

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Г.В.КАРПЕНКА НАЦІОНАЛЬНОЇ
АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Журавель Ігор Михайлович

УДК 004.932.2;620.18

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.13.06 – інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ /І.М. Журавель/

Науковий консультант:

Максимович Володимир Миколайович,
доктор технічних наук, професор

Львів – 2019

АНОТАЦІЯ

Журавель І.М. Інформаційна технологія автоматизованого аналізу металографічних та фрактографічних зображень. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 “Інформаційні технології” (126 “Інформаційні системи та технології”). – Фізико–механічний інститут ім. Г.В.Карпенка Національної академії наук України, Національний університет “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України, Львів, 2019.

Розвиток комп’ютерної техніки та оптично-електронної мікроскопії призвів до широко використання цифрових зображень у різноманітних галузях – медицині, машинобудуванні, авіабудуванні, дистанційному зондуванні, матеріалознавстві тощо. Дані зображення є основою для проведення досліджень, аналізу та прийняття рішень. Оскільки в багатьох випадках сформовані зображення мають складну структуру та вимагають прецизійного аналізу, тому візуальна система людини не завжди може справитися з поставленим завданням у визначений часовий інтервал.

Велика кількість металевих конструкцій та виробів у згаданих вище галузях народного господарства вичерпали свій ресурс або підходять до його завершення. Ці об’єкти, з метою подальшої безпечної експлуатації, вимагають постійного моніторингу їх стану. Рівень деградації цих об’єктів визначається фізико-механічними характеристиками матеріалу, з якого вони виготовлені. Відомо, що між фізико-механічними характеристиками матеріалу та його мікроструктурою існує однозначна відповідність. Таким чином, вивчаючи мікроструктуру матеріалів, можна оцінити характеристики матеріалу та стан його деградації.

Традиційні методи аналізу мікроструктури - рентгеноструктурний аналіз, мікрорентгеноспектральне зондування, ядерно-магнітний резонанс, механічні методи та ін. характеризуються складністю і трудомісткістю реалізації. Окрім

того, вони не дають можливості кількісно оцінити складну мікроструктуру складових матеріалу.

Прикладні програми, якими комплектуються пристрої оптично-електронної мікроскопії мають, здебільшого, універсальний характер. Вони забезпечують усунення геометричних спотворень, коригують діапазон інтенсивностей зображення та інші подібні функції, але не можуть вирішувати вузькоспеціалізовані задачі, наприклад, пошук об'єктів з певними характеристиками, обчислення їх метричних характеристик, класифікацію текстур. Особливо складними для аналізу є металографічні та фрактографічні зображення, які характеризуються складною структурою та наявністю великої кількості дрібних об'єктів. Ці задачі вимагають індивідуального підбору проблемно-орієнтованих алгоритмів.

Згадані системи базуються на інформаційній технології обробки та аналізу металографічних та фрактографічних зображень. Тому підвищення ефективності інформаційної технології кількісного аналізу металографічних зображень шляхом розроблення нових підходів до їх опрацювання, оцінювання кількісних характеристик структурних складових та їх аналіз залишається не вирішеною і актуальною науково-прикладною проблемою, залучення до вирішення якої фрактальної геометрії вважають одним з перспективних і водночас недостатньо розроблених напрямів, який відкриває перспективи зв'язати параметри кількісного аналізу мікроструктури матеріалів з їх фізико-механічними властивостями.

У **першому** розділі роботи проведено огляд основних підходів до неруйнівного контролю виробів та конструкцій у різноманітних галузях народного господарства - це рентгенографічний контроль, капілярний, за допомогою тепловізора, дистанційне зондування, електронна мікроскопія та інші. Проведено аналіз систем обробки зображень у промисловості та основних задач, які на них покладені.

Показано, що ефективність методів опрацювання зображень у значній мірі залежить від адекватності моделі, яка вибрана для вирішення цього чи

іншого завдання. Запропоновано фрактальну модель зображення, яка є зручною при аналізі зображень зі складною текстурою, при пошуку та розпізнаванні об'єктів. На цій моделі у роботі побудовано більшість методів опрацювання зображень в неруйнівному контролі.

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. Ці кроки представляють собою цілісний комплекс інформаційних процесів, які спрямовані на вирішення задачі обробки та аналізу цифрових зображень неруйнівного контролю. Таким чином, система аналізу зображень представляє собою інформаційну систему, де застосовується інформаційна технологія опрацювання цифрових діагностичних зображень. Її основними недоліками є необхідність проведення візуального контролю результату з боку оператора на кожному кроці опрацювання, необхідність підбору параметрів в інтерактивному режимі тощо.

Проведені у першому розділі дослідження відомих підходів до аналізу даних неруйнівного контролю, виявлені їх недоліки дали можливість окреслити основні шляхи вирішення проблеми підвищення ефективності інформаційної технології аналізу структур у кількісній металографії.

На початку **другого** розділу розглянуто один із аспектів, який особливо суттєвий при проведенні метричного аналізу, є відсутність геометричних спотворень на зображенні. Через використання перетворень Хафа розроблено метод калібрування цифрових відеокамер. На відміну від відомих підходів він дозволяє автоматизувати процес усунення геометричних спотворень, які спричинені оптичними системами, що призводить до підвищення точності метричних вимірювань загалом.

У цьому ж розділі розглянуті підходи до локалізації об'єктів інтересу на зображенні. Для цього використовуються методи сегментації, які є одним з

перших та важливих кроків при вирішенні задачі аналізу зображень технічного зору. Різноманіття зображень та особливості їх складної структури призводить до того, що задача сегментації є проблемно-орієнтованою та вимагає створення нових та модифікації відомих підходів до її вирішення.

У цій роботі запропоновано метод бінаризації напівтонових зображень з використанням оптимального значення порогу, який обчислюється із застосуванням кореляційної функції. Одна з переваг запропонованого методу полягає в тому, що усувається суб'єктивний фактор у виборі порогу бінаризації та з'являється можливість аналізу металографічних зображень, отриманих, зокрема, за різних умов освітлення.

Розроблено адаптивний метод бінаризації, у якому порогове значення інтенсивності обчислюється на основі аналізу особливостей локальних околів. Запропонований підхід до бінаризації усуває блочну структуру на результуючому зображенні та дає можливість адаптувати його стосовно різних класів зображень.

Модифіковано метод статистичної сегментації, який на відміну від відомих підходів, через використання відповідних розмірів локальних апертур забезпечує реєстрацію підвищеної детальності зображень об'єктів зацікавлення різних розмірів. Недоліком цього підходу є те, що він є більш складним у програмній реалізації та вимагає більших часових затрат через ітераційність у реалізації.

З використанням адаптивного вибору локальних околів запропоновано модифікацію методу Канні до виділення границь об'єктів. Такий підхід, на відміну від відомого методу, дозволяє ефективно виділяти різнорозмірні об'єкти на зображенні.

Дослідження останніх років виявили можливість використання теорії фракталів для розв'язання задач аналізу та кількісного оцінювання структури матеріалу за її зображенням. **Третій** розділ дисертаційної роботи присвячений дослідженню використання можливостей фрактальних розмірностей при аналізі фрактографічних та металографічних зображень.

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

Запропоновано метод обчислення фрактальної розмірності з використанням поверхневого інтегралу, який, на відміну від відомих підходів, дає можливість коректно опрацьовувати напівтонові зображення без необхідності їх бінарного представлення.

Встановлено, що фрактальна розмірність є інваріантною ознакою при деяких видах афінних перетворень за умови дотримання певних вимог. Ця властивість дає можливість аналізувати зображення однієї сцени, які отримані при різних умовах освітлення, з різним коефіцієнтом масштабування та різним кутом повороту.

Встановлено, що при обчисленні фрактальних розмірностей важливим є правильний вибір налаштувань. Зокрема, у випадку побудови поля фрактальних розмірностей розмір локальної апертури повинен бути співмірним з розміром об'єктів зацікавлення на зображенні. При обчисленні фрактальних розмірностей за клітинним та крапковим методом важливим є вибір методу бінаризації, який має забезпечити найкращу деталізацію дрібних предметів на бінарному зображенні.

Перспективною технологією аналізу зображень є використання розподілу фрактальних розмірностей по полю зображення. Гістограма розподілу фрактальних розмірностей суттєво залежить від розміру апертури. Встановлено, що при розмірі локальної апертури, який співмірний з розміром досліджуваних об'єктів моди розподілу стають особливо вираженими. Кожна з цих мод свідчить про наявність текстури, яка характеризується певною

фрактальною розмірністю. Ця властивість може використовуватися для локалізації різних типів текстур чи об'єктів на зображенні.

Гістограма розподілу фрактальних розмірностей по полю зображення може використовуватися для оцінки дефокусування зображень, у тому числі і зашумлених. Встановлено, що з серії зображень, сформованих при різному фокусуванні, найменш розфокусованим буде зображення, яке характеризується найбільшою усередненою фрактальною розмірністю.

Четвертий розділ роботи присвячений методам кількісного аналізу структурних елементів металографічних зображень з використанням фрактальних розмірностей.

Запропоновано підхід до опису текстур фрактографічних зображень через використання спектру узагальнених фрактальних розмірностей Реньї. Використання запропонованого підходу дає можливість класифікувати досліджувані зображення текстур за мінімальною відстанню Чебишева.

Розроблено метод виділення об'єктів на зображенні з використанням фрактальних розмірностей. Перевагою цього методу є те, що через адаптацію розміру ковзної локальної апертури, він дозволяє одночасно локалізувати об'єкти різних розмірів.

На основі фрактальних розмірностей розроблено метод визначення усередненого розміру зерен металу за металографічними зображеннями. Даний підхід дозволяє автоматизувати процес обчислення та дає можливість аналізувати металографічні зображення з незамкнутими та розривними межами зерен без необхідності їх інтерактивного редагування.

Розроблено метод визначення фрактальної розмірності на основі тривимірного представлення зображень неруйнівного контролю. Такий підхід забезпечує потрібну чутливість до невеликих змін площі пошкоджених ділянок та використовується для моніторингу втомного пошкодження плакованого алюмінієвого сплаву Д16АТ, який є основою багатьох авіаційних конструкцій.

Металографічні та фрактографічні зображення представляють собою поєднання різноманітних структурних елементів. Серед цих елементів

найбільш задіяними при непрямому оцінюванні фізико-механічних характеристик матеріалів є зерна металів. У п'ятому розділі роботи розглянуто методи метричного аналізу зображень згаданих структур.

Запропоновано метод контролю величини зерна на основі аналізу металографічних зображень. Метод побудовано на припущенні, що координати меж зерен є відомими. Він дає можливість обчислити не лише розміри зерен, а й додатково будь-які інші показники, що характеризуватимуть геометрію зерна. Цей метод має велику практичну цінність, особливо при аналізі зерен, величина та форма яких суттєво впливає на властивості матеріалу.

На прикладі аналізу металографічних зображень мікроструктури експлуатованої паропровідної сталі 12Х1МФ запропоновано метод автоматизованого визначення геометрії зерен, який відповідає вимогам ASTM E 112. На відміну від відомих підходів, цей метод дає можливість аналізувати зображення з нечітко окресленими границями зерен, для чого на заключному етапі використовується інтерактивне оброблення зображення.

