56–62.

РОЗДІЛ V

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ СПЕЦІАЛЬНИХ ПРОГРАМ У КОМП'ЮТЕРНОМУ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ

Комп'ютерно-інформаційні технології формулюють науково-технічний прогрес і створюють інформаційний фундамент розвитку науки. Використання сучасного програмного забезпечення при дослідженні структури різноманітних матеріалів привело до появи нового напрямку в матеріалознавстві – *комп'ютерного матеріалознавства*. Отримання матеріалів з унікальними властивостями можливо за допомогою традиційних методів, що використовують фізико-хімічні, металургійні технології. У багатьох випадках ці технології трудомісткі, довготривалі та енерговитратні.

Підвищити ефективність традиційних технологій, а також ввести безвідходне виробництво виробів широкого цільового призначення, зберігати енергію та матеріали, скорочувати трудові затрати за рахунок зменшення кількості технологічних операцій та автоматизації процесів дозволяє використання комп'ютерного моделювання на всіх етапах отримання нових матеріалів.

Таким чином, прогнозування, моделювання, дослідження структурних, технологічних характеристик матеріалів за допомогою сучасного програмного забезпечення є актуальним завданням сучасного матеріалознавства.

5.1. *SolidWorks* як сучасна інформаційна база для інженерних розрахунків

В умовах ринкової економіки України та світу конкурентна боротьба, вимагає від виробничих підприємств постійного оновлення випущеної продукції та підвищення її якості, це призводить до необхідності скорочення термінів і вартості технічної підготовки виробництва при підвищенні якісного вдосконалення проєктів, що розробляються. Очевидно, що рішення цих проблем багато в чому може бути забезпечене за рахунок застосування систем автоматизованого проєктування в процесі технічної підготовки виробництва.

Виходом з такого становища є застосування спеціалізованих автоматизованих об'єктно орієнтованих систем проєктування, які є САД-системами, адаптованими до конкретної предметної області за допомогою програмно-методичних модулів [1, 2].

Однією з таких спеціалізованих САПр-систем і є *SolidWorks*.

SolidWorks (Солідворкс) – програмний комплекс САПр для автоматизації робіт промислового підприємства на етапах конструкторської та технологічної підготовки виробництва, забезпечує розробку 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;
- ✓ Експресаналіз міцності деталей і кінематики механізмів;
- ✓ Спеціальні засоби для роботи з великими збірками;
- ✓ Висока функціональність;
- ✓ Гнучкість і масштабність;
- ✓ 100 % дотримання вимог ЕСКД при оформленні креслень.

Процес побудови та розрахунків 3D моделі ґрунтується на створенні об'ємних геометричних елементів і виконанні різноманітних операцій між ними. Модель набирається так, як збирається конструктор зі стандартних елементів (блоків), і може бути відредагована шляхом додавання (видалення) цих елементів або шляхом зміни характерних параметрів блоків. 3D модель несе в собі найбільш повний опис фізичних властивостей об'єкта (обсяг, маса, моменти інерції) і дає проєктантові можливість роботи у віртуальному 3D просторі, що дозволяє на найвищому рівні наблизити комп'ютерну модель до вигляду майбутнього виробу, виключаючи етап макетування.

SolidWorks є системою гібридного параметричного моделювання, вона призначена для проєктування деталей і зборок у тривимірному просторі, а також для оформлення конструкторської документації. У *SolidWorks* використовується принцип тривимірного твердотілого і поверхневого параметричного проєктування, що дозволяє конструктору створювати об'ємні деталі і компоувати збірки у вигляді тривимірних електронних моделей, за якими створюються двовимірні креслення і специфікації у відповідності з вимогами ЕСКД.

Створення і розробка фільтрувальних пористих проникних матеріалів неможлива без вимірювання та контролю властивостей вихідних порошків і готових виробів. Деякі методи визначення властивостей порошків і фільтруючих ППМ внесені до ГОСТ або до технічних умов, однак є ряд властивостей, дослідження яких регламентуються даними документами.

Важливою характеристикою фільтруючих ППМ є розподіл локальної проникності або визначення коефіцієнта проникності.

Відомий ряд методів визначення проникності ППМ [3–5]. Кращим є спосіб визначення проникності через коефіцієнт проникності за допомогою вдосконаленої установки [6], яка представлена на рис. 5.1.

У процесі роботи над проєктом, а точніше при проведенні коригування розмірів або у випадку більш глобальної зміни в конструкції, справді виникають протиріччя з раніше заданими взаємозв'язками або призначеними розмірами.



Рис. 5.1. Загальний вигляд установки для визначення проникливості ППМ: 1 – корпус; 2 – досліджуваний зразок; 3 – ущільнювач; 4 – кришка; 5 – координатний пристрій; 6 – джерело тиску; 7, 8 – манометри; 9, 10 – датчики.

Найбільш поширеною проблемою при значній переробці деталі, що входить у складання, є втрата швидкості та перепад тиску. Най-

кращим з пропонованих *SolidWorks* шляхом для вирішення подібних проблем є визначення даних характеристик в умовах моделювання для подальшого експериментального дослідження. У цьому варіанті всі умови будуть досліджені та збережені. При моделюванні цих параметрів можна буде дослідити, чи можливі втрати тиску та швидкості, що легко можна змінити [7].

Можливість такого моделювання в дослідженні до останнього моменту роботи над ним потенційно несе в собі більш високу якість, що і відбивається на конкурентоспроможності проекту. Засоби, які надає *SolidWorks*, дозволяють говорити про неї саме як про систему для проектування, моделювання, яка орієнтована на дослідника.

Тривимірне моделювання виробів має масу переваг перед традиційним двовимірним проектуванням, наприклад, виключення помилок збирання виробу ще на етапі проектування, створення за електронною моделлю деталі керуючої програми для обробки на верстаті з ЧПУ. За допомогою програми *SolidWorks* можна побачити майбутній виріб з усіх боків в обсязі і надати йому реалістичного відображення у відповідності з обраним матеріалом для попередньої оцінки дизайну, а також провести всі необхідні розрахунки.

У даному пункті ми розглянемо рух потоку крізь пористий проникний матеріал. Інструмент **Porous media** у *SolidWorks* здатний імітувати пористу структуру, що дає нам можливість моделювати обсяг, який він займав, як область розподіленого опору замість безпосереднього моделювання всіх порожнин всередині каталізатора, що може бути недоцільним або навіть неможливим.

Також буде показаний вплив типу проникності пористих тіл (ізотропне і односпрямоване середовище), при однаковому опорі потоку та на розподіл потоку.

Спостерігаючи за поведінкою траєкторії потоку газу, розподіленого рівномірно по вхідному отвору моделі і проходженні його крізь пористе тіло, ми зможемо побачити, як тип проникності впливає на поведінку потоку. Крім цього, фарбування траєкторій у залежності від швидкості потоку дає можливість оцінити час, протягом якого гази знаходяться в пористому тілі, що також важливо з точки зору ефективності каталізатора.

SolidWorks Flow Simulation є модулем гідрогазодинамічного аналізу в середовищі *SolidWorks*. Модуль **Flow Simulation** не робить

різниці між геометричними об'єктами, створеними в *SolidWorks* чи імпортованими в базовий модуль.

Завдання цього моделювання та його моніторинг у ході розрахунку передбачає:

- ✓ можливість попереднього перегляду полів течії в заданих перетинах без зупинки розрахунку,
- ✓ критерії автоматичної зупинки розрахунку,
- ✓ можливості моделювання,
- ✓ стаціонарні та нестаціонарні течії,
- ✓ одно- і багатоконпонентні течії без хімічної взаємодії і розділення фаз,
- ✓ течії в пористих середовищах з урахуванням теплопровідності стінки
- ✓ розрахунок траєкторій твердих частинок і крапель у потоці.

SolidWorks Flow Simulation повністю вбудований в *SolidWorks 3D CAD* інтерфейс дозволяє моделювати потоки рідин і газів з урахуванням властивостей навколишнього середовища, ефективно аналізувати їх вплив, тепловий обмін і виникнення напружень.

Для побудови 3D моделі ППМ використаємо наступні реалістичні дані (таблиці 5.1–5.3).

Таблиця 5.1

Хімічний склад порошку сталі ШХ15

Хімічний елемент	Відсотковий склад, %
Кремній (Si)	0,17-0,37
Мідь (Cu), (не більше)	0,25
Марганець (Mn)	0,20-0,40
Нікель (Ni), (не більше)	0,30
Фосфор (P), (не більше)	0,027
Хром (Cr)	1,30-1,65
Сірка (S), (не більше)	0,020

Таблиця 5.2

Механічні властивості порошку сталі ШХ15

Межа текучості $\sigma_{0,2}$, МПа	Межа міцності σ_B , МПа	Відносне звуження ψ , %	Ударна в'язкість КСУ, Дж/м ²	Твердість за Брінелем НВ
710	1670	35–55	44	179–207

Таблиця 5.3

Фізичні властивості порошку сталі ШХ15

Модуль пружності E , Гпа	Густина ρ , кг/см ³	Коефіцієнт теплового розширення, α , °С
211	7812	11,9

Оскільки в програмному комплексі *Solidworks* є можливість задавати властивості матеріалу, то задамо основні властивості сталі ШХ15 з наведених вище таблиць (рис. 5.2).

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	2.11e+011	Н/м ²
Коеффициент Пуассона	0.29	Не применимо
Предел прочности при растяжении	585000002.9	Н/м ²
Предел текучести	282685049	Н/м ²
Начальный модуль		Н/м ²
Коеффициент теплового расширения	1.1e-005	/К
Массовая плотность	7812	кг/м ³
Коеффициент отверждения	0.85	Не применимо

Рис. 5.2. Вікно властивостей матеріалу в *Solidworks*

На рис. 5.3 показано 3D модель ППМ з порошку сталі ШХ15 зі заданим реальними даними.

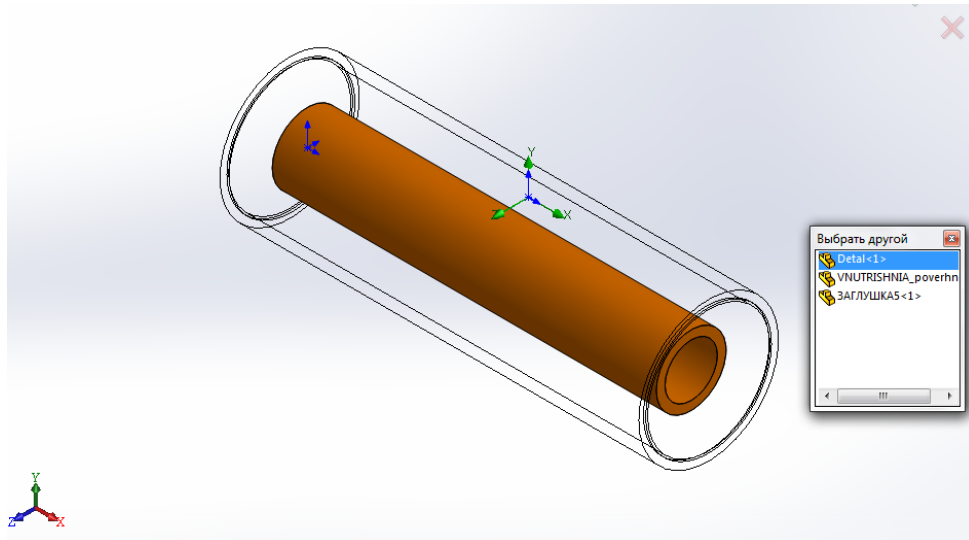


Рис. 5.3. 3D модель ППМ з порошку сталі ШХ15 спроектованого в *Solidworks*

Для проведення розрахунків ми використали наступні дані та граничні умови:

- ✓ через ППМ протікає потік води, повітря та газу (неон);
- ✓ середовища протікають через середину назовні та з ззовні у середину (внутрішнє та зовнішнє фільтування).

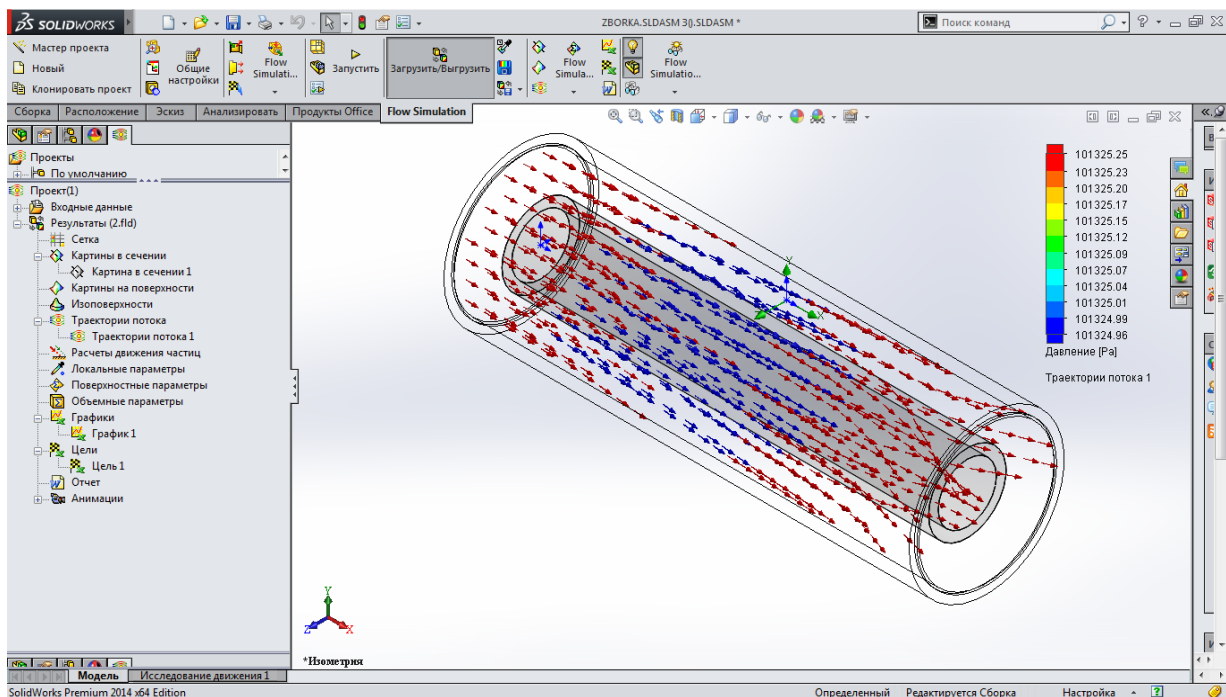


Рис. 5.4. Графічне відображення траекторії руху потоку води по ППМ (внутрішнє фільтування)

На рис. 5.5. показано січення колби, в якій закріплено ППМ. Всередині колби рухається рідина зсередини фільтра у колбу. Визначається швидкість, з якою рідина діє на ППМ. Синім кольором позначено ділянки потоку, в яких швидкість мінімальна, а червоним максимальна.

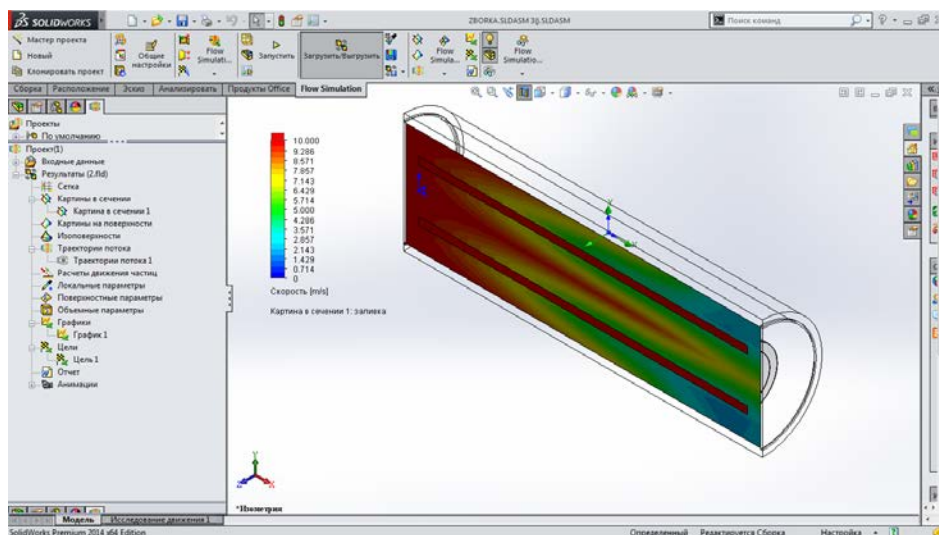


Рис. 5.5. Відображення січення ППМ за параметром швидкості внутрішнього фільтрування

Отримані модельні дані наведено у таблицях 5.4–5.8.

Таблиця 5.4

**Отримані модельні дані тиску проходження,
температури та швидкості води через ППМ
з порошку сталі ШХ15 пористістю 10 %**

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	184516,118	184499,663	182733,595	185410,091
Температура (текучого середовища)	[C]	23,204	23,205	23,203	293,206
Швидкість	[m/s]	7,413	7,436	6,763	8,131

Таблиця 5.5

**Отримані модельні дані тиску проходження,
температури та швидкості води через ППМ
з порошку сталі ШХ15 пористістю 20 %**

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	166123,315	166255,178	165852,168	166736,119
Температура (текучого середовища)	[C]	23,204	23,205	23,203	293,206
Швидкість	[m/s]	7,077	7,097	6,456	7,763

Таблиця 5.6

**Отримані модельні дані тиску проходження,
температури та швидкості води через ППМ
з порошку сталі ШХ15 пористістю 30 %**

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	144198,721	144358,052	143984,339	144766,809
Температура (текучого середовища)	[C]	23,204	23,205	23,203	293,206
Швидкість	[m/s]	6,965	6,984	6,354	7,641

Таблиця 5.7

**Отримані модельні дані тиску проходження,
температури та швидкості води через ППМ
з порошку сталі ШХ15 пористістю 40 %**

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	136525,114	136694,057	136316,773	137077,551
Температура (текучого середовища)	[C]	23,204	23,205	23,203	293,206
Швидкість	[m/s]	6,909	6,928	6,303	7,589

Таблиця 5.8

**Отримані модельні дані тиску проходження,
температури та швидкості води через ППМ
з порошку сталі ШХ15 пористістю 50 %**

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	132973,332	133146,720	132767,406	133518,515
Температура (текучого середовища)	[C]	23,204	23,205	23,203	293,206
Швидкість	[m/s]	6,876	6,894	6,273	7,543

З даних, що наведені у таблицях 5.4–5.8 бачимо, що при зростанні пористості ППМ значення тиску і швидкості рідини зменшується, а значення температури текучого середовища залишається незмінним.

