

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ЖУРАВЕЛЬ ІГОР МИХАЙЛОВИЧ

УДК 004.932.2;620.18

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО АНАЛІЗУ
МЕТАЛОГРАФІЧНИХ ТА ФРАКТОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ**

05.13.06 – інформаційні технології

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів - 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Фізико-механічному інституті ім. Г.В.Карпенка Національної академії наук України та Національному університеті "Львівська політехніка" Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Максимович Володимир Миколайович,
Національний університет "Львівська політехніка",
завідувач кафедри безпеки інформаційних технологій,
Лауреат Державної премії України в галузі науки та
техніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Антощук Світлана Григорівна,
Одеський національний політехнічний університет,
директор навчально-наукового інституту
комп'ютерних систем;

доктор технічних наук, професор
Бісикало Олег Володимирович,
Вінницький національний технічний університет,
декан факультету комп'ютерних систем і автоматики;

доктор технічних наук, доцент
Рассомахін Сергій Геннадійович,
Харківський національний університет,
завідувач кафедри безпеки інформаційних систем і
технологій.

Захист дисертації відбудеться "2" липня 2019 р. о 14:00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.14 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79000, м. Львів, вул. Степана Бандери, 12, ауд. 226, головний навчальний корпус.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м.Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий "29" травня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



А.С.Батюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Розвиток та здешевлення комп'ютерної техніки і цифрових пристроїв, зокрема відео- та фотофіксації, зумовлює постійне зростання обсягів інформації. Це стимулює розвиток нових високопродуктивних інформаційних технологій для її опрацювання та аналізу при вирішенні різноманітних прикладних задач.

Оскільки однією з найбільш зручних форм представлення інформації є зображення, тому значна увага приділяється методам та засобам обробки двовимірних інформаційних масивів, які інтегровані у різноманітних комп'ютеризованих системах. Ці системи, як правило, забезпечують формування вхідних зображень за допомогою мікроскопів чи фотофіксуючих пристроїв, виконують корекції інтенсивностей елементів зображень, усувають геометричні спотворення, формують базу даних та реалізують інші подібні функції. Проте їх універсальний характер призводить до того, що вони не володіють достатніми функціональними можливостями і не враховують специфіку конкретної галузі застосування та прикладних задач, які, в значній мірі, зумовлюють особливості об'єкту досліджень. Тому, у більшості випадків, при практичному застосуванні даних систем аналіз зображень здійснює людина-оператор. Це призводить до неоднозначностей при їх інтерпретації, виникнення помилок через наявність людського фактору та не дає можливості опрацювати зображення в реальному масштабі часу.

Зважаючи на сказане, доцільною є розробка комп'ютеризованої системи, яка забезпечить автоматизацію обробки, аналізу та розпізнавання зображень у заданій прикладній галузі. Враховуючи наукоємний характер цієї системи, її ефективна розробка неможлива без використання відповідних інформаційних технологій, програмних засобів, методів, моделей і алгоритмів. Це призводить до необхідності розроблення нової парадигми вирішення проблеми побудови високоефективної інформаційної технології, яка базується на розв'язку множини задач аналізу та опрацювання зображень.

Через зростання вимог до швидкодії, ефективності та вірогідності аналізу двовимірних інформаційних масивів особливої уваги набувають моделі зображень, методи усунення геометричних спотворень, виділення та вимірювання ознак, локалізації об'єктів. Залежно від прикладної галузі, зображення вимагають специфічних підходів до їх обробки та аналізу. Тому інформаційні технології обробки та аналізу цих зображень мають бути спеціалізованими та зорієнтованими на оптимальне опрацювання певного класу зображень з конкретної прикладної галузі.

Серед основних задач, які виникають при розробці інформаційних технологій обробки, аналізу та розпізнавання зображень, слід виділити наступні: підвищення інформативності та усунення геометричних спотворень на зображеннях, що особливо актуально для задач метричних вимірювань; оптимальний вибір порогу бінаризації в задачах виділення об'єктів на зображеннях зі складною структурою; аналіз текстури зображень в задачах класифікації та розпізнавання; визначення геометрії об'єктів на зображеннях в задачах метричного аналізу; виділення та

обчислення ознак об'єктів, інваріантних до процесу формування зображень; усунення суб'єктивного людського фактору через підвищення автоматизації обробки та аналізу зображень.

Ці задачі є актуальними у багатьох прикладних галузях. В дисертаційній роботі досліджуються задачі обробки, аналізу та розпізнавання металографічних та фрактографічних зображень.

Розроблена у поданій роботі інформаційна технологія аналізу металографічних та фрактографічних зображень, запропоновані моделі та методи ґрунтуються на дослідженнях, теоретичних основах та практичних результатах, які отримані такими вченими, як Воробель Р.А., Русин Б.П., Путятін Є.П. (методи обробки, аналізу та розпізнавання зображень), Большаков В.І., Волчук В.М., Встовський Г.В., Потапов А.А. (фрактальна параметризація структур зображення), Карускевич М.В., Haralick R.M., Shanmugavadivu P. (текстурний аналіз зображень), Atiquzzaman M. (застосування перетворень Хафа для аналізу зображень), Студент О.З., Салтиков С.А., Wojnar L., Kurzydowski K. (аналіз зображень в металографії) та іншими.

Металографічні та фрактографічні зображення - це зображення внутрішньої мікроструктури поверхні вирізаного чи зламаного елементу металоконструкції. Внутрішня мікроструктура тісно пов'язана з її фізико-механічними властивостями. Кількісний аналіз складових мікроструктури дає можливість моніторити стан деградації матеріалів та забезпечувати їх безпечну експлуатацію.

Тому актуальною є науково-прикладна проблема підвищення точності та швидкодії автоматизованого аналізу зображень, вирішення якої можливе шляхом розробки системної концепції модельних підходів до опрацювання зображень з врахуванням особливостей предметної області, що є основою створення нової інформаційної технології.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертаційної роботи повністю відповідає науковим напрямам, які виконувалися в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України та у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, зокрема:

- “Створення математичних моделей фізичних явищ на базі теорії апроксимації, покращання зображень та розпізнавання образів” (2002–2004, Постанова Бюро відділення ФТПМ НАН України № 10 від 11.06.2002, р.н. 0102U002668);
- “Створення інтелектуальних інформаційних технологій розпізнавання дефектності об'єктів та аналізу їх геометричних параметрів при технічній діагностиці” (2005–2006, Постанова Бюро відділення ФТПМ НАН України № 9 від 24.05.2005, р.н. 0105U004306);
- “Розроблення автоматизованих методів кількісного оцінювання розподілу структурних складових та встановлення їх зв'язку з механічними властивостями для ошаднолегованих теплостійких сталей” (2007–2011, Постанова Бюро відділення ФТПМ НАН України № 19 від 26.12.2006 р., р.н. 0107U004067);
- “Розроблення комп'ютеризованих методів кількісного аналізу елементів зламів і структури трубних сталей, спричинених їх деградацією” (Постанова Бюро відділення ФТПМ НАН України № 13 від 04.10.2011 р., р.н. 0112U002779);

- “Розроблення компонентів для синтезу інтегрованих автоматизованих систем управління”, кафедральна науково-дослідна робота (державна реєстрація № 0114U001232).

Мета та задачі дослідження.

Мета дисертаційної роботи – розроблення інформаційної технології, яка забезпечить підвищення рівня автоматизації, точності та швидкодії аналізу металографічних та фрактографічних зображень для оцінки технічного стану матеріалів відповідальних промислових об’єктів шляхом побудови нових методів кількісного оцінювання геометрії та розподілу елементів їх мікроструктури.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити нові та вдосконалити відомі методи виділення об’єктів на складноструктурованих зображеннях з метою подальшого аналізу їх форми, локалізації та метричних характеристик;
- розробити імітаційну модель калібрування цифрових камер, яка дасть можливість автоматизувати процес усунення геометричних спотворень в оптико–електронних системах формування цифрових зображень;
- розробити нові та вдосконалити відомі методи обчислення фрактальних розмірностей як інструментарій для аналізу складноструктурованих зображень матеріалів;
- розробити методи кількісного аналізу структурних елементів металографічних зображень з використанням фрактальних розмірностей та перетворення Хафа;
- удосконалити методологію автоматизованого та автоматичного визначення метричних характеристик структурних об’єктів на металографічних зображеннях;
- розробити модель зеренної структури металографічних та фрактографічних зображень матеріалів;
- провести комп’ютерне імітаційне моделювання функціонування розроблених методів та створити програмні засоби для розв’язання прикладних задач обробки, аналізу та розпізнавання металографічних та фрактографічних зображень.
- інтегрувати розроблені методи в єдину інформаційну технологію, яка забезпечить підвищення рівня автоматизації, точності та швидкодії аналізу металографічних та фрактографічних зображень.

Об’єкт дослідження – процеси кількісного аналізу структурних складових металографічних та фрактографічних цифрових зображень.

Предмет дослідження – методи та засоби інформаційної технології виділення, метричного аналізу та моделювання об’єктів цифрових зображень для металографії.

Методи дослідження. Дослідження, проведені у роботі, ґрунтуються на положеннях та методах обробки сигналів та розпізнавання образів, теорії контрастності зображень, основах теорії ймовірності та математичного моделювання. Результати теоретичних досліджень перевірялися шляхом імітаційного моделювання, а також оптико–електронної металографії та фрактографії.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробці нових та вдосконаленні відомих методів пошуку, локалізації та кількісного аналізу інформативних мікроструктурних елементів на металографічних та

фрактографічних зображеннях і створенні на цій основі інформаційної технології, яка придатна для використання під час моніторингу стану металевих конструкцій. В результаті проведених досліджень отримано такі наукові результати:

вперше

- розроблена імітаційна модель калібрування цифрових зображень, яка на основі перетворень Хафа та еталонного зображення дає можливість автоматизувати процес усунення геометричних спотворень, що спричинені використанням оптичних систем;

- розроблено метод аналізу текстурованості на основі перетворень Хафа з визначенням переважних орієнтацій зерен конструкційних сталей, що робить можливим виділення та аналіз зон локалізації пластичних деформацій в матеріалі, визначення напрямку дії прикладених до елементів конструкцій сил під час експертизи експлуатаційних пошкоджень та з'ясування причин їх виникнення;

- розроблено метод обчислення усередненого діаметра зерен металу згідно вимог нормативних документів, який через застосування коригуючого коефіцієнта, забезпечує підвищену на 30% точність оцінки;

- розроблено модель зеренної структури металу за металографічними зображеннями на основі діаграм Вороного, що надає нові можливості щодо теоретичних досліджень, спрямованих на прогнозування впливу різних чинників на мікроструктуру металів;

отримали подальший розвиток:

- метод бінаризації напівтонових зображень завдяки вибору оптимального значення порогу, обчисленого із застосуванням кореляційної функції. Такий підхід дає можливість усунути суб'єктивізм при виборі порогу бінаризації та аналізувати зображення, які отримані за різних умов освітлення;

- метод обчислення фрактальної розмірності за тривимірним представленням поверхні, утвореної інтенсивностями елементів зображення, який забезпечує підвищену чутливість до виявлення пошкоджень матеріалу за незначної зміни площі поверхонь ділянок, на яких їх виявили; використовується цей метод для моніторингу втомних пошкоджень на поверхні плакованих елементів алюмінієвих сплавів.

удосконалено:

- метод обчислення фрактальних розмірностей, що розширило його можливості для детальнішого аналізу не лише бінарних, а й напівтонових металографічних зображень без їх попереднього порогового опрацювання. Для цього застосовано поверхневий інтеграл, який враховує локальні перепади інтенсивностей на зображенні;

- методологію автоматизованого визначення геометрії зерен металу за їх цифровим металографічним зображенням, яка завдяки використанню технологій обробки зображень, фрактальних розмірностей та у відповідності до нормативних документів дала можливість аналізувати зображення з нечіткими та розривними межами зерен металу.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що на основі розроблених моделей, методів та інформаційної технології створені програмні засоби, які розширюють та створюють нові можливості для кількісного аналізу

зображень в металографії, зокрема:

- підвищено точність аналізу геометричних параметрів об'єктів за їх зображеннями через застосування методу усунення геометричних спотворень, які спричинені недоліками використаних оптичних систем формування візуальних даних;

- підвищено швидкодію і точність обробки та аналізу структурних складових напівтонових зображень через розроблення методу обчислення фрактальної розмірності з використанням поверхневого інтегралу;

- розширено можливість аналізу металографічних зображень з розмитими та розривними границями зерен і формування статистичних даних щодо їх структурних складових методами визначення усередненого розміру зерен конструкційних сталей, які відповідають вимогам нормативних документів;

- надано можливість врахування властивостей матеріалу при теоретичних модельних дослідженнях металокопункцій через розробку методу моделювання зеренної структури металографічних зображень за допомогою діаграм Вороного;

- підвищено чутливість аналізу до невеликих змін площі поверхонь пошкоджених ділянок, що зробило можливим його використання для моніторингу втомного пошкодження плакованих алюмінієвих сплавів, які є основою багатьох авіаційних конструкцій. Це досягнуто через розробку методу визначення фрактальної розмірності, який базується на тривимірному представленні поверхні, утвореної інтенсивностями пікселів ділянки металографічного зображення;

- розвинуто можливості аналізу пластичних деформацій матеріалу та визначення напрямку прикладених сил через розробку методу кількісного аналізу видовженості та орієнтування зерен конструкційних сталей з використанням перетворень Хафа;

- усунуто невизначеність у виборі порогових значень інтенсивності через розроблення методу бінаризації напівтонових зображень з оптимальним щодо деталізації значенням порогу із застосуванням кореляційної функції;

- підвищено точність обчислень усередненого діаметра зерен металу згідно вимог нормативних документів через використання коригуючого коефіцієнта, який залежить від кількості та виду досліджуваних зерен;

- створено програмні засоби для розв'язання прикладних задач обробки, аналізу та розпізнавання металографічних та фрактографічних зображень.

Результати дисертаційної роботи використано у філії будівельно-монтажної фірми «Укргазпромбуд» ПАТ «Укртрансгаз» та у ПП «ГАЗ ДІМ» для контролю об'єктів транспортування і розподілу природного газу; у ТзОВ «Західтрансбуд» при візуально-оптичному обстеженні зварних стиків головних балок моста, зварних з'єднань ребер жорсткості, фасонки, в'язів головних балок та зварних з'єднань домкратних балок прогонової будови; у ЛФ «Західдіпрошлях» ДП «Укрдіпрошлях» для оцінювання тріщин проїжджої частини автомобільних шляхів та сталевих залізобетонних мостів і кількісного аналізу зеренного складу асфальтобетонів.