Проведено аналіз підходів до визначення усередненої величини зерен матеріалу згідно ASTM E 112. Доведено, що при обчисленні усередненого діаметра згідно ASTM E 112 необхідно використовувати поправочний коефіцієнт, що дасть можливість підвищити точність проведених обчислень.

На основі перетворень Хафа запропоновано метод аналізу видовженості та орієнтації зерен сталі 12Х1МФ, що дозволяє аналізувати пластичні деформації матеріалу та визначати напрямок прикладених напружень. Проведене комп'ютерне моделювання з використанням зображень зерен шліфів сталі 12Х1МФ, вирізаних з прямолінійної ділянки та зони гину труби парогону ТЕС. Отримані результати показали, що на прямолінійній ділянці труби парогону видовженість зерен суттєво менша за видовженість зерен в зоні гину, а отже деформаційна текстура в зоні гину є більш вираженою. Таким чином, розроблений підхід може використовуватися для оцінювання рівня деградації матеріалу.

У шостому розділі роботи розглянуто підходи до моделювання та візуалізації структури металографічних та фрактографічних зображень.

Запропоновано метод моделювання меж зерен металу за допомогою діаграм Воронова, що надає нові можливості для аналізу зеренної структури металів. Одним із застосувань є дослідження геометричних та статистичних співвідношень багатокутників на діаграмах Вороного, які тісно пов'язані з характеристиками зеренної мікроструктури та матеріалу.

На основі технології дифузійного псевдозмішування кольорів і застосування алгоритму Флойда-Стейнберга запропоновано алгоритм оптимізації палітри, який дає можливість без стиску суттєво зменшити об'єм файлу металографічного зображення без значного погіршення якості його візуального сприйняття.

Через модифікацію функції перетворення координат колірному простору в колірні компоненти, запропоновано підхід до формування псевдокольорових зображень, який забезпечує підвищення інформативності напівтонових металографічних та фрактографічних зображень при їх візуальному аналізі.

Таким чином, проведені у дисертаційній роботі дослідження призвели до підвищення ефективності методів аналізу металографічних та фрактографічних зображень шляхом розроблення нових способів кількісного оцінювання геометрії та розподілу елементів їх мікроструктури, що забезпечило покращання відомих та створення нових інформаційних процесів, які є основою для побудови нової, більш ефективної, інформаційної технології опрацювання діагностичних зображень у металографії.

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

Annotation

Zhuravel I.M. Information technology of automated analysis of metallographic and fractographic images. - Qualification scientific work on the rights of the manuscripts.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Science in 05.13.06 "Information Technologies" specialty (126 "Information Systems and Technologies"). – Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

The development of computer technology and opto-electronic microscopy has led to widespread use of digital images in various industries - medicine, mechanical engineering, aircraft engineering, remote sensing, materials science, etc. These images are the basis for research, analysis and decision-making. As in many cases the formed images have a complex structure and require precision analysis, then the visual system of a person cannot always deal with the task at a defined time interval.

A large number of metal constructions and products previously mentioned in branches of the national economy have exhausted their resources or are coming for its completion. These objects require permanent monitoring of their condition for the further safe exploitation. The level of degradation of these objects is determined by the physical and mechanical characteristics of the material from which they are made. It is known that there is an unambiguous correspondence between the physical and mechanical characteristics of the material and its microstructure. Thus, it's possible to estimate the characteristics of the material and the state of its degradation by studying the microstructure of materials.

Traditional methods of microstructure analysis - X-ray analysis, micro-X-ray spectral sensing, nuclear magnetic resonance, mechanical methods, etc. characterized by the complexity of implementation. In addition, they do not allow to quantify the complex microstructure of the material components.

In recent years electron microscopy has been actively developing. It has its specialization in various fields - medicine, biology, materials science, etc. The

applications that these devices are equipped with, for the most part, has universal character. They provide the elimination of geometric distortions, adjust the range of intensities of the image and other similar functions, but they can not solve highly specialized tasks, for example, search for objects with certain characteristics, calculating of their metric characteristics, textures classification. Metallographic and fractographic, which are characterized by complex structure and the presence of a large number of small objects images, are especially difficult for analysis. These tasks require an individual selection of problem-oriented algorithms.

The mentioned systems are based on the information technology of processing and analysis of metallographic and fractographic images. Therefore, increasing the effectiveness of information technology for quantitative analysis of metallographic images by developing new approaches to their processing, evaluating the quantitative characteristics of structural components and their analysis remains unsolved and relevant scientific and applied problem, involvement in the solution of which fractal geometry is considered one of the perspective and at the same time underdeveloped areas , which opens the prospect of linking the parameters of quantitative analysis of the microstructure of materials with their physico-mechanical properties.

In the **first** part of the work, an overview of the basic approaches to non-destructive control of products and constructions in various branches of the national economy has been carried out - X-ray control, capillary, with the help of a thermal imager, remote sensing, electronic microscopy and others. The analysis of image processing systems in industry and the main tasks assigned to them are carried out.

It has been shown that the effectiveness of image processing methods depends on the adequacy of the model chosen for solving this or another task. A fractal image model, which is convenient for analysis of images with a complex texture, in the search and recognizing of objects, is offered. The majority of image processing methods in non-destructive testing are built on this model.

Despite the large number and variety of existing tasks, all systems for the analysis of digital metallographic and fractographic images have much in common. In particular, this community consists in the similarity of the basic steps of processing

- image enhancement, elimination of geometric distortions, the formation of signs, the location of objects of attention and the calculation of their metric characteristics. These steps represent a holistic set of information processes aimed at solving the problem of processing and analyzing digital images of non-destructive control. Thus, the image analysis system is an information system in which information technology for the processing of digital diagnostic images is used. Its main drawbacks are the need for visual control of the result from the operator at each step of the process, the need for selection of parameters in the interactive mode, etc.

In the first section of the study of known approaches to the analysis of non-destructive testing data, their deficiencies revealed the opportunity to outline the main ways of solving the problem of increasing the efficiency of information technology analysis of structures in quantitative metallography.

At the beginning of the **second** section, one of the aspects considered, which is especially significant during the metric analysis, is the absence of geometric distortions in the image.

A method for calibration of digital cameras has been elaborated by using of Hough transform. It allows automating the process of eliminating of geometric distortions caused by optical systems unlike the known approaches that leads to increasing of accuracy of metric measurement in general.

In the same section of the work, approaches for localization of interest objects in the image has been reviewed. Segmentation methods are used for this, that are one of the first and most important steps in solving problems of analyzing images of technical vision. The variety of images and features of their complex structure cause the task of segmentation is a problem-oriented and requires the creation of new and modifications of known approaches for its solution.

In this work, we propose a method for binarization of the halftone images with using the optimal threshold value, which is calculated using the correlation function. One of the advantages of the proposed method is that it eliminates the subjective factor in choosing the threshold of binarization and it is possible to analyze the metallographic images obtained, in particular, under different lighting conditions.

An adaptive method of binarization has been elaborated in which the threshold value of intensity is calculated on the basis of analysis of the features of local neighborhoods. The proposed approach for binarization eliminates the block structure in the resulting image and permits to adapt it to different classes of images.

The statistical segmentation method has been modified, which provide registration of the detailed image objects of interest of various sizes by using of appropriate sizes of local apertures unlike the known approaches. The disadvantage of this approach is that it is more complex in software implementation and requires more time consuming because of iteration in implementation.

Modification of the Canny method for selecting of object's limit has been proposed, because of the adaptive choice of local neighborhoods. This approach allows to allocate various objects in the image effectively unlike the known method.

Researches of recent years have discovered the possibility of using the theory of fractals for solving the problems of analysis and quantitative evaluation of the material structure by their image. The **third** chapter of dissertation is devoted to exploring of using of the possibilities of fractal dimensions in analysis of fractographic and metallographic images.

It has been experimentally established that the fractal dimension is a quantitative characteristic of the structure of the material. As the microstructure of the material reflects its properties, so the dependence between the fractal dimension of the metal structure and its qualitative characteristics, in particular, physical and mechanical properties can be established. It gives a possibility to study the qualitative metal characteristics on the basis of the fractal dimension analysis of its microstructure.

The method of fractal dimension calculating with usage of a surface integral has been proposed, which allows to process halftone images correctly without necessity for their binary representation unlike well-known approaches.

It is established that the fractal dimension is an invariant feature for some types of affine transformations under conditions of following certain requirements. This feature allows to describe the images of one scene obtained under different lighting conditions, with different scaling ratios and different angle of rotation.

It is established that when calculating fractal dimensions it is important to choose correct settings. In particular, in the case of building a fractal dimension field, the size of the local aperture should be commensurate with the size of the objects of interest in the image. When calculating fractal dimensions by cell and point method, it is important to choose the binary method, which should provide the best detalization of small objects in a binary image.

A promising technology of image analysis is the usage of the distribution of fractal dimensions in the image field. The histogram of the distribution of fractal dimensions essentially depends on the size of the aperture. It is established that mode distribution becomes especially pronounced with the size of a local aperture, which is commensurate with the size of the investigated subject. Each of these modes indicates the presence of a texture that is characterized by a certain fractal dimension. This property can be used to localize different types of textures or objects in an image.

The histogram of the distribution of fractal dimensions in the image field can be used to evaluate the defocusing of images, including noisy ones. It has been established that the least unfocused image will be that one from a series of images formed with different focusing, which is characterized by the largest averaged fractal dimension.

The **fourth** chapter of the work is devoted to methods of quantitative analysis of structural elements of metallographic images with usage of fractal dimensions.

It has been proposed an approach to the description of the texture of fragmentographic images through the usage of the Rényi generalized fractal dimensions. The usage of the proposed approach makes it possible to classify investigated texture images for a minimum distance of Chebyshev.

A method for allocating objects in an image using fractal dimensions has been elaborated. The advantage of this method is that it allows localizing objects of different sizes at one time because of adaptation of the size of the sliding local aperture.

On the basis of fractal dimensions a method for determining of the averaged size of metal grains by metallographic images has been elaborated. This approach allows

to automate the calculation process and makes it possible to analyze the metallographic images with unclosed and discontinuous grain boundaries without the need for their interactive editing. This approach allows to automate the calculation process and makes it possible to analyze the metallographic images with unclosed and discontinuous grain boundaries without the need for their interactive editing.

The method of determination of fractal dimension on the basis of three-dimensional representation of images of non-destructive control has been elaborated. This approach provides the required sensitivity for small changes in the area of damaged fields and is used to monitor the fatal damage of the clad aluminum alloy D16AT, which is the basis for many aviation constructions.

Metallographic and fractographic images are the combination of various structural elements. Among these elements, the most involved in the indirect evaluation of the physical and mechanical characteristics of materials are the metal grains. In the **fifth** chapter of the work methods of metric analysis of images of the mentioned structures have been reviewed.

It has been proposed the method of size control of the grain on the basis of analysis of metallographic images. The method is based on the assumption that the coordinates of the boundaries of the grains are known. It is possible to calculate not only the size of grains, but also any other indicators that characterize the geometry of the grain. This method has a great practical value, especially in the analysis of grains, the size and shape of which essentially affects the properties of the material.

The method of automated determination of grain geometry, which meets the requirements of ASTM E 112, has been proposed on the example of the analysis of metallographic images of the exploited steam-conducting steel microstructure 12Kh1MF. Unlike the known approaches, this method makes it possible to analyze images with fuzzy boundaries of grains, for which interactive image processing is used at the final stage.