Рис. 5.6. зображує швидкість руху потоку рідини у середині ППМ по довжині перерізу колби.

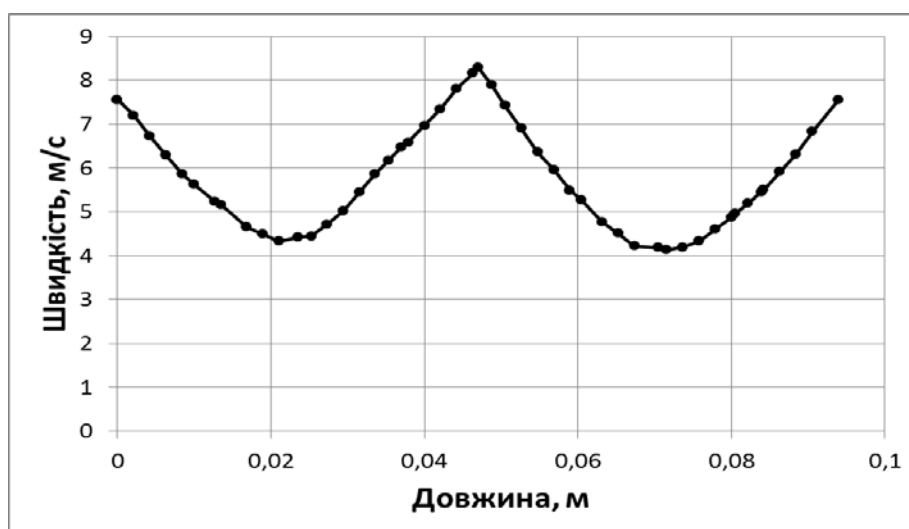


Рис. 5.6. Графік залежності швидкості руху води у ППМ відносно довжини перерізу ППМ

Дані графіка переконливо доводять, що швидкість руху рідини збільшується ближче до краю ППМ. Швидкість змінюється на проміжку від 4 до 7 м/с.

На рис. 5.7. представлено графік залежності тиску води на ППМ з середини відносно довжини його перерізу.

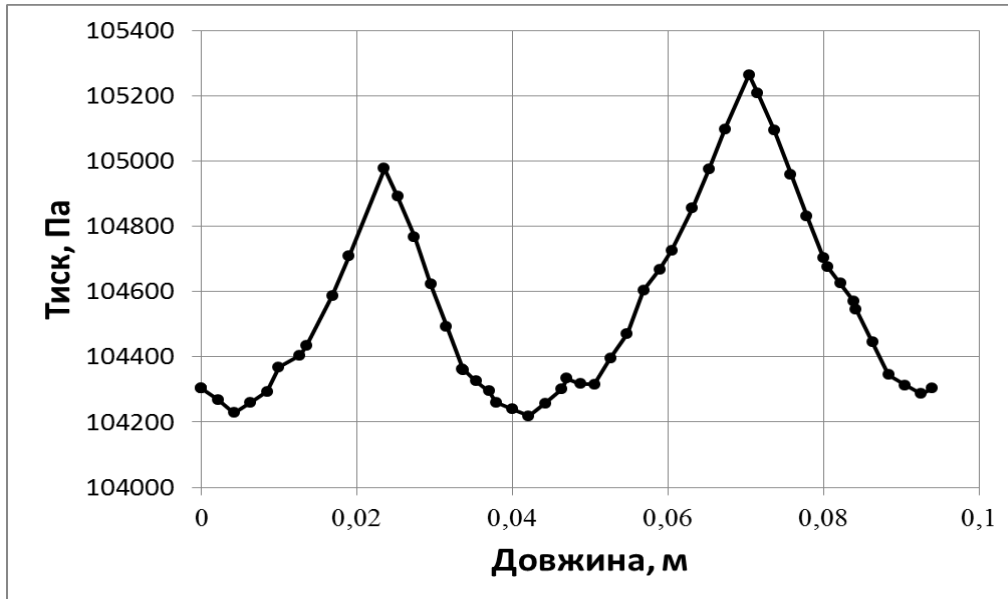


Рис. 5.7. Графік залежності тиску води на ППМ з середини відносно довжини його перерізу

Графік на рис. 5.7. показує тиск потоку рідини по довжині перерізу колби, в якій знаходиться ППМ. Дані графіка вказують, що тиск рідини збільшується ближче до краю ППМ. Тиск змінюється на проміжку від 104,2 кПа до 105,270 кПа.

Ті ж самі дії проводимо для зовнішнього фільтрування води ППМ (ззовні у середину ППМ).

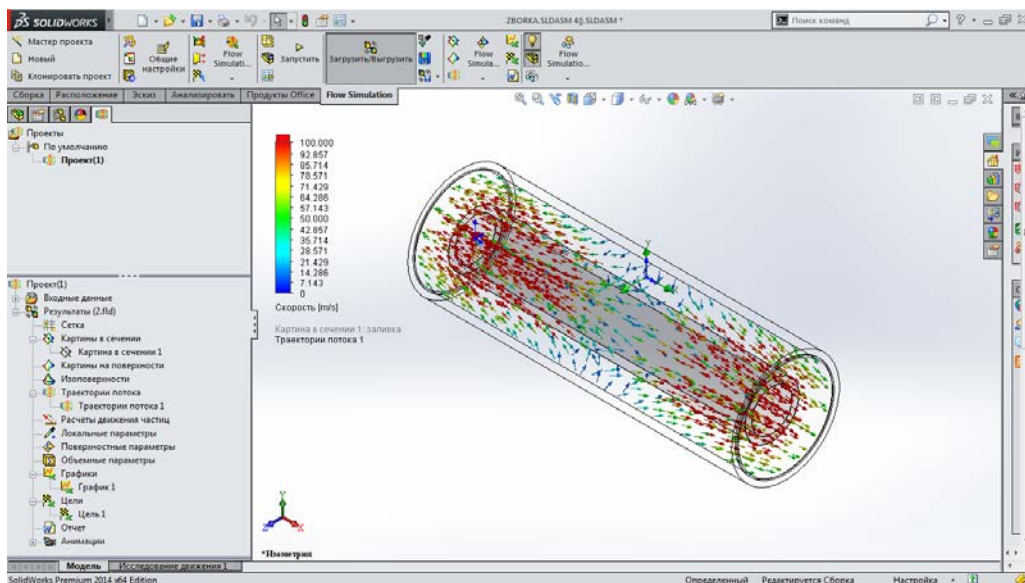


Рис. 5.8. Графічне відображення траєкторії руху потоку води по ППМ (зовнішнє фільтрування)

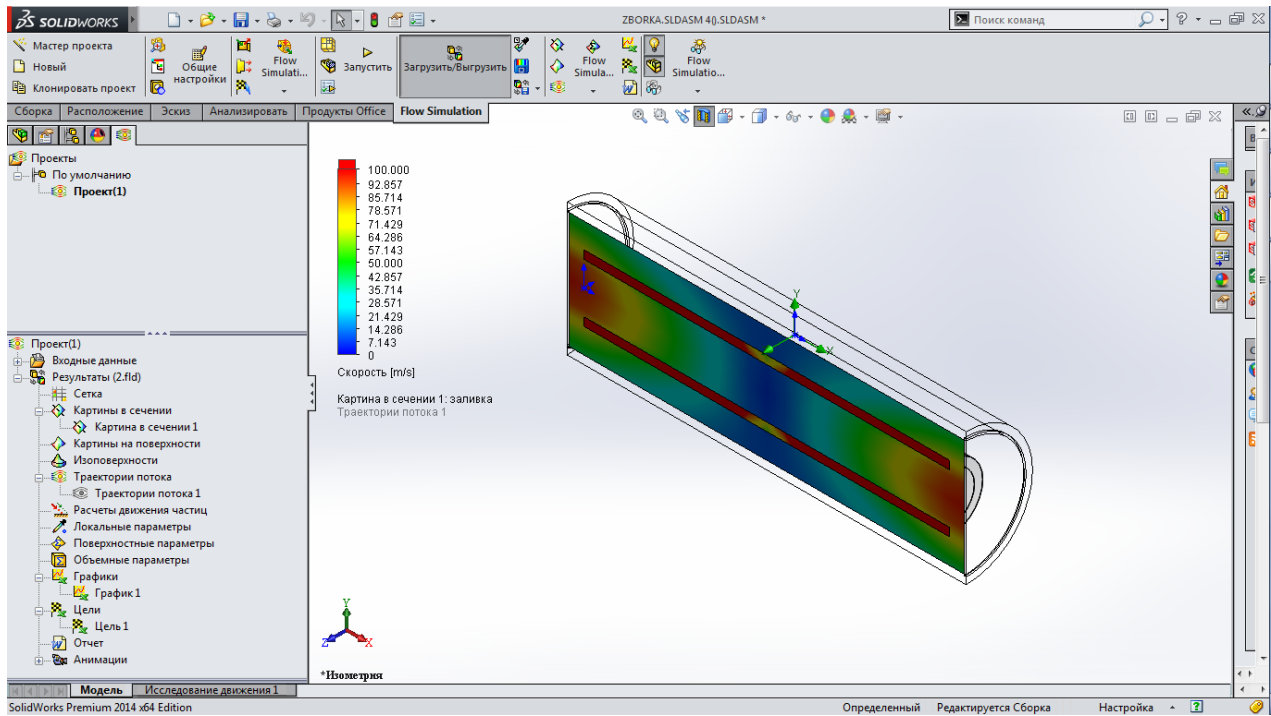


Рис. 5.9. Відображення січення ППМ за параметром швидкості зовнішнього фільтрування

Таблиця 5.9

**Отримані модельні дані тиску проходження,
температури та швидкості води через колбу у середину ППМ
з порошку сталі ШХ15 пористістю 10 %**

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	1909368,21	1818273,26	1794089,69	1919368,23
Температура (текучого середовища)	[C]	22,949	22,935	22,874	22,951
Швидкість	[m/s]	109,861	109,584	108,849	109,861

Таблиця 5.10

**Отримані модельні дані тиску проходження,
температури та швидкості води через колбу у середину ППМ
з порошку сталі ШХ15 пористістю 20 %**

Назва цілі	Оди- ниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	1719353,93	1882074,71	1692617,77	1919353,931
Температура (текучого середовища)	[C]	22,949	22,935	22,874	22,951
Швидкість	[m/s]	105,186	104,921	104,214	105,187

Таблиця 5.11

**Отримані модельні дані тиску проходження,
температури та швидкості води через колбу у середину ППМ
з порошку сталі ШХ15 пористістю 30 %**

Назва цілі	Оди- ниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	1669351,9	1642037,896	1577530,382	1669351,09
Температура (текучого середовища)	[C]	22,949	22,935	22,874	22,951
Швидкість	[m/s]	103,629	103,367	102,67	103,629

Таблиця 5.12

**Отримані модельні дані тиску проходження,
температури та швидкості води через колбу у середину ППМ
з порошку сталі ШХ15 пористістю 40 %**

Назва цілі	Оди- ниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	1546850,36	1523025,63	1467249,795	1646850,356
Температура (текучого середовища)	[C]	22,949	22,935	22,874	22,951
Швидкість	[m/s]	102,85	102,590	101,899	102,851

Таблиця 5.13

**Отримані модельні дані тиску проходження,
температури та швидкості води через колбу в середину ППМ
з порошку сталі ШХ15 пористістю 50 %**

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	1256619,93	1253939,06	1250205,638	1258149,927
Температура (текучого середовища)	[C]	22,949	22,935	22,874	22,951
Швидкість	[m/s]	102,383	102,125	101,435	102,383

Проаналізувавши дані з таблиць 5.9–5.13, можемо зробити висновок, що при зростанні пористості ППМ значення параметрів тиску і швидкості рідини зменшується, а значення температури текучого середовища залишається незмінним.

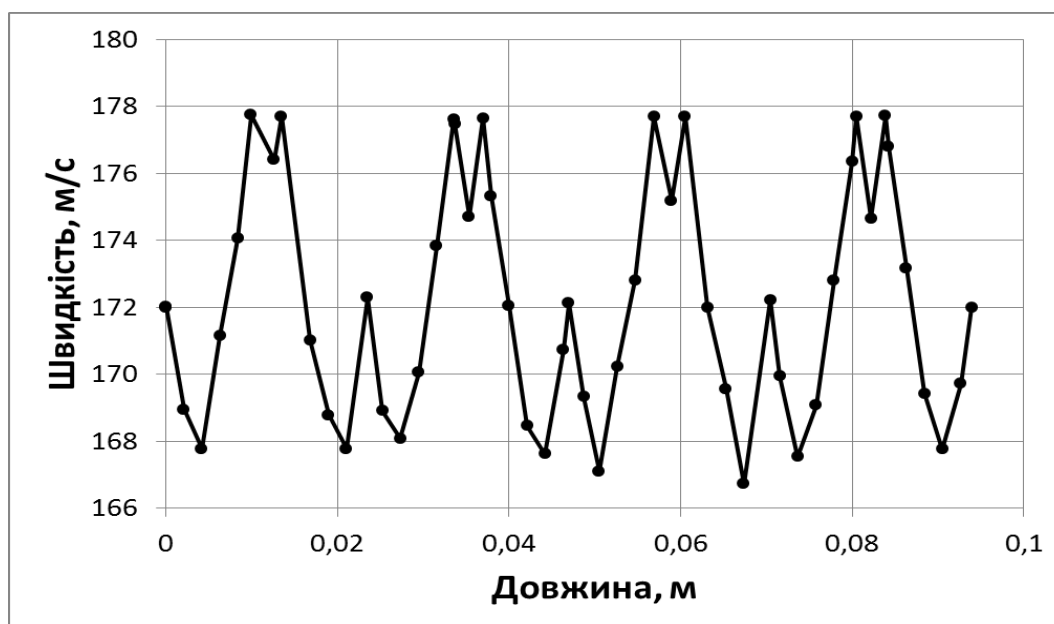


Рис. 5.10. Графік залежності швидкості руху води у ППМ відносно довжини перерізу ППМ (зовнішнє фільтрування)

З рис. 5.10 видно, що швидкість руху рідини збільшується ближче до краю ППМ. Швидкість змінюється на проміжку від 166 до 178 м/с.

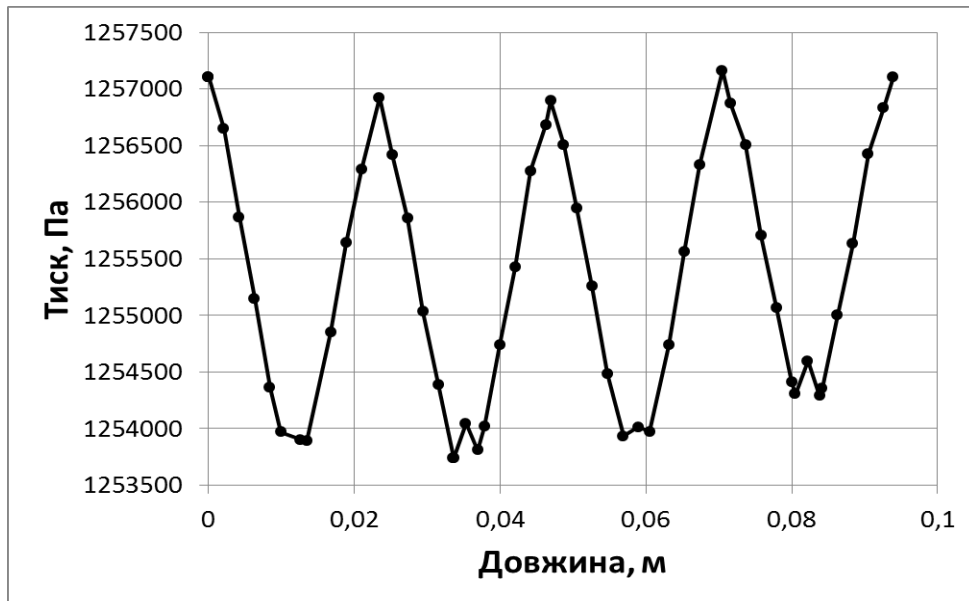


Рис. 5.11. Графік залежності тиску води на ППМ зсередини відносно довжини його перерізу (зовнішнє фільтрування)

З рис. 5.11 видно, що тиск рідини збільшується ближче до краю ППМ. Тиск змінюється на проміжку від 125,35 кПа до 125,7 кПа.

Аналогічні розрахунки для повітря та газу (внутрішнє та зовнішнє фільтрування) наведені нижче.