Публікації. Основні положення та результати дисертаційного дослідження викладено у 46 наукових працях, серед них 18 статей у наукових фахових виданнях України, 4 статті у наукових періодичних виданнях інших держав, що включено до

наукометричних баз даних Scopus і Web of Science та 24 тези у матеріалах вітчизняних та міжнародних науково–технічних конференцій.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати, які виносяться на захист, отримані автором самостійно. Праці опубліковані одноосібно: [6, 32] – методи моделювання зеренної структури металів; [7, 25, 33] – методи бінаризації та виділення об’єктів на зображеннях; [22, 39] – методи попередньої обробки зображень; [10, 12, 13, 30] – методи фрактального аналізу; [17, 28, 29] – методи метричних вимірювань на зображеннях; [3] – побудова інформаційної технології аналізу металографічних та фрактографічних зображень. У роботах, що опубліковані у співавторстві, дисертанту належить: [16, 45, 46] – методи покращання візуальної якості зображень; [18, 36, 38, 44] – підходи до формування та попередньої обробки первинного зображення в оптоелектронній системі контролю профілю різьби; [19] – алгоритм локалізації меж об’єктів на зображенні з використанням перетворення Хафа; [4, 23] – метод калібрування цифрових відеокамер з використанням перетворень Хафа; [20, 21] – алгоритм відслідковування ліній стику об’єктів при електронно–променевому зварюванні; [14] – алгоритм виділення контурів різномірних об’єктів на зображенні за допомогою фрактальних розмірностей; [9] – алгоритм обчислення фрактальної розмірності з використанням поверхневого інтегралу; [1, 2] – підхід до обчислення розмірів зерен сталі згідно нормативних документів та за допомогою фрактальної розмірності; [15] – технологія кількісного оцінювання фізико–механічних властивостей сталей через аналіз їх фрактальних розмірностей; [11] – комп’ютерне моделювання методу локалізації та кількісного аналізу карбідів на межах зерен конструкційних сталей; встановлення залежності їх кількості та площі від розмірів локальної апертури; [8] – метод визначення фрактальної розмірності на основі тривимірного представлення зображення; [34] – дослідження метрик кількісного оцінювання візуальної якості зображення; [35] – побудова оптимальної палітри на основі кластерного аналізу гістограми зображення та використання дифузійного псевдозмішування кольорів; [37, 40, 41, 42] – методи покращання цифрових рентгенографічних зображень; [27] – модифікація методу статистичної сегментації; [43] – методи попередньої обробки зображень капілярного контролю; [24, 26, 31] – методи обчислення фрактальної розмірності зображень мікроструктури матеріалу; [5] – метод кількісного оцінювання орієнтування та видовженості зерен на металографічних зображеннях.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати виконаних у дисертації досліджень доповідались і обговорювались на таких конференціях: Міжнародній конференції з індуктивного моделювання (Львів, 2002); Відкритих науково–технічних конференціях молодих науковців і спеціалістів Фізико–механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України (Львів, 2002, 2003, 2005, 2007); Всеукраїнській міжнародній конференції з оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів “УкрОБРАЗ” (Київ, 2002); науково–технічній конференції–виставці “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання” (Івано–Франківськ, 2002); конференції з міжнародною участю “Інформаційні технології в охороні здоров’я та практичній медицині” (Київ, 2003); Середньоєвропейській конференції

“Комп’ютерні методи і системи в автоматичі та електротехніці” (Ченстохова, Польща, 2003, 2005); міжнародній конференції з автоматичного управління “Автоматика” (2005, 2006); конференції ЛЕОТЕСТ “Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів” (Славське, 2005, 2006, 2007); міжнародній конференції “Сучасні інформаційні та телемедичні технології для охорони здоров’я” (Advanced Information and Telemedicine Technologies for Health, АІТТН), (Мінськ, 2008); національній науково–технічній конференції–виставці “Неруйнівний контроль та технічна діагностика” (Київ, 2006); міжнародній науково–технічній конференції «Конструкційна міцність матеріалів і ресурс обладнання АЕС» (Київ, 2006); науково–технічній конференції “Обчислювальні методи і системи перетворення інформації” (Львів, 2010, 2012, 2014); міжнародній науково–технічній конференції “АВІА” (Київ, 2011).

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел з 230 найменувань і додатків, викладена на 321 сторінках друкованого тексту, містить 286 сторінок основного тексту, 135 рисунків, 9 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета та завдання досліджень, розкритий зв'язок роботи з науковими планами та програмами, вказана новизна та практична цінність отриманих результатів, відзначений особистий внесок автора, наведені дані про апробацію та практичне впровадження, публікації та структуру роботи.

У **першому** розділі роботи – “**Автоматизований аналіз зображень у неруйнівному контролі**” - проведено дослідження сучасного стану проблеми створення інформаційних технологій для вирішення завдань обробки та аналізу зображень у неруйнівному контролі та технічній діагностиці.

Проведено аналіз систем обробки зображень неруйнівного контролю у промисловості та основних задач, які на них покладені. Встановлено, що використання таких систем дає можливість автоматизувати процес аналізу дефектності виробів, що призводить до підвищення його швидкодії та ефективності в цілому.

Показано, що ефективність методів опрацювання зображень в значній мірі залежить від адекватності моделі, яка вибрана для вирішення цього чи іншого завдання. Це пояснюється тим, що математична модель зображення представляє собою набір функцій, які описують найбільш важливі для вирішення даної задачі ознаки. Наразі не існує єдиного підходу до вибору оптимальної моделі, тому її вибір в значній мірі залежить від вмінь та досвіду дослідника. Проведено аналіз моделей щодо вирішення задач опрацювання зображень у неруйнівному контролі. Окрім відомих, запропоновано використовувати фрактальну модель зображення, яка є зручною при аналізі зображень зі складною текстурою, пошуку та розпізнаванні об’єктів. На цій моделі у роботі побудовано декілька методів опрацювання зображень у неруйнівному контролі.

Дослідження відомих методів обробки зображень у кількісній металографії показали, що результат роботи системи аналізу цифрових зображень суттєво залежить від якості вхідного зображення. Для прикладу, більшість таких систем не може коректно опрацювати металографічні зображення з вузьким діапазоном інтенсивностей чи розривними межами зерен. Це вимагає приділяти увагу методам їх попередньої обробки та розробляти методи, які нечутливі до цих недоліків.

Незважаючи на велику кількість та різноманіття існуючих задач, усі системи аналізу цифрових металографічних та фрактографічних зображень мають багато спільного. Зокрема, ця спільність полягає у подібності основних кроків опрацювання - покращання зображень, усунення геометричних спотворень, формування ознак, локалізація об'єктів уваги та обчислення їх метричних характеристик (рис. 1).



Рисунок 1 – Узагальнена послідовність основних кроків обробки та аналізу зображень.

Проведене дослідження дало можливість виявити та узагальнити недоліки, які притаманні більшості відомих комп'ютеризованих систем обробки, аналізу та розпізнавання металографічних зображень і вказати шляхи їх вирішення. Серед них слід виділити підвищення інформативності вхідних даних, усунення суб'єктивного людського фактору при проведенні аналізу зображень, оптимізація та автоматизація вибору параметрів налаштувань, розроблення нових ознак об'єктів, інваріантних до процесу формування зображень тощо. На основі виявлених недоліків визначено напрямки досліджень стосовно

створення інформаційної технології обробки та аналізу металографічних та фрактографічних зображень.

Таким чином, проблема підвищення ефективності вищезгаданих систем, яка включає можливість автоматизації, збільшення швидкодії та точності опрацювання зображень у металографії як нового інструменту сучасної інформаційної технології обробки, аналізу та розпізнавання металографічних і фрактографічних зображень та недостатня розробленість цього напрямку свідчать про актуальність виконання дисертаційного дослідження та визначають тему і напрям дисертаційної роботи.

Вирішення визначеної проблеми досягається через розроблення методів та інформаційної технології, опис і застосування яких подано у наступних розділах роботи.

У другому розділі роботи – **“Методи виділення об'єктів на складно-структурованих зображеннях”** - розроблено ряд методів виділення об'єктів на складноструктурованих зображеннях з метою їх подальшого кількісного аналізу.

Одним з аспектів, який особливо суттєвий при проведенні метричного аналізу, є відсутність геометричних спотворень на зображенні. Оскільки при формуванні

зображень у неруйнівному контролі не завжди використовуються дорогі оптичні системи, то це вимагає створення методів усунення геометричних спотворень, зокрема, дисторсії, на сформованих зображеннях.

Побудовано метод калібрування цифрових відеокамер, який базується на перетвореннях Хафа. Він усуває геометричні спотворення, найбільш поширеними серед яких є дисторсія, що проявляється при формуванні цифрових зображень через недосконалість оптичних систем. Його суть полягає у наступному. Тестовий прямокутник з нанесеними клітинками (рис. 2а) при його фотофіксації пристроєм з недосконалим об'єктивом зазнає геометричних спотворень, які проявляються у вигляді викривлених ліній на зображенні (рис. 2б). Ці спотворення зумовлені дисторсією об'єктива, внаслідок чого масштаб зображення не є постійним зі зміною віддалі від центра зображення.

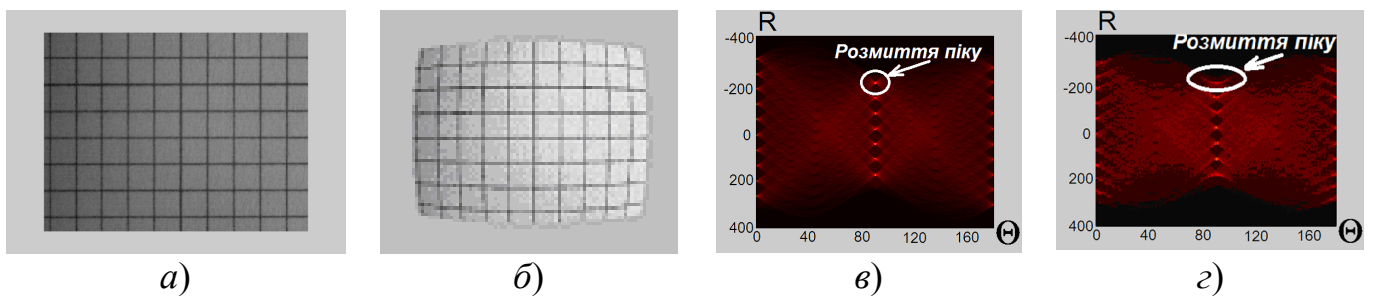


Рисунок 2 - Зображення: а - тестового прямокутника; б - тестового прямокутника зі спотвореннями, зумовленими дисторсією об'єктива; в - зображення тестового прямокутника в просторі Хафа; г - спотвореного тестового прямокутника в просторі Хафа.

Експериментально встановлено, що рівень “розмиття” піків в просторі Хафа для спотвореного зображення (рис. 2г) є більшим, ніж для тестового (рис. 2в). Це розмиття пропорційне рівню дисторсії та деякому коефіцієнту k , який використовується для усунення геометричних спотворень за допомогою виразів (1), що пов'язують координати відповідних пікселів спотвореного (xd, yd) , та неспотвореного (x, y) зображень [4]:

$$x = (id - Ox) \cdot (1 + k \cdot (xd^2 + yd^2)), \quad y = (jd - Oy) \cdot (1 + k \cdot (xd^2 + yd^2)), \quad (1)$$

де (Ox, Oy) - координати центру зображення.

Метод дає можливість автоматизувати процес усунення геометричних спотворень, які спричинені недорогими оптичними системами, що призводить до зменшення похибки метричних вимірювань мінімум на 5%.

Основна частина досліджень у цьому розділі стосується розробки методів виділення об'єктів на складноструктурованих зображеннях. Це зумовлено тим, що за предметну область у роботі було вибрано аналіз металографічних та фрактографічних зображень. Ці зображення містять велику кількість об'єктів, які відрізняються формою або/і рівнем інтенсивності, можуть розміщуватися на різному фоні, окремо чи перекривати один одного, сам об'єкт може мати неоднорідну структуру і т.п. Така складна текстура матеріалу формується при його виливанні,

обробці тиском, прокаті і т.п. Практичний інтерес у вивченні текстури полягає в тому, що вона впливає на властивості матеріалу.

Для вивчення текстури застосовують різноманітні підходи. Серед них слід виділити інтегральні методи локалізації текстури, які базуються на властивості дифракції. Перевага цих методів полягає в тому, що вони надають інформацію про текстуру в цілому, усереднюючи інформацію про орієнтацію окремих структурних складових.

Ще одним підходом до аналізу орієнтації структурних складових є металографічні методи. Дослідження проводяться на основі шліфа металу з протравленою поверхнею, а зображення текстури формується за відбитим від зерен світлом. Даний підхід є простим та швидким у реалізації, не потребує дороговартісної апаратури, проте володіє низькою точністю.

Недоліком описаних вище методів аналізу текстури є те, що вони оцінюють лише орієнтацію структурних складових та є незручними при аналізі металографічних та фрактографічних зображень, зокрема, не дають можливості сформуванню вектор ознак для розпізнавання певного типу текстур.

Одна із задач дослідження складноструктурованих зображень полягає в статистичному аналізі цих об'єктів – їх кількості, площі, форми і т.д. Перш, ніж проводити такий аналіз, ці об'єкти мають бути локалізовані на зображенні. Для вирішення задачі локалізації об'єктів на зображенні використовуються методи сегментації. Ці методи і надалі залишаються актуальними для вирішення задач технічного зору, адже від того чи усі об'єкти будуть виявлені, від точності локалізації їх форми суттєво залежить якість аналізу зображення в цілому.

Підходів до сегментації зображень є багато. Вибір того чи іншого методу залежить від багатьох факторів, наприклад, самого зображення, складності форми досліджуваного об'єкта, поставленої задачі тощо.

Проведено аналіз найбільш вживаних методів сегментації у задачах технічної діагностики - порогові методи, методи водорозділу, методи з використанням опису на основі графу, текстурні методи та методи виділення границь. На основі аналізу відомих методів, їх переваг та недоліків у роботі представлено ряд методів [25, 27, 33], які були розроблені автором для сегментації складноструктурованих зображень.

На підставі проведеного аналізу існуючих методів порогової обробки можна зробити висновок, що бінаризація є ефективною тоді, коли оброблене зображення відображатиме всі деталі вхідного напівтонового зображення. Іншими словами, вхідне напівтонове та результуюче бінарне зображення мають бути максимально подібними. Саме ця ідея є основою розробленого методу бінаризації зображень з використанням оптимального порогу [7].

Для цього вхідне напівтонове зображення (рис. 3а) перетворюють у бінарне згідно виразу (2), використовуючи всі можливі значення порогу L_T із заданого діапазону.

$$L_{bin}(i, j) = \begin{cases} 0, L(i, j) \leq L_T; \\ 1, L(i, j) > L_T, \end{cases} \quad (2)$$

де $L(i, j)$ – рівень інтенсивності вхідного зображення L в точці з координатами (i, j) ; L_T – порогове значення інтенсивності; $L_{bin}(i, j)$ – рівень інтенсивності обробленого зображення L в точці з координатами (i, j) .

Далі для кількісної оцінки подібності вхідного напівтонового та бінарного зображень використаємо коефіцієнт кореляції k :

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (L(i, j) - \bar{L}) \cdot (L_{bin}(i, j) - \bar{L}_{bin})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (L(i, j) - \bar{L})^2 \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (L_{bin}(i, j) - \bar{L}_{bin})^2 \right)}}, \quad (3)$$

де \bar{L} , \bar{L}_{bin} – середньоарифметичні значення інтенсивностей вхідного та бінарного зображень, які обчислюються за виразами

$$\bar{L} = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M L(i, j), \quad (4)$$

$$\bar{L}_{bin} = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M L_{bin}(i, j). \quad (5)$$

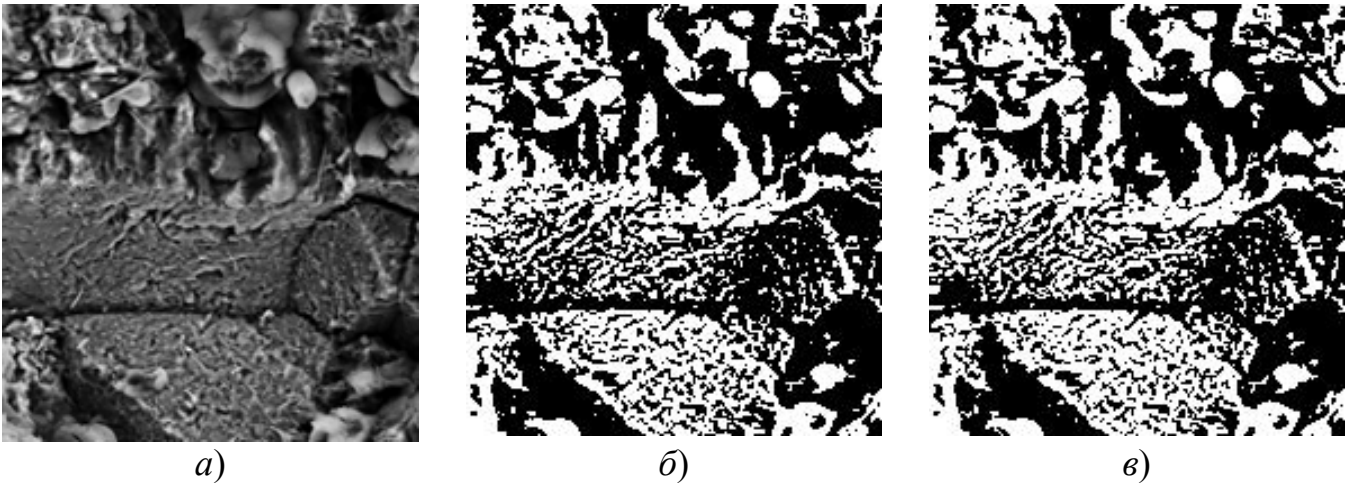


Рисунок 3 – Обробка вхідного зображення (а) з використанням оптимального порогу (б) та методом Оцу (в).