It has been carried out the analysis of approaches for determination of grain size of materials according to ASTM E 112. It is proved that it is necessary to use a

correction coefficient to increase the accuracy of the performed calculations in calculating the averaged diameter of metal grains according to ASTM E 112.

On the basis of Hough transform, the method of analysis of the elongation and orientation of steel grains 12Kh1MF has been proposed, which allows to analyze the plastic deformations of the material and to determine the direction of applied stresses. A computer simulation was carried out using images of steel sanding grains 12Kh1MF, which were cut from the rectilinear area and bending zone of pipe paragon of the thermal power station. The obtained results showed that in the rectilinear section of the tube paragon the elongation of the grains is significantly less than the grain elongation in the bending zone and therefore the deformation texture in the bending zone is more pronounced. Thus, the elaborated approach can be used to assess the level of material degradation.

In the **sixth** chapter of the work approaches to modeling and visualizing of the structure of metallographic and fractographic images has been reviewed.

It is proposed the method of modeling of the boundaries of metal grains with the help of Voronov diagrams, which provides new possibilities for analysis of the grain structure of metals. One of the applications is the research of geometric and statistical correlation of polygons in Vorony's diagrams, which are closely related to the characteristics of grain microstructure and material.

Based on the technology of diffusion pseudo-mixing of colors and the application of the Floyd-Steinberg algorithm, a palette optimization algorithm, which gives the opportunity to reduce the volume of metallographic images without compression significantly, has been proposed.

An approach to the formation of pseudo-color images, which provides an increase in the informativeness of the halftone metallographic and fractographic images in their visual analysis, has been proposed because of the modification of the function of transforming the coordinates of the color space into color components.

Thus, the research carried out in the dissertation resulted in an increase in the effectiveness of the methods of analysis of metallographic and fractographic images by developing new methods for quantitative assessment of geometry and the

distribution of elements of their microstructure, which ensured the improvement of known and creation of new information processes, which are the basis for building a new, more efficient, information technology for the processing of diagnostic images in metallography.

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

Список публікацій здобувача:

а) *основні наукові результати 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.
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.
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.
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.
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.

7. Журавель І.М. Метод бінаризації металографічних зображень з оптимальним порогом / І.М.Журавель // «Штучний інтелект». - 2012. - № 4. - С. 142-147.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
 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-променевоому зварюванні / І.Б.Івасенко, І.М.Журавель, К.В.Сущик, О.Р.Берегуляк // Проблеми програмування. – 2008. - № 1. - С. 78–86.
 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.
- б) *апробація матеріалів дисертації*
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//ІІІ 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, ДНДІ, 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 ІІІ 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.Opyr, 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. Czestochowa, 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–ДЗ” 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.

ЗМІСТ

ВСТУП	28
РОЗДІЛ 1 АВТОМАТИЗОВАНИЙ АНАЛІЗ ЗОБРАЖЕНЬ У НЕРУЙНІВНОМУ КОНТРОЛІ	39
1.1 Технології неруйнівного контролю з використанням цифрових зображень.....	40
1.2 Основні задачі систем аналізу зображень неруйнівного контролю.....	68
1.3 Застосування систем аналізу зображень у промисловості.....	70
1.4 Моделі складноструктурованих зображень у неруйнівному контролі.....	72
1.5 Методи обробки та аналізу зображень в неруйнівному контролі.....	74
1.5.1 Методи попередньої обробки зображень у неруйнівному контролі.....	75
1.5.2 Методи аналізу зображень у неруйнівному контролі.....	76
Висновки до розділу 1.....	82
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ВИДІЛЕННЯ ОБ’ЄКТІВ НА СКЛАДНО– СТРУКТУРОВАНІХ ЗОБРАЖЕННЯХ	83
2.1 Усунення геометричних спотворень в оптико–електронних системах формування цифрових зображень.....	85
2.2 Сегментація складноструктурованих зображень.....	95
2.3 Метод бінаризації зображень з використанням оптимального порогу.....	100
2.4 Модифікація методу адаптивної бінаризації зображень.....	103
2.5 Ітераційний метод статистичної сегментації.....	105
2.6 Модифікація методу Канні для виділення країв об’єктів зображення.....	111

2.7	Покращання слабоконтрастних зашумлених зображень	118
	Висновки до розділу 2.....	126
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ОБЧИСЛЕННЯ ФРАКТАЛЬНИХ РОЗМІРНОСТЕЙ ЗОБРАЖЕНЬ.....		128
3.1	Аналіз структури матеріалів з використанням фрактальних розмірностей.....	128
3.2	Обчислення фрактальних розмірностей з використанням поверхневого інтеграла.....	136
3.3	Дослідження інваріантів зображення на основі його фрактальної моделі.....	142
3.4	Вибір параметрів при обчисленні фрактальних розмірностей...	149
3.4.1	Вплив розмірів локальної апертури на результати формування поля фрактальних розмірностей зображення.....	149
3.4.2	Вплив кроку зміщення локальної апертури k на формування зображення поля фрактальних розмірностей.....	152
3.4.3	Обчислення фрактальної розмірності зображень з різним діапазоном інтенсивностей та з використанням різних методів бінаризації.....	153
3.5	Вплив шуму на фрактальну розмірність зображень.....	159
3.6	Аналіз зображень через розподіл фрактальних розмірностей... Висновки до розділу 3.....	166 176
РОЗДІЛ 4. КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ФРАКТАЛЬНИХ РОЗМІРНОСТЕЙ.....		178
4.1.	Аналіз текстури фрактографічних зображень на основі спектру фрактальних розмірностей Реньї.....	178
4.2	Виділення різнорозмірних об'єктів на зображенні за	

допомогою фрактальних розмірностей.....	184
4.3 Вимірювання усередненого розміру зерен металу з використанням фрактальної розмірності.....	190
4.4 Автоматичне розпізнавання крихкого та в'язкого зламів сталі 15X1МФ з використанням фрактальної розмірності.....	193
4.5 Метод визначення фрактальної розмірності на основі тривимірного представлення зображень неруйнівного контролю авіаційних конструкцій.....	197
Висновки до розділу 4.....	203
РОЗДІЛ 5. МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ МЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРНИХ ОБ'ЄКТІВ НА МЕТАЛОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕННЯХ.....	204
5.1 Метод визначення величини зерна металевих матеріалів.....	204
5.2 Автоматизоване визначення геометрії зерен в експлуатованій паропровідній сталі.....	209
5.3 Уточнення при обчисленні усередненого діаметру зерен металу.....	218
5.4 Автоматичне виділення та кількісний аналіз карбідів на межах зерен сталі 12X1МФ після експлуатації на парогоні ТЕС.....	223
5.5 Аналіз орієнтації зерен на металографічних зображеннях за допомогою перетворень Хафа.....	232
5.5.1 Аналіз орієнтації зерен металу.....	236
5.5.2 Визначення видовженості зерен металу.....	239
5.6. Точність статистичної оцінки вимірювань діаметра зерна матеріалу.....	243
Висновки до розділу 5.....	250
РОЗДІЛ 6. РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОСТРУКТУРИ МЕТАЛІВ, ОБРОБКИ	

ТА АНАЛІЗУ МЕТАЛОГРАФІЧНИХ І ФРАКТОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ.....	252
6.1 Моделювання зеренної структури металографічних зображень за допомогою діаграм Вороного.....	252
6.2 Візуалізація графічних файлів великого об'єму.....	257
6.3 Підвищення інформативності напівтонових зображень мікроструктур через використання псевдокольників.....	263
6.4 Аналіз розроблених інформаційних процесів	268
6.5 Синтез складових інформаційної технології аналізу металографічних та фрактографічних зображень.....	276
6.6 Програмно-апаратні засоби інформаційної системи обробки та аналізу металографічних та фрактографічних зображень....	278
6.7 Аналіз ефективності сформованої інформаційної технології обробки та аналізу металографічних та фрактографічних зображень.....	279
Висновки до розділу 6.....	283
ВИСНОВКИ.....	284
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	287
ДОДАТКИ.....	312
А. Акти впровадження результатів дисертаційних досліджень.....	312
Б. Список публікацій здобувача.....	316

ВСТУП

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 опрацьовувати 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

високоєфективної 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 їх 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 ощаднолегованих 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 і 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 розробленого комплексу методів 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 металокопструкцій 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 плакованого алюмінієвого сплаву Д16АТ, який 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 деформації 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 сталі-залізобетонних мостів і кількісного аналізу зеренного складу асфальтобетонів.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати, які виносяться на захист, отримані автором самостійно. У роботах, що опубліковані у співавторстві, дисертанту належить: [40, 19, 38] – методи покращання візуальної якості зображень; [43, 39, 221, 14] – підходи до формування та попередньої обробки первинного зображення в оптоелектронній системі контролю профілю різьби; [48] – алгоритм локалізації меж об'єктів на

зображенні з використанням перетворення Хафа; [49, 34] – метод калібрування цифрових відеокамер з використанням перетворень Хафа; [94, 95] – алгоритм відслідковування ліній стику об'єктів при електронно–променевому зварюванні; [73] – алгоритм виділення контурів різнорозмірних об'єктів на зображенні за допомогою фрактальних розмірностей; [74] – алгоритм обчислення фрактальної розмірності з використанням поверхневого інтегралу; [226, 227] – підхід до обчислення розмірів зерен сталі згідно нормативних документів та за допомогою фрактальної розмірності; [41] – технологія кількісного оцінювання фізико–механічних властивостей сталей через аналіз їх фрактальних розмірностей; [220] – комп'ютерне моделювання методу, встановлення залежності площі карбідів на межах зерен конструкційних сталей від розмірів локальної апертури; [191] – метод визначення фрактальної розмірності на основі тривимірного представлення зображення; [35] – дослідження метрик кількісного оцінювання візуальної якості зображення; [36] – метод побудови оптимальної палітри на основі кластерного аналізу гістограми зображення та використання дифузійного псевдозмішування кольорів; [18, 16, 167, 168] – методи покращання цифрових рентгенографічних зображень; [33] – модифікація методу статистичної сегментації; [17] – методи попередньої обробки зображень капілярного контролю; [30, 15, 119] – методи обчислення фрактальної розмірності зображень мікроструктури матеріалу; [78] – метод кількісного оцінювання орієнтації 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 автоматичній та електротехніці” (Ченстохова, Польща, 2003, 2005);
- міжнародній конференції з автоматичного управління “Автоматика” (2004, 2005, 2006);
- конференції ЛЕОТЕСТ “Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів” (Славське, 2005, 2006, 2007);
- міжнародній конференції “Сучасні інформаційні та телемедицинські 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);
- міжнародній науково–практичній конференції “Теоретичні і експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства та машинобудування” (Луцьк, 2009);
- науково–технічній конференції “Обчислювальні методи і системи перетворення інформації” (Львів, 2010, 2012, 2014);
- міжнародній науково–технічній конференції “АВІА” (Київ, 2011).

Публікації результатів досліджень. 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.

Структура та обсяг дисертації. 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.