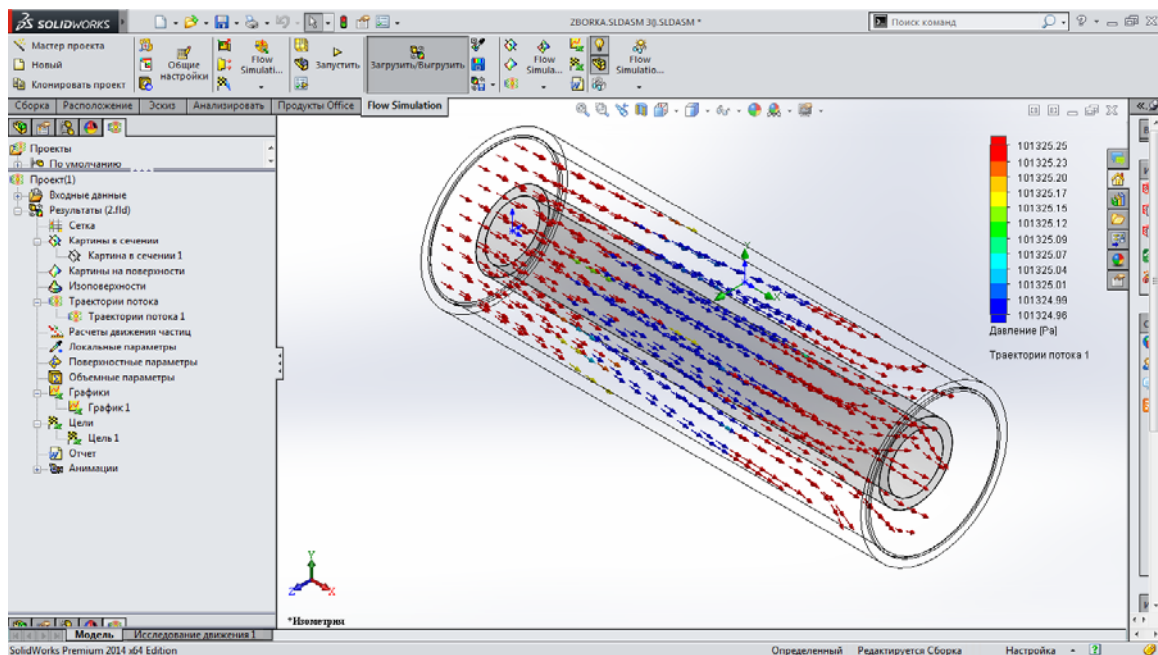


Рис. 5.12. Графічне відображення траєкторії руху швидкості потоку повітря з середини ППМ у колбу (внутрішнє фільтрування)

На рис. 5.11. зображено колбу, всередині якої закріплено ППМ. Визначається траєкторія руху потоку повітря через ППМ поза швидкістю. Синім кольором позначено ділянки потоку, в яких швидкість мінімальна, а червоним максимальна.

Таблиця 5.14

**Отримані модельні дані тиску проходження,
температури та швидкості повітря через ППМ з порошку
сталі ШХ15 з пористістю 10 % у колбу**

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	101548,111	101548,153	101546,386	101549,701
Температура (текучого середовища)	[C]	23,221	23,219	23,213	23,225
Швидкість	[m/s]	7,458	7,607	6,969	8,475

Таблиця 5.15

**Отримані модельні дані тиску проходження,
температури та швидкості повітря через ППМ з порошку
сталі ШХ15 з пористістю 20 % у колбу**

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	101403,397	101403,335	101402,506	101404,147
Температура (текучого середовища)	[C]	23,221	23,219	23,213	23,225
Швидкість	[m/s]	7,122	7,265	6,658	8,095

Таблиця 5.16

**Отримані модельні дані тиску проходження,
температури та швидкості повітря через ППМ з порошку
сталі ШХ15 з пористістю 30 % у колбу**

Назва цілі	Оди- ниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	101376,898	101376,816	101376,086	101377,502
Температура (текучого середовища)	[C]	23,221	23,219	23,213	23,225
Швидкість	[m/s]	7,011	7,151	6,554	7,969

Таблиця 5.17

**Отримані модельні дані тиску проходження,
температури та швидкості повітря через ППМ з порошку
сталі ШХ15 з пористістю 40 % у колбу**

Назва цілі	Оди- ниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	101367,646	101367,557	101366,861	101368,201
Температура (текучого середовища)	[C]	23,221	23,219	23,213	23,225
Швидкість	[m/s]	6,954	7,094	6,502	7,906

Таблиця 5.18

**Отримані модельні дані тиску проходження,
температури та швидкості повітря через ППМ з порошку
сталі ШХ15 з пористістю 50 % у колбу**

Назва цілі	Оди- ниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	101363,367	101363,275	101362,595	101363,901
Температура (текучого середовища)	[C]	23,221	23,219	23,213	23,225
Швидкість	[m/s]	6,921	7,059	6,471	7,868

Проаналізувавши дані з таблиць, можна зробити висновок, що при зростанні параметру пористості ППМ значення параметрів тиску і швидкості рідини зменшується.

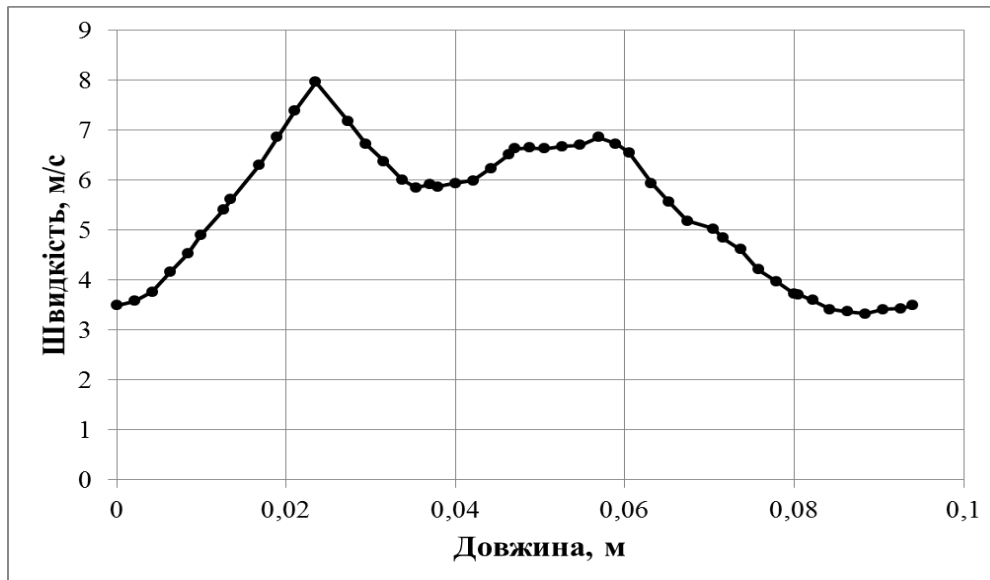


Рис. 5.13. Графік залежності швидкості руху повітря зсередини ППМ відносно довжини перерізу у колбу

З графіка на рис. 5.13 видно, що швидкість руху повітря росте ближче до середини ППМ, а далі спадає. Швидкість змінюється на проміжку від 3,5 до 8 м/с.

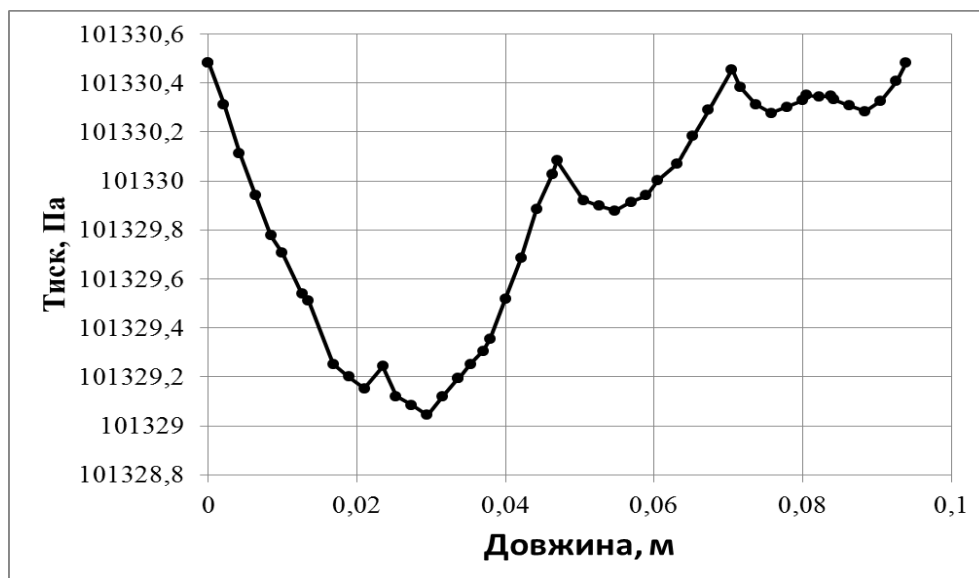


Рис. 5.14. Графік залежності тиску руху повітря зсередини ППМ відносно довжини перерізу у колбу

Дані графіка переконливо доводять, що тиск повітря збільшується ближче до краю ППМ. Тиск змінюється на проміжку від 101,329 кПа до 101,331 кПа.

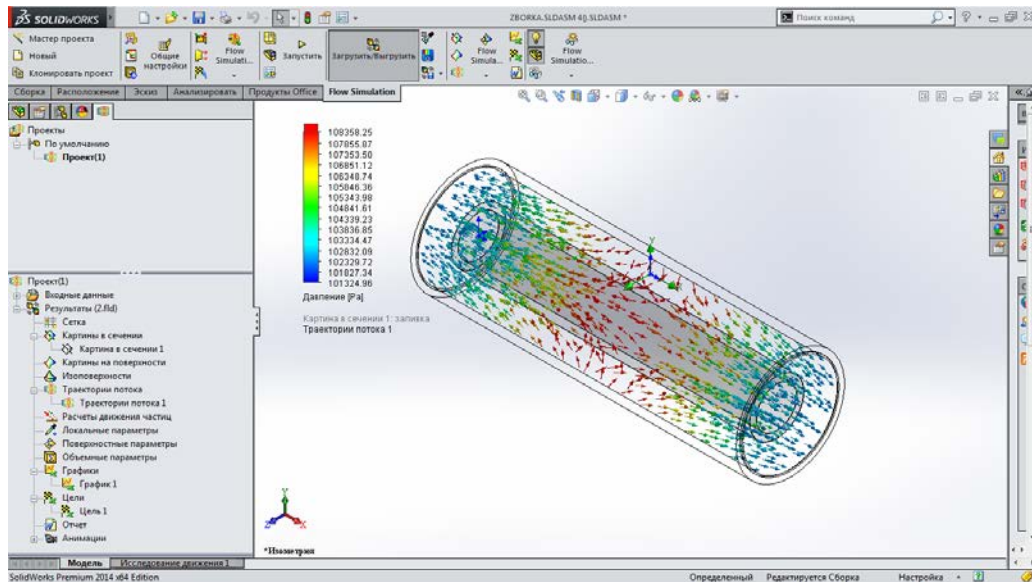


Рис. 5.15. Напрямки потоку повітря, що проходить через ППМ (зовнішнє фільтрування)

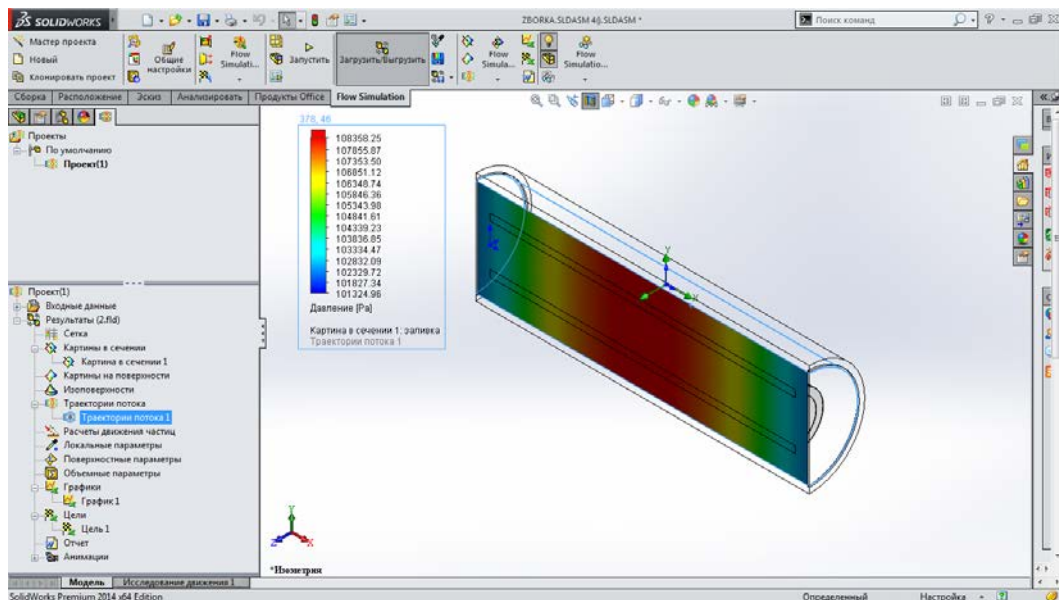


Рис. 5.16. Визначення тиску потоку повітря, що проходить через ППМ (зовнішнє фільтрування)

Синім кольором позначено ділянки потоку повітря, в яких тиск мінімальний, а червоним – максимальний.

Таблиця 5.19

**Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості
проходження повітря через ППМ з порошку сталі ШХ15
з пористістю 10 % з колби**

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	160306,923	158701,272	156614,492	160306,923
Температура (текучого середовища)	[C]	15,106	15,176	15,106	15,269
Швидкість	[m/s]	109,867	109,116	108,104	109,868

Таблиця 5.20

**Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості
проходження повітря через ППМ з порошку сталі ШХ15
з пористістю 20 % з колби**

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	114103,45	113934,946	113722,057	114103,45
Температура (текучого середовища)	[C]	15,078	15,133	15,078	15,202
Швидкість	[m/s]	105,486	104,921	104,207	105,486

Таблиця 5.21

**Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості
проходження повітря через ППМ з порошку сталі ШХ15
з пористістю 30 % з колби**

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	109978,383	109894,918	109789,154	109978,384
Температура (текучого середовища)	[C]	15,063	15,11	15,063	15,169
Швидкість	[m/s]	104,077	103,602	103,004	104,077

Таблиця 5.21

**Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості
проходження повітря через ППМ з порошку сталі ШХ15
з пористістю 40 % з колби**

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	108765,316	108705,916	108627,313	108765,316
Температура (текучого середовища)	[C]	15,053	15,095	15,053	15,148
Швидкість	[m/s]	103,391	102,974	102,436	103,391

Таблиця 5.22

**Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості
проходження повітря через ППМ з порошку сталі ШХ15
з пористістю 50 % з колби**

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	108240,824	108191,829	108126,121	108240,824
Температура (текучого середовища)	[C]	15,047	15,085	15,047	15,135
Швидкість	[m/s]	102,978	102,598	102,099	102,978

Проаналізувавши дані з таблиць 5.19–5.22, робимо висновок, що при зростанні параметру пористості ППМ значення параметрів тиску, швидкості і температури текучого середовища зменшується.

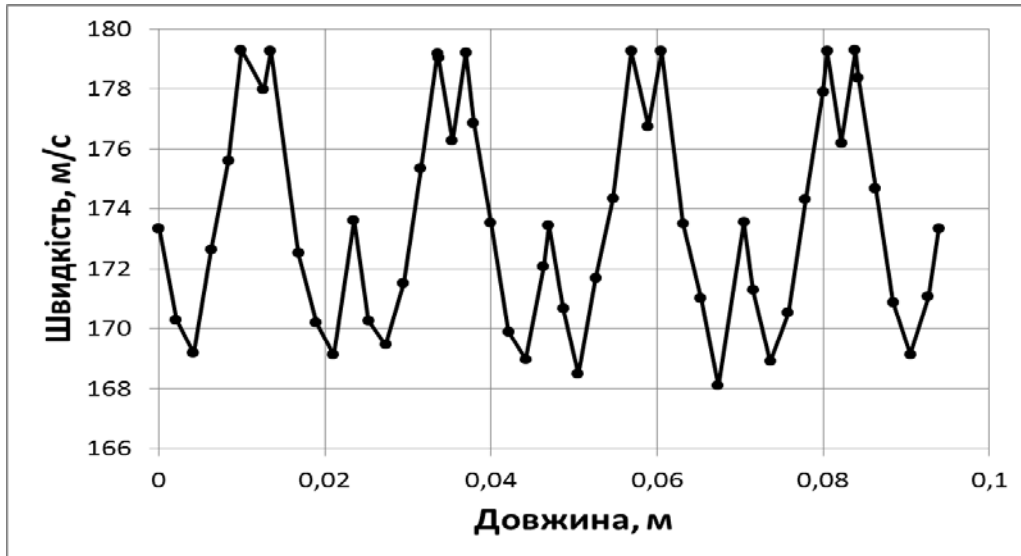


Рис. 5.17. Залежності швидкості руху повітря з колби у ППМ відносно довжини перерізу

Швидкість змінюється у проміжку від 168...180 м/с.

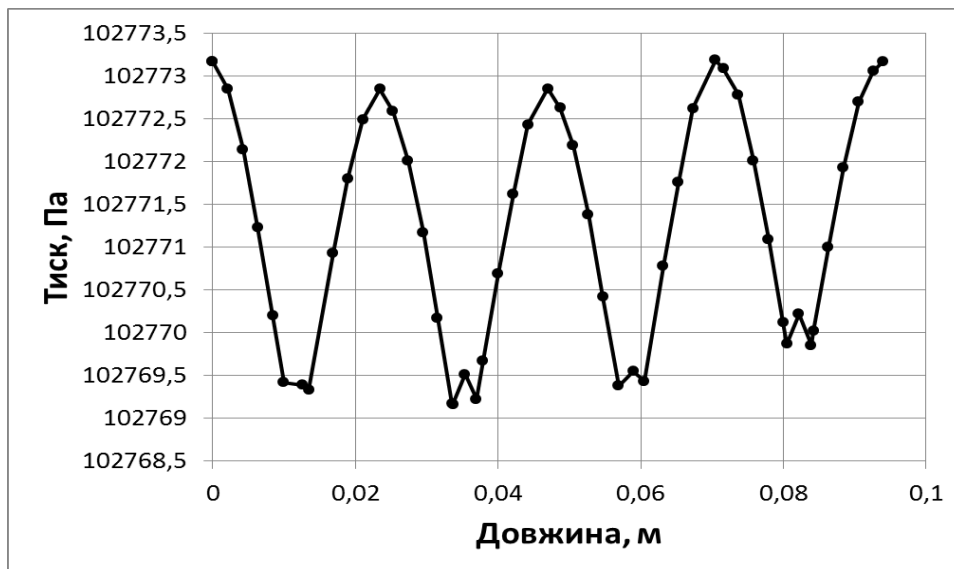


Рис. 5.18. Залежності тиску повітря, що рухається з колби у ППМ відносно довжини перерізу

Тиск змінюється на проміжку від 102,769 кПа до 102,744 кПа.

На рис. 5.19 зображено колбу, всередині якої закріплено ППМ. У колбі рухається газ (неон) зсередини ППМ назовні колби. Синім кольором позначено ділянки потоку, в яких швидкість мінімальна, а червоним – максимальна.