В результаті проведених обчислень отримаємо залежність між коефіцієнтами кореляції (3) та відповідними пороговими рівнями L_T (рис. 4). Зауважимо, що дана залежність отримана для зображення, яке представлено на рис. 3а. Експериментально встановлено, що для інших зображень вигляд графіку отриманої залежності буде подібний за формою до отриманого.

Таким чином, із сказано вище та рисунку 4 слідує, що оптимальним у розробленому методі бінаризації буде таке порогове значення L_T , яке забезпечує максимум коефіцієнта кореляції k у виразі (3), тобто максимальну подібність вхідного напівтонового та бінарного зображень. Результати комп'ютерної реалізації розробленого методу представлені на рис. 3б.

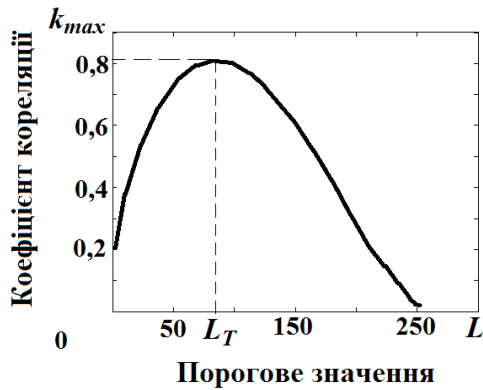


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнту кореляції k вхідного напівтонового та бінарного зображень від порогового рівня L_T .

Експериментально встановлено, що за ефективністю обробки запропонований алгоритм не поступається відомим методам глобальної бінаризації, зокрема, методу Оцу, а для деяких зображень забезпечує кращу деталізацію (рис. 3в).

При цьому слід зазначити, що якість роботи усіх методів глобальної бінаризації, у тому числі і запропонованого, суттєво залежить від вхідного зображення, зокрема, від рівномірності фону. Тому в деяких випадках, перед використанням цих методів необхідно спершу провести вирівнювання фону вхідного зображення. Одна з переваг запропонованого методу полягає в тому, що на етапі бінарної обробки усунуто суб'єктивний фактор та є можливість порівнювати результати аналізу зображень, отриманих, зокрема, за різних умов освітлення. Розроблений метод використовується при аналізі металографічних та фрактографічних зображень, при обчисленні їх фрактальних розмірностей, виділенні країв, геометричному аналізі меж зерен тощо.

У третьому розділі роботи – “**Методи обчислення фрактальних розмірностей зображень**” - розроблено методи аналізу структури матеріалу з використанням фрактальних розмірностей. Експериментально встановлено, що традиційні підходи до кількісного аналізу зображень зі складною текстурою є неефективними, більш перспективним є використання фрактальних розмірностей. Фрактальна розмірність більш чутлива до змін конфігурації структури, чого не може врахувати цілочисельна евклідова геометрія.

Фрактальна розмірність представляє собою кількісну характеристику структури матеріалу. Оскільки мікроструктура матеріалу однозначно відображає його властивості, тоді можна встановити залежність між фрактальною розмірністю структури металу та його якісними характеристиками, зокрема, фізико-механічними властивостями. Це дає можливість вивчати якісні характеристики металу на основі аналізу фрактальної розмірності його мікроструктури.

Існують різні методи обчислення фрактальної розмірності. Найбільш вживаними є клітинний та крапковий. Розглянемо приклад обчислення фрактальної розмірності клітинним методом. Згідно цього методу вхідне зображення фракталу (рис. 5а) покривають сітками з квадратними клітками із різними значеннями кроку сітки δ (рис. 5 б-г), що залежить від етапу вимірювання, і підраховують кількість кліток $N(\delta)$, які покривають досліджувану фрактальну фігуру для кожного кроку виміру.

Далі визначають фрактальну розмірність зображення D як тангенс кута нахилу прямої (рис. 6), яка отримана внаслідок апроксимації отриманого набору точок за допомогою методу найменших квадратів за виразом (6).

$$D = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\ln N(\delta)}{\ln \delta}. \quad (6)$$

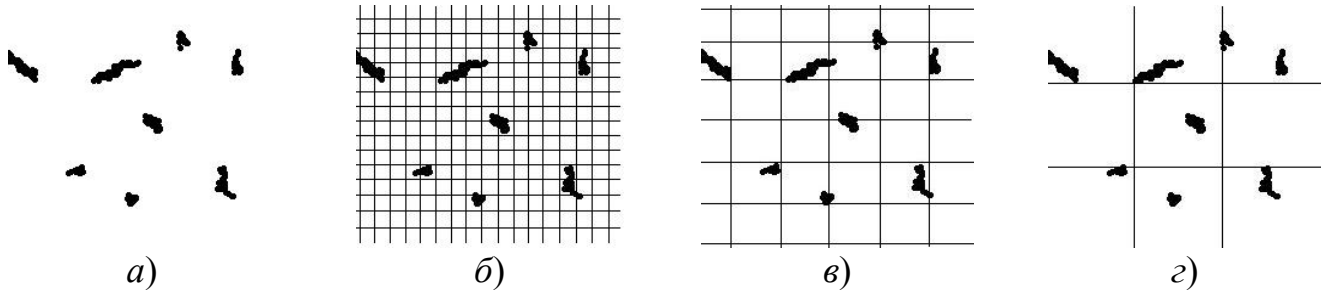


Рисунок 5 – а - зображення деякої структури; б, в, з - зображення структур, які покриті клітинками з різним кроком δ .

Для аналізу зображень з неоднорідним розподілом інформаційних ознак по структурі використовується мультифрактальна модель. Основна ідея мультифрактального аналізу полягає у тому, що досліджуване зображення розбивається на однорідні підмножини з чітко вираженою фрактальною розмірністю.

У роботі досліджено приклад зміни фрактальної розмірності зображень матеріалу при зміні процентного співвідношення перліту і фериту [24].

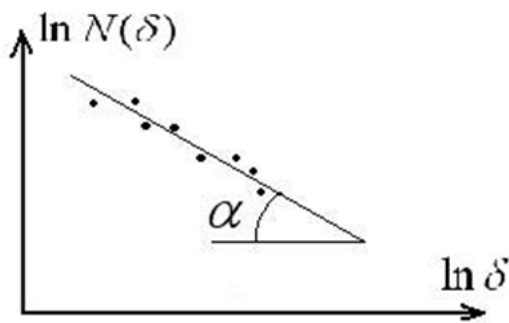


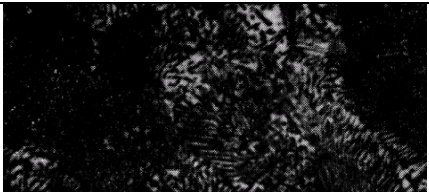
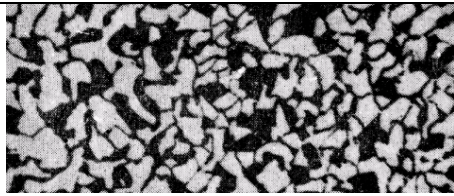
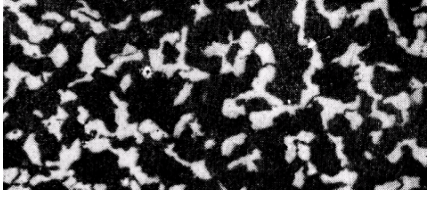
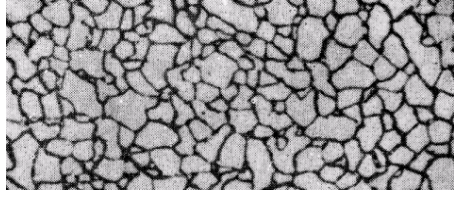
Рисунок 6 - Графік залежності кількості клітин $N(\delta)$, які потрібні для покриття досліджуваної фігури, від розміру цих клітин δ .

Отримані результати через використання зв'язку *мікроструктура-фрактальна розмірність-процентне співвідношення перліт-ферит-процентний вміст вуглецю-механічні властивості сталі* дають можливість встановити залежності значень різноманітних фізико-механічних властивостей матеріалу від фрактальної розмірності його металографічного зображення. В якості вхідних використано еталонні зображення (табл. 1) мікроструктури сталі (ASTM E930 - 99(2015)).

Обчислення фрактальних розмірностей для зображень з таблиці 1 проводилися за найкращою збіжністю клітинного та крапкового методів.

Оскільки дані методи використовують за вхідні лише бінарні зображення, то виникає невизначеність у виборі порогового рівня бінаризації. На рисунку 7 наведено результати обчислення фрактальних розмірностей для бінарних зображень (табл. 1), які сформовані при різних значеннях порогу інтенсивностей.

Таблиця 1. Приклади еталонних зображень мікроструктури (ASTM E930 - 99(2015)) з відповідним співвідношенням складових перліт-ферит.

Еталонні зображення	Співвідношення перліту та фериту (%)	Еталонні зображення	Співвідношення перліту та фериту (%)
	100/0		35/65
	65/35		0/100

З рисунку 7 видно, що одне і теж зображення (табл. 1) характеризується різними значеннями фрактальних розмірностей залежно від вибраного порогу бінаризації.

фрактальна розмірність

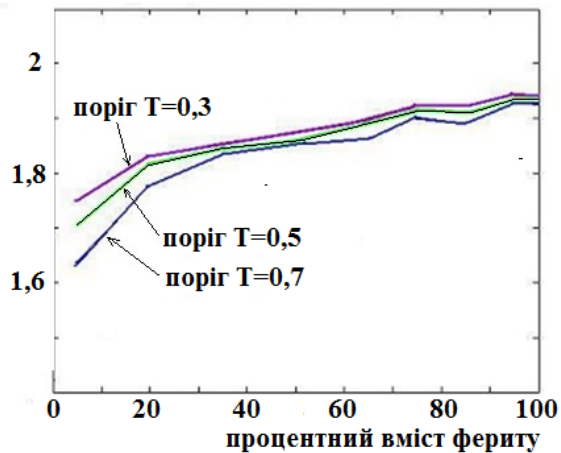


Рисунок 7 – Залежність фрактальної розмірності зображень від відсоткового вмісту вуглецю та вибраного порогового рівня бінаризації T .

Існує два способи усунення цієї невизначеності: перший спосіб полягає у використанні розробленого описаного вище методу бінаризації з оптимальним порогом [7], другий – в обчисленні фрактальних розмірностей методом з використанням поверхневого інтегралу [9]. Розглянемо другий спосіб детальніше.

Метод обчислення фрактальних розмірностей з використанням поверхневого інтегралу є розвитком відомого методу многогранників. Перевага цього підходу полягає у тому, що він, на відміну від клітинного та крапкового методів, використовує за вхідні напівтонові зображення.

Фрактальна розмірність згідно цього методу обчислюється як відношення площі поверхні S , яка утворена внаслідок тривимірного подання деякого околу, до його сторони m в логарифмічному масштабі:

$$D(i, j) = \frac{\lg(S(i, j))}{\lg m} \quad (7)$$

У методі многогранників площа поверхні, яка утворена інтенсивностями локального околу, апроксимується площею трикутників abo , bco , cdo та ado (рис. 8). Внаслідок такого наближення не беруть до уваги локальні перепади рівнів інтенсивностей, що призводить до похибок під час обчислення площі поверхні фрактальної фігури, а отже, і до некоректного обчислення фрактальної розмірності зображення.

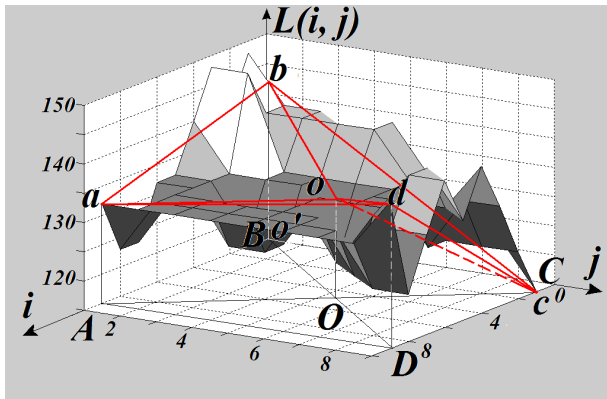


Рисунок 8 - Тривимірне зображення локального околу пікселя з координатами (i, j) .

Для усунення цього недоліку запропоновано обчислювати площу поверхні з використанням поверхневого інтегралу [9], а фрактальну розмірність виразом

$$D(i, j) = \frac{\lg \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sqrt{(L(i, j) - L(i+1, j))^2 + (L(i, j) - L(i, j+1))^2 + 1} \right)}{\lg m}. \quad (8)$$

До основних переваг запропонованого методу відносяться можливість опрацювання напівтонових зображень та підвищення швидкодії через усунення кроку бінаризації. Окрім того, цей метод володіє більшою, порівняно з відомими аналогами, точністю при обчисленні фрактальних розмірностей зображень зі складною структурою. Експериментальні дослідження на серії зображень показали, що розроблений метод забезпечує на 17% меншу середню похибку при локалізації об'єктів інтересу у порівнянні з відомими аналогами, наприклад, з методом многокутників.

При вирішенні будь-яких задач важливим чинником є повторювальність результатів, отриманих при аналізі досліджуваних об'єктів. Вхідні дані, у нашому випадку це зображення об'єкту, можуть формуватися у різний час, при різному зовнішньому освітленні, під різним ракурсом. Тому актуальним є питання впливу перелічених вище чинників на результати аналізу зображення певного об'єкту цим чи іншим методом.

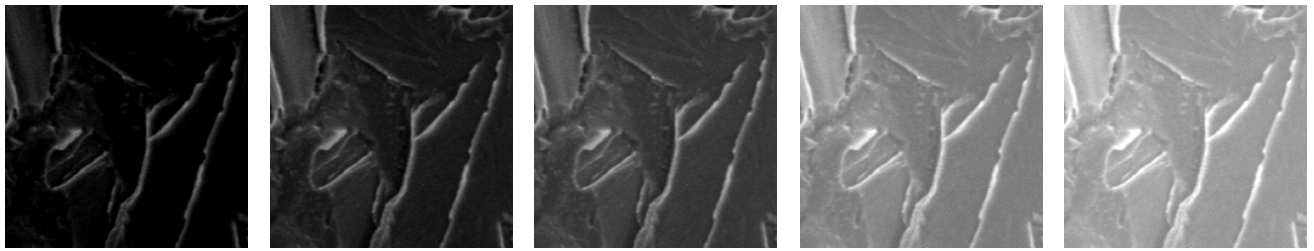
У роботі досліджено вплив зовнішніх умов при формуванні цифрових зображень об'єкту, а саме усередненого рівня інтенсивності пікселів, кута повороту в площині зображення та оптичного збільшення на значення їх фрактальних розмірності [12].

Сформуємо три набори зображень (рис. 9) – з різним рівнем \bar{L} усередненої інтенсивності 1-5, під різним кутом повороту відносно центру зображення 6-10 та різним збільшенням k 11-15.

Набір зображень на рис. 9 11-15 утворений через зменшення та збільшення зображення рис. 9 13 з відповідним коефіцієнтом k . Для кожного зображення з

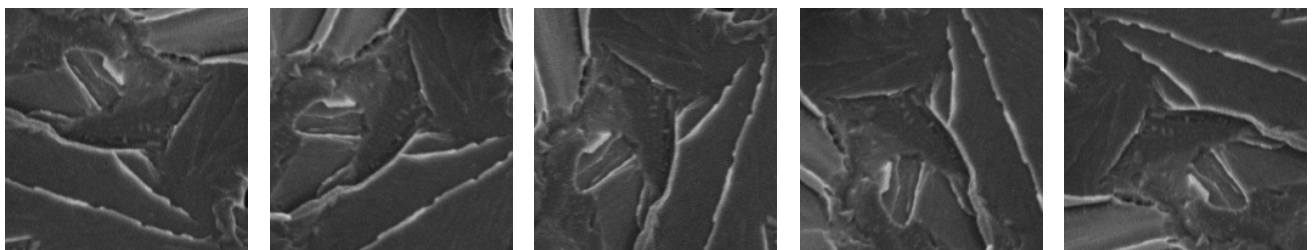
наведених наборів були обчислені фрактальні розмірності на основі найкращої збіжності клітинного та крапкового методів.