РОЗДІЛ 1

АВТОМАТИЗОВАНИЙ АНАЛІЗ ЗОБРАЖЕНЬ У НЕРУЙНІВНОМУ КОНТРОЛІ

Існуючі об'єкти, зокрема, різноманітні металоконструкції в енергетичній, транспортній, хімічній, авіаційній та інших галузях, термін служби яких вже вичерпано або підходить до завершення, потребують постійного моніторингу їх стану. Саме ці напрями промисловості є базовими галузями економіки країни. Інвестиційні вкладення у розвиток цих секторів економіки на сьогодні є незначними, тому розробка інструментарію для підтримки роботоздатності описаних вище металоконструкцій ще довгий час буде актуальною.

Розвиток промисловості призвів до появи нових видів продукції та до зростання об'ємів її виробництва. Проте рівень розвитку промисловості характеризується не тільки об'ємами виробленої продукції, але й її якістю. Паралельно з цим розвивалися також наукові підходи та технічні засоби контролю якості. Зокрема, розвиток технологій обробки зображень, цифрових мікроскопів та обчислювальної техніки призвів до створення комплексів автоматизованого контролю якості продукції.

Системи аналізу зображень в неруйнівному контролі дозволяють реалізувати нові наукоємні рішення при автоматизації методів неруйнівного контролю. Застосування таких систем призводить до підвищення якості виконуваних робіт та збільшення продуктивності технологічних процесів.

Ще у багатьох випадках на сьогоднішній день візуальний контроль якості продукції виконується людиною-експертом. Якість виконання такого контролю залежатиме від досвіду експерта та його фізичного стану. Очевидним є факт, що у порівнянні з машиною, експерт буде працювати повільніше, швидше втомлюватися, а сам процес контролю у багатьох випадках буде важким та небезпечним. Тому створення та застосування у виробництві систем машинного зору не підлягає сумніву.

Основними елементами системи автоматизованого аналізу зображень є пристрій фото- чи відео фіксації, комп'ютер та відповідне програмне забезпечення. Пристрої фото- та відео фіксації служать для вводу в комп'ютер зображення сцени з контрольованим об'єктом. Здебільшого, розміщення контрольованого об'єкту є відомим, тому камера є жорстко закріплена. Важливими також є вимоги щодо технічних характеристик фотовідеокамер, що суттєво впливає на результат подальшого аналізу. Контрольовані об'єкти повинні бути відповідним чином освітлені, не повинно бути зайвих тіней – все це полегшить роботу на етапі попередньої обробки та забезпечить коректність отриманих результатів.

Не існує універсальних систем автоматизованого аналізу зображень неруйнівного контролю. Пояснюється це різноманіттям досліджуваних об'єктів та завдань неруйнівного контролю.

1.1. Технології неруйнівного контролю з використанням цифрових зображень

Існує велика кількість видів неруйнівного контролю – електричний, магнітний, радіаційний, акустичний та інші. Оцінку результатів цих підходів та їх аналіз переважно здійснює людина-оператор. Використання можливостей людського зору вносить значну міру суб'єктивізму, не дає можливості обробляти великі потоки даних та дозволяє проводити лише якісну, а не складну кількісну оцінку дефектів та відхилень. Спроби автоматизації методів візуального контролю робляться вже давно. Розвиток апаратної частини - комп'ютерного обладнання і фототехніки та інформаційних технологій робить ці спроби щораз успішнішими.

Основні завдання, які стоять перед методами неруйнівного контролю, полягають у дефектоскопії відповідальних деталей та пристроїв, а саме у виявленні неоднорідностей структури, відхиленні хімічного складу, виявленні певних структурних складових тощо.

Розглянемо детальніше основні види неруйнівного контролю. Вони відрізняються природою формування вхідного сигналу [97].

Радіаційні методи є найбільш поширеними та базуються на реєстрації проникаючого іонізуючого випромінювання. Радіаційне випромінювання, проходячи через досліджуваний виріб, по різному ослаблюється та несе інформацію про внутрішню будову та наявність дефектів. Ці методи використовуються переважно для контролю зварних швів, прокату металу тощо.

Радіаційні методи характеризуються універсальністю та оперативністю. Вони володіють значно ширшою сферою застосування у порівнянні з іншими методами неруйнівного контролю.

Акустичні або, як їх ще називають, ультразвукові методи аналізують коливання, які збуджуються або виникають у контрольованому об'єкті. За їх допомогою контролюють поверхневі та внутрішні дефекти, а також фізико-механічні властивості матеріалів.

Капілярні методи базуються на проникненні крапель індикаторної рідини у порожнини поверхневих дефектів. Застосовуються вони для виявлення дрібних поверхневих дефектів у деталях складної форми.

Магнітні методи неруйнівного контролю реєструють магнітні поля розсіювання контрольованих виробів і виявляють дефекти несцільності матеріалу типу тріщини.

Теплові методи базуються на реєстрації температурних полів досліджуваного об'єкту. Для безконтактного спостереження використовують скануючий тепловізор. Цей метод успішно використовують для неруйнівного контролю дефектності багат шарових матеріалів.

Дані неруйнівного контролю, які отримуються за описаними вище методами, здебільшого представляються у візуальному вигляді для подальшого аналізу та прийняття рішень (рис. 1.1).

Важливим аспектом є спосіб візуального представлення даних. Результати неруйнівного контролю можуть бути представлені різним чином – на плівці при

рентгенографічному контролю, безпосередньо на контрольованому об'єкті при капілярному контролі тощо. Якщо передбачається подальша автоматизована чи автоматична обробка даних та їх аналіз, то результати неруйнівного контролю найбільш зручно представити у вигляді цифрових зображень.

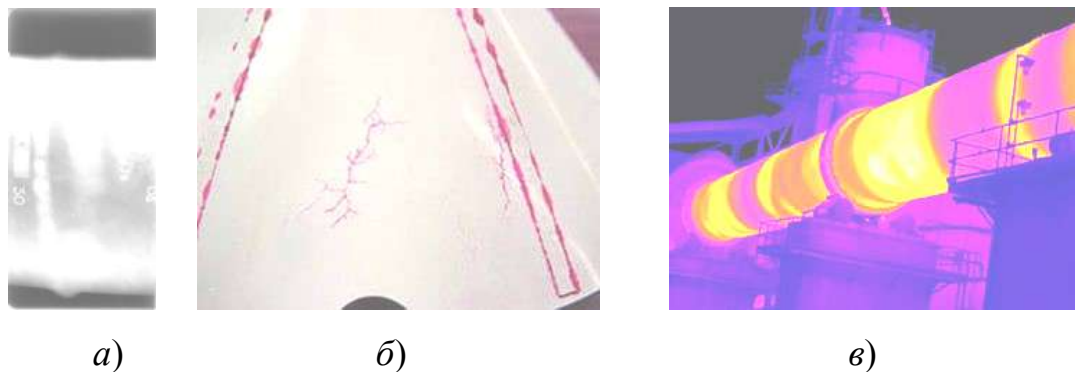


Рис. 1.1. Приклади зображень неруйнівного контролю: а) рентгенографічним методом; б) капілярним методом; в) за допомогою тепловізора.

Формування даних неруйнівного контролю у вигляді цифрових зображень є дуже відповідальним кроком, оскільки від нього, в значній мірі, залежить точність подальшого аналізу та коректність прийнятих на цій основі рішень. Для прикладу, при оцифруванні рентгенівських плівок за допомогою сканера, важливим параметром є правильно задана роздільна здатність. Замала роздільна здатність сканування призведе до пропуску дрібних об'єктів при їх аналізі, завелика – до великих обсягів даних і, як наслідок, збільшення часу їх опрацювання. В таких випадках лише досвід дефектоскопіста дозволяє вибрати оптимальне значення роздільної здатності.

Розглянемо декілька підходів до побудови систем аналізу зображень у неруйнівному контролі, які розроблялися за участю автора даної дисертаційної роботи.

Комп'ютеризована система дистанційного контролю параметрів зовнішньої різьби

Методи визначення геометричних розмірів елементів різноманітних виробів здебільшого реалізовані у пристроях, які вимагають безпосереднього контакту з досліджуваним об'єктом. Але такі підходи не завжди прийнятні.

Бувають випадки, коли до елемента об'єкта, розміри якого необхідно виміряти, не можна застосовувати будь-які механічні дії, або давачі вимірювань під час безпосереднього контакту з об'єктом швидко втрачають свою роботоздатність. Тому актуальною є розробка безконтактних оптикоелектронних методів вимірювання геометричних параметрів об'єктів. Завдяки розвитку комп'ютерної техніки зросли можливості використання інформаційних технологій у цій галузі. Серед задач, які можна розв'язувати цими засобами, найактуальнішими щодо практичного вжитку, є задачі високоточного безконтактного метричного контролю складнопрофільних виробів.

Однією з таких задач є контроль параметрів різьбових з'єднань труб нафтогазового сортаменту. В процесі експлуатації різьба труб зношується, змінюються її параметри, в результаті різьбове з'єднання стає негерметичним, що є причиною виникнення 50% аварій при експлуатації свердловин з видобування нафти та газу. Актуальність цієї задачі пояснюється необхідністю автоматизації процесу контролю параметрів різьби, що призведе до збільшення точності і швидкодії його проведення та запобігатиме виникненню аварійних ситуацій. Підходів до вирішення цієї задачі може бути багато, але найбільш перспективними є підходи з використанням дистанційних вимірювань та фотофіксуючих пристроїв з подальшим опрацюванням даних на комп'ютері.

Загалом розв'язати цю задачу можна в чотири етапи: сформувати вхідні цифрові зображення (рис.1.2 *а*); сформувати контур профілю різьби (рис.1.2 *б*); розпізнати контур для автоматичної ідентифікації профілю різьби; виміряти параметри різьби.

Кожен з перерахованих етапів пов'язаний з цілим рядом задач, вирішення яких суттєво впливатиме на отриманий результат. Перерахуємо основні із них.

Оскільки формування первинних зображень відбувається за допомогою оптикоелектронних фотофіксуючих пристроїв, то можлива наявність геометричних спотворень, які утворюються через недосконалість лінзи об'єктива. У даній роботі автором запропоновано підхід до усунення

геометричних спотворень в оптико-електронних системах формування цифрових зображень [49], який базується на використанні перетворення Хафа.

Світлочутлива матриця фотоапарату чи відеокамери характеризується певним рівнем білого шуму та флуктуації сигналу, що вносить спотворення у візуальну якість зображення та впливає на точність метричних вимірювань. Для усунення шуму використовуються різноманітні методи фільтрації. Основна вимога до методів підвищення співвідношення сигнал/шум полягає у тому, що вони не повинні розмивати границі, оскільки це впливатиме на точність метричних вимірювань. Відомо, що рівень шуму світлочутливої матриці фотоапарату чи відеокамери є чутливим до рівня зовнішнього освітлення, тому методи фільтрації шуму мають адаптуватися до рівня інтенсивності та співвідношення сигнал/шум.

Наступна задача – локалізація контуру різьби – є однією з найбільш відповідальних, від коректності її виконання залежить точність аналізу в цілому. Основна проблема, з якою зустрічаються при виконанні цієї задачі, полягає у тому, що контури об'єкту є розмитими і складно провести поділ зображення на частини об'єкт-фон. Здебільшого дана задача вирішується у два етапи – спочатку застосовуються слідкуючі алгоритми для пошуку “грубого” контуру різьби, а далі вже застосовуються уточнюючі методи, які ґрунтуються на мінімізації зміни інтенсивності на зображенні профілю різьби.