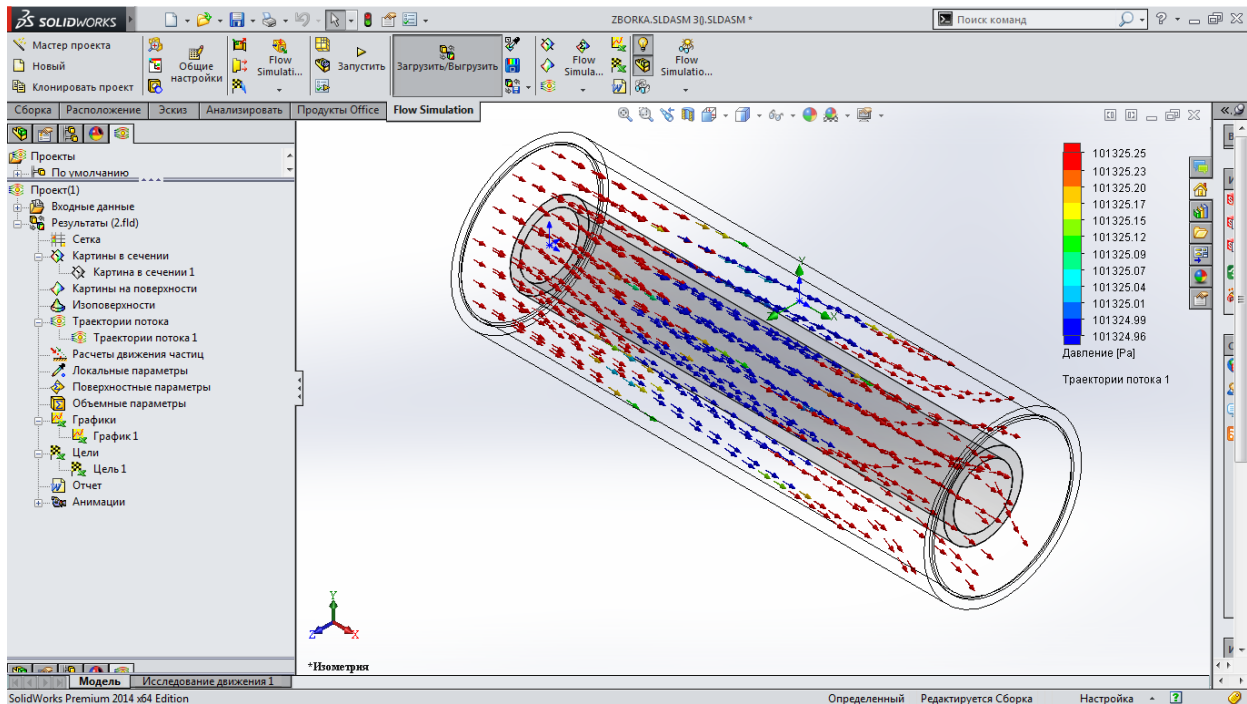


Рис. 5.19. Графічне зображення траєкторії руху газу з ППМ у колбу (внутрішнє фільтрування)

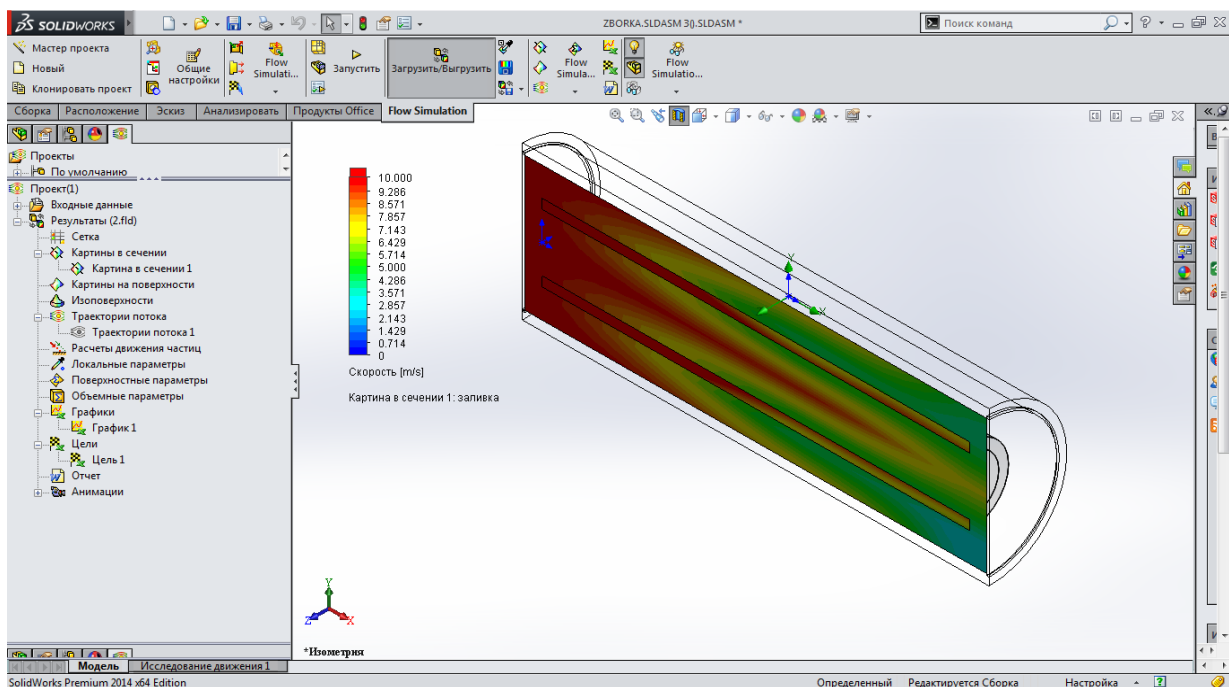


Рис. 5.20. Визначення тиску повітря, що проходить з ППМ у колбу (внутрішнє фільтрування)

Таблиця 5.23

**Отримані модельні дані тиску, температури
та швидкості проходження газу з ППМ у колбу (пористість 10 %)**

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	101479,791	101480,071	101479,041	101481,044
Температура (текучого середовища)	[C]	23,219	23,218	23,214	23,224
Швидкість	[m/s]	7,571	7,629	7,152	8,493

Таблиця 5.24

**Отримані модельні дані тиску, температури
та швидкості проходження газу з ППМ у колбу (пористість 20 %)**

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	101379,551	101379,597	101379,104	101380,039
Температура (текучого середовища)	[C]	23,219	23,218	23,214	23,224
Швидкість	[m/s]	7,229	7,285	6,834	8,111

Таблиця 5.25

**Отримані модельні дані тиску, температури
та швидкості проходження газу з ППМ у колбу (пористість 30 %)**

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	101361,112	101361,113	101360,625	101361,495
Температура (текучого середовища)	[C]	23,219	23,218	23,214	23,224
Швидкість	[m/s]	7,115	7,171	6,728	7,982

Таблиця 5.26

**Отримані модельні дані тиску, температури
та швидкості проходження газу з ППМ у колбу (пористість 40 %)**

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	101354,665	101354,651	101354,166	101355,023
Температура (текучого середовища)	[C]	23,219	23,218	23,214	23,224
Швидкість	[m/s]	7,058	7,112	6,675	7,918

Таблиця 5.27

**Отримані модельні дані тиску, температури
та швидкості проходження газу з ППМ у колбу (пористість 50 %)**

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	101351,684	101351,663	101351,178	101352,031
Температура (текучого середовища)	[C]	23,219	23,218	23,214	23,224
Швидкість	[m/s]	7,024	7,078	6,643	7,881

Проаналізувавши дані з таблиць 5.23–5.27, можна зробити висновок, що при зростанні параметру пористості ППМ значення параметрів тиску і швидкості рідини зменшується, а значення температури не змінюється.

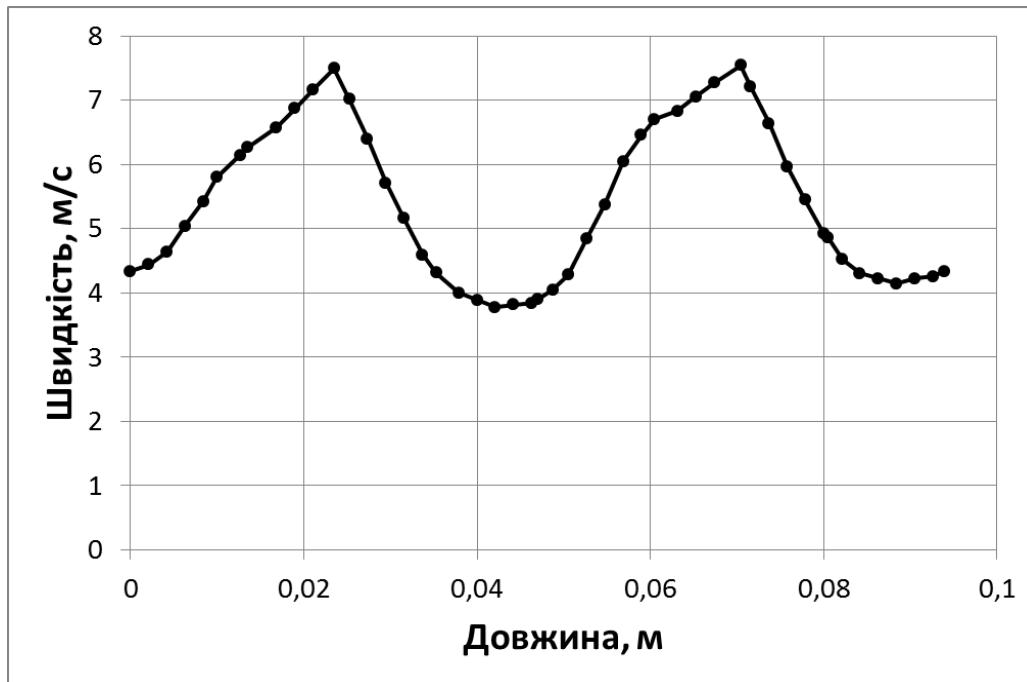


Рис. 5.21. Графік залежності швидкості руху газу з ППМ у колбу

Швидкість змінюється на проміжку від 4 до 8 м/с.

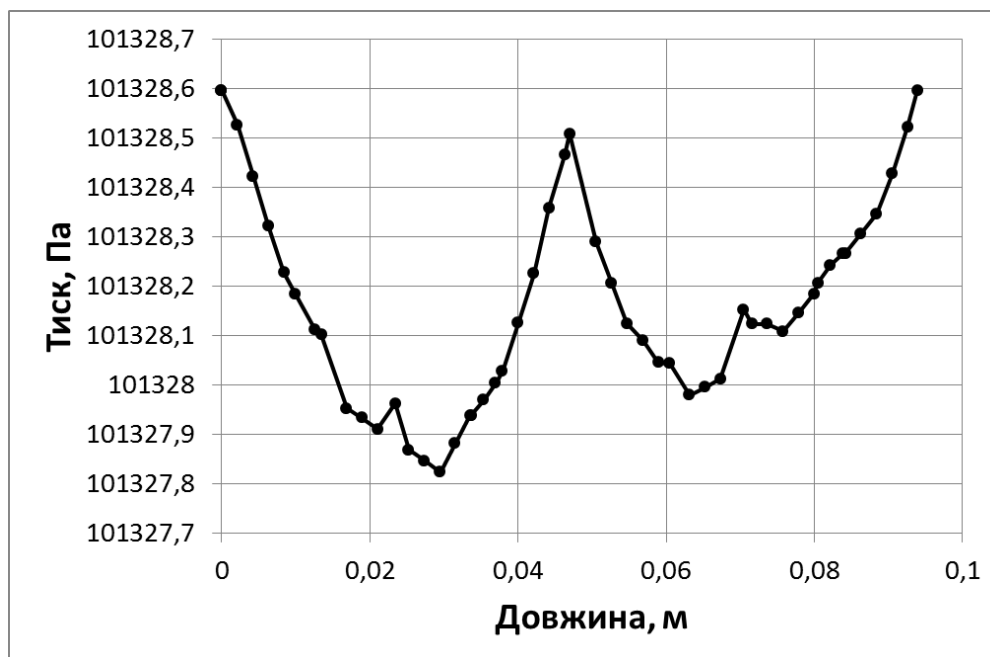


Рис. 5.22. Графік залежності тиску потоку газу, що проходить з ППМ у колбу

Тиск змінюється на проміжку від 101,327 кПа до 101,328 кПа.

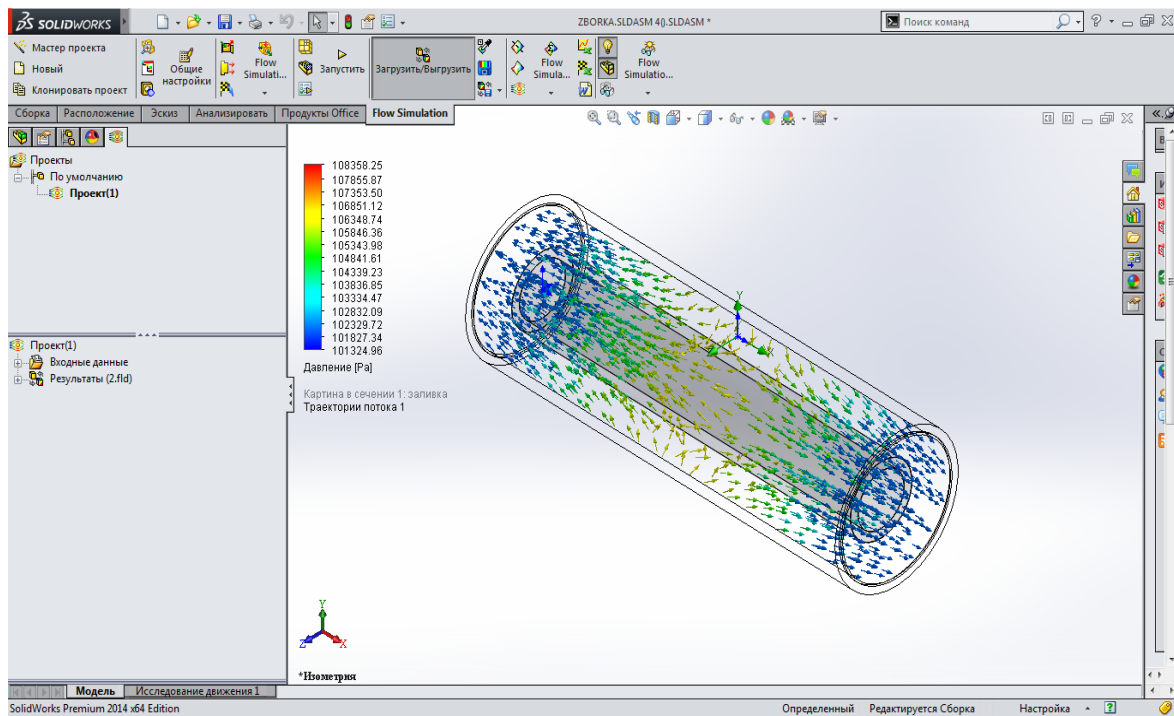


Рис. 5.23. Графічне зображення траєкторії руху газу з ППМ у колбу (зовнішнє фільтрування)

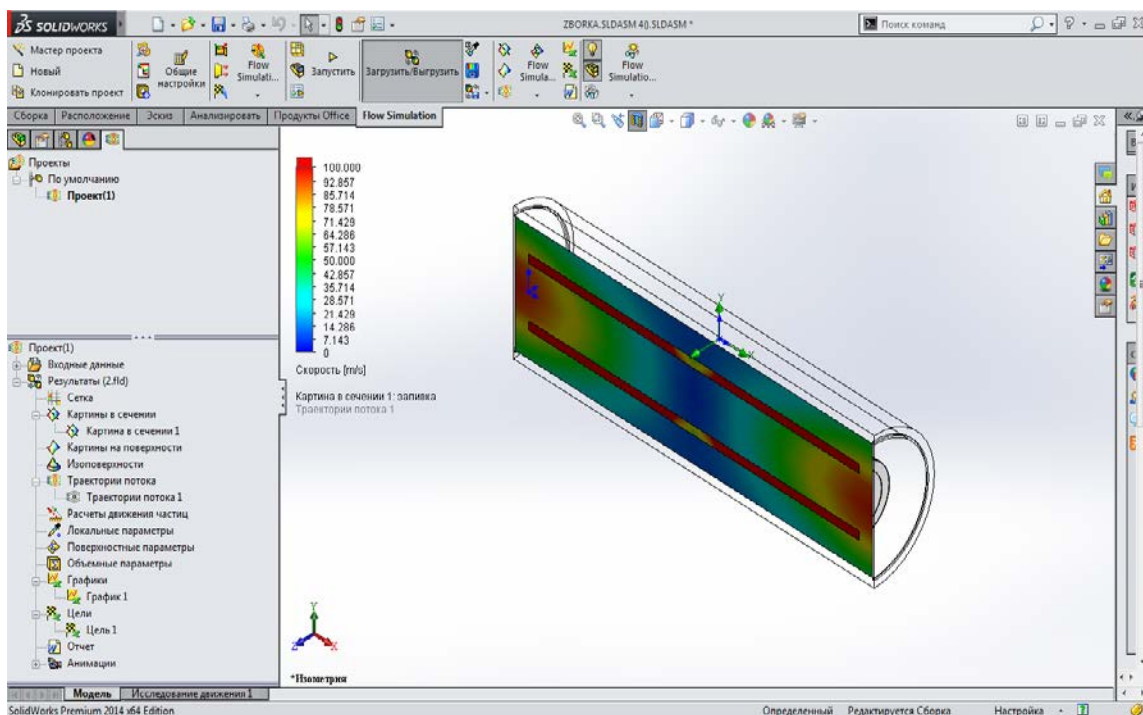


Рис. 5.24. Визначення тиску повітря, що проходить з ППМ у колбу (зовнішнє фільтрування)

Таблиця 5.28

Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості проходження газу з колби у ППМ (пористість 10 %)

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	11709368,2	11618273,6	11394089,69	11709368,23
Температура (текучого середовища)	[C]	19,95	19,935	19,874	19,954
Швидкість	[m/s]	109,86	109,584	108,848	109,86

Таблиця 5.29

Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості проходження газу з колби у ППМ (пористість 20 %)

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	9019353,93	8982074,72	8892617,774	9019353,931
Температура (текучого середовища)	[C]	19,95	19,935	19,874	19,954
Швидкість	[m/s]	105,186	104,928	104,215	105,187

Таблиця 5.30

Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості проходження газу з колби у ППМ (пористість 30 %)

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	6669351,28	6642037,32	6577530,38	6669351,28
Температура (текучого середовища)	[C]	19,95	19,935	19,874	19,954
Швидкість	[m/s]	103,629	103,368	102,671	103,629

Таблиця 5.31

Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості проходження газу з колби у ППМ (пористість 40 %)

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	5846850,36	5823025,06	5767249,795	5846850,356
Температура (текучого середовища)	[C]	19,95	19,935	19,874	19,954
Швидкість	[m/s]	102,85	102,591	101,899	102,85

Таблиця 5.32

Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості проходження газу з колби у ППМ (пористість 50 %)

Назва цілі	Одиниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	[Pa]	5466149,93	5443939,11	5392205,638	5466149,927
Температура (текучого середовища)	[C]	19,95	19,935	19,874	19,954
Швидкість	[m/s]	102,383	102,125	101,435	102,383

Проаналізувавши дані з таблиць 5.28–5.32 можна зробити висновок, що при зростанні параметра пористості ППМ значення параметрів тиску і швидкості газу зменшуються, а значення температури не змінюється.