Отримані результати обчислення фрактальних розмірностей для описаних наборів зображень (рис. 9) представлені у вигляді графіків на рис. 10.



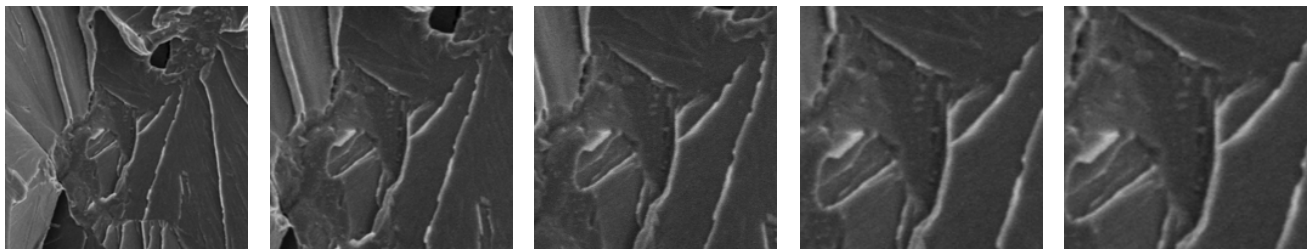
1) $\bar{L} = 32$ 2) $\bar{L} = 64$ 3) $\bar{L} = 128$ 4) $\bar{L} = 160$ 5) $\bar{L} = 192$

Зображення з різним рівнем усередненої інтенсивності пікселів \bar{L} .



6) $\alpha = -90^\circ$ 7) $\alpha = -45^\circ$ 8) $\alpha = 0^\circ$ 9) $\alpha = +45^\circ$ 10) $\alpha = +90^\circ$

Зображення, сформовані під різним кутом повороту відносно центру.



11) $k = 0,5$ 12) $k = 0,75$ 13) $k = 1$ 14) $k = 1,25$ 15) $k = 1,5$

Зображення з різним масштабним збільшенням k .

Рисунок 9 – Зображення однієї і тієї ж ділянки крихкого зламу, які використали під час досліджень впливу усередненої інтенсивності (1-5), кута повороту об'єкта досліджень у площині зображення (6-10) та його масштабування (11-15) на їх фрактальну розмірність.

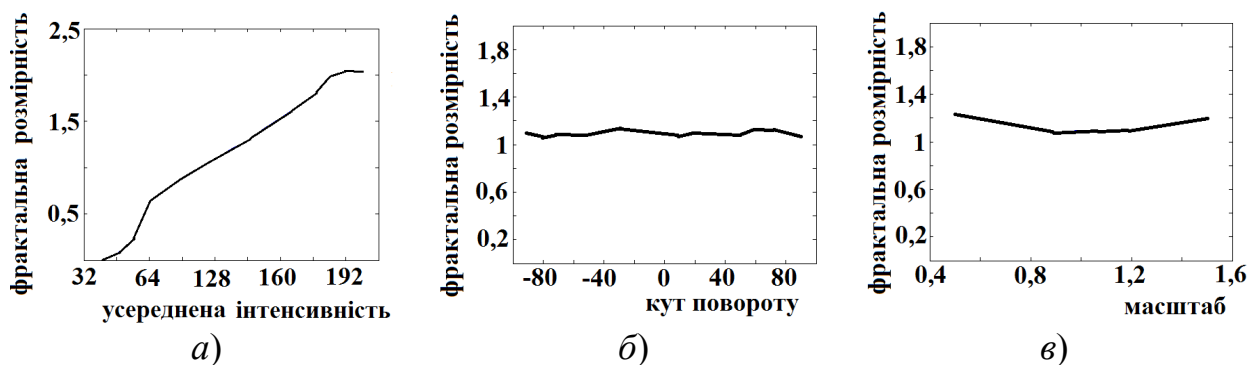


Рисунок 10 - Залежність фрактальної розмірності зображень від зміни усередненої інтенсивності пікселів (а), кута його повороту (б) та масштабу (в).

З графіку на рис. 10а видно, що зовнішнє освітлення при проведенні металографічних досліджень суттєво впливає на значення фрактальної розмірності і вона змінюється від 0 - коли фрактальне зображення є практично чорним і до 2 – коли фрактальне зображення є повністю білим.

Як наслідок, при аналізі зображень одного і того ж об'єкту, які сформовані за різних умов освітлення, будуть отримані різні результати, що є неприпустимо. Рисунок 10б демонструє, що середня фрактальна розмірність рівна 1,1689, максимальне відхилення від середнього значення – 0,035 або 3%, тобто сама фрактальна розмірність є малочутливою до кута повороту навколо центру зображення. На рис. 10в показано, що усереднене значення фрактальної розмірності рівне 1,1707 і змінюється в межах $\pm 0,04$ або 3,4% при змінах масштабу зображення від 0,5 до 1,5. Таким чином, фрактальні розмірності зображень одного і того ж об'єкту співпадають з точністю до сотих і рівні 1,17 та не залежать від кута повороту та масштабу.

Проведені вище дослідження показали, що фрактальні розмірності зображень, які отримані при різному зовнішньому освітленні та мають різну усереднену інтенсивність, суттєво відрізняються (рис. 10а). Один з варіантів вирішення цієї задачі полягає у нормалізації зображення, тобто приведенні до вигляду, коли середнє значення інтенсивності по полю зображення стане наближено рівне середині діапазону інтенсивностей. На рис. 11 представлено результати обчислення фрактальних розмірностей для серії зображень 1-5 на рис. 9 після вирівнювання фону. Як видно з рисунку 11, значення фрактальних розмірностей для набору зображень, які мали різне значення усередненої інтенсивності (рис. 9 1-5), але зазнали операції вирівнювання фону, стали майже рівними. Їх усереднене значення рівне 1,1732, абсолютне відхилення по набору зображень становить 0,012 або 1%. Зазначимо, що обчислене значення співпадає з фрактальними розмірностями, обчисленими для зображень цього ж об'єкту, які сформовані при різних кутах повороту в площині зображення та масштабах (рис. 10 б та в).

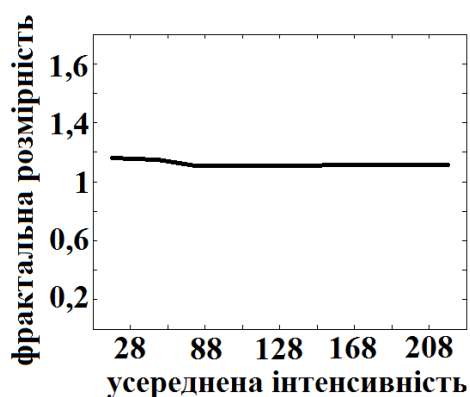


Рисунок 11 - Значення фрактальних розмірностей, обчислені для серії зображень 1-5 на рис. 9 після вирівнювання інтенсивності фону.

Отже, у роботі встановлено, що фрактальну розмірність можна вважати інваріантною ознакою при описаних вище афінних перетвореннях зображення за умови використання методу вирівнювання інтенсивності та зміни масштабу зображення у невеликих межах [12]. У роботі коефіцієнт масштабування змінювався від 0,5 до 1,5.

Як було сказано вище, традиційні засоби обробки зображень, що містять велику кількість дрібних об'єктів та мають складну структуру, є малоефективними та дозволяють отримати лише загальні відомості про досліджуване зображення. Вирішення спеціалізованих задач потребує розробки та застосування нових проблемно-орієнтованих підходів та інструментів. Проведені у роботі дослідження показали широкі можливості фрактальних розмірностей для аналізу зображень зі складною структурою. При аналізі складноструктурованих об'єктів, окрім фрактальних розмірностей, використовують таке поняття як поле фрактальних розмірностей [14], яке представляє собою матрицю, де значення у кожній комірці (i,j) рівне фрактальній розмірності локального околу вихідного зображення у точці (i,j) . Застосування цієї технології вимагає глибоких знань та вмінь дослідника як у галузі обробки зображень, так і в теорії фракталів для правильного вибору параметрів налаштувань методів обчислення та побудови поля фрактальних розмірностей. У роботі проведено дослідження впливу розмірів локальної апертури $n \times n$, кроку зміщення k , діапазону інтенсивностей вхідного зображення R , використаних методів бінаризації та рівня шуму на результати обчислення фрактальних розмірностей [13]. В результаті проведених досліджень встановлено, що розмір локальної апертури при обчисленні поля фрактальних розмірностей впливає на деталізацію неоднорідностей на результуючому зображенні: менша апертура – більша деталізація і навпаки. Загалом, розмір досліджуваних неоднорідностей повинен бути співмірним з розміром локальної апертури.

Доволі часто металографічні зображення містять шум. На рівень шуму суттєво впливає розмір та тип елементів матриці фотофіксуючих пристроїв, їх спотворення, чутливість матриці, час експонування тощо. У роботі досліджено вплив шуму на результати обчислення фрактальних розмірностей. Для цього формувалися зображення з різними рівнями та типами накладених шумів – гаусівським, імпульсним та мультиплікативним.

На рисунку 12 наведено графік залежностей фрактальних розмірностей від типу та рівня шуму, який виражений параметром пікового відношення сигналу до шуму PSNR.

З наведених результатів досліджень, які представлені на графіку (рис. 12), слідує, що вплив гаусівського, імпульсного та мультиплікативного шумів зображення на значення фрактальної розмірності є несуттєвим.

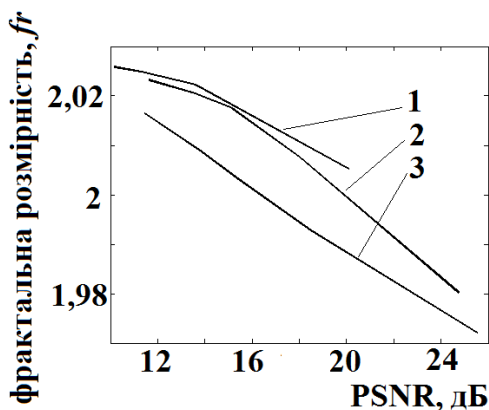


Рисунок 12 - Графіки залежностей фрактальних розмірностей металографічних зображень від типу (1 – гаусівський, 2 – мультиплікативний, 3 – імпульсний шуми) та рівня шуму, який виражений параметром PSNR.

Якщо розглядати фрактальні розмірності вхідного та зашумленого зображень, то максимальна відносна похибка становитиме 3,3%. При цьому важливо зазначити, що отримані вище результати наведені для рівнів PSNR від 11 до 26 дБ, а при обчисленні фрактальних розмірностей використовувались клітинний та крапковий метод. Також у роботі показано, що не усі методи обчислення фрактальних розмірностей є нечутливими чи малочутливими до шумової складової на зображеннях.

Зображення у неруйнівному контролі переважно характеризуються складною структурою. Це призводить до того, що різні ділянки таких зображень будуть мати різні фрактальні розмірності. До цього моменту при аналізі зображень використовувалися як глобальні, так і локальні фрактальні розмірності. Вибір виду фрактальної розмірності – глобальної чи локальної – в значній мірі залежить від поставленої задачі та досліджуваних зображень. Глобальна фрактальна розмірність дає інтегральну усереднену оцінку цілого зображення. Такий підхід може бути застосований при аналізі зображень з приблизно однаковою по полю зображення структурою. Якщо поставлена задача виділення певних областей на зображенні та їх аналізу, тоді доцільно використовувати локальні фрактальні розмірності, тобто будувати поле фрактальних розмірностей. Проведені дослідження показали, що метод побудови поля фрактальних розмірностей з використанням поверхневого інтегралу [9] забезпечує на 17% меншу середню похибку при локалізації об'єктів інтересу у порівнянні з відомими аналогами, зокрема, з методом многокутників.

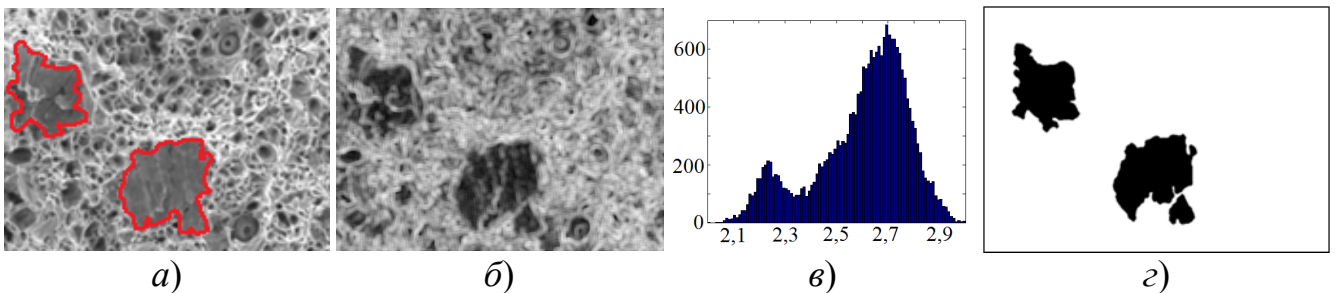


Рисунок 13 – Цифрове зображення рельєфу зламу теплостійкої сталі парогонів ТЕС *а)*, поле його фрактальних розмірностей *б)*, гістограма поля фрактальних розмірностей *в)* та виділені на фоні в'язкого рельєфу зламу крихкі його елементи *г)*.

На рисунку 13*б* у вигляді зображення продемонстровано результати обчислення поля фрактальних розмірностей вхідного зображення зламу металу (рис. 13*а*). З метою візуалізації значення фрактальних розмірностей були приведені до діапазону $[0,1]$. На рис. 13*в* представлено розподіл обчислених значень поля фрактальних розмірностей. Представлена гістограма має дві чітко виражені моди. Це свідчить про те, що на досліджуваному зображенні (рис. 13*а*) є два основних види текстур, які характеризуються діапазонами розмірностей $2,2 \pm \varepsilon$ та $2,65 \pm \varepsilon$. Параметр ε визначає ширину діапазону значень фрактальних розмірностей, які властиві певному типу текстури чи певній ділянці на зображенні. На рис. 13*г* у вигляді чорних об'єктів представлені результати локалізації крихких елементів зламу. Білий фон - це в'язке руйнування. Ці дані служать дослідникам-матеріалознавцям основою для проведення різноманітних метричних досліджень, обчислення процентного співвідношення в'язкого та крихкого руйнування тощо.

Таким чином, поле фрактальних розмірностей може використовуватися для локалізації об'єктів на зображенні.

У четвертому розділі дисертаційної роботи – “Кількісний аналіз структурних елементів металографічних зображень з використанням фрактальних розмірностей” - розроблено методи кількісного аналізу структурних елементів металографічних зображень з використанням фрактальних розмірностей. Розглянемо деякі з них детальніше.

Стан і властивості матеріалу в металоконструкціях тривалої експлуатації вимагають постійного моніторингу. Одним із основних параметрів, який тісно пов'язаний з механічними властивостями, є розмір зерна металу. Більшість існуючих способів визначення розмірів зерен розроблені з дотриманням відповідних регламентуючих документів. Але їх практичне застосування характеризується великими трудовими та часовими затратами через необхідність набирати статистику і, як наслідок, отримані результати є дещо суб'єктивними. Другим суттєвим недоліком більшості відомих програмних систем є необхідність використання лише високоякісних зображень структури металів з чітко окресленими межами зерен. Але доволі часто якість вхідних металографічних зображень не відповідає таким вимогам, особливо при виготовленні шліфів безпосередньо на експлуатованому об'єкті. У роботі розроблено комп'ютеризований метод визначення геометрії зерен металів і сплавів, який базується на використанні фрактальної розмірності та забезпечує оброблення металографічних зображень з нечітко окресленими і розривними межами зерен [2]. Розглянемо його детальніше.

Для еталонних зображень сталей з відомим усередненим діаметром d , представлених в ASTM E930 - 99(2015), обчислюємо фрактальні розмірності f_r . Результати дослідження показали, що між усередненим діаметром d та фрактальною розмірністю f_r існує однозначна відповідність (рис. 14).