Після цього, як контур різьби локалізовано і він представлений у вигляді лінії товщиною в один піксель з відомими координатами, реалізується задача кількісного аналізу профілю різьби на предмет виявлення відхилень від встановлених параметрів. Цю задачу можна вирішувати багатьма способами, але серед них найбільш поширеними є наступні два підходи. Перший – є більш складним і полягає у тому, що аналізується кожний виток та проводиться обчислення усіх важливих параметрів профілю різьби – крок, конусність, радіус заокруглення, висота та ін. Далі отримані дані порівнюються з нормативними параметрами та приймається рішення про можливість подальшої експлуатації такого різьбового з'єднання. Другий підхід до аналізу профілю різьби

розроблений у даній дисертаційній роботі базується на використанні кореляційної функції та вимагає існування бази зображень еталонних профілів різьби [88]. Розглянемо цей підхід більш детально.

Вище було сказано, що існує багато різноманітних підходів до розпізнавання об'єктів на зображеннях. Ці підходи використовуються і при вирішенні інших задач розпізнавання, тому розглянемо деякі з них, виділивши як основні метод граматичного опису контуру, метод розпізнавання з використанням інваріантних характеристик об'єкта та метод розпізнавання із застосуванням розкладу контуру в ряд Фур'є [88].

Суть відомого методу граматичного опису контуру полягає в тому, що граMATика, що створюється, повинна передбачити всі варіанти положення об'єкта розпізнавання відносно спостерігача. Його недоліком є велика обчислювальна складність, через яку, навіть застосовуючи сучасну комп'ютерну техніку, не вдається проводити розпізнавання в реальному масштабі часу.



Рис. 1.2. Вхідне зображення досліджуваного взірця різьби *a)* та його контур *б)*.

Виділення постійних ознак зображення – важливий напрямок у теорії розпізнавання образів. Воно дозволяє виявляти та ідентифікувати об'єкт на зображенні незалежно від його положення, розмірів та орієнтації. Ця ідея покладена в основу другого відомого методу, який базується на використанні інваріантних характеристик контуру об'єкта. Математичною основою виділення інваріантних ознак є теорія алгебричних інваріантів. Як такі інваріанти розглядають центральні моменти, що обчислюють за виразом

$$M_{pq} = \frac{1}{N} \sum_r^N (U_r - U)^p (V_r - V)^q,$$

де U_r і V_r – координати r -ї точки зображення, а U і V – їх середнє значення на множині із N точок. Під час розпізнавання використовують декілька моментів

$$M_1 = M_{20} + M_{02}, M_2 = (M_{20} - M_{02})^2 + 4 \cdot M_{11}^2,$$

$$M_3 = (M_{30} - 3 \cdot M_{12})^2 + (3 \cdot M_{21} - M_{03})^2 \dots,$$

що є складовими багатовимірнього вектора, який описує контур. Групують їх за правилом найближчого сусіда. Оскільки функцію взаємної кореляції обчислюють за всіх можливих відносних зсувів досліджуваного та еталонного об'єктів, то це зумовлює значні обчислювальні затрати.

Третій відомий метод полягає у зображенні об'єкта розпізнавання вектором, складовими якого є коефіцієнти розкладу контуру в ряд Фур'є. Оскільки профіль різьби (рис. 1.2 б) представляє собою розімкнутий контур, його можна розглядати як один період періодичної функції. Ряд Фур'є подано виразом

$$z(\theta) = \sum_{s=-\infty}^{\infty} c_s \exp(i2\pi s\theta),$$

де θ – кут відхилення радіуса-вектора z ; c_s – комплексні коефіцієнти ряду Фур'є.

Суттєва перевага цього методу полягає в тому, що за відповідного нормування такий опис не залежить від масштабу, кута повороту та зсуву. Один з елементів його реалізації полягає у створенні бази даних контурів всіх можливих об'єктів, які необхідно розпізнати. Недоліком методу є велика обчислювальна складність.

На підставі аналізу вказаних відомих підходів запропонуємо розпізнавати профіль зовнішньої різьби на основі кореляційного методу [43, 88]. Вхідними даними розробленого методу розпізнавання є бінарне зображення зовнішнього контуру різьби (рис. 1.2 б), використовуючи яке, контур різьби можна подати у вигляді дискретної табличної функції $y(x)$. Наступні кроки, в рамках даного

методу, полягатимуть у тому, що контур різьби, описаний функцією $y(x)$, порівнюватимемо з різними типами еталонних різьб, які описуватимуться відповідними функціями. На основі критерію найбільшої подібності визначимо тип, геометричні розміри та інші характеристики різьби.

Щоб порівняти існуючий контур з еталоном, графік функції $y(x)$ необхідно повернути на кут φ у горизонтальне положення (рис. 1.3) відносно точки O з координатами $(0, y_c)$, яка є точкою перетину прямої OA з віссю ординат. Прямі OA та OB є “осями симетрії” функцій вхідного $y(x)$ та повернутого $y_0(x_0)$ контурів.

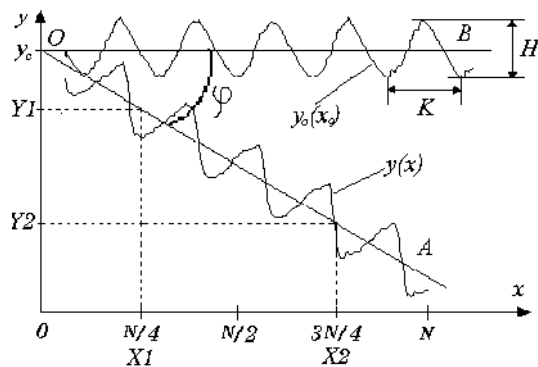


Рис. 1.3. Поворот контуру досліджуваної різьби.

Вирази, які застосовують для обчислення геометричних перетворень графіків функцій $y(x) \Rightarrow y_0(x_0)$, зображених на рис. 1.3, є такими:

$$y_0(i) = \begin{cases} y_c + \sqrt{\frac{(x(i))^2 + (y(i) - y_c)^2}{\frac{1}{\text{tg}^2(\varphi - \alpha(i))} + 1}}, & \text{при } \varphi \geq \alpha(i), \\ y_c - \sqrt{\frac{(x(i))^2 + (y(i) - y_c)^2}{\frac{1}{\text{tg}^2(\varphi - \alpha(i))} + 1}}, & \text{при } \varphi < \alpha(i), \end{cases}, \quad (1.1)$$

$$x_0(i) = \frac{|y_0(i) - y_c|}{\text{tg}(\varphi - \alpha(i))}, \quad (1.2)$$

де $\alpha(i) = \left| \arctg \left(\frac{y_c - y(i)}{x(i)} \right) \right|$; $y(i)$, $x(i)$ - координати поточної i -ї точки функції $y(x)$; $y_0(i)$, $x_0(i)$ - координати поточної i -ї точки функції $y_0(x_0)$, яка описує геометрично перетворений контур; N - максимальна кількість відліків табличної функції $y(x)$;

Значення ординати y_c визначимо з рівняння прямої OA , яка проходить через дві точки з координатами $(X1, Y1)$ та $(X2, Y2)$:

$$y_c = Y1 - \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1} \cdot X1,$$

де

$$X1 = \left[\frac{N}{4} \right]; \quad Y1 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{\left[\frac{N}{2} \right]} y_0(i); \quad X2 = \left[\frac{3 \cdot N}{4} \right]; \quad Y2 = \frac{2}{N} \sum_{i=\left[\frac{N}{2} \right]}^N y_0(i).$$

Остаточний вираз для знаходження ординати y_c набуде вигляду

$$y_c = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{\left[\frac{N}{2} \right]} y_0(i) - \frac{3}{N} \left[\sum_{i=\left[\frac{N}{2} \right]}^N y_0(i) - \sum_{i=1}^{\left[\frac{N}{2} \right]} y_0(i) \right]. \quad (1.3)$$

Вирази (1.1) та (1.2) є інваріантними до відхилення контуру досліджуваної різьби, представленого функцією $y(x)$, на кут $-90^\circ < \varphi < 90^\circ$ від горизонтального положення.

Отримавши з (1.1) та (1.2) функцію $y_0(x_0)$, яка описує контур у горизонтальному положенні, можна визначити висоту різьби H :

$$H = \max(y_0) - \min(y_0). \quad (1.4)$$

Не беручи до уваги можливі дефектні ділянки, загалом $y_0(x_0)$ можна характеризувати як гладку монотонну функцію. Тоді знак похідної від функції $y_0(x_0)$ можна використати як інформативний параметр для визначення кроку різьби. Відомо, що у вершинах зубців різьби, які відповідають екстремумам функції $y_0(x_0)$, похідна дорівнюватиме нулю, а на схилах почергово

змінюватиме знак. Проаналізувавши таким чином знак похідної за всіх значень аргументу $x_0(i)$, можна визначити крок різьби K .

Знаючи висоту H та крок K різьби, можна моделювати різні еталони різьб (трикутні, трапецеподібні і т.д.). Таким чином отримаємо ряд дискретних функцій, які описуватимуть контур певної різьби: y_0 – функція, що описує контур досліджуваної різьби, y_1, \dots, y_n – функції, які описують контури еталонів. Функції y_0, y_1, \dots, y_n повинні мати однакову кількість відліків. Кожну різьбу зі створеної бази еталонів порівнюватимемо із дослідним зразком. Критерії виявлення найбільшої подібності між досліджуваною та еталонною різьбами базуються на кореляційному аналізі дискретних функцій, які описуватимуть їх контури.

Для кожної з функцій y_0, y_1, \dots, y_n знаходимо середнє значення

$$\bar{y}_k = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_k(i) \quad (1.5)$$

та дисперсію

$$\sigma_{y_k}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_k(i) - \bar{y}_k(i))^2, \quad (1.6)$$

де $k = \overline{0, n}$; N – максимальна кількість відліків функції y_k .

Мірою зв'язку функції y_0 та однієї із функцій y_1, \dots, y_n є коваріантність, яка визначається виразом

$$\sigma_{y_0 y_k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_0(i) - \bar{y}_0) \cdot (y_k(i) - \bar{y}_k), \quad (1.7)$$

де $k = \overline{1, n}$.

Коефіцієнтом кореляції є нормована коваріантність, причому $-1 \leq corr \leq 1$:

$$corr = \frac{\sigma_{y_0 y_k}}{\sigma_{y_0} \sigma_{y_k}}, \quad (1.8)$$

де $k = \overline{1, n}$.

Важлива властивість коефіцієнта кореляції полягає у тому, що він у числовому еквіваленті виражає подібність функцій y_0 та y_k : 1 – для

абсолютної подібності і 0 – за відсутності будь-якої залежності між функціями. Таким чином, за максимальним значенням коефіцієнта кореляції можна виявити еталон різьби, що найбільш подібний до досліджуваного зразка.

На рис. 1.4 наведено результати комп'ютерного моделювання запропонованого методу. Після обчислень за виразами (1.1) – (1.3) із профілю, зображеного на рис. 1.2 б, отримуємо повернутий контур (рис. 1.3). Далі на підставі аналізу цього зображення та з допомогою формули (1.4) визначимо крок та висоту різьби, які використаємо для формування еталонних контурів різьби різного типу (рис. 1.4 б – е). Кількість еталонних контурів різьби може бути довільною, але достатньою для достовірного розпізнавання. Здебільшого база зображень профілів визначається набором різьб, які використовуються у конкретному виробництві.