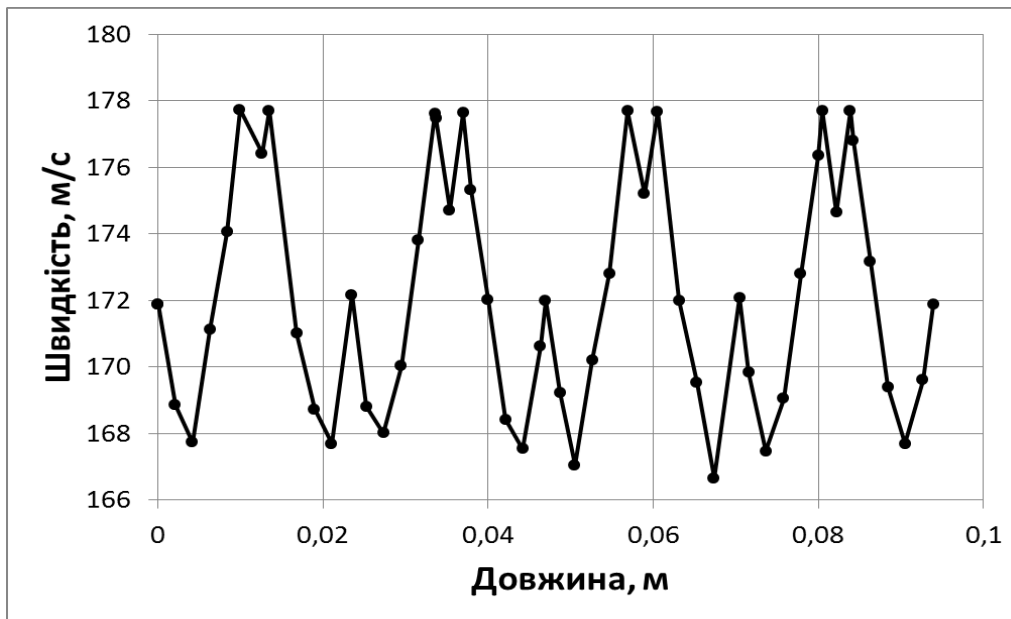


Рис. 5.25. Графік залежності швидкості руху газу з колби у ППМ

Швидкість змінюється на проміжку від 166 до 178 м/с.

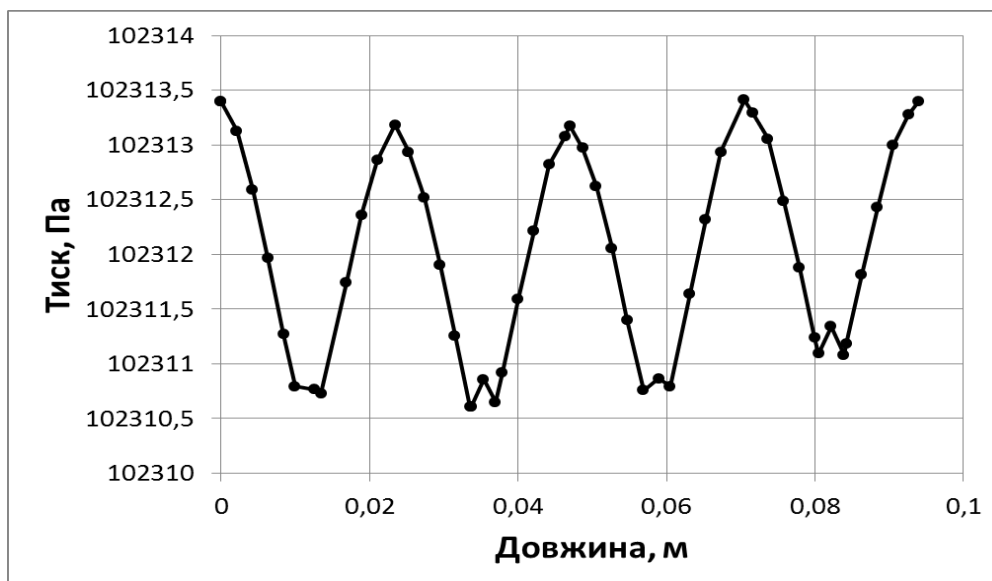


Рис. 5.26. Графік залежності тиску потоку газу, що проходить з колби у ППМ

Тиск змінюється на проміжку від 102310,5 Па до 102313 Па.

Змодельовану цілу систему для визначення комплексної оцінки ППМ представлено на рис. 5.29, 5.30.

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

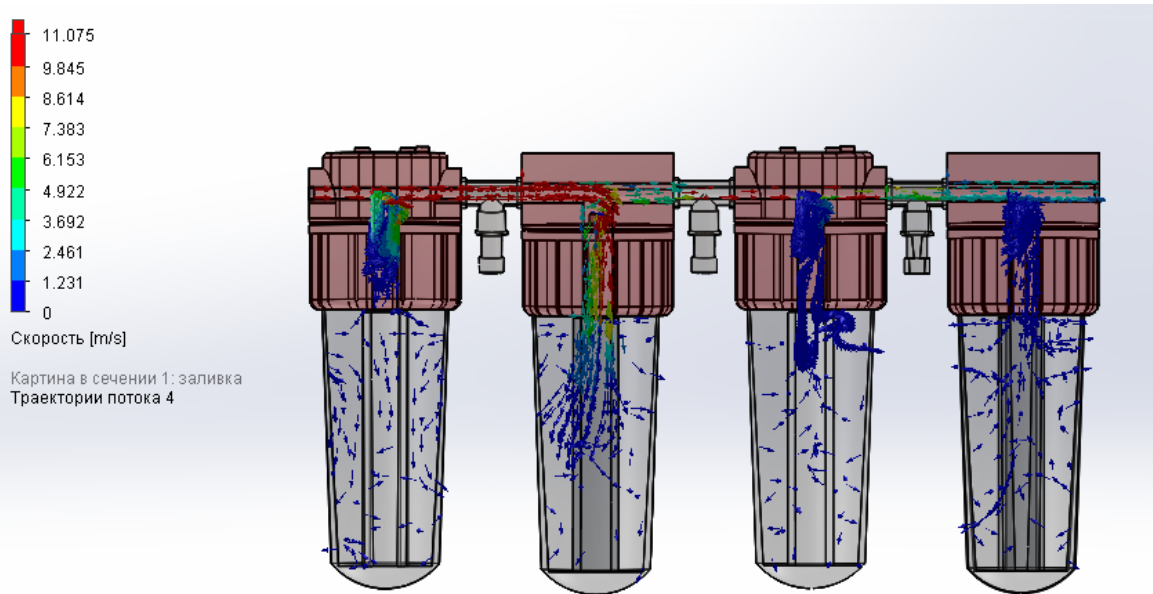


Рис. 5.27. Напрямки руху потоку води в системі із чотирьох ППМ при визначенні швидкості

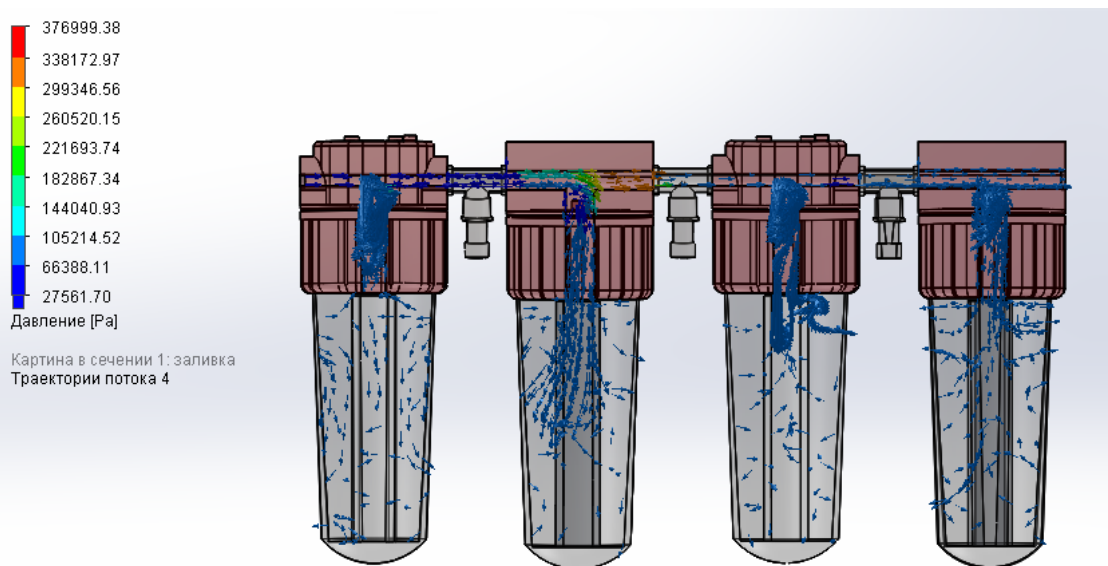


Рис. 5.28. Напрямки руху потоку води в системі із чотирьох ППМ при визначенні перепаду тисків

Графічні залежності швидкості руху потоку води та перепаду тисків представлено на рис. 5.29.

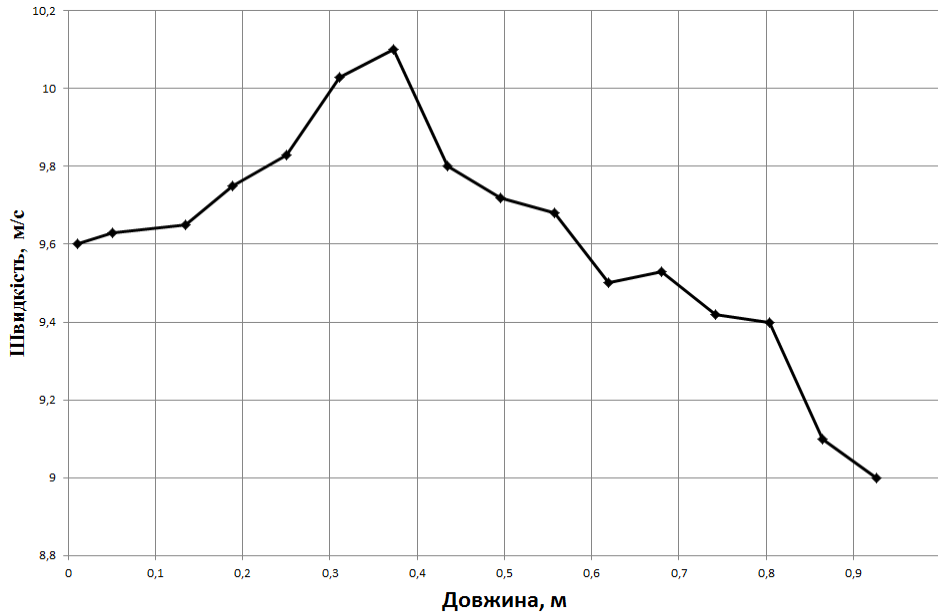


Рис. 5.29. Графік залежності швидкості руху води в системі із чотирьох ППМ відносно перерізу ППМ

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

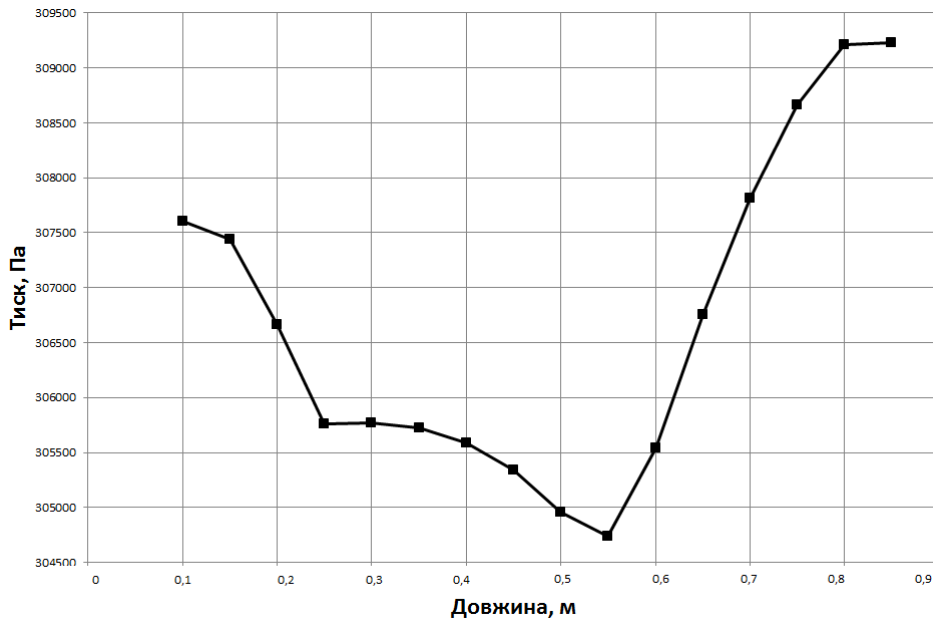


Рис. 5.32. Графік залежності перепаду тисків у системі із чотирьох ППМ відносно перерізу ППМ

Графік зображує перепад тисків потоку рідини по довжині перерізу системи фільтрів із ППМ. З графіка випливає, що тиск рідини збільшується ближче до краю ППМ.

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

5.2. Застосування ABAQUS для розв'язання статичних задач

Програмний кінцево-елементний комплекс ABAQUS – універсальна система загального призначення, використовується як для проведення багатоцільового інженерного аналізу, так і для науково-дослідних і навчальних цілей різних сферах діяльності, серед яких такі:

- автомобілебудування;
- авіабудування і оборонна промисловість;
- електроніка;
- металургія;
- нафтовидобування і переробка;
- виробництво товарів народного споживання;
- загальна механіка і геомеханіка.

За допомогою комплексу ABAQUS можна вирішувати такі складні завдання, як розрахунок міцності турбомашин і проектування рухових установок, аналізувати роботу шасі і трансмісій, визначати поведінку шин, розраховувати зварні з'єднання, проводити аналіз аварійних зіткнень (краш-тести), здійснювати тести на падіння, лиття металів, пробивання матеріалу, виконувати розрахунки композиційних структур, враховувати контактну взаємодію великої кількості тіл, сейсмічні впливи, вибухові впливи, проводити розрахунки надійності ядерних реакторів, аналіз міцності електронних компонентів і т.д.

Аналіз структури різноманітних матеріалів за допомогою комп'ютерних технологій проводили наукові колективи під керівництвом К. В. Гуляєва, В. І. Зензерова, А. П. Карнаухова, В. Н. Павлиша та багато інших вчених. Особливість цих робіт полягає в тому, що за допомогою тих чи інших математичних моделей, програмних комплексів, а також розроблених алгоритмів розглядається структура уже сформованих матеріалів. Традиційні технологічні процеси порошкової металургії характеризуються регламентованою послідовністю

операцій: отримання шихти, заповнення прес-форм, формування заготовки, спікання, фінішна механічна обробка тощо.

Кожний із цих етапів суттєво впливає на якість кінцевого продукту, і тому серед нових технологій важливим є використання комп'ютерного моделювання, яке базується на методі скінчених елементів, а також за допомогою якого можна прогнозувати якісні показники кінцевого продукту.

Моделювання проводили у програмному комплексі ABAQUS, який має такі модулі: **Part, Property, Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Job, Visualization, Sketch**. Для імітації структурно неоднорідного середовища нами використано модуль **Visualization**. У якості зразка використовували круглу пластину, виготовлену з еластичного матеріалу (рис. 5.33) в циліндричній системі координат товщиною h і радіусом R .

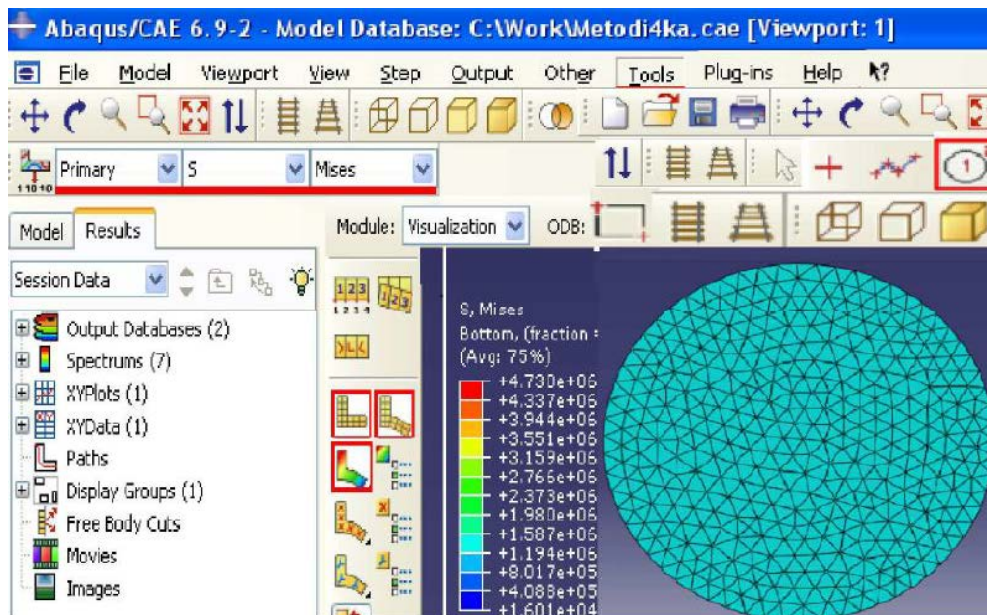


Рис. 5.33. Пластина циліндричної системи координат x, y, z

Структурні елементи представлені у вигляді п'єзоелектричних накладок однакової товщини δ та радіусом $\leq R$. Зовнішні та внутрішні поверхні межують із пасивним шаром, який покритий із нескінченно тонкими суцільними електродами. На пластинку діє осесиметричний рівномірно розподілений уздовж радіуса поверхневий тиск $P = \cos(\omega t)$, який змінюється в часі t з коловою частотою ω , близькою до власної частоти. Окрім того, виконуються функції електричних потенціалів $\psi\left(\frac{h}{2} + \delta\right) - \psi\left(-\frac{h}{2} - \delta\right) = R_{\theta}(2V^{\omega})$ із частотою механічного навантаження,

де також відбувається процес збурення. Моделювання поведінки пластини ґрунтується на гіпотезах Кірхгофа–Лява, і зводиться до розв'язування звичайних диференціальних рівнянь.