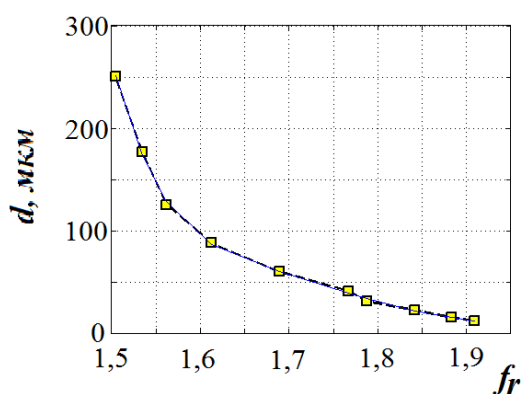


Рисунок 14 - Залежність усередненого діаметра зерна d від фрактальної розмірності f_r , визначеної за металографічним зображенням структури сталі з виділеними на ньому межами зерен. Лінія відповідає залежності, апроксимованій згідно з (9).

Використавши метод найменших квадратів, апроксимуємо отриману залежність наступним виразом:

$$d = (-1,29 \cdot f_r^5 + 11,51 \cdot f_r^4 - 40,98 \cdot f_r^3 + 72,85 \cdot f_r^2 - 64,69 \cdot f_r + 22,96) \cdot 10^5. \quad (9)$$

Вираз (9) моделює зв'язок усередненого розміру зерен d та фрактальної розмірності f_r бінарного зображення меж зерен. Важливо зазначити, що він стосується лише зображень, які сформовані на мікроскопі із збільшенням 100.

Для перевірки достовірності запропонованого підходу обчислимо усереднений діаметр зерен сталі 12X1МФ (рис. 15а) та порівняємо його з результатами, які

отримані іншим методом, який представлений у роботі [1].

Фрактальна розмірність зображення меж зерен (рис. 15 б) рівна 1,77. За виразом (9) обчислимо, що цій фрактальній розмірності відповідає усереднений розмір зерна 38,3 мкм. У статті [1] наведено результат вимірювань усередненого діаметру зерен саме цієї ділянки зразка сталі 12Х1МФ (рис. 15 а), він становить 36 мкм.

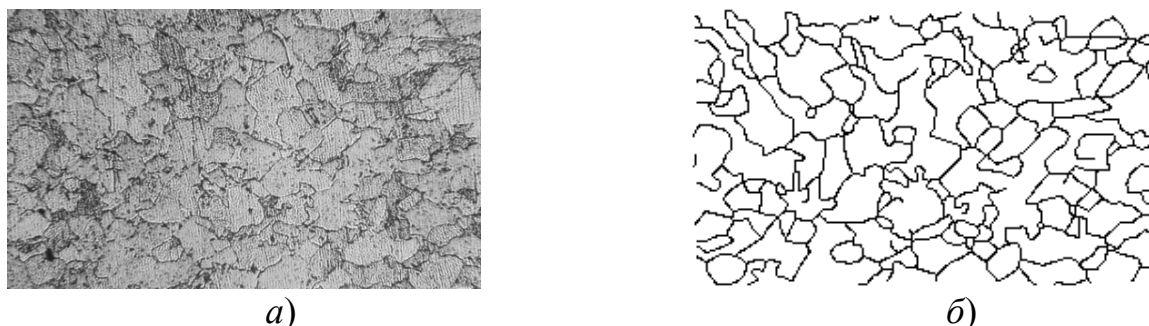


Рисунок 15 - Мікроструктура сталі 12Х1МФ (а) та відповідне їй зображення меж зерен (б).

Похибка вимірювань за запропонованим у цій роботі методом з використанням еталонних зображень становить 6%. Перевагою розробленого методу є те, що він дозволяє автоматизувати процес обчислення та дає можливість аналізувати металографічні зображення з незамкнутими та розривними межами зерен без необхідності їх інтерактивного редагування.

У роботі розроблено метод визначення фрактальної розмірності на основі тривимірного представлення зображень неруйнівного контролю авіаційних конструкцій [8].

Для забезпечення безпечної експлуатації літальних апаратів виникає необхідність в постійному контролі стану конструкції на предмет виявлення та оцінки втомних пошкоджень. Показником накопиченого втомного пошкодження може бути деформаційний рельєф, який формується при циклічному навантажуванні. Такий рельєф можна спостерігати, зокрема, на плакованому алюмінієвому сплаві Д16АТ, який є найбільш поширеним матеріалом в конструкції літака (рис. 16).

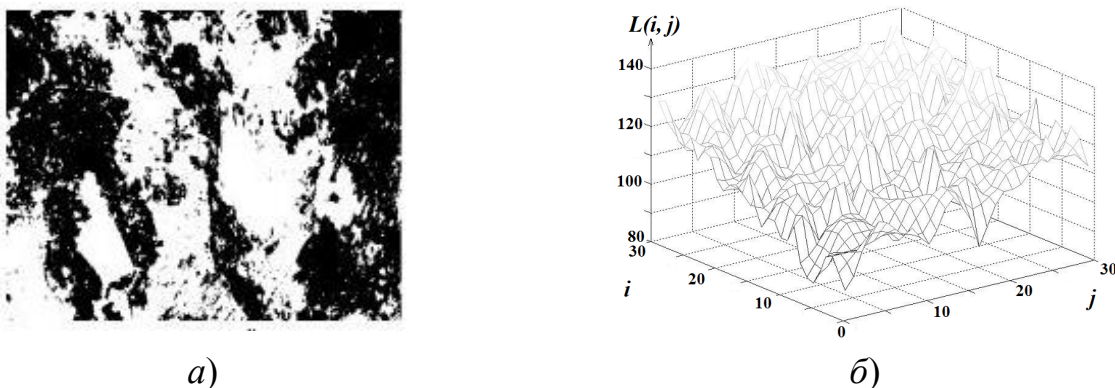


Рисунок 16 – Зображення деформаційного рельєфу плакованого алюмінієвого сплаву Д16АТ, спричиненого його деформуванням (а), та поверхня, сформована інтенсивностями пікселів деякої ділянки цього зображення (б).

Існує декілька параметрів для кількісної оцінки накопиченого втомного пошкодження. Природа формування і розвитку деформаційного рельєфу дає підстави вважати його природним фракталом і застосувати для його кількісної оцінки апарат фрактальної геометрії, зокрема, фрактальні розмірності.

Метод обчислення фрактальної розмірності з використанням поверхневого інтегралу [9] не забезпечує потрібної чутливості до невеликих змін площі пошкоджених ділянок, тому у роботі розроблено інший метод до обчислення фрактальної розмірності таких зображень [8]. Його суть полягає у наступному. У відомому клітинному методі для покриття фрактальної фігури використовували різну кількість клітин залежно від розміру її сторони. Аналогічним способом створена на основі інтенсивностей зображення об'ємна фігура (рис. 16б) покривається кубиками. Зрозуміло, що чим менша сторона ребра куба, то більше кубиків буде потрібно для покриття фігури і навпаки. Таким чином, можна отримати залежності між розміром ребра куба та їх кількістю, необхідною для покриття об'ємної фігури. Отримані залежності представляються в логарифмічних координатах і апроксимуються прямою, тангенс кута нахилу якої визначає фрактальну розмірність даного фрактального об'єкту. Цей підхід був використаний як один з методів обчислення фрактальних розмірностей зображень деформаційного рельєфу.

На рис. 17 представлено результати дослідження зміни фрактальної розмірності, обчисленої за розробленим методом, залежно від кількості циклів навантаження N_i до зародження тріщини в околі концентратора.

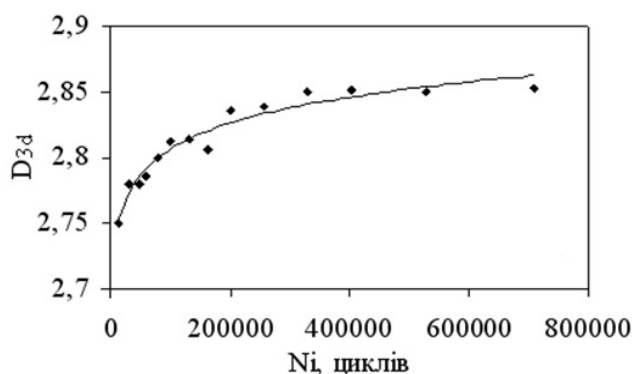


Рисунок 17 - Еволюція фрактальних розмірностей деформаційного рельєфу, визначених на основі аналізу тривимірною представлення його оптичного зображення.

Отримана залежність має монотонний характер та добре корелює з іншими методами оцінки деформаційного рельєфу, наприклад, з параметром пошкодження [8]. Це означає, що розроблений метод разом з іншими підходами може бути застосований для моніторингу втомного пошкодження та прогнозування залишкового ресурсу досліджуваного матеріалу.

У п'ятому розділі дисертаційної роботи – **“Методи визначення метричних характеристик структурних об'єктів на металографічних зображеннях”** - розроблено методи обчислення метричних характеристик структурних об'єктів на металографічних зображеннях.

Зазвичай, для опису деградації металу використовують різноманітні фізичні, хімічні методи та проводять механічні випробування. Але застосування цих методів стосовно деяких виробів та конструкцій є дещо утрудненим, оскільки більшість із

згаданих виробів перебувають в робочому стані. Загальновідомо, що між якісними характеристиками досліджуваного металу та його внутрішньою структурою існує однозначна відповідність. Це дозволило оцінювати механічні властивості металу через аналіз його внутрішньої структури. В багатьох випадках за основний параметр металу при аналізі його внутрішньої структури використовують розмір зерна, адже саме він суттєво впливає на властивості металу.

Для визначення розміру зерна використовують різні методи. Їх аналіз показав, що вони мають ряд недоліків, серед яких можна виділити наступні - об'єктом аналізу є не окремі зерна, а деяка, часом достатньо велика, група зерен, що призводить до великої методичної похибки у випадку присутності різнорозмірних зерен; більшість методів придатні для аналізу зерен лише опуклої форми, в іншому випадку теж виникатиме додаткова методична похибка; методи не є автоматизованими, що вимагає додаткових часових затрат на підрахунок кількості зерен, кількості точок перетинів ліній і границь зерен тощо.

Наведений аналіз недоліків зумовив розробку комп'ютеризованого методу контролю величини зерна металевих матеріалів [28]. Для цього на вхідне зображення меж зерен (рис. 18а) наносять початкові точки та сканують контур з певним кутом α (рис. 18б). Таким чином, кожне зерно, яке містить початкову точку, описується набором даних $\vec{\alpha}$ та \vec{d} , на основі яких можна повністю відтворити його форму та обчислити усі метричні та орієнтаційні характеристики.

Візьмемо деяке зерно, яке описується наборами даних $\vec{\alpha}$ та \vec{d} (рис. 18б), і обчислимо його основні геометричні параметри, наприклад, максимальну d_{\max} , мінімальну d_{\min} та середню d_c величину зерна.

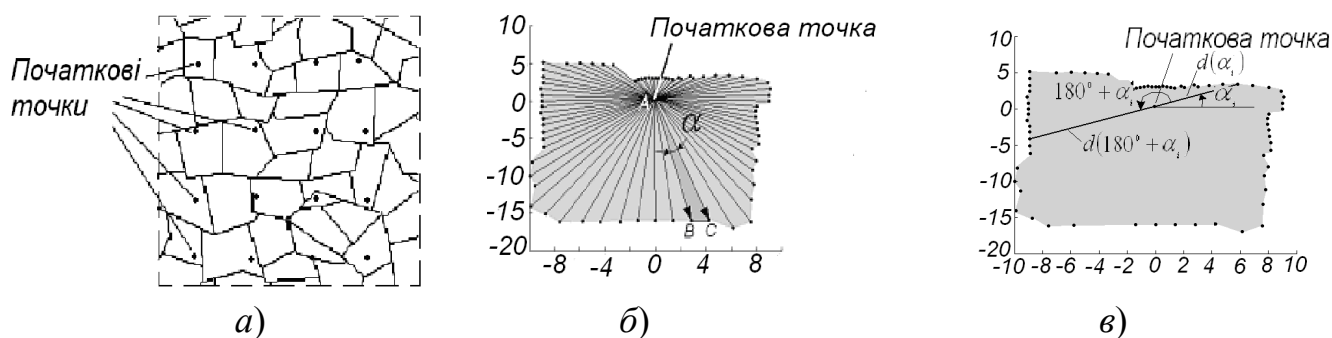


Рисунок 18 – Комп'ютеризований метод контролю величини зерна: а) зображення меж зерен з сформованими початковими точками; б) сканування окремого зерна; в) обчислення геометричних параметрів зерна.

Для обчислення параметрів d_{\max} , d_{\min} та d_c необхідно для усіх кутів $\alpha_i \in [0^\circ, 180^\circ)$ обчислити суму $d(\alpha_i) + d(\alpha_i + 180^\circ)$, де $d(\alpha_i)$ – відрізок прямої, проведеної під кутом α_i , яка сполучає початкову точку та точку контуру зерна (рис. 18в).

Далі, з отриманого набору сум $\{d(\alpha_i) + d(\alpha_i + 180^\circ)\}$ знаходять максимальне, мінімальне та середнє значення, яке відповідатиме максимальному d_{\max} , мініимальному d_{\min} та середньому d_c діаметру зерна

$$d_{\max} = \max \{d(\alpha_i) + d(\alpha_i + 180^\circ)\}, \quad (10)$$

$$d_{\max} = \min \{d(\alpha_i) + d(\alpha_i + 180^\circ)\}, \quad (11)$$

$$d_{\max} = \text{mean} \{d(\alpha_i) + d(\alpha_i + 180^\circ)\}. \quad (12)$$

Аналогічним чином можна розрахувати площу окремого зерна та гістограму розподілу площ зерен для деякого металографічного зображення.

Беззаперечна перевага розробленого методу [28] полягає у тому, що він дає можливість отримати всю інформацію про геометрію зерна – діаметр, видовженість, орієнтацію тощо. Недоліком даного підходу є те, що він не може опрацьовувати зображення зерен з розривними межами зерен.

Розвитком розглянутого вище підходу був розроблений метод автоматизованого визначення геометрії зерен в експлуатованій паропровідній сталі [1]. Цей метод базується на стандарті ASTM E930 - 99(2015). Послідовність основних кроків вирішення задачі автоматизованого визначення геометрії зерен з нечіткими та несучільними межами зерен наступна. Спочатку на зображенні усувають шуми, підвищують контрастність та вирівнюють за інтенсивністю фон (рис. 19а). Для формування меж зерен зображення бінаризують (рис. 19б) та застосовують морфологічну обробку (рис. 19в), яка усуває неінформативні об'єкти. На сформованому зображенні (рис. 19г) межі зерен є розривними. У розробленому методі передбачена можливість їх автоматичного або ітеративного дотягування.

Після цього на зображення меж зерен (рис. 19г) згідно вимог ASTM E930 - 99(2015) наноситься сітка з взаємно перпендикулярних ліній. Далі підраховується кількість перетинів N горизонтальних і вертикальних ліній сітки з усіма межами зерен. Усереднений діаметр D зерен обчислюють за виразом $D = L/N$, де L - загальна довжина ліній нанесеної сітки.

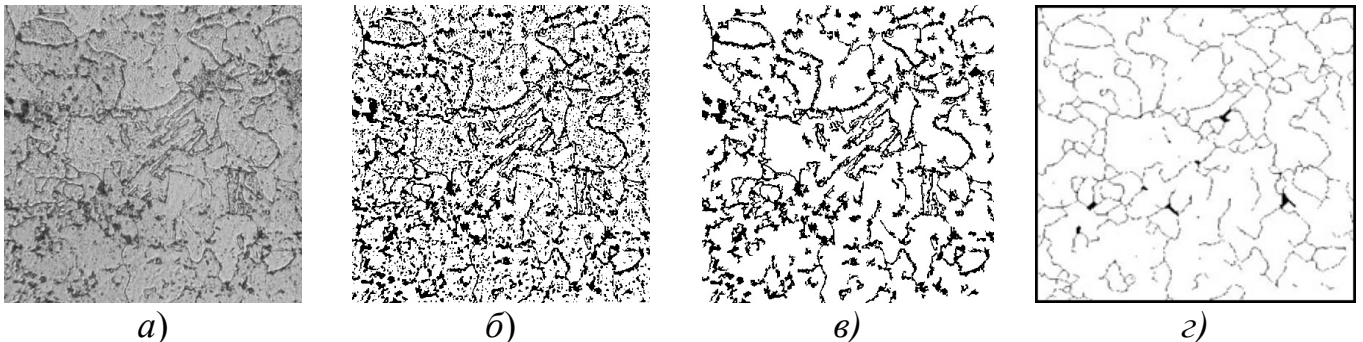


Рисунок 19 - Вихідне зображення структури сталі 12X1МФ (а) та після її бінаризації (б), усунення неінформативних деталей (в) і представлення меж зерен лініями (г).