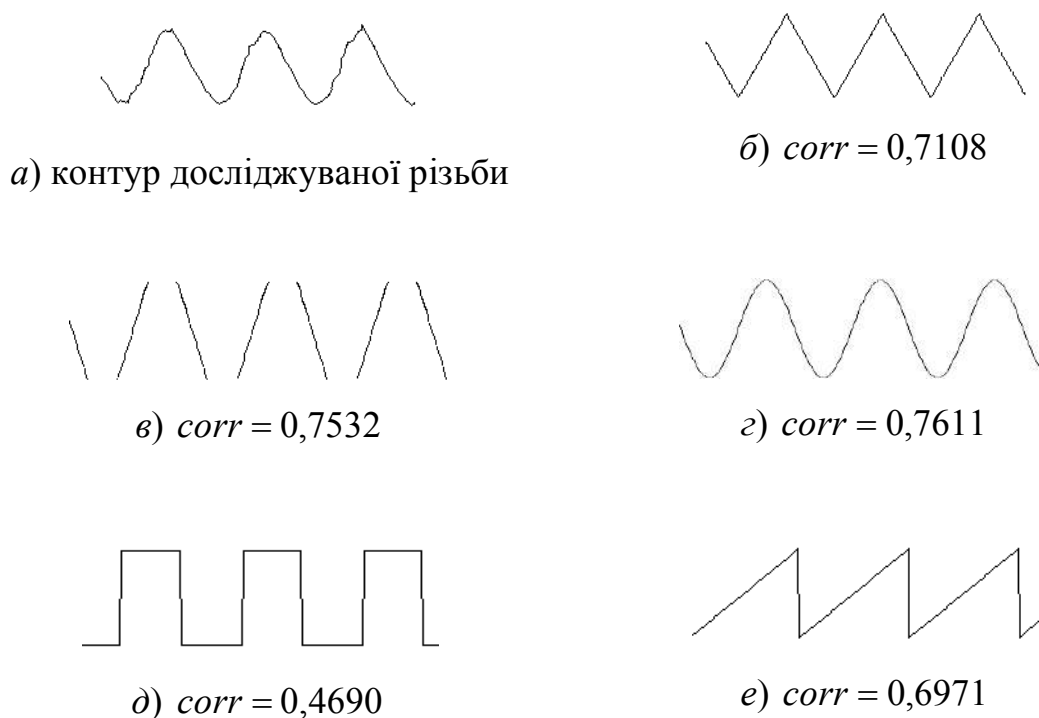


Рис. 1.4. Зображення контурів досліджуваної (а) та еталонних (б – е) різьб, а також відповідні їм значення коефіцієнтів кореляції $corr$.

Надалі за виразами (1.5) – (1.7) обчислимо значення коефіцієнтів кореляції між функціями, які описують досліджуваний контур y_0 та еталонні взірці різьби y_k . За максимальним значенням коефіцієнта кореляції $corr$ вдається

виявити із заданої бази даних такий еталонний контур, який максимально подібний до досліджуваного взірця (рис. 1.4 з).

Запропонований метод розпізнавання профілю зовнішньої різьби дозволяє розпізнавати тип різьби досліджуваного взірця та встановлювати його основні геометричні розміри. Основна перевага підходу – простота реалізації. Один із шляхів удосконалення методу полягає у розробці такого критерію розпізнавання, який би був стійким до афінних перетворень зображення профілю різьби, зокрема, до його масштабу.

Ідентифікований таким чином контур надалі використовуємо для розв'язування різноманітних задач, зокрема, метрологічного контролю виробів, де актуальними є питання похибок.

Оцінка точності у системі дистанційних вимірювань

Однією з важливих характеристик будь-якої вимірювальної системи, у тому числі оптико-електронної для проведення дистанційних вимірювань параметрів різьби, є її точність. Похибка результату вимірювань включає в себе методичні та інструментальні похибки.

Методичні похибки викликані недосконалістю математичної моделі вимірювань. Стосовно описаної вище комп'ютеризованої системи дистанційного контролю параметрів зовнішньої різьби, то основні складові методичної похибки викликані неточністю виділення границь об'єктів вимірювання та їх локалізації.

Інструментальні похибки зумовлені, в основному, недосконалістю засобів вимірювань і, як наслідок, неякісною реєстрацією первинного зображення. Пояснюється це невисокою якістю зовнішнього освітлення, недосконалістю оптичної системи, шумами камери та ін.

Таким чином кожний із перерахованих вище факторів вносить свої похибки у результат вимірювань.

Для числової оцінки точності вимірювань за допомогою запропонованої комп'ютеризованої системи машинного зору було проведено наступні

дослідження. З тонкого листового металу виготовлено тестовий зразок, форма якого імітувала профіль різьби (рис. 1.5). Довжина тестового взірця складає 70 мм.

Далі цей тестовий зразок фотографувався за допомогою розробленої системи і отримане зображення представлено на рис. 1.6.



Рис. 1.5. Тестовий зразок.

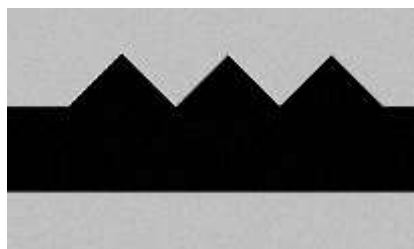


Рис. 1.6. Зображення тестового зразка.

Для того, щоб визначити скільком пікселям зображення відповідає один міліметр реального об'єкту, разом із тестовим зразком було сфотографовано також еталон міри (рис. 1.7).

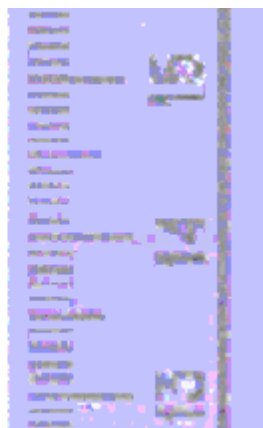


Рис. 1.7. Зображення еталона міри.

Аналіз зображення еталону мір (рис. 1.7) виявив, що 1 мм об'єкту відображається за допомогою 9,3 пікселів. Далі проведемо обробку зображення тестового взірця (рис. 1.6), суть якої полягає у визначенні піксельних координат

точок досліджуваного об'єкту та переводі їх у метричні координати, виходячи з того, що одному міліметру відповідає 9,3 пікселя на зображенні.

Після такої обробки із застосуванням різноманітних методів, зокрема, методу виділення країв Канні та їх локалізації за методом Хафа, отримуємо зображення, яке представлено на рис. 1.8 з відомими піксельними координатами виділених точок.

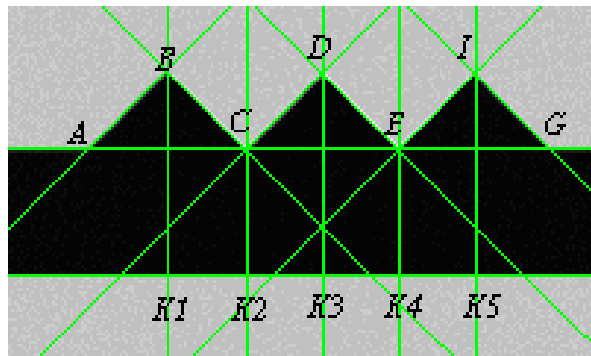


Рис. 1.8. Зображення тестового взірця після обробки.

Оскільки піксельні координати виділених точок (A, B, C, D, E, I, G, K1, K2, K3, K4, K5) є відомими, тоді можна знайти віддалі між ними та перевести їх в метричні координати.

Для аналізу похибок вимірювань в таблиці 1.1 наведено дані трьох дослідів по вимірюванню тестового взірця.

Проведемо такі ж вимірювання тестового взірця за допомогою катетометра КМ-8 і будемо вважати їх еталонними. Результати проведених вимірювань також представлені в таблиці 1.1.

Проаналізуємо дані з таблиці 1.1. Вимірювання відповідних відрізків за допомогою комп'ютеризованої системи машинного зору проводились під час кожного досліді. В результаті для кожного відрізка є три заміри. Наприклад, для відрізка *BD* (рис. 1.8) ці заміри становлять 14,8391мм, 15,6811мм та 15,6811 мм. Разом з цим вимірювання аналогічних величин проводились за допомогою катетометра – вони вважаються еталонними. Таким чином, можна знайти абсолютні похибки вимірювань відрізків, а усереднивши їх – знайти абсолютну похибку вимірювань під час одного досліді.

Таблиця 1.1. Результати вимірювань тестового зразка.

Віддаль Вимі- рювання, мм.	BD	DI	CE	EG	BK ₁	CK ₂	DK ₃	EK ₄	IK ₅
– за допомогою комп'ютеризова ної системи машинного зору (три досліди)	14,8391	13,5552	14,5161	13,6711	12,6900	7,0976	12,4750	6,7750	12,6900
	15,6811	14,2149	15,3426	14,2145	12,9735	7,3329	12,9735	7,3329	12,9735
	15,1291	13,7982	15,0183	13,4830	12,6837	7,3429	12,4612	7,0092	12,5725
– катетометра КМ–8	15,22	13,58	14,70	13,85	13,08	7,19	12,95	7,07	13,04
Похибка вимірювань	0,2828								

Після проведення відповідних обчислень похибки по кожному досліді становлять відповідно

$$\Delta_1 = 0,2634, \Delta_2 = 0,3006, \Delta_3 = 0,2845. \quad (1.9)$$

Таким чином, можна сказати, що середня абсолютна похибка розробленої комп'ютеризованої системи безконтактних вимірювань об'єкта довжиною 70 мм становить

$$\Delta_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = \frac{(0,2634 + 0,3006 + 0,2845)}{3} = 0,2828 \text{ мм}. \quad (1.10)$$

Як було сказано вище, похибка результату вимірювань включає в себе методичну та інструментальну складову. Для кожного досліді на основі відповідного зображення міри (рис. 1.7) проводились обчислення, в результаті яких встановлювалося скільком пікселам відповідає один міліметр. Для нашого випадку, коли за допомогою відеокамери Creavite Webcam 5 з ПЗЗ–матрицею 640×480 пікселів необхідно фотографувати об'єкти з розмірами до 70 мм, було встановлено що 1мм об'єкту вимірювань відображається за допомогою 9 пікселів. Коли припустити, що похибка квантування є найбільш суттєвою серед похибок, які зумовлені недосконалістю засобів вимірювання, то її можна вважати інструментальною похибкою та обчислити як

$$\Delta_{instr} = \frac{1}{2 \cdot 9} = 0,0556. \quad (1.11)$$

Решту похибки системи становить методична похибка

$$\Delta_{метод} = \Delta_c - \Delta_{instr} = 0,2828 - 0,0556 = 0,2272. \quad (1.12)$$

Також доцільно дослідити як буде змінюватися значення загальної похибки та її складових в залежності від якості відеокамери. Нехай за критерій якості виберемо роздільну здатність відеокамери. Обчислимо значення похибки, коли роздільна здатність зросте у два рази. Для проведення цього експерименту використаємо цю ж камеру Creavite Webcam 5, але віддаль від камери до об'єкту вимірювань зменшимо в два рази, щоб в поле зору матриці попала лише половина об'єкту. Таким чином на ПЗЗ–матриці відобразатиметься вже не цілий об'єкт (рис. 1.5), а лише його половина, що відповідатиме збільшенню роздільної здатності в два рази (рис. 1.9).