За допомогою модуля **Visualization** програмного комплексу ABAQUS та наведеного вище матеріалу, проаналізували коливання пластини, результати представлені на (рис. 5.34–5.36).

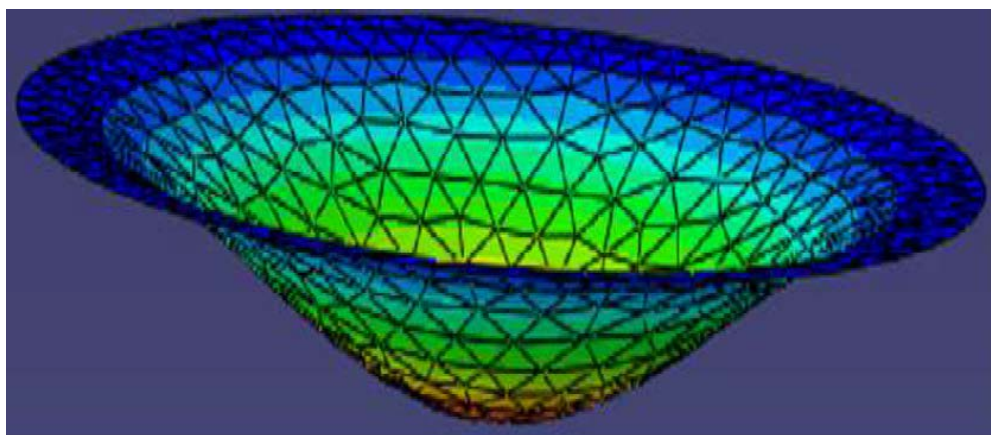


Рис. 5.34. Коливання пластини у момент часу $t= 2^0\text{C}$

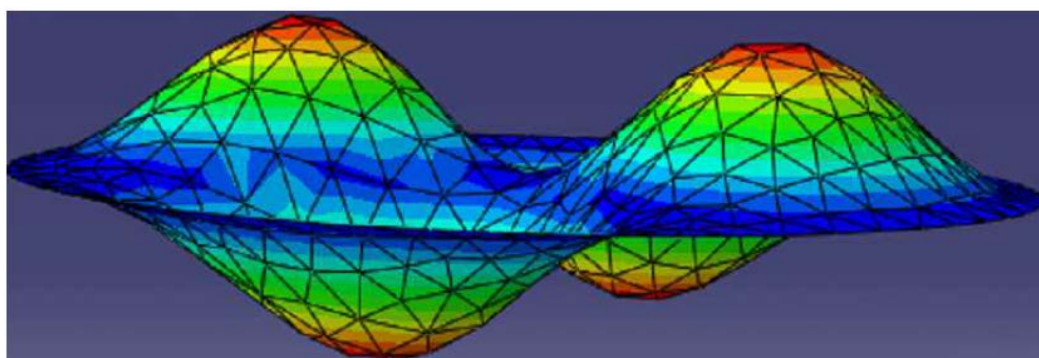


Рис. 5.35. Коливання пластини у момент часу $t= 5^0\text{C}$

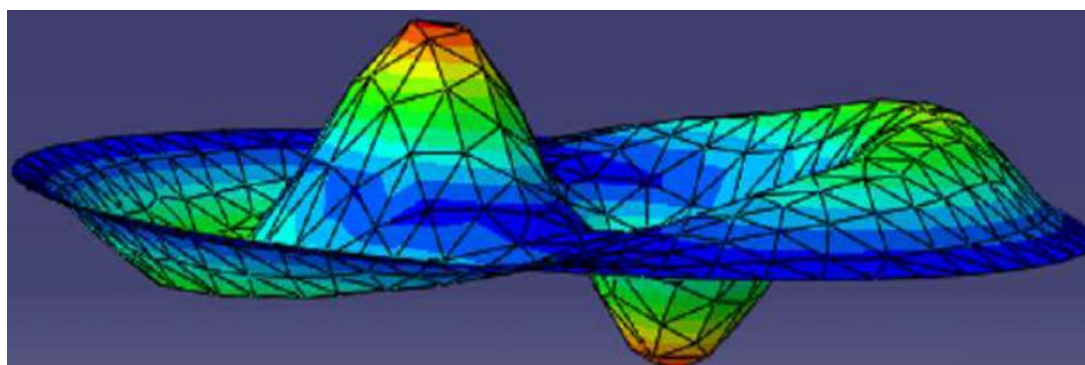


Рис. 5.36. Коливання пластини у момент часу $t= 10^0\text{C}$

Розглянемо пористий проникний матеріал зовнішнім діаметром 40мм, внутрішнім діаметром 30мм і довжиною 220мм, виготовлений з матеріалу – порошок сталі ШХ15 (рис. 5.37) і навантажену силою $P=10\text{кПа}$, яка прикладена до тіла зовні та зсередини.

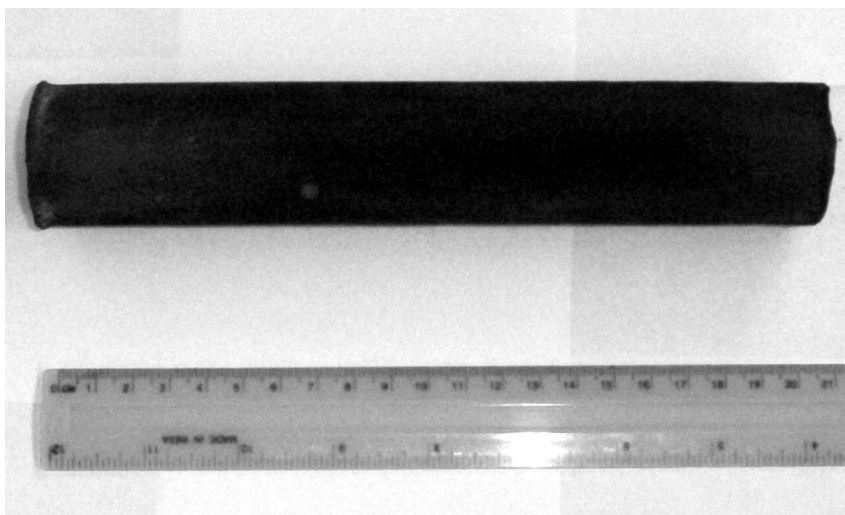


Рис. 5.37. Загальний вигляд ППМ виготовленого з порошку ШХ15

Для початку роботи необхідно завантажити заздалегіть створену деталь із пористого проникного матеріалу. Дана деталь була накреслена з допомогою програмного комплексу *Solidworks* (рис. 5.38).

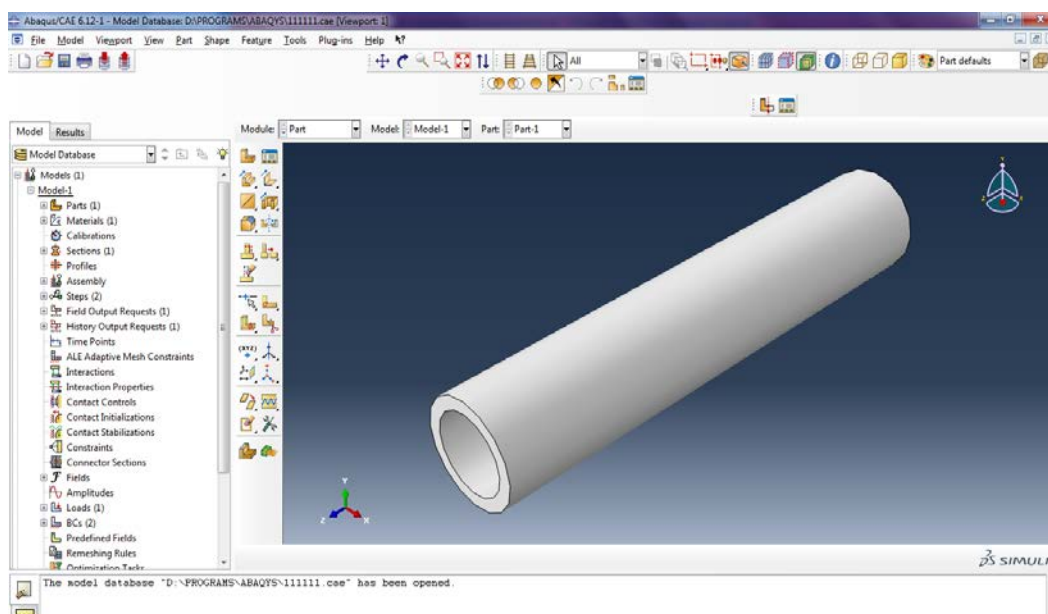


Рис. 5.38. Тривимірна модель деталі ППМ, яка виготовлена з порошку сталі ШХ15

У модулі **Encatре** вводимо нульові лінійні і кутові переміщення в торці ППМ, і виводимо візуальне відображення прикладання тиску ззовні (рис. 5.39).

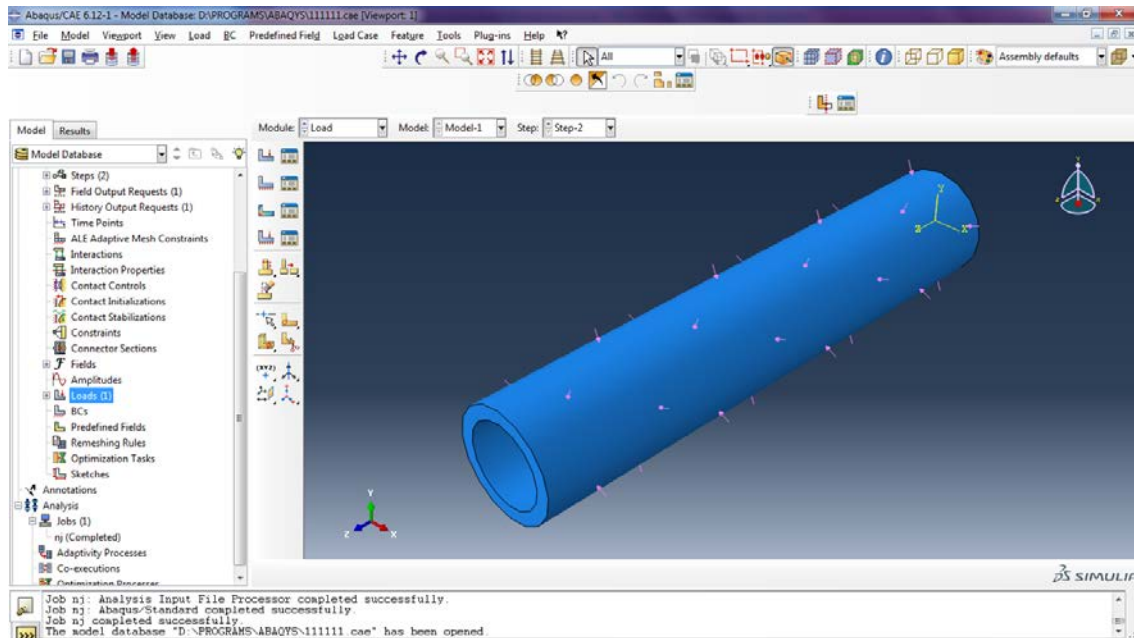


Рис. 5.39. Графічне відображення прикладених до тіла навантаження

Як критерій міцності у програмному комплексі ABAQUS у цьому разі вибираємо кількість питомої потенціальної енергії формозміни, накопиченої zdeформованим об'єктом. небезпечний стан (текучість) у загальному випадку напруженого стану виникає тоді, коли питома потенціальна енергія формозміни досягне свого критичного значення. Еквівалентне напруження за теорією четвертою теорією Губера-Мізеса буде рівним:

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma]$$

За допомогою **Plot Contour** програмного комплексу ABAQUS та введених всіх необхідних даних, автоматично проводяться розрахунки та одержуємо результати прикладання тиску ззовні (рис. 5.40).

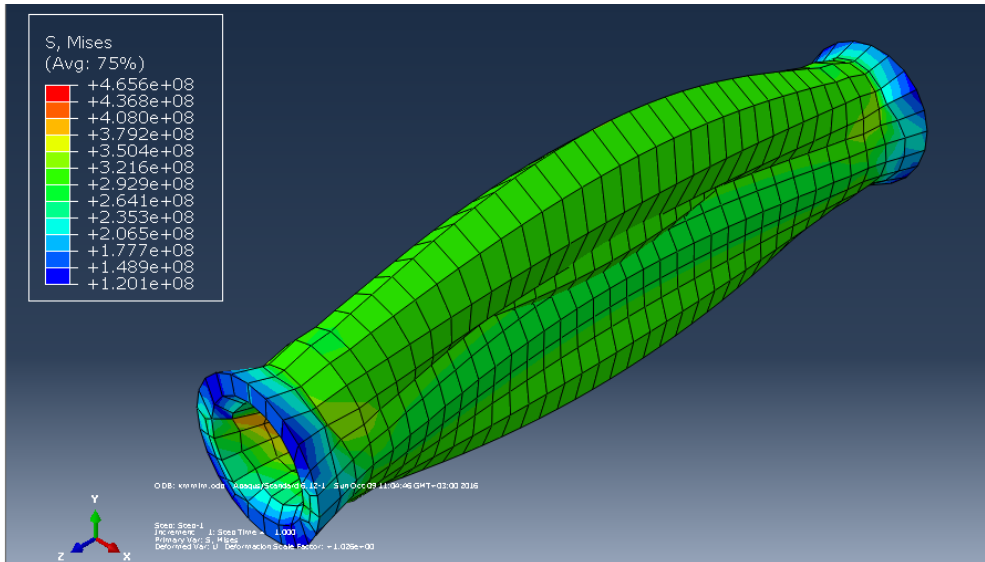


Рис. 5.40. Розподілення навантаження на ППМ по критерію максимального напруження за Губером-Мізесом ззовні

У даному випадку ми отримуємо графічне відображення розподілення навантаження на ППМ за критерієм максимального напруження за Губером-Мізесом. Деталь відображується в деформованому вигляді. Зеленим кольором показано допустимі навантаження на ППМ за критерієм максимального напруження за Мізесом, а червоним відображено перевищення гранично допустимих навантажень.

Змінимо критерій на **Pressure** (критерій руйнування в ABAQUS) і відображуємо розподілення по тиску (рис. 5.41).

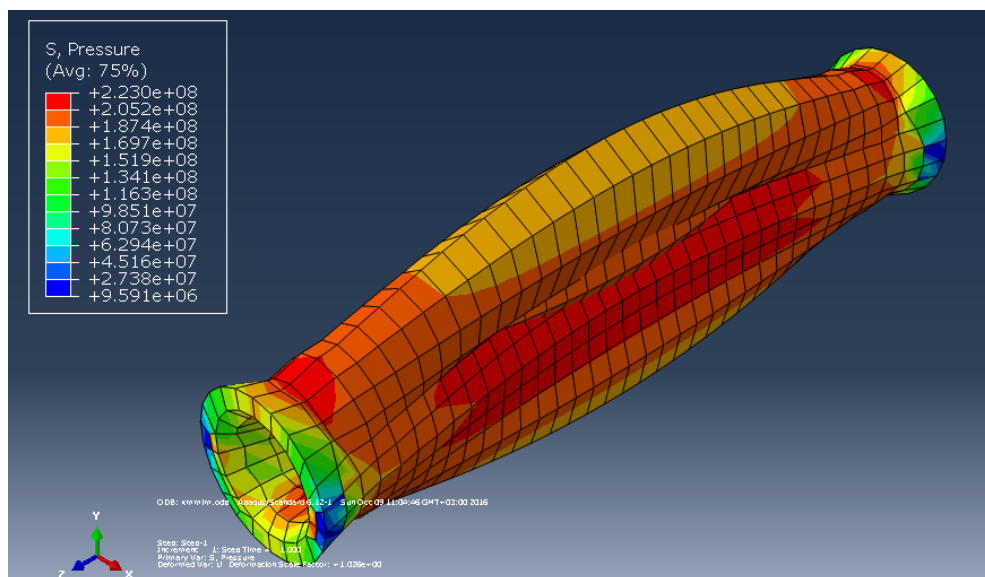


Рис. 5.41. Розподілення деформацій по ППМ під дією заданого тиску

У даному випадку ми отримуємо графічне відображення розподілення навантаження на ППМ за критерієм **Pressure**. Деталь відображується в деформованому вигляді. Зеленим кольором показано допустимі навантаження на ППМ, а червоним відображено перевищення гранично допустимих навантажень.

Результати моделювання представлено у вигляді графічної залежності, яка представлена на рис. 5.42.