Однією з переваг розробленого методу, у порівнянні з відомими, є відповідність вимогам ASTM E930 - 99(2015) та можливість автоматизованого аналізу металографічних зображень з нечітко окресленими межами зерен. Проводилась також апробація розробленого методу на металографічних зображеннях шліфів сталі 12X1МФ (рис. 20), вирізаних на різній віддалі від внутрішньої стінки з прямолінійної ділянки та зони гину паропроводу ТЕС.

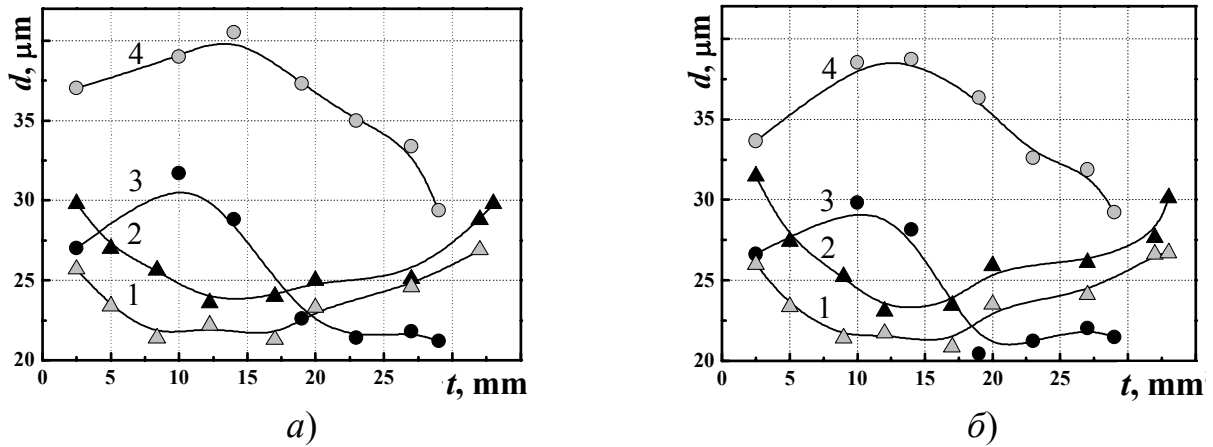


Рисунок 20 - Зміна величини зерна d поперек стінки труби в осьовому перерізі прямої ділянки труби (1, 2) і розтягнутої зони гину (3, 4) за визначення вручну (а) і з використанням розробленого методу автоматизованого оцінювання (б). Діаметр зерна визначали в осьовому (1, 4) і радіальному (2, 3) напрямках на різній віддалі t від внутрішньої поверхні труби.

Наведені результати досліджень зміни геометрії зерен, отримані матеріалознавцями вручну (рис. 20 а), корелюють з даними, отриманими з використанням розробленого методу автоматизованого оцінювання (рис. 20 б). Незначна відмінність результатів, отриманих різними методами, може бути зумовлена більшою вибіркою, яку використали під час автоматизованого оброблення зображень і, відповідно, більшою похибкою під час замірів вручну.

Внаслідок досліджень одного із підходів до визначення величини зерна - методу пересічень меж зерен, який описаний в ASTM E930 - 99(2015), встановлено, що він має методичну помилку, яка призводить до значних похибок у визначенні середнього умовного діаметра [29]. Причина полягає у тому, що усереднення діаметрів зерен D ніколи не буде рівне дійсному діаметру зерна D_0 (рис. 21).

У роботі виведено вираз поправочного коефіцієнта, який пов'язує дійсний діаметр зерна у тривимірному просторі D_0 та усереднений діаметр зерен D_{mean} , що обчислюється згідно нормативних документів [1]

$$k = \frac{n^2}{\sum_{i=0}^n \sqrt{n^2 - i^2}}, \quad (13)$$

де n - кількість перерізів зерен в площині шліфа.

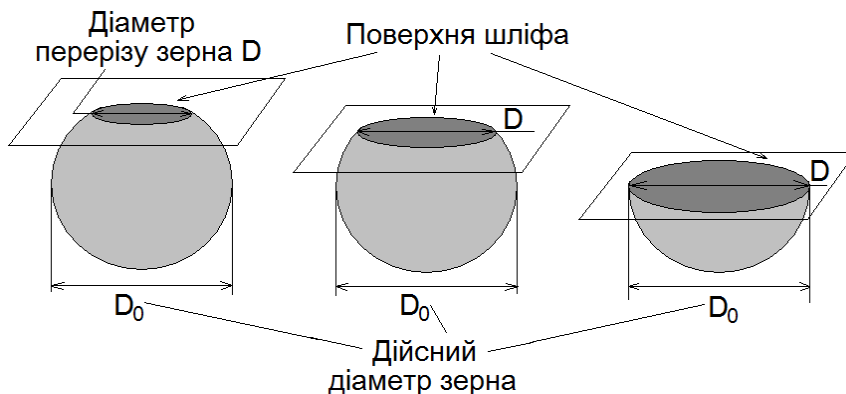


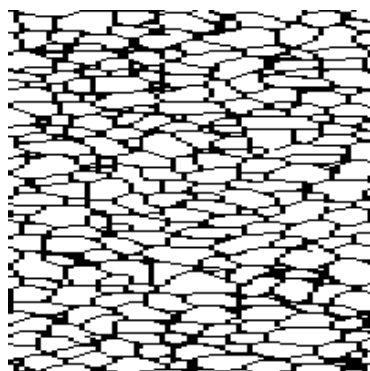
Рисунок 21 - Варіанти перерізу зерен металу площиною шліфа.

Згідно ASTM E930 - 99(2015) мінімальна кількість зерен при обчисленні їх усередненого діаметра повинна бути не меншою 50. З виразу (13) слідує, що коли на досліджуваному зображенні шліфа є $n = 50$ перерізів зерен, то поправочний коефіцієнт рівний $k \approx 1,3$. Тобто значення усередненого діаметра зерна D_{mean} , обчислене згідно ASTM E930 - 99(2015), необхідно збільшити в 1,3 рази і лише в цьому випадку отримаємо дійсний усереднений діаметр D_0 зерен у їх тривимірному представленні.

Одним із параметрів, які характеризують структуру, є усереднена орієнтація зерен чи її відсутність. Зокрема, орієнтація зерен матеріалу здебільшого виникає внаслідок його пластичної деформації. Неоднорідність розподілу пластичної деформації є причиною виникнення залишкових напружень. Одним із основних підходів до оцінювання залишкових напружень є рентгенівський метод. Недоліком такого підходу є те, що він є доволі складним у реалізації та вимагає дороговартісного рентгенівського обладнання.

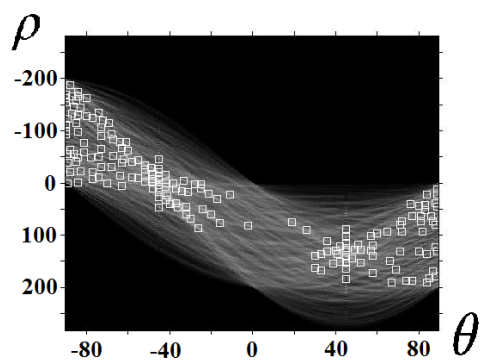
У роботі розроблено метод для виявлення та кількісного аналізу орієнтації зерен [5]. Ідея методу полягає у тому, що у випадку збільшення кількості зерен, які зорієнтовані у певному напрямку, їх межі теж орієнтуються у певному напрямку, що можна виявити за допомогою перетворення Хафа.

Розглянемо це на прикладі зображення. За вхідне використаємо змодельоване зображення, яке представлено на рис. 22а.

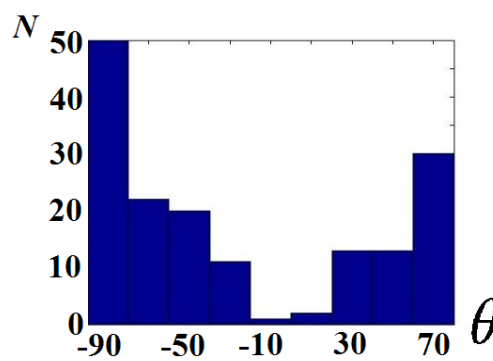


$$\alpha = 0^\circ$$

а) Зображення меж зерен, які спрямовані під кутом α до горизонталі



б) Представлення зображення в просторі Хафа



в) Гістограма розподілу прямих під певним кутом

Рисунок 22 - Дослідження методу орієнтації зерен з використанням перетворення Хафа.

Це зображення меж зерен, переважаюча більшість яких зорієнтовані під кутом α до горизонталі (в даному випадку $\alpha = 0^{\circ}$). До цього зображення було застосовано перетворення Хафа (рис. 22б). Максимальне значення гістограми розподілу піків за кутом θ у просторі Хафа вказуватиме кут, під яким спрямований перпендикуляр до переважаючого напрямку орієнтації зерен. Наприклад, максимальне значення гістограми на рис. 22в вказує, що перпендикуляр до переважаючого напрямку орієнтації меж зерен розміщений під кутом $\theta = -90^{\circ}$, звідси слідує, що самі зерна зорієнтовані під кутом 0° .

Другим важливим аспектом при аналізі гістограми, представленої на рис. 22в, є те, що її мода пропорційна до видовження зерен металу на зображенні (рис. 22а).

Отже, на основі пронормованого значення цих максимумів можна кількісно оцінювати рівень видовженості S зерен, який у свою чергу корелює з іншими фізико-механічними характеристиками, зокрема, такими як пластична деформація, міцність, пружність, твердість тощо [5].

Застосуємо розроблений у роботі метод кількісного оцінювання видовження зерен металу на основі перетворень Хафа для дослідження металографічних зображень шліфів сталі 12Х1МФ, вирізаних з прямолінійної ділянки та зони гину труби парогону ТЕС на різній віддалі від внутрішньої стінки. Результати проведених досліджень представлені на рис. 23.

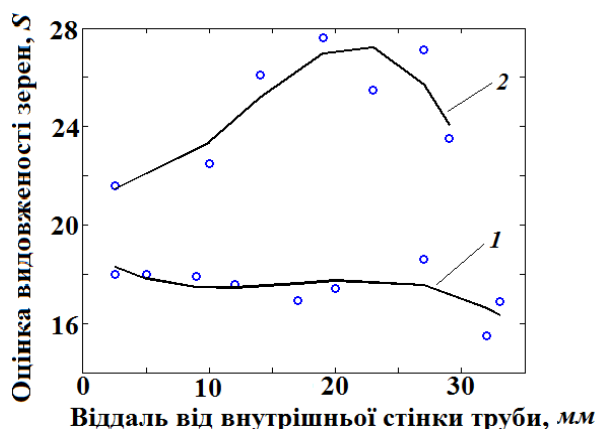


Рисунок 23 - Оцінка видовженості зерен шліфів сталі 12Х1МФ, вирізаних з прямолінійної ділянки (1) та зони гину (2) труби парогону ТЕС.

З рисунку 23 видно, що на прямолінійній ділянці труби парогону видовженість зерен суттєво менша за видовженість зерен в зоні гину. Це свідчить про те, що деформаційна текстура в зоні гину є більш вираженою. Видовженість та орієнтація зерен тісно пов'язана з пластичними деформаціями. Орієнтація видовженості зерен збігається із напрямком прикладених напружень. Цим пояснюється збільшення оцінки видовженості при зростанні відстані від внутрішньої стінки труби в зоні гину.

У шостому розділі дисертаційної роботи – “Розроблення інформаційної технології моделювання мікроструктури металів, обробки та аналізу металографічних і фрактографічних зображень” - представлено методи моделювання та візуалізації структури металевих матеріалів за їх зображеннями та проведено інтегрування розроблених методів в єдину інформаційну технологію автоматизованого аналізу металографічних та фрактографічних зображень.

Для виявлення певних залежностей між фізико-механічними властивостями та

мікроструктурою необхідним є модельне представлення зеренної структури металу. Одним із найбільш вживаних підходів до моделювання зеренної мікроструктури є метод Монте-Карло. Проте цей підхід не є найкращим для вивчення метричних та орієнтаційних співвідношень, які характеризують зеренну структуру металу.

При дослідженні, беручи до уваги кристалічну структуру металів, доволі часто зерна представляють у вигляді багатокутників. Така модель дає змогу більш повно оцінити метричні та топологічні властивості зеренної структури. Припустимо, що точки p_i є центрами кристалізації і на рис. 24 зображені у вигляді зерен кристалу, які ростуть з постійною швидкістю у всіх напрямках. Також припускаємо, що ріст зерен продовжується доти, поки два чи більше зерен не зустрінуться.

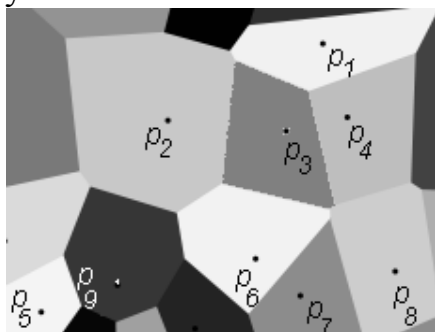


Рисунок 24 - Діаграма Вороного з вершинами p_i , де $i = 1 \div 9$.

Через деякий час зерно, яке виростило, представляється коміркою діаграми Вороного. В результаті буде отримана діаграма Вороного для множини точок p_i . На основі цього у роботі розроблено метод моделювання меж зерен на металографічному зображенні металу з використанням діаграм Вороного [6]. Марка металу в цьому випадку не має принципового значення.

На рисунку 25 наведено результати моделювання меж зерен металу з використанням діаграм Вороного.

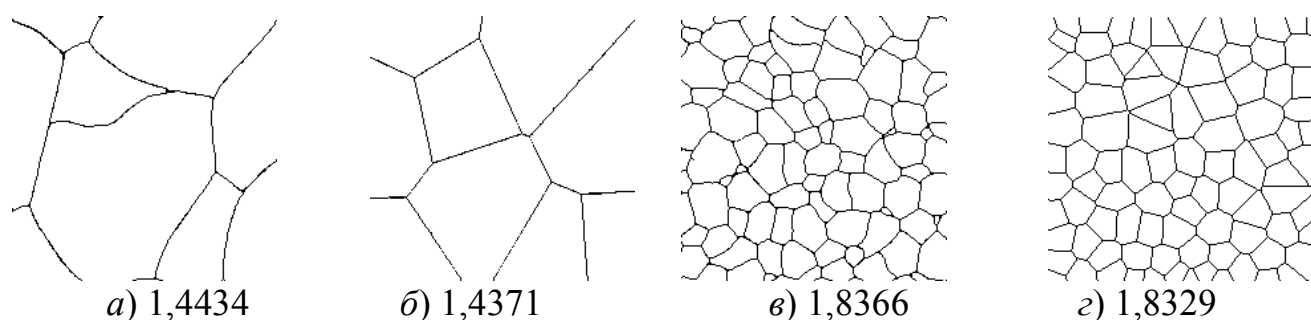


Рисунок 25 - Фрактальні розмірності тестових зображень (а, в) меж зерен різного розміру та відповідних їм моделей (б, г), отриманих за допомогою діаграм Вороного.

У дисертаційній роботі проводилося моделювання більшої кількості зображень і для кожного з них проводилося вимірювання фрактальних розмірностей. Результати проведених обчислень свідчать, що максимальна відносна похибка фрактальної оцінки зображень меж зерен певного розміру та відповідних до них змодельованих зображень (рис. 25) становить 1,15%. Також проведено аналогічні дослідження з визначення усередненого діаметра зерен для тестових зображень (ASTM E930 - 99(2015)) та відповідних їм моделей, отриманих за допомогою діаграм Вороного. Максимальне відносне відхилення усередненого діаметра зерна,

змодельованого за допомогою діаграм Вороного, становить 5,7%. На підставі проведених досліджень можна стверджувати, що запропонована модель є адекватною.