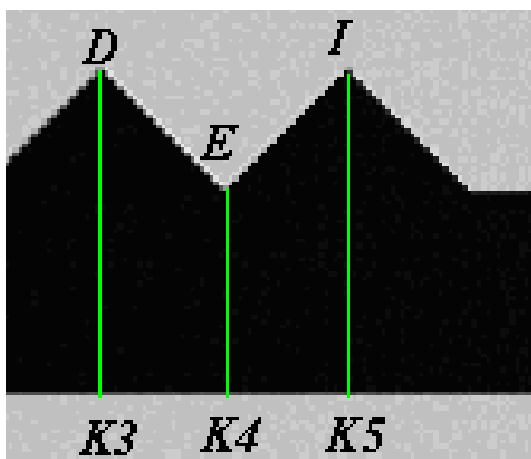


Рис. 1.9. Зображення тестового взірця із збільшеною роздільною здатністю.

Проведемо аналогічні до проведених вище вимірювання на основі зображення на рис. 1.9. Результати представлені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. Результати вимірювань за зображенням на рис. 1.9.

Віддаль	DI	DK_3	EK_4	IK_5
Вимірювання, мм:				
– за допомогою комп'ютеризованої системи машинного зору	13,5602	12,6167	7,0941	12,7514
– катетометра КМ–8	13,58	12,95	7,07	13.04
Похибка вимірювань	0,1664			

Згідно проведених експериментів середня абсолютна похибка комп'ютеризованої системи становить $\Delta_c = 0,1664$. Зауважимо, що за допомогою відеокамери Creavite Webcam 5 з ПЗЗ–матрицею 640×480 пікселів проводилось фотографування половини об'єкту, що становить близько 30 мм. При цьому було встановлено, що 1мм об'єкту вимірювань відображається за допомогою 22 пікселів, тобто в порівнянні з минулими дослідями роздільна здатність зображення об'єкту була більшою.

Коли згідно зробленого вище припущення, похибка квантування є найбільш суттєвою серед похибок, які зумовлені недосконалістю засобів вимірювання, то її можна вважати інструментальною похибкою та обчислити як

$$\Delta_{instr} = \frac{1}{2 \cdot 22} = 0,0227. \quad (1.13)$$

Решту похибки системи становить методична похибка

$$\Delta_{метод} = \Delta_c - \Delta_{instr} = 0,1664 - 0,0227 = 0,1437. \quad (1.14)$$

Проведемо порівняльний аналіз похибок, які отримані при двох експериментах (таблиця 1.3).

Таблиця 1.3. Порівняння похибок вимірювань.

	Дослід 1	Дослід 2
Роздільна здатність представлення об'єкту	9 пікселів/мм	22 піксели/мм
Середня абсолютна похибка комп'ютеризованої системи:	0,2828	0,1664
– інструментальна складова	0,0556	0,0227
– методична складова	0,2272	0,1437

Різниця в проведенні обох дослідів полягала у тому, що в першому досліді на ПЗЗ–матриці фотокамери відображався цілий об'єкт (рис. 1.5), а у другому досліді на ПЗЗ–матриці відображалась половина об'єкту (рис. 1.9). Таким чином, одні і ті ж елементи тестового взірця (рис. 1.5) відображалися з різною роздільною здатністю. З таблиці 1.3 видно, що підвищення роздільної здатності

камери призводить до зменшення середньої похибки вимірювань, та її відповідних складових.

Отже, розроблена комп'ютеризована система машинного зору для визначення параметрів різьби дозволяє проводити вимірювання об'єктів до 70 мм з похибкою $\Delta_c = 0,2828$. Проведені дослідження показують, що для підвищення точності вимірювань необхідно використовувати відеокамеру з кращими характеристиками, зокрема, за роздільною здатністю та вдосконалювати методи обробки з точки зору точності виділення країв та їх локалізації. Для забезпечення точності 0,01 мм при контролі об'єктів до 70 мм формат ПЗЗ-матриці по одній з сторін повинен становити $(70\text{мм} \times 2\text{піксела})/0,01\text{мм} = 14000\text{пікселів}$. З метою використання матриць з форматом меншим за 14000 пікселів, доцільно контролювати об'єкт частинами.

Локалізація областей інтересу при електронно-променевому зварюванні

У багатьох галузях народного господарства таких як машинобудування, енергетика, аерокосмічна індустрія та інших застосовується електронно-променеве зварювання. Даний підхід використовується для зварювання металу, який має достатньо велику товщину (200-500 мм). Весь процес відбувається у вакуумі, що вимагає дистанційного керування електронним променем. Важливим моментом при цьому є точність переміщення електронної пушки вздовж межі зварювання об'єктів. Для вирішення задачі комп'ютерного керування процесом зварювання використовують технології обробки цифрових зображень [94, 95].

Щоб електронний промінь переміщувався вздовж стику елементів зварювання, пристрою, який керує рухом цього променя, необхідно задати опис траєкторії. Це вимагає двократного проходження ліній стику об'єктів зварювання. Перший прохід використовується для формування зображення, на основі якого визначають траєкторію руху електронного променя. Проблемними випадками на цьому етапі є наявність гострих кутів. Другий прохід використовується вже безпосередньо для зварювання, але автоматизація

процесу надає не тільки можливості щодо керування променем, а також дозволяє контролювати якість зварювання.

Оскільки зображення, які формуються при першому навчальному проході характеризуються наявністю шумів та низькою контрастністю, то для підвищення надійності методу відслідковування ліній стику об'єктів зварювання використовуються методи попередньої обробки. Вони зменшують рівень шуму на зображенні, покращують візуальну якість [40, 35], підсилюють межі об'єктів.

Після проведення попередньої обробки потрібно локалізувати об'єкт інтересу. В даному випадку це лінія стику об'єктів на цифрових зображеннях. Таким чином, метою даного етапу є отримання однозв'язного контуру ліній стику з відповідним описом його координат.

Для вирішення цієї задачі можуть бути застосовані три загальні підходи – апроксимація кривих, відслідковування контуру та з'єднання перепадів. Апроксимація кривих здійснюється шляхом підбору аналітично заданої кривої до набору точок контурного перепаду. Важливим при цьому є спосіб вибору точок контурного перепаду та точність апроксимації. Суть методу відслідковування контурів полягає у тому, що по ходу руху точка відноситься до контуру лише в тому випадку, коли різниця яскравостей сусідніх елементів зображення є достатньо великою. Метод з'єднання точок по своїй суті дещо подібний до попереднього підходу і полягає у з'єднанні точок перепаду інтенсивностей зображення.

У [94] автором запропоновано підхід до локалізації згаданих ліній, в основі якого лежить аналіз зміни яскравісних характеристик зображення. Розглянемо цей метод. Спочатку на зображенні в околі стику задається або інтерактивно вибирається початкова точка відслідковування L_p . Далі проводиться аналіз околу зображення розміром 3×3 з центром в точці L_p . Наступний елемент вибирається, виходячи з того, що лінії стику відповідають елементи зображення з найнижчим рівнем інтенсивності в даному околі

$$L_n = \min \{L_i\}, \quad (1.15)$$

де L_i – усі елементи околу, за винятком центрального елемента L_p .

Далі за L_p приймається елемент L_n та все повторюється ітераційно. Таким чином, отриманий набір точок L_p відповідає контуру лінії стику. При програмній реалізації цього підходу елементам, які стоять позаду шляху відслідковування тимчасово присвоюються максимальне значення інтенсивності, щоб унеможливити рух назад та зациклення алгоритму.

Експериментальне моделювання розробленого підходу підтвердило його ефективність щодо локалізації ліній стику зазначених вище об'єктів. Результати локалізації ліній стику об'єктів на цифрових зображеннях, які сформовані при електронно-променевому зварюванні, наведено на рис. 1.10.

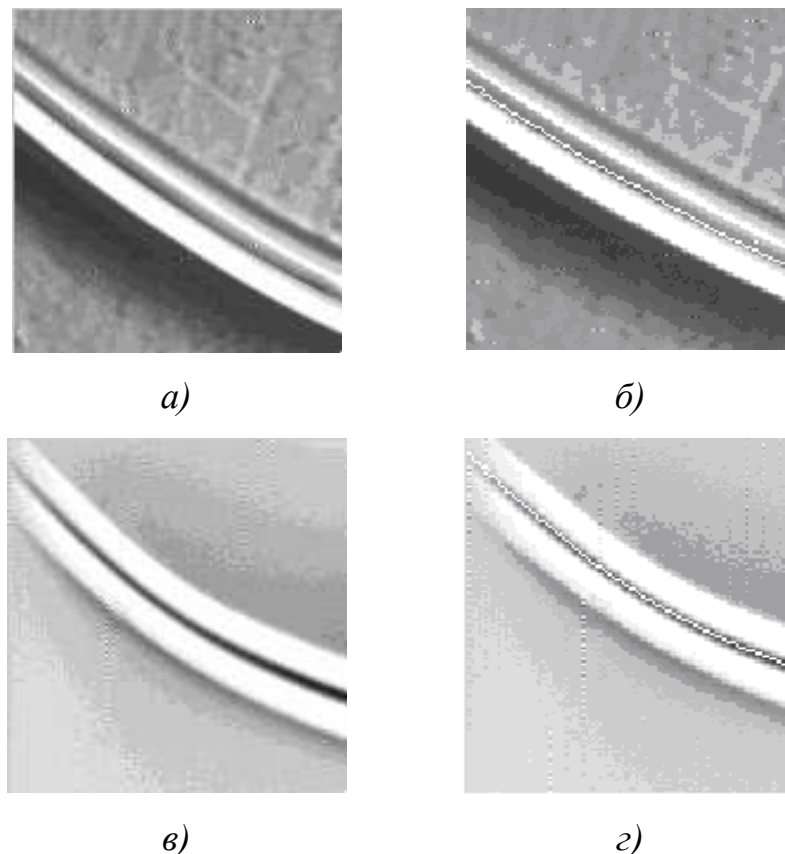


Рис 1.10 . Зображення ліній стику об'єктів на цифрових зображеннях, які сформовані при електронно-променевому зварюванні (а, в) та результати їх локалізації (б, з).

Для підвищення надійності роботи методу доцільно проводити відслідковування по бінарному зображенню. Також доцільно проводити аналіз більших локальних околів стосовно можливих напрямків руху з запам'ятовуванням декількох попередніх кроків. Це дозволить підвищити ефективність методу відслідковування ліній стику об'єктів на зображенні.

Комп'ютеризована система аналізу рентгенографічних знімків "ОБРАЗ-ДІ"

Один із видів неруйнівного контролю використовує рентгенівське випромінювання для формування зображень, які є основою для діагностування стану матеріалів, виробів та металоконструкцій. Сформовані рентгенографічні зображення здебільшого аналізує оператор-дефектоскопіст. Оскільки зображення можуть бути зашумленими, містити велику кількість об'єктів, які мають різні розміри, форму, інтенсивність, можуть перекриватися іншими об'єктами, бути малопомітними, то існує ймовірність, що деякі об'єкти будуть не поміченими та не враховані при аналізі. Це призводить до того, що рішення, які приймаються на основі такого аналізу, будуть не достовірними.