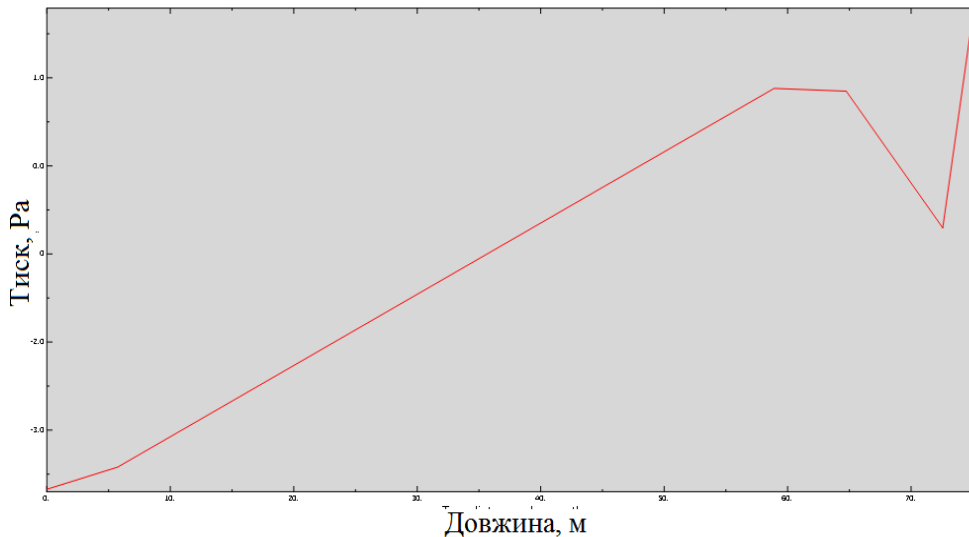


Рис. 5.42. Графік залежності тиску, що діє на ППМ від довжини перерізу

Аналогічні розрахунки проведемо для ППМ, до якого навантаження прикладене зсередини. Результати моделювання у вигляді графічної залежності наведено на рис. 5.43.

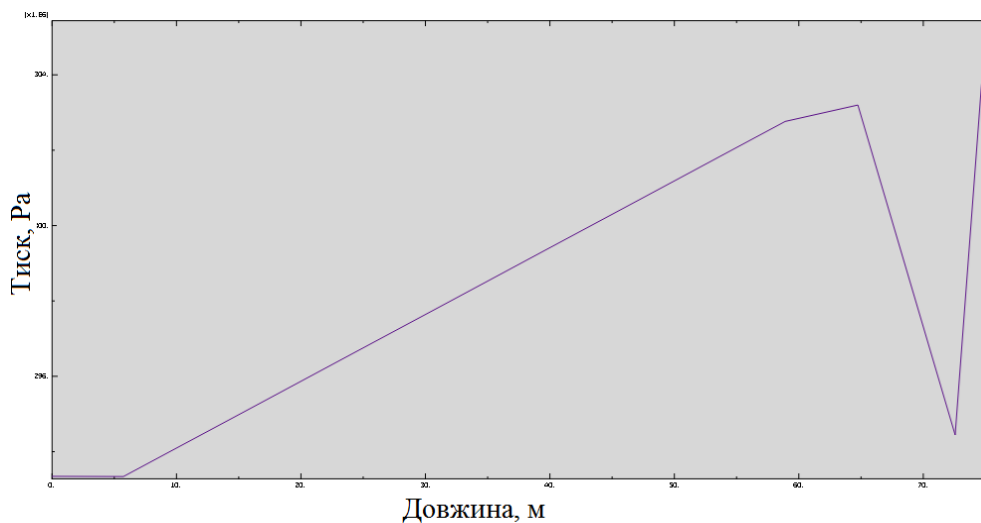


Рис. 5.43. Графік залежності тиску, що діє на ППМ зсередини

Як видно з рис. 5.42, 5.43 чим далі від зони закріплення ППМ діє навантажувальне середовище (вода, повітря, газ), тим більший тиск створюється у ППМ. У нашому випадку тиск зсередини при проходженні води менше діє на ППМ, ніж тиск, прикладений ззовні.

Організація програмного середовища моделювання ABAQUS надає можливість досліджувати та прогнозувати закономірності формування структури та властивості матеріалів з урахуванням розмірів структурних елементів, встановлення кореляційних зв'язків між складовими, будовою; а також використовується для аналізу напруженодеформованого стану під дією механічних та термічних навантажень, базою для яких слугує метод скінчених елементів.

5.3. Моделювання ущільнення порошкового фільтруючого елемента складної форми при радіально-ізостатичному пресуванні

Порошкова металургія кожним новим розробленим технологічним процесом демонструє переваги, які дозволяють отримувати матеріали з кращими або зовсім новими властивостями, виготовляти вироби найбільш економічно вигідним способом.

Форма одержуваних фільтруючих елементів може бути як простою, так і складною (рис. 5.44).

Технологічні параметри процесу пресування визначають розміри, форму, а також розподіл властивостей за об'ємом виробів, що, в свою чергу, впливає на експлуатаційні властивості фільтрів.

Вибір оптимальних параметрів процесу пресування є складним завданням. Тому поряд з традиційними методами досліджень, в даний час все більш широко застосовується метод попереднього комп'ютерного моделювання. Це стало можливим завдяки істотному прогресу в розумінні основних особливостей поведінки порошкових матеріалів в процесі їх ущільнення, створення відповідних математичних моделей.

Як свідчить вітчизняний та світовий досвід останніх десятиріч, успіх розв'язання проблем, що при цьому виникають, вимірюється якістю та ступенем прогнозування процесів та явищ, які супроводжують ці технології. Підвищити ефективність традиційних технологій, а також ввести безвідходне виробництво виробів широкого цілю-

вого призначення, зберігати енергію, скорочувати трудові затрати та контролювати параметри структури порошкових проникних матеріалів у процесі їх виготовлення можливо за допомогою прогнозування з використанням сучасних засобів моделювання.

Розробка та виробництво нових пористих проникних матеріалів є важливим завданням, яке значно виграє від використання засобів автоматизованого інжинірингу. Зі збільшення обчислювальної потужності, багатовимірне комп'ютерне моделювання стає все потужнішим та актуальнішим.

Найбільш поширеним методом моделювання деформаційної обробки порошкових пористих матеріалів є метод скінченних елементів.

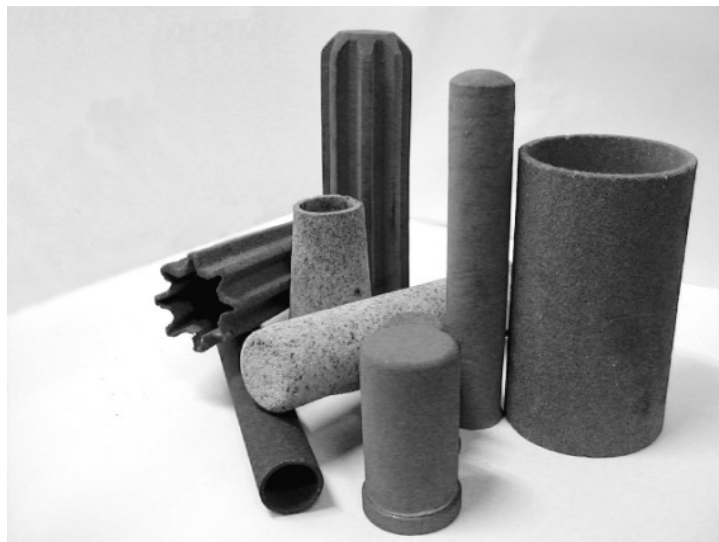


Рис. 5.44. Пористі порошкові фільтри простої і складної форми

Комп'ютерне моделювання поведінки фільтруючих елементів, що ущільнюються, при радіально-ізостатичному пресуванні, встановлення закономірностей зміни форми елемента, розподілу пористості та інших параметрів, що визначають експлуатаційні властивості, є актуальною проблемою.

Перспективними методами отримання ППМ, є методи, які направлені на створення ППМ з анізотропною структурою, у яких розміри та кількість пор змінюються в напрямку фільтрації. У таких ППМ товщина фільтрації буде визначатися шаром з мінімальним розміром пор, проникливістю є інтегральна величина, яка визначається пористою структурою всього матеріалу, а забруднювач у процесі фільтру-

вання розподіляється по всьому об'ємі фільтруючого елемента, що дозволяє збільшити ресурс роботи фільтра.

Фільтруючі ППМ у вигляді тіл обертання (труби, диски, колби тощо) отримують все більше розповсюдження у різних галузях техніки, так як вони володіють високою технологічністю конструкції. Основні вимоги, які висуваються до геометрії таких виробів, є забезпечення точності зовнішніх та внутрішніх розмірів.

Широко використовувані такі ППМ характеризуються досить високою технологічністю виготовлення. Розміри і форма таких виробів визначаються габаритами пристроїв, складовою частиною яких вони є. Збільшення продуктивності цих пристроїв зі збереженням габаритів дозволяє значно підвищити ефективність їх використання.

Моделювання виконано на основі континуального підходу. В якості визначальних співвідношень використовували співвідношення теорії пластичності пористого тіла. Визначення форми заготовки, що ущільнюється, а також полів щільності, напруг і деформацій виконано на основі методу скінченних елементів.

Розглядалися дві схеми ущільнення: радіальне (рис. 5.45, а) та осьове (рис. 5.45, б). Матеріал порошку, що ущільнюється – порошок сталі ШХ15. Початкова пористість фільтруючого елемента дорівнювала 0,7. Ущільнення відбувалося на оправку під впливом еластичного середовища, матеріал якого – поліуретан.

У зв'язку з симетрією при моделюванні розглядали половину осьового перерізу. Вважали, що оправка нерухома. Також вважали, що при радіальному ущільненні нерухома кришка (3 на рис. 5.45), а при осьовому ущільненні нерухома стінка (4 на рис. 5.45).

Поверхня поліуретану, на яку здійснювалося силове навантаження, переміщала з постійною швидкістю в радіальному (радіальне ущільнення), або в осьовому (осьове ущільнення) напрямку.

На рис. 5.46 приведені результати по розподілу пористості (рис. 5.46, а) та величини накопиченої пластичної деформації при радіальному ущільненні (рис. 3, 5.46).

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

При подальшому пресуванні відбувається збільшення відносної щільності стінки і поширення процесу ущільнення на дно фільтруючого елемента. Проте, як видно з рис. 5.46, у кінці процесу пресування величина пористості в області дна фільтра значно вище, ніж в області стінки. Характер зміни пористості по радіусу стінки залишається таким же, як на початку пресування. Розподіл пористості по висоті стінки нерівномірний: у нижній і верхній частині (рис. 5.46, а) пористість вище.

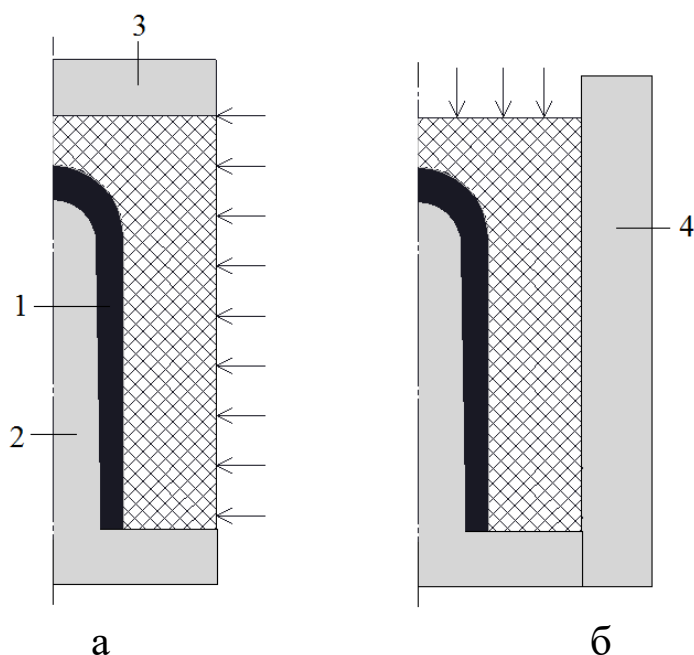


Рис. 5.45. Схеми радіального (а) та осьового (б) ущільнення:
1 – порошок, що ущільнюється, 2 – оправка, 3 – кришка, 4 – стінка

Величина накопиченої пластичної деформації розподілена за об'ємом фільтра аналогічно розподілу відносної щільності. В області дна фільтруючого елемента вона нижче.

На рис. 5.47 представлений розподіл пористості і накопиченої пластичної деформації при осьовому ущільненні. Найбільш інтенсивно порошок ущільнюється в області дна фільтра. Розподіл пористості по радіусу дна нерівномірний (рис. 5.47, а). Зі збільшенням радіуса пористість зростає.

Ущільнення порошку в області стінки відбувається в меншому ступені. У внутрішній поверхні стінки пористість нижче, а у зовнішній – вище. Величина накопиченої пластичної деформації вище в області внутрішньої поверхні стінки.

Таким чином, як при радіальному, так і при осьовому ущільненні порошку розподіл величин пористості та накопиченої пластичної деформації нерівномірний. У першому випадку менш інтенсивно ущільнюється дно, а в другому – стінка фільтра.

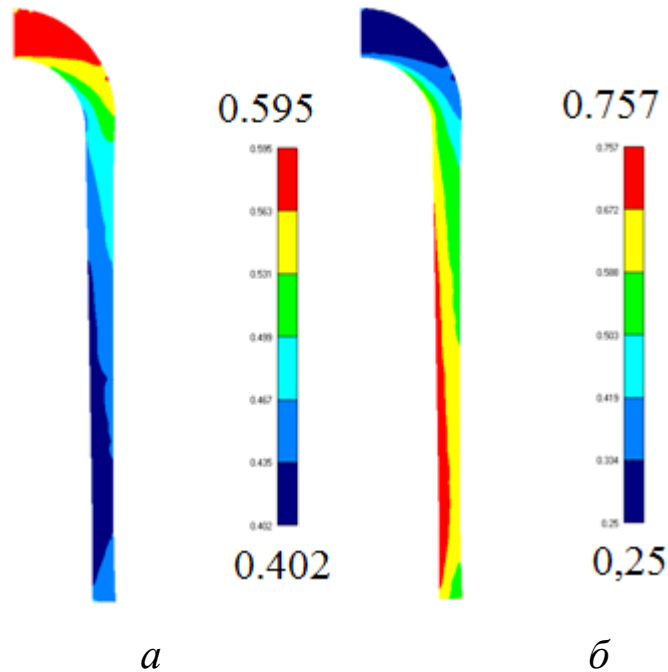


Рис. 5.46. Розподіл пористості (а) та величини накопиченої пластичної деформації (б) при радіальному ущільненні

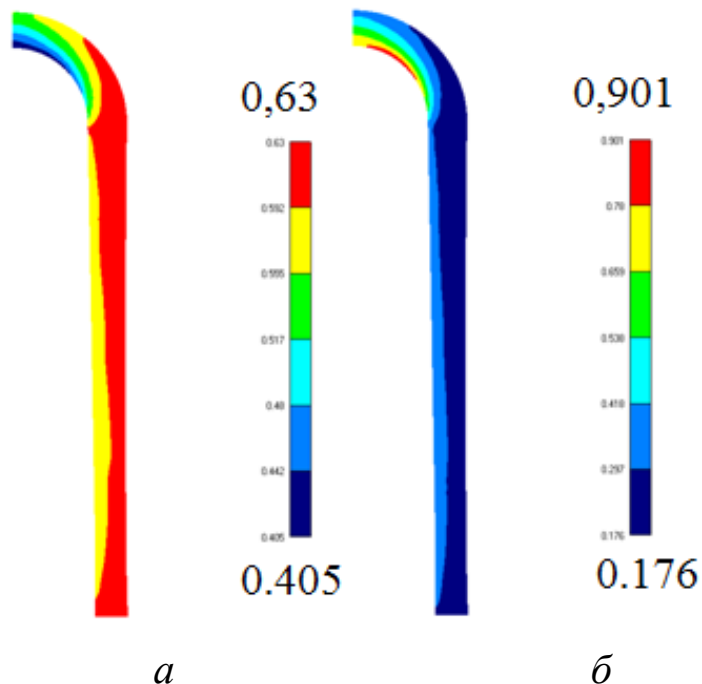


Рис. 5.47. Розподіл пористості (а) та величини накопиченої пластичної деформації (б) при осьовому ущільненні

У зв'язку з цим була розглянута схема ущільнення, при якій порошок спочатку ущільнювали в радіальному, а потім в осьовому напрямку. Результати моделювання представлені на рис. 5.48

На першому етапі більш інтенсивно ущільнюється стінка, а на другому етапі – дно фільтруючого елемента. В результаті величини пористості та накопиченої пластичної деформації розподілені більш рівномірно.

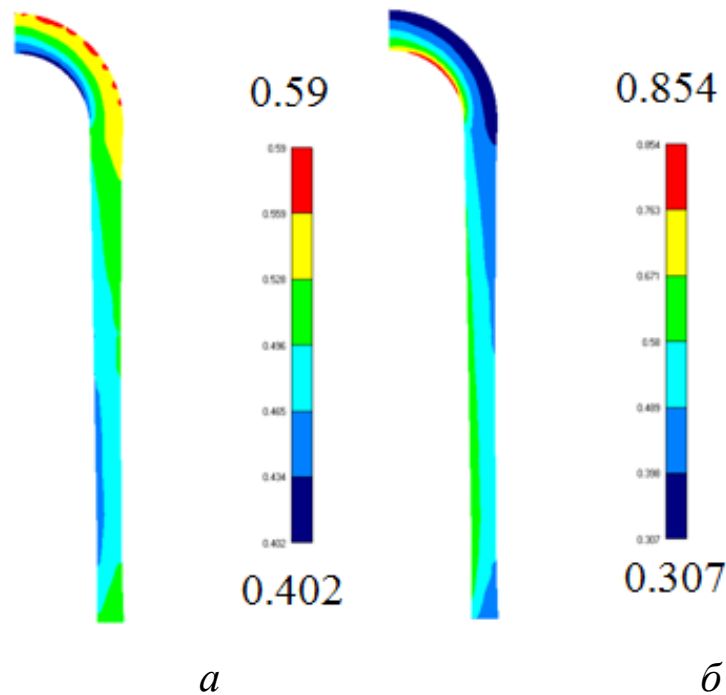


Рис. 5.48. Розподіл пористості (а) та величини накопиченої пластичної деформації (б) при радіальному та осьовому ущільненні

При радіально-ізостатичному пресуванні порошкового фільтруючого елемента у вигляді колби розподіл величин пористості та накопиченої пластичної деформації за об'ємом виробу нерівномірний і залежить від схеми ущільнення.