Моделювання меж зерен металу за допомогою діаграм Вороного надає нові можливості щодо аналізу зеренної структури металів. Зокрема, таке подання зеренної структури дає змогу дослідити геометричні та статистичні співвідношення багатокутників на діаграмах Вороного, які тісно пов'язані з характеристиками зеренної мікроструктури та матеріалу.

У дисертаційній роботі побудовано комплекс методів, при побудові яких враховані недоліки, що виявлені при дослідженні відомих систем обробки та аналізу металографічних і фрактографічних зображень. Порівняльний аналіз деяких із них представлено на рисунку 26.

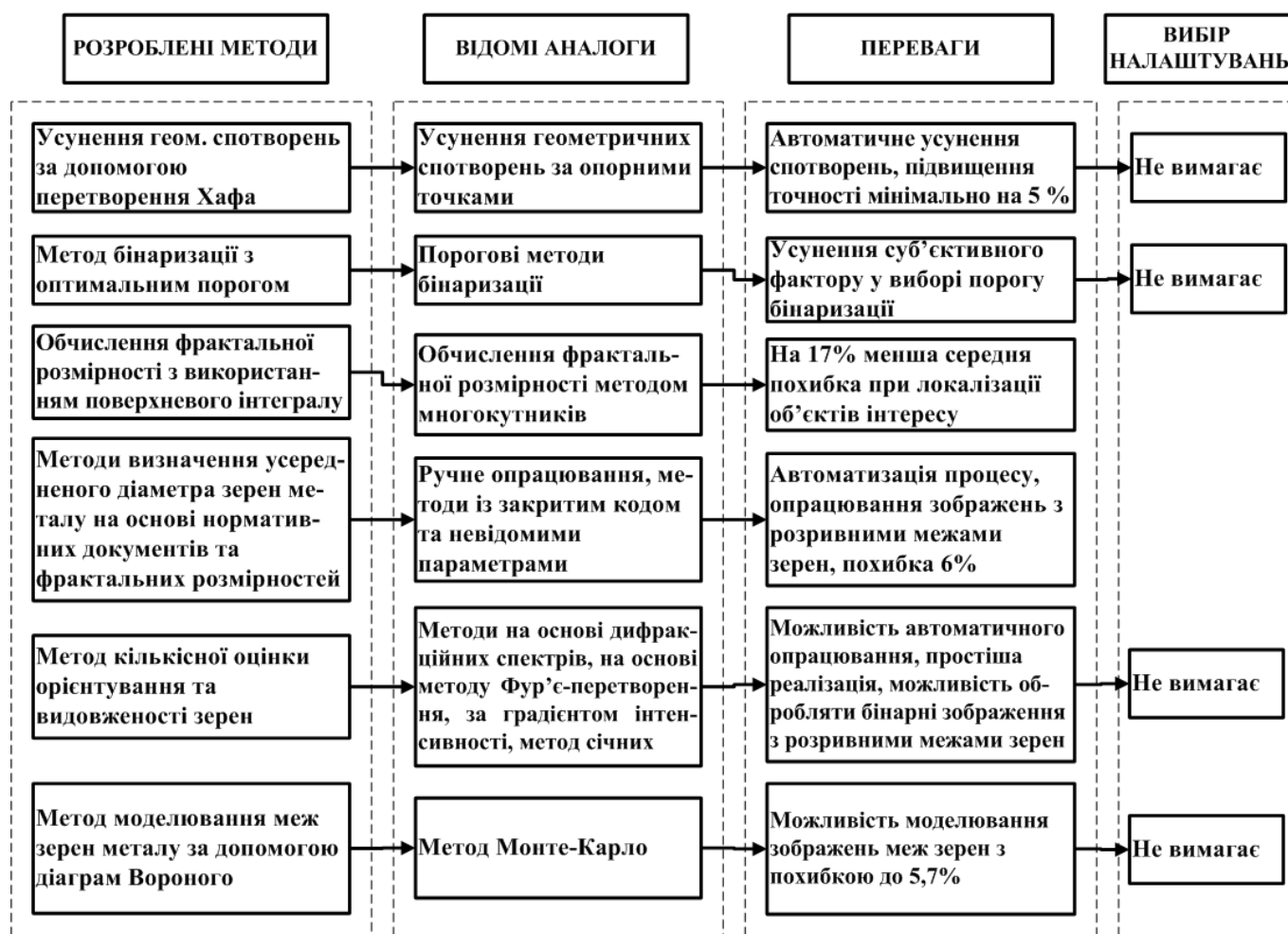


Рисунок 26 – Порівняльні характеристики розроблених методів.

Спільною рисою розроблених методів є те, що більшість із них забезпечує можливість проведення автоматизованого опрацювання металографічних і фрактографічних зображень з мінімальною кількістю налаштувань, більшою швидкістю та точністю.

На основі розроблених у роботі методів та програмних засобів їх реалізації синтезовано складові інформаційної технології для розв'язування окремих задач обробки та аналізу металографічних і фрактографічних зображень (рис. 27).



Рисунок 27 – Модель синтезу складових інформаційної технології для аналізу металографічних та фрактографічних зображень.

Модель синтезу складових інформаційної технології поєднує задачі, які вирішуються при обробці та аналізі металографічних і фрактографічних зображень. Кожна складова інформаційної технології базується на методах, вибір яких залежить не лише від поставленої задачі, але й від класу зображення. Таким чином забезпечується інваріантність інформаційної технології до різних прикладних галузей та розширюються її функціональні можливості.

Розрізнені складові інформаційної технології, які розроблені для окремих задач (рис. 27), інтегровані в єдину інформаційну технологію [3] аналізу металографічних та фрактографічних зображень (рис. 28).

Для аналізу розробленої інформаційної технології необхідно сформулювати критерії, згідно яких буде оцінюватися її ефективність. За такі критерії вибрано можливість автоматизованого режиму роботи, точність обчислень та швидкодія методів опрацювання і аналізу зображень.

Відмінною рисою побудованої інформаційної технології (рис. 28) є те, що її основу становлять розроблені у роботі методи, які забезпечують автоматизований, а деякі автоматичний режим опрацювання зображень, не вимагають постійних переналаштувань параметрів та забезпечують вищу точність обробки у порівнянні з аналогами (рис. 29). Як наслідок, розроблена інформаційна технологія не потребує постійного візуального аналізу з боку оператора на кожному кроці опрацювання, що сприяє підвищенню швидкодії опрацювання зображень.



Рисунок 28 – Структурно-функціональна модель інформаційної технології аналізу металографічних та фрактографічних зображень [3].

Складові інформаційної технології		Автоматизація	Точність	Швидкодія
Попередня обробка та корекція геометричних спотворень	Усунення геометричних спотворень	✓	✓	✓
	Виділення та вимірювання ознак досліджуваного об'єкту		✓	
Локалізація об'єктів інтересу	Бінаризація з оптимальним порогом	✓		
Вимірювання параметрів об'єктів та їх моделювання	Обчислення усередненого діаметру зерен металу	✓		✓
	Орієнтування та видовження зерен металу	✓		✓
	Моделювання меж зерен	✓		✓
	Уточнення при обчисленні усередненого діаметра		✓	

Рис. 29. Основні характеристики інформаційної технології обробки та аналізу металографічних та фрактографічних зображень.

Таким чином, результатом проведених у дисертаційній роботі досліджень є побудова нової інформаційної технології, складові якої характеризуються підвищеним рівнем автоматизації, швидкодії та точності аналізу зображень. Це досягається через розроблення нових способів кількісного оцінювання геометрії та розподілу їх структурних елементів. За прикладну галузь у роботі вибрано опрацювання мікроструктури металографічних та фрактографічних зображень, проте більшість із розроблених методів як і інформаційна технологія в цілому можуть бути адаптованими до опрацювання та аналізу зображень з інших прикладних галузей.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему побудови інформаційної технології, яка забезпечує підвищення рівня автоматизації, швидкодії та точності аналізу цифрових металографічних та фрактографічних зображень для оцінювання технічного стану металу різних об'єктів шляхом розробки нових методів опрацювання елементів їх мікроструктури. Це відкрило нові можливості для автоматизації та підвищення швидкодії матеріалознавчих досліджень, що важливо для встановлення нових залежностей між мікроструктурою та фізико-механічними властивостями матеріалів.

За результатами розв'язання поставленої проблеми можна зробити такі висновки:

1. Вперше запропоновано парадигму та системну концепцію вирішення науково-прикладної проблеми побудови інформаційної технології, яка через створення нових способів кількісного аналізу мікроструктур у металографії, забезпечує підвищення рівня автоматизації, швидкодії та точності аналізу металографічних та фрактографічних зображень.

2. З застосуванням перетворення Хафа розроблено імітаційну модель калібрування цифрових відеокамер, яка використовується в оптичній мікроскопії при формуванні металографічних та фрактографічних зображень. На відміну від відомих підходів це дозволяє автоматизувати процес усунення геометричних спотворень, які спричинені дисторсією недосконалих оптичних систем, що забезпечує підвищення точності метричних вимірювань мінімально на 5%.

3. Отримав подальший розвиток метод бінаризації напівтонових зображень з використанням оптимального щодо деталізації значення порогу, який обчислюється із застосуванням кореляційної функції. Перевага запропонованого методу полягає у тому, що усувається суб'єктивний фактор у виборі порогу бінаризації та з'являється можливість аналізу металографічних зображень, отриманих, зокрема, за різних умов освітлення.

4. Удосконалено метод обчислення фрактальної розмірності з використанням поверхневого інтегралу, який дає можливість опрацьовувати напівтонові зображення без необхідності їх бінарного представлення та забезпечує на 17% меншу середню похибку при локалізації об'єктів інтересу у порівнянні з відомими аналогами.

5. Удосконалено методологію визначення усередненого діаметра зерен металу за металографічними зображеннями. Вона побудована на основі використання технологій опрацювання зображень, обчислення фрактальних розмірностей та у відповідності до нормативних документів. Це забезпечує можливість обчислення усередненого діаметру зерен в автоматизованому режимі, при якому за вхідні дані можуть використовуватися металографічні зображення з нечітко окресленими та розривними межами зерен, а обчислення відповідають нормативним документам. Похибка вимірювань цими методом, у порівнянні з еталонним зображенням, становить 6 %.

6. Отримав подальший розвиток метод обчислення фрактальної розмірності на основі тривимірного представлення поверхні, сформованої інтенсивностями пікселів деякої ділянки металографічного зображення. Він забезпечив підвищену чутливість до незначних змін площі поверхонь ділянок з пошкодженнями, що зробило можливим його використання для моніторингу ознак утомних пошкоджень на поверхні плакованих алюмінієвих сплавів.

7. Розроблено метод кількісної оцінки орієнтування та видовженості зерен на металографічних зображеннях за допомогою перетворень Хафа. Це створює нові можливості щодо аналізу ознак пластичного деформування матеріалів та визначення напряму прикладених сил, які безпосередньо корелюють з видовженістю та орієнтуванням зерен.

8. Розроблено метод обчислення усередненого розміру зерен в структурі металу згідно нормативних документів, який через застосування коригуючого коефіцієнта, дає можливість зменшити похибку обчислень мінімум в 1,3 рази.

9. Розроблено модель зеренної структури металу за допомогою діаграм Вороного, яка розширює можливості щодо теоретичних досліджень, спрямованих на прогнозування впливу різних чинників на мікроструктуру металів. Одним із застосувань є дослідження геометричних та статистичних співвідношень багатокутників на діаграмах Вороного, які тісно пов'язані з характеристиками зеренної мікроструктури та матеріалу. При цьому максимальне відхилення геометричних розмірів змодельованих зерен від еталонних складає 5,7%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Zhuravel' I.M. Automated determination of grain geometry in an exploited steam-pipeline steel / I.M. Zhuravel', L.M. Svirs'ka, O.Z. Student, R.A. Vorobel' and H.M. Nykyforchyn // *Materials Science*, 2009, Volume 45, Number 3, p. 350-357. (Входить до міжнародних науковометричних баз Google Scholar, Scopus, Web of Science).
2. Zhuravel' I.M. Measurement of the mean grain size in a metal by using fractal dimensions / I.M. Zhuravel', L.M. Svirs'ka // *Materials Science*, 2010, Volume 46, Number 3, p. 418-420. (Входить до міжнародних науковометричних баз Google Scholar, Scopus, Web of Science).
3. Журавель І.М. Інформаційна технологія автоматизованого аналізу металографічних та фрактографічних зображень / І.М.Журавель // *Науковий вісник НЛТУ України*.–2018.–т. 28.–№ 10. – С. 120-123. (Входить до міжнародних науковометричних баз Google Scholar, Index Copernicus).

4. Воробель Р.А. Метод калібрування цифрових відеокамер на основі перетворень Хафа / Р.А.Воробель, І.М.Журавель // Відбір і обробка інформації. - 2004. – Вип. 21(97). - С. 57 – 62.
5. Журавель І.М. Кількісний аналіз орієнтації та видовженості зерен на металографічних зображеннях за допомогою перетворень Хафа / І.М.Журавель, В.М.Максимович//Науковий вісник НЛТУ України.–2018.–т. 28.–№ 5. – С. 135-139. (Входить до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Index Copernicus).
6. Журавель І.М. Моделювання зеренної структури металографічних зображень за допомогою діаграм Вороного /І.М.Журавель// Відбір і обробка інформації.– 2014. -№41(117).-С. 77-80. (Входить до міжнародної наукометричної бази Google Scholar).
7. Журавель І.М. Метод бінаризації металографічних зображень з оптимальним порогом / І.М.Журавель // «Штучний інтелект». - 2012. - № 4. - С. 142-147. (Входить до міжнародної наукометричної бази Google Scholar).
8. Karuskevych M. V. Application of Fractal Geometry to the Problems of Prediction of the Residual Service Life of Aircraft Structures / M. V. Karuskevych, I. M. Zhuravel', T. P. Maslak // Materials Science, 2012, Volume 47, Issue 5, pp 621–626. (Входить до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Scopus, Web of Science).
9. Журавель І.М. Обчислення фрактальних розмірностей з використанням поверхневого інтеграла / І.М.Журавель, Р.А.Воробель // Відбір і обробка інформації. - 2007. – Вип. 26(102). - С.95-98.
10. Журавель І.М. Аналіз текстури фрактографічних зображень на основі спектру фрактальних розмірностей Реньї / І.М.Журавель // «Штучний інтелект». - 2013. - №1. - С. 204-208. (Входить до міжнародної наукометричної бази Google Scholar).
11. Vorobel' R. A. Automatic selection and quantitative analysis of carbides on grain boundaries of 12Kh1MF steel after operation at a steam pipeline of a thermal power plant / R. A. Vorobel', I. M. Zhuravel', L. M. Svirs'ka, O. Z. Student // Materials Science, 2011, Volume 47, Issue 3, pp. 393–400. (Входить до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Scopus, Web of Science).
12. Журавель І.М. Дослідження інваріантів зображення на основі його фрактальної моделі / І.М.Журавель // Вісник НУ “Львівська політехніка”: серія “Автоматика, вимірювання та керування”. – 2017. - Вип. 880. – С. 18-23. (Входить до міжнародної наукометричної бази Google Scholar).
13. Журавель І.М. Вибір налаштувань під час обчислення поля фрактальних розмірностей зображення /І.М.Журавель//Науковий вісник НЛТУ України.–2018.–т. 28.–№ 2. – С.159-163. (Входить до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Index Copernicus).
14. Журавель І.М. Використання локальних фрактальних розмірностей для виділення різнорозмірних об'єктів на зображенні / І.М.Журавель, Р.А.Воробель // Штучний Інтелект. - 2007 – Вип. 1, С. 238 – 243.
15. Воробель Р.А. Метод автоматизованого аналізу мікроструктури вуглецевої сталі за її металографічними зображеннями / Р.А.Воробель, І.М.Журавель, О.З.Студент // "Наукові нотатки" – Міжвузівський збірник наукових праць, Луцький Національний технічний університет. – 2009. - Вип. 25, том 1. - С. 69-72.