При радіальному застосуванні навантаження відбувається більш інтенсивне ущільнення матеріалу в області стінки фільтра. Дно фільтра ущільнюється меншою мірою.

У разі застосування схеми осьового ущільнення спостерігається більш інтенсивне ущільнення дна фільтра. Стінка фільтра при цьому також ущільнюється, але менш інтенсивно.

Застосування схеми, при якій порошок спочатку ущільнюється в радіальному, а потім в осьовому напрямку, дозволяє отримати більш рівномірний розподіл пористості та накопиченої пластичної деформації.

Підвищення продуктивності ППМ без зміни їх розмірів, що може бути досягнуто шляхом збільшення площі робочої поверхні за рахунок її ускладнення.

На рис. 5.49 показана еластична оболонка для пресування виробів з гвинтовими зовнішньою і внутрішньою поверхнями, стержень для її відливання. На рис. 5.50 представлені гвинтові ППМ з порошку сталі ШХ15 і технологічне оснащення для їх пресування, яке розроблено у Білоруському національному технічному університеті. Відмітимо, що гвинтові фільтри з тими ж габаритними розмірами мають більшу площу робочої поверхні у порівнянні з гладкою циліндричною або квадратною трубою.

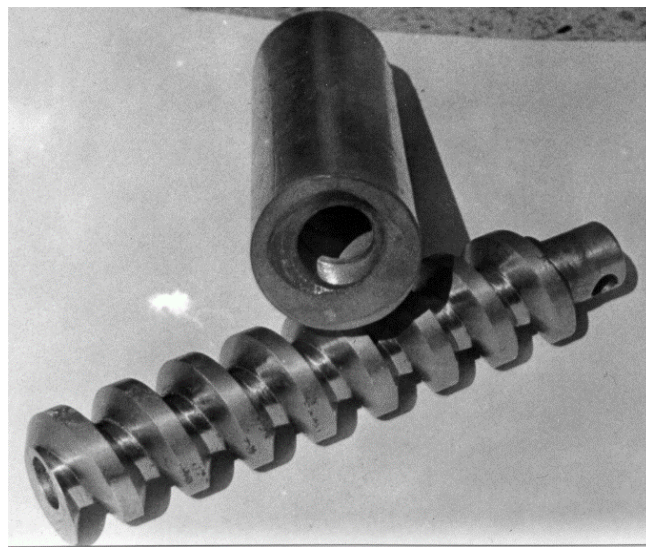


Рис. 5.49. Оболонка для пресування гвинтових виробів і стержень для її відливання

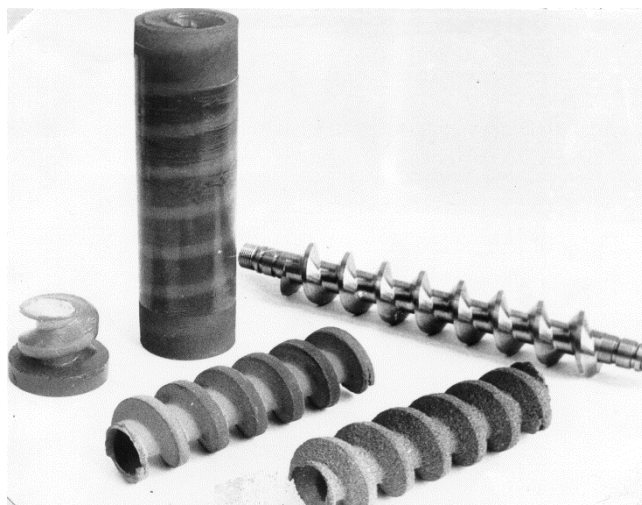


Рис. 5.50. Гвинтові фільтри і форма для їх отримання

Одним з шляхів збільшення площі робочої поверхні ППМ є формування ребристої бічної поверхні, оскільки саме така трансформація забезпечує ефективніше використання виробів. Початкові дані при проектуванні ребристих ППМ слід задавати з урахуванням досвіду розробки технології і устаткування для радіального пресування. Так, не дивлячись на те, що коефіцієнт Пуассона матеріалу еластичного передавального середовища (зокрема, поліуретану) наближається до 0,5, існують обмеження за формою і мінімальною товщиною елементів еластичних форм для пресування. Тому в число початкових даних повинні входити такі показники, як мінімальна відстань між сусідніми зубами, радіуси переходів між поверхнями, максимальна висота зубів залежно від розмірів пресування, тобто параметри, що визначають технологічність і принципову можливість виготовлення конкретного виробу.

Порошкова заготовка ППМ з розвиненою бічною поверхнею, еластична деформуюча оболонка і жорстка формотворна оправка утворюють разом реологічно і геометрично неоднорідну систему. Постійний взаємовплив ППМ та еластичної оболонки в процесі пресування не дозволяють отримати адекватне рішення задачі по визначенню напружень, деформацій і, в підсумку, розподілу щільності в пресуванні. При цьому геометрична неоднорідність визначається конфігурацією пресування і, відповідно, інструменту, а реологічна – фізико-механічними властивостями матеріалів порошку, еластомеру і оправки. Тоді задача з розрахунку кінетичних характеристик процесу деформування зазначеної системи зводиться до визначення областей, який займається відповідним матеріалом, встановлення співвідношень між напруженнями і деформаціями для кожного матеріалу і розв'язання системи диференціальних рівнянь в часткових похідних для розрахунку компонент тензорів напружень і деформацій.

Розглянемо процес пресування ППМ з розвинутою бічною поверхнею у вигляді повздовжніх ребер, які утворені дугами окружностей з розмірами, які розраховані з точки зору максимізації коефіцієнта збільшення поверхні при виконання технологічних операцій. Матеріал еластичної оболонки – поліуретан Адіпрен Л-167. Пресуємий порошок – порошок сталі ШХ15. Тиск пресування – 100 МПа.

Результати моделювання на основі приведеної математичної моделі представлено на рис. 5.50, 5.51.

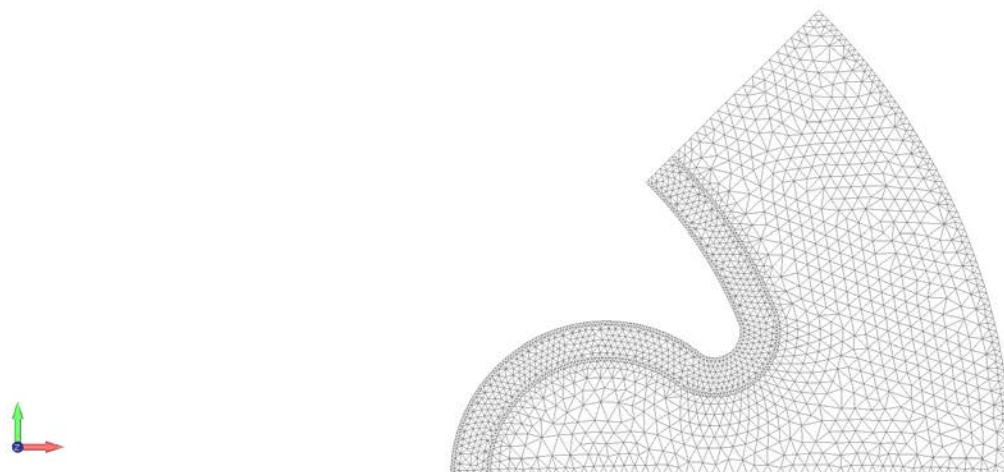


Рис. 5.51. Розбиття площини січення ППМ на кінцеві елементи

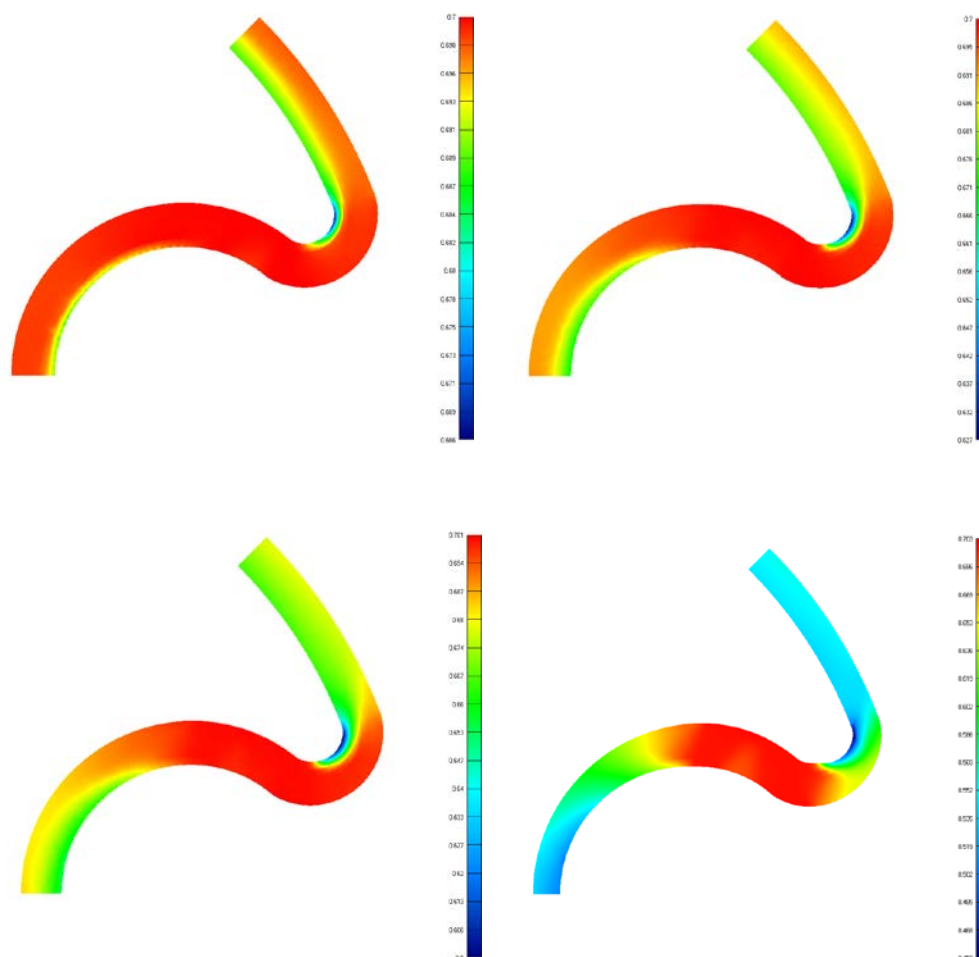


Рис. 5.52. Деформований стан системи

Приймаючи термінологічні напруження, які направлені перпендикулярно поверхні контакту еластичного інструменту та порошку

нормальними, а напруження, які направлені по дотичній до цієї поверхні в площині, яка перпендикулярна осі пресовки, дотичними, проведемо аналіз результатів моделювання.

Величина напружень по контуру пресовки не є постійною. Ця обставина визначається властивостями матеріалу еластичної оболонки та конфігурацією поверхні пресовки. В силу геометричної неоднорідності системи абсолютні переміщення в об'ємі еластичної оболонки на різних ділянках різні. Тому на різних ділянках границі контакту еластичної оболонки та порошку співвідношення величини нормальних та дотичних напружень індивідуальні. Найбільші переміщення спостерігаються в областях між ребрами пресуємого ППМ, що зумовлено перетіканням поліуретану під дією тиску.

З рис. 5.52 видно, що вирішальний вплив на розподіл густини по об'єму пресовки ППМ дає рівень і співвідношення величин нормальних та дотичних напружень.

На рис. 5.53 представлені ППМ з розвинутою поверхнею.



Рис. 5.53. ППМ з розвинутою поверхнею

Моделювання процесу пресування при ущільненні ППМ на основі порошку сталі ШХ15 показало, що характер розподілення густини по контуру пресовки не змінюється. Це вказує на визначальну роль характеристик матеріалу деформуючого інструменту в процесі пресування, що забезпечує одну з основних вимог до пористих проникних матеріалів – рівномірність розподілу густини по об'єму.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ V

1. Автоматизация проектно-конструкторских работ и технологического производства в машиностроении: Учебное пособие / Под ред. О. Л. Семенкова. – Минск : Высшая школа, 1976. – 351 с.
2. Повстяной О. Ю., Заболотный О. В. Автоматизация проектирования установок для сухого радиально-изостатического пресования на основе параметризации // Научные нотатки. – Луцк : ЛДТУ, 2006. – Выпуск 18. – С. 159–164.
3. Дыбан Е. П., Максимов Е. А., Пугин В. М., Страдомский М. В. Определение локальной проницаемости металлокерамических материалов // Порошковая металлургия. – 1968. – № 8. – С. 78–83.
4. Витязь П. А., Капцевич В. М., Пилиневич Л. П. и др. Оценка локальной проницаемости пористых порошковых материалов // Порошковая металлургия. – 1985. – № 6. – С. 55–57.
5. А.с. 890161 СССР, МКИ G01N15/08. Установка для определения проницаемости пористых материалов. / Ермаков В. Г., Стецюк В. Н. // Открытия. Изобретения. – 1981. – №46. – С. 216.
6. Повстяной О. Ю. Удосконалення технології отримання пористих проникливих матеріалів з відходів промислового виробництва: Дис...канд. техн. наук. – Луцк, 2007. – 151 с.
7. Большаков, В. П. 3D-моделирование в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex: Учебный курс / В. П. Большаков, А. Л. Бочков, А. А. Сергеев. – СПб. : Питер, 2011. – 336 с.: ил.
8. Алямовский, А. А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович, Н. Б. Пономарев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.: ил. ISBN 5-94157-558-0.
9. Алямовский, А. А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2004. – 432 с.: ил.
10. Алямовский, А. А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи / А. А. Алямовский. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 448 с.: ил. + DVD – Мастер
11. Гуляев К. В. Математические модели и моделирование // Моделирование пористых материалов : справочник. – Донецк, 2004. – С. 50–74.

12. Карнаухов А. П. Модели пористых сред // Моделирование пористых материалов. – Новосибирск, 1976. – С. 315–322.
13. Тропкин С. Н. Некоторые особенности моделирования с помощью SIMULIA ABAQUS // Инженерные системы. – М., 2010. – С. 78–105.
14. von Mises, R. (1913). *Mechanik der festen Körper im plastisch deformablen Zustand*. Göttin. Nachr. Math. Phys., vol. 1, pp. 582–592.
15. Заболотний О. В. Розвиток процесів ізостатичного пресування ущільнювальних порошкових середовищ / Заболотний О.В., Повстяной О. Ю., Рудь В. Д. // Наукові нотатки. – Луцьк : ЛДТУ, 2001. – Випуск 9. – С. 152–156
16. Oleksandr Povstyanou, Oleg Zabolotnyi, Victor Rud' AndriyKuzmov, Halyna Herasymchuk: Modeling of processes for creation new porous permeable materials with adjustable properties. In: Ivanov V. et al. (eds.) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE-2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 456-465. Springer, Cham (2019), doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_46.
17. Штерн М. Б. Модифицированные модели деформирования порошковых материалов на основе пластичных и труднодеформируемых порошков / О. В. Михайлов, М. Б. Штерн // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Машинобудування. – 2011. – № 62. – С. 13–19.
18. Матвійкова О.М. Численное моделирование процесов пресования порошковых изделий сложной формы в жестких матрицах: влияние схемы пресования на распределение плотности / О. М. Матвійкова, М. Б Штерн, О. В. Михайлов // Порошковая металлургия. – 2002. – № 11. – С. 29–36.
19. Михайлов О. В. Моделювання ущільнення біпористих порошкових виробів, що мають похилі до напрямку пресування поверхні / Михайлов О. В. // Математичні моделі і обчислювальний експеримент в матеріалознавстві – Київ : ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України. – 2011. – №13 – С. 90–95.
20. Повстяной О. Ю. Моделювання ущільнення порошкового фільтруючого елемента складної форми при радіально-ізостатичному пресуванні / Повстяной О. Ю., Михайлов А. О., Рудь В. Д., Михай-

- лов О. В. // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. Науковий журнал. – №3. – Луцьк, 2019. – С. 40–44.
21. Повстяной О. Ю., Полінкевич Р. М., Четвержук Т. І, Сичук В. А. Моделювання пористості порошкового проникного матеріалу складної форми методом скінченних елементів // Львів-Карпати. – (3–7 лютого 2020 р.). – Національний університет “Львівська політехніка”. – С. 45-Ц47.
22. Витязь П. А., Капцевич В. М., Кусин Р. А. Фильтрующие материалы: свойства, области применения, технология изготовления.– Мн. : НИИ ПМ с ОП, 1999. – 304 с.

Для нотаток

Наукове видання

**Повстяной Олександр Юрійович,
Рудь Віктор Дмитрович,
Імбірович Наталя Юрїївна**

**КОМП'ЮТЕРНО-ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
В СУЧАСНОМУ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ**

Монографія

Комп'ютерний набір та верстка
Редактор
Дизайн

О. Ю. Повстяной
Т. В. Николюк
У. О. Повстяна

Формат 60x84 ¹/₁₆. Обсяг 11,39 ум. друк. арк., 10,98 обл.-вид. арк.
Наклад 300 пр. Зам. 25. Виготовлювач – Вежа-Друк
(м. Луцьк, вул. Шопена, 12, тел. (0332) 29-90-65).
Свідоцтво Держ. комітету телебачення та радіомовлення України
ДК № 4607 від 30.08.2013 р.

Повстяной Олександр

П 38 Комп'ютерно-інформаційні технології в сучасному матеріалознавстві : монографія / Олександр Повстяной, Віктор Рудь, Наталя Імбірович. – Луцьк : РВВ ЛНТУ. – 2019. – 196 с.

ISBN 978-617-672-216-8

Монографія присвячена одному із напрямків сучасного *матеріалознавства* – *комп'ютерного*, а саме вивченню можливостей та оцінки сучасного програмного забезпечення для комп'ютерних засобів дослідження металографічних зображень з метою визначення якісних та кількісних характеристик різноманітних матеріалів.

Коллективна монографія принесе значну користь фахівцям-практикам та теоретикам із матеріалознавства та буде цікава аспірантам, магістрантам, бакалаврам і студентам старших курсів технічних ЗВО, які пов'язані з опануванням сучасного матеріалознавства.