16. Воробель Р.А., Журавель І.М. Покращання зображень через перетворення їх локальних контрастів / Р.А.Воробель, І.М.Журавель // Відбір і обробка інформації. - 2002. - Вип. 16(92). - С. 78 – 82.
17. Журавель І.М. Розпізнавання профілю зовнішньої різьби з використанням кореляційного методу / І.М.Журавель // Відбір і обробка інформації.- 2003. – Вип. 18(94). - С. 82 – 86.
18. Воробель Р.А. Обробка даних в оптоелектронній системі контролю профілю різьби / Р.А.Воробель, Я.М.Зінчак, О.М.Карпаш, Н.В.Опир, І.М.Журавель, К.В.Сущик // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 2003.– № 3. – С. 27–29. (Входить до міжнародної науковометричної бази Google Scholar).
19. Воробель Р.А. Використання локального контрасту при виділенні ліній на багатоградацийному зображенні методом Хафа /Р.А.Воробель, Н.В.Опир, О.Р. Берегуляк, І.М.Журавель//Відбір і обробка інформації.–2003.–№ 19(95).–С. 115-119.
20. Івасенко І.Б. Визначення ліній стику об'єктів під час електронно-променевого зварювання / І.Б.Івасенко, І.М.Журавель, О.Р.Берегуляк // Відбір і обробка інформації. - 2006. – Вип. 24(100). - С. 104 – 109.
21. Івасенко І.Б. Комп'ютеризована система обробки та аналізу цифрових зображень, отриманих при електронно-променевому зварюванні / І.Б.Івасенко, І.М.Журавель, К.В.Сущик, О.Р.Берегуляк // Проблеми програмування. – 2008. - № 1. - С. 78–86. (Входить до міжнародної науковометричної бази Google Scholar).
22. Журавель І.М. Про один підхід до покращання слабоконтрастних зашумлених рентгенівських зображень / І.М.Журавель // Міжвузівський збірник “Наукові нотатки”. – 2013. – Вип. 42. - С. 101-105. (Входить до міжнародної науковометричної бази Google Scholar).
23. Воробель Р.А. Метод калібрування цифрових відеокамер / Р.А.Воробель, І.М.Журавель // Праці 12-ї міжнародної конференції по автоматичному управлінню “Автоматика”. – Харків. – 2005, с. 23-24.
24. Воробель Р.А. Кількісний аналіз структури матеріалів на основі теорії фракталів / Р.А.Воробель, І.М.Журавель// 13-міжнародна конференція з автоматичного управління “Автоматика”, Вінниця. – 2006. - С. 383.
25. Журавель І.М. Модифікація методу адаптивної бінаризації зображень / І.М.Журавель // XV Відкрита науково–технічна конференція молодих науковців та спеціалістів Фізико–механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України. – 2003. - С. 228 – 230.
26. Берегуляк О.Р. Комп'ютеризовані системи аналізу цифрових зображень для оцінювання зміни структури і властивостей матеріалів при експлуатації / О.Р.Берегуляк, Р.А.Воробель, І.М.Журавель, І.Б.Івасенко, Н.В.Опир, К.В.Сущик // Міжнародна науково-технічна конференція «Конструкційна міцність матеріалів і ресурс обладнання АЕС», Київ. – 2006. - С. 20-21.
27. Воробель Р.А. Модифікація методу статистичної сегментації / Р.А.Воробель, І.М.Журавель // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – 2005 - Вип. 10. – С. 189 - 192.
28. Журавель І.М. Метод визначення величини зерна металевих матеріалів / І.М.Журавель // XX Відкрита науково–технічна конференція молодих науковців та

- спеціалістів Фізико–механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України. - 2007. - С. 238-241.
29. Журавель І.М. До питання обчислення усередненого діаметру зерен металу / І.М.Журавель // II науково-технічна конференція "Обчислювальні методи і системи перетворення інформації". – Львів. – 2012. - С. 169-172.
30. Журавель І.М. Автоматичне розпізнавання крихкого та в'язкого зламів сталі 15Х1МФ з використанням фрактальної розмірності / І.М.Журавель // Науково-технічна конференція "Обчислювальні методи і системи перетворення інформації", Львів.- 2010. - С. 176-178.
31. Маслак Т.П. Фрактальні моделі деформаційного рельєфу / Т.П.Маслак, І.М.Журавель // Міжнародна науково-технічна конференція "АВІА", Київ. – 2011. - том 2. - С. 16-19.
32. Журавель І.М. Моделювання зеренної структури металографічних зображень за допомогою діаграм Вороного /І.М.Журавель//III наук.-техн. конф. "Обчислювальні методи і системи перетворення інформації".–Львів.–2014.-С.105-108.
33. Журавель І.М. Модифікація методу Канні для виділення країв об'єктів / І.М.Журавель // XVI Відкрита наук.–техн. конф. молодих науковців та спеціалістів Фізико–механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України. – 2005. - С. 352-355.
34. Воробель Р.А. Деякі підходи до визначення якості цифрових зображень / Р.А.Воробель, І.М.Журавель, Н.В.Опир // Міжнародна конференція з індуктивного моделювання, ДНДП, Львів. – 2002. - Т. 1, Ч. 2. – С - 325.
35. Воробель Р.А. Перетворення палітри кольорових зображень / Р.А.Воробель, І.М.Журавель, К.В.Сущик // УАСОІРО. Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів. Праці. Шоста Всеукраїнська конференція. Україна, Київ. УкрОБРАЗ'2002. – 2002. - С. 155 – 157.
36. Воробель Р.А. Методологічні аспекти обробки даних в оптоелектронній системі контролю профілю різьби / Р.А.Воробель, Н.В.Опир, І.М.Журавель, К.В.Сущик, Я.М.Зінчак // 3-я науково-технічна конференція і виставка "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання", м. Івано–Франківськ. - 2002. - С. 55 – 57.
37. Берегуляк О.Р. Методи покращання цифрових рентгенографічних зображень / О.Р.Берегуляк, Р.А.Воробель, Н.В.Опир, Журавель І.М. // Матеріали III конференції з міжнародною участю "Інформаційні технології в охороні здоров'я та практичній медицині", Київ. – 2003. - С. 17–19.
38. Vorobel R. Computer system for measurement parameters of thread on gas-and-oil assortment pipes / R.Vorobel, N.Оpyr, I.Zhuravel, K.Sushchyk // Central European V Conference "Numerical Methods and Computer Systems in Automatic Control and Electrical Engineering". - 2003. – Part 1. – P.171-173.
39. Журавель І.М. Оцінка спотворень модифікованих контейнерів у стеганографії з використанням технологій обробки цифрових зображень // IV Міжнародна науково-технічна конференція "Захист інформації і безпека інформаційних систем" 04 - 05 червня 2015 р., Львів, Україна, с. 131-132.
40. Берегуляк О.Р. Комп'ютеризована система "Образ-Д1" для аналізу рентгенографічних знімків / О.Р. Берегуляк, Р.А. Воробель, І. М. Журавель, І.Б.

Івасенко, Н.В. Опир, К.В. Сущик // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – 2005. - Вип. 10. – С. 185 - 188.

41. Berehulyak O. Computer system for input, processing and analysis of radiographic images for defective area detection / O.Berehulyak , R.Vorobel , I.Ivasenko , N.Opyr , I.Zhuravel , K.Sushchyk // Central European VI Conference MSKE. Częstochowa, Poland. – 2005. - P. 26-28.

42. Berehulyak O.R. Computer system “Negatoscop” for the analysis of radiographic films / O.R.Berehulyak, R.A.Vorobel, I.M.Zhuravel, I.B.Ivasenko, N.V.Opyr, K.V.Sushchyk // Proc. of AITTH, Minsk, Belarus. – 2005. - P. 188-192.

43. Берегуляк О.Р. Комп'ютеризована система “ОБРАЗ-Д2” вводу, обробки і аналізу результатів капілярного контролю якості виробів / О.Р.Берегуляк, Р.А.Воробель, І.М.Журавель, І.Б.Івасенко, Н.В.Опир, К.В.Сущик // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – 2006. - Вип. 11. – С. 195 - 200.

44. Берегуляк О.Р. Комп'ютеризована оптоелектронна система контролю параметрів зовнішньої різьби /О.Р.Берегуляк, Р.А.Воробель, І.М.Журавель, Я.М.Зінчак, І.Б.Івасенко, Н.В.Опир, К.В.Сущик//5-а Національна наук.-техн. конф. і виставка “Неруйнівний контроль та технічна діагностика” Київ.–2006. - С. 248-250.

45. Берегуляк О.Р. Система обробки цифрових зображень в задачах неруйнівного контролю якості матеріалів / О.Р.Берегуляк, Р.А.Воробель, І.М.Журавель та ін. // Цільова комплексна програма НАН України “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин”, Збірник наукових статей, Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, Київ. - 2006. - С. 77-80.

46. Воробель Р.А. Система “ОБРАЗ–Д3” автоматизованого оброблення та аналізу зображень, що формуються при неруйнівному контролі якості виробів / Р.А.Воробель, Г.І.Бавда, О.Р.Берегуляк, І.М.Журавель та ін. // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – 2007. - Вип. 12. – , С. 243-247.

АНОТАЦІЯ

Журавель І.М. Інформаційна технологія автоматизованого аналізу металографічних та фрактографічних зображень. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. – Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, Національний університет " Львівська політехніка" Міністерства освіти і науки України, м. Львів, 2019.

Дисертацію присвячено розробленню інформаційної технології, яка забезпечує підвищення рівня автоматизації, точності та швидкодії аналізу металографічних та фрактографічних зображень для оцінки технічного стану матеріалів відповідальних промислових об'єктів шляхом побудови нових методів кількісного оцінювання геометрії та розподілу елементів їх мікроструктури. Розроблена інформаційна технологія охоплює всі основні етапи досліджень зображень у металографії – від їх формування, виділення об'єктів інтересу, геометричного аналізу, до візуалізації результатів. Серед розроблених методів слід виділити: метод бінаризації напівтонових зображень з використанням оптимального, з точки зору деталізації, значення порогу, який обчислюється із

застосуванням кореляційної функції; метод обчислення фрактальної розмірності, який, на відміну від відомих підходів, дає можливість коректно опрацьовувати напівтонові зображення без необхідності їх бінарного представлення; метод визначення усередненого розміру зерен металу за металографічним зображенням, який дозволяє автоматизувати процес обчислення та дає можливість аналізувати металографічні зображення з незамкнутими межами зерен.

Ключові слова: мікроструктура зображення, геометричні спотворення, сегментація, аналіз текстури, поле фрактальних розмірностей, усереднений діаметр зерен, перетворення Хафа, зеренна структура, діаграми Вороного.

АННОТАЦІЯ

Журавель І.М. Информационная технология автоматизированного анализа металлографических и фрактографических изображений. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.06 - информационные технологии. - Физико-механический институт им. Г.В.Карпенко НАН Украины, Национальный университет "Львовская политехника" Министерства образования и науки Украины, г. Львов, 2019.

Диссертация посвящена разработке информационной технологии, которая обеспечивает повышение уровня автоматизации, точности и быстродействия анализа металлографических и фрактографических изображений для оценки технического состояния материалов ответственных промышленных объектов путем построения новых методов количественной оценки геометрии и распределения элементов их микроструктуры. Разработанная информационная технология охватывает все основные этапы исследований изображений в металлографии - от их формирования, выделения объектов интереса, геометрического анализа, к визуализации результатов. Среди разработанных методов следует выделить следующие.

Разработан метод калибровки цифровых видеокамер, который построен на основе преобразований Хафа и используется в оптической микроскопии при формировании металлографических и фрактографических изображений. Он дает возможность автоматизировать процесс устранения геометрических искажений, вызванных дисторсией несовершенных оптических систем и повышает точность метрических измерений. Получил дальнейшее развитие метод бинаризации полутоновых изображений с использованием оптимального по детализации значения порога, который высчитывается с применением корреляционной функции. Преимущество предложенного метода заключается в том, что устраняется субъективный фактор в выборе порога бинаризации и появляется возможность анализа металлографических изображений, полученных, в частности, при различных условиях освещения. Усовершенствован метод вычисления фрактальной размерности с использованием поверхностного интеграла, который дает возможность обрабатывать полутоновые изображения без необходимости их бинарного представления и уменьшает среднюю погрешность при локализации объектов интереса по сравнению с известными аналогами. Усовершенствован метод определения усредненного размера зерен металла по металлографическими

изображениями. Он построен на основе вычисления фрактальных размерностей и дает возможность автоматизировать процесс определения усредненного диаметра зерен и анализировать металлографическое изображение с незамкнутыми границами зерен без необходимости их интерактивного редактирования. Получил дальнейшее развитие метод вычисления фрактальной размерности на основе трехмерного представления поверхности, сформированной интенсивностями пикселей некоторого участка металлографического изображения. Он обеспечил повышенную чувствительность к незначительным изменениям площади поверхностей участков с повреждениями, что сделало возможным его использование для мониторинга признаков усталостных повреждений на поверхности плакированного алюминиевого сплава, который является основой многих авиационных конструкций. Усовершенствован метод автоматизированного определения геометрии зерен, который учитывает требования нормативных документов. На примере анализа металлографических изображений микроструктуры теплостойкой стали, эксплуатируемой на паропроводе ТЭС, установлено, что в отличие от известных подходов, он дает возможность анализировать изображения с нечетко очерченными и разрывными границами зерен. Разработан метод количественной оценки ориентирования и удлиненности зерен на металлографических изображениях с помощью преобразований Хафа. Это создает новые возможности анализа признаков пластического деформирования материалов и определения направления приложенных напряжений, которые непосредственно коррелируют с вытянутостью и ориентированием зерен. Разработан метод вычисления усредненного размера зерен в структуре металла согласно нормативных документов, который из-за применения корректирующего коэффициента, дает возможность повысить точность вычислений. Разработан метод моделирования границ зерен металла с помощью диаграмм Вороного, который расширяет возможности теоретических модельных исследований, направленных на прогнозирование влияния различных факторов на микроструктуру металлов. Одним из его применений является исследование геометрических и статистических соотношений многоугольников на диаграммах Вороного, которые тесно связаны с характеристиками зеренной микроструктуры и материала.

На основе разработанных в работе методов и программных средств их реализации синтезированы информационные технологии для решения отдельных задач обработки и анализа металлографических и фрактографических изображений. Синтез информационных технологий сочетает задачи, решаемые при обработке и анализе металлографических и фрактографических изображений. Разработанная информационная технология характеризуется повышенным уровнем автоматизации, быстродействия и точности анализа металлографических и фрактографических изображений, что достигнуто путем разработки новых способов количественной оценки геометрии и распределения элементов их микроструктуры.

Ключевые слова: микроструктура изображения, геометрические искажения, сегментация, анализ текстуры, поле фрактальных размерностей, усредненный диаметр зерен, преобразования Хафа, зеренная структура, диаграммы Вороного.

ABSTRACT**Zhuravel I.M. Information technology of automated analysis of metallographic and fractographic images. - On the rights of the manuscript.**

Dissertation submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Sciences by specialty 05.13.06 - Information technologies. – Karpenko Physiko-mechanical Institute National Academy of Science of Ukraine, Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

The dissertation is devoted to the development of information technology, which provides an increase in the level of automation, accuracy and speed of analysis of metallographic and fractographic images to assess the technical state of materials of responsible industrial objects through the construction of new methods of quantitative evaluation of geometry and the distribution of elements of their microstructure. The developed information technology covers all the main stages of research of images in metallography - from their formation, allocation of interest objects, geometric analysis, to visualization of the results. Among the developed methods, one should distinguish: the method of binarization of the halftone images using the optimal, in terms of detail, threshold value, which is calculated using the correlation function; the method of calculating the fractal dimension, which, unlike the known approaches, makes it possible to correctly process halftone images without the need for their binary representation; a method for determining the average grain size of a metal by a metallographic image, which allows automating the calculation process and makes it possible to analyze metallographic images with unclosed grain boundaries.

Keywords: microstructure of image, geometric distortion, segmentation, fractal dimension, average diameter of grains, Hough transform, grain structure, Voronyi diagram.

Підписано до друку 21.05.2019 р.
Формат 60×90 1/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 2,2. Обл.-видав. арк. 1,7.
Тираж 100 прим. Зам. 190886.

Поліграфічний центр
Видавництва Національного університету “Львівська політехніка”
вул. Ф.Колесси, 4, 79013, Львів
Реєстраційне свідоцтво серії ДК № 4459 від 27.12.2012 р.