Для усунення описаних вище недоліків актуальною є розробка системи автоматичного аналізу рентгенографічних зображень неруйнівного контролю. Загалом, усі системи рентгенографічного контролю виконують схожі задачі – аналізують об'єкти на плівці, які сформовані в результаті рентгенівського випромінювання. Природа формування плівок теж схожа – чим менший шар матеріалу з меншою густиною зустрінеться на шляху рентгенівського променя, тим більше його енергії дійде до плівки та відобразиться на ній у вигляді більшого потемніння. Порожнини у матеріалі будуть представлені більш темними ділянками на плівці, потовщення – більш світлими, різноманітні включення – залежно від їх густини.

На практиці на ефективність аналізу впливає ще ряд додаткових факторів – розмитість через неправильне розташування джерела випромінювання, недо- чи перепроявлення плівки тощо.

Незважаючи на схожу природу формування рентгенографічних плівок та проблеми, які при цьому виникають, комп'ютерні системи аналізу рентгенографічних даних будуть відрізнятися програмною частиною, яка суттєво залежатиме від конкретної поставленої задачі.

Таким чином, на підставі сказаного вище можна зробити висновок, що системи комп'ютерного аналізу рентгенографічних зображень у неруйнівному контролі, окрім інших, міститимуть два основних блоки:

- підвищення візуальної якості оцифрованих рентгенографічних плівок з метою підсилення інформативних ознак дефектів [18];
- переведення процесу аналізу на формальну основу.

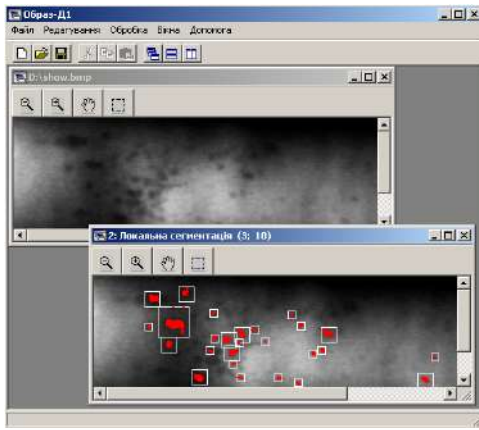
Апаратно-структурна схема комп'ютеризованої системи “ОБРАЗ-Д1” [16] для аналізу рентгенографічних зображень складається з трьох основних частин – пристрій вводу даних, програмна частина та вивід результатів (рис. 1.11).

Оскільки більшість даних рентгенографічного контролю представлені на плівках, то пристрій вводу служить для їх оцифрування та передачі в комп'ютер в якості первинних даних. Здебільшого за пристрій вводу використовують сканер, який володіє хорошою роздільною здатністю.

Програмна частина у комп'ютеризованій системі “ОБРАЗ-Д1” та інших подібних системах є основною. У кожній з відомих систем аналізу рентгенографічних даних є своя структура, яка, в значній мірі, визначається покладеними на неї задачами. Серед обов'язкових структурних складових слід виділити блоки:

- первинної обробки та покращання візуальної якості зображення;
- локалізації об'єктів інтересу;
- формування результатів аналізу.

Результати проведеного аналізу виводяться на принтер у вигляді протоколу дефектоскопії або/і на екрані монітора.



ПРОТОКОЛ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

ТИП І НОМЕР ВИРБОВУ - Соревий шов АК308
 НАЗВА ЗОБРАЖЕННЯ - 01 соревий шов
 ПРІЗВИЩЕ ОПЕРАТОРА - Петренко О.С.
 МИНІМАЛЬНИЙ РОЗМІР ОБ'ЄКТА - 3x3
 ПОРГ БНАРХАЦІЇ - 10
 ДАТА - 08.11.2024

ТАБЕЛИЦЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕФЕКТІВ

№ п/п	Тип	Центр X	Центр Y	Широк	Висота	Площа	Інг. об'єкт	Інг. форма	Період
1	Пора	98	88	22	31	221	27	47	20
2	Пора	184	89	11	7	65	77	107	20
3	Пора	503	125	14	8	62	144	161	27
4	Пора	275	86	13	10	64	68	87	29
5	Пора	488	106	9	7	64	155	184	29
6	Пора	198	74	8	8	67	75	87	22
7	Пора	174	87	9	11	72	89	88	21
8	Пора	391	122	10	12	62	100	126	17
9	Пора	89	80	12	13	48	25	40	15
10	Пора	79	25	12	9	68	19	36	17

Рис. 1.11. Приклад роботи комп'ютеризованої системи аналізу рентгенографічних знімків “ОБРАЗ-Д1”.

Комп'ютеризована система аналізу результатів капілярного контролю якості виробів “ОБРАЗ-Д2”

Різноманіття виробів та матеріалів, з яких ці вироби виготовлені, зумовило розвиток різних підходів до їх неруйнівного контролю та діагностики. Один із них базується на капілярному проникненні рідких речовин в поверхневі дефекти під дією капілярного тиску [17, 56]. Даний вид неруйнівного контролю може застосовуватися для пошуку поверхневих дефектів виробів різної форми, які виготовлені з металевих та неметалевих матеріалів.

Для виявлення дефектів на поверхню матеріалу розпилюють спеціальну речовину яскравого кольору, яку називають пенетрантом. Ця речовина проникає у всі, навіть найдрібніші, поверхневі тріщини та пори. Після цього залишки пенетранту видаляють та через деякий час наносять проявник, який витягує пенетрант із дефектів на поверхню. В результаті, всі наявні поверхневі тріщини, пори та подряпини стають контрастно видимими (рис. 1.12).

Структура комп'ютеризованої системи аналізу результатів капілярного контролю якості виробів “ОБРАЗ-Д2” є схожою до розглянутої вище комп'ютеризованої системи аналізу рентгенографічних знімків. Вона складається з трьох основних елементів – пристрою вводу даних, блоку програмної обробки та аналізу і пристрою для представлення результатів.

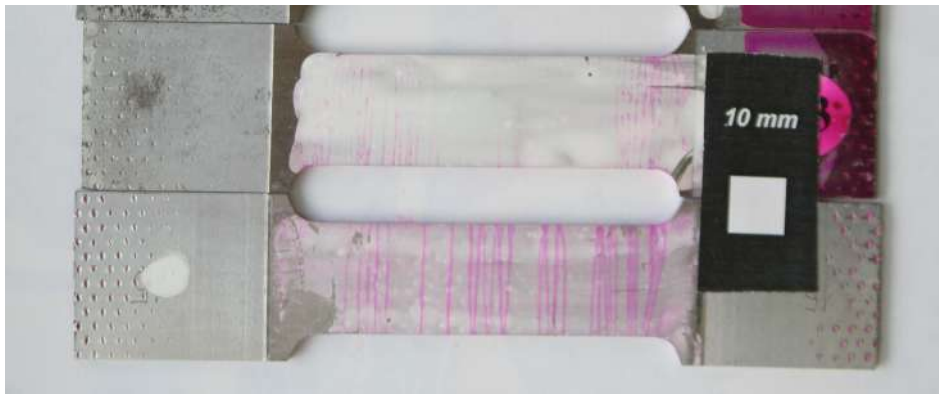


Рис. 1.12. Тестові взірці матеріалу для виявлення поверхневих дефектів капілярним методом та еталон міри.

За пристрій вводу даних найчастіше використовують цифровий фотофіксуючий пристрій. Його роздільна здатність визначає найменший розмір об'єкту, який може бути виявлений при проведенні контролю. Цифрове зображення об'єкту використовується за вхідні дані.

Блок програмної обробки та аналізу включає методи опрацювання зображень, основним завданням яких є:

- локалізація дефектів через кластеризацію зображення на фон та колір пенетранту з його відтінками. Успішне вирішення цього завдання досягається через використання методів сегментації з попереднім навчанням на тренувальних зображеннях;

- визначення геометричних характеристик дефектів через використання морфологічних операцій та методів виділення границь об'єктів. При проведенні метричних вимірювань на досліджуваній поверхні розміщують еталон міри для встановлення співвідношення ціни пікселя в міліметрах (рис. 1.12).

Результати капілярного контролю виводять у вигляді протоколу дефектоскопії на екран монітору або видрукують на принтері.

Дослідження представлених вище комп'ютеризованих систем аналізу даних неруйнівного контролю показало, що їх програмне забезпечення базується на сучасних досягненнях технологій обробки зображень. Представлення об'єкту дослідження у вигляді зображення дозволяє

автоматизувати пошук дефектів та їх метричний аналіз, що значно підвищує ефективність неруйнівного контролю в цілому.

Система зеренного аналізу асфальтобетонної суміші

Покриття більшості автомобільних доріг становить асфальтобетон. З часом під впливом тиску коліс автомобілів різної маси, зміни погодних умов, особливо температури, він змінює свої фізико-механічні властивості, що призводить до появи тріщин та ям на дорожньому полотні. Для збільшення стійкості асфальтобетону до навантажень та несприятливих погодних умов технології його виготовлення приділяють особливу увагу.

Існує велика кількість типів сумішей, які використовують при асфальтуванні. Для нижніх та проміжних шарів дорожнього покриття використовують крупнозернисті асфальтобетонні суміші КЗ-7, КЗ-10. Для покриття верхніх шарів дороги використовують дрібнозернисті суміші Б-10, В-10. При будівництві тротуарів, велосипедних доріжок, внутрішньоквартальних доріг використовують асфальтобетонні суміші, які містять більшу кількість піску, наприклад, Г-4. Існують асфальтобетонні суміші ЩМПА-10 та ЩМАС-10, які характеризуються підвищеною тріщиностійкістю, міцністю та строком служби. При проведенні термінових ремонтних робіт за несприятливих погодних умов використовують холодні асфальтобетонні суміші.

Для покриття різних категорій доріг використовують також різні асфальтобетонні суміші. Наприклад, дороги I та II категорій характеризуються пропускною здатністю більше 7000 автомобілів в сутки та вимагають покриття, яке буде стійке до колійності та температурних умов. Облаштування спортивних гоночних треків вимагає використання інших асфальтобетонів. Залежно від ручного чи механічного способу укладання слід використовувати також асфальтобетонні суміші різного складу.

Технології виготовлення асфальтобетонних сумішей регламентуються ДСТУ В.2.7-127:2015 “Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон щебенево-мастикові” та іншими нормативно-правовими актами та документами.

На усіх етапах від виготовлення на заводі до укладання на дорожнє полотно присутній постійний контроль за дотриманням вимог нормативних документів щодо кількісного складу асфальтобетонних сумішей та їх структури.

Розглянемо автоматизовану систему зернового аналізу асфальтобетонної суміші. Побудова такої системи полягає у розв'язку типової задачі гранулометрії з використанням технологій обробки зображень. Наведемо її основні кроки.

Формування первинного зображення

Спочатку з дорожнього полотна вирізають зразок асфальтобетону здебільшого циліндричної форми, який називають керном (рис. 1.13).



Рис. 1.13. Зразок асфальтобетону.

На основі керна (рис. 1.13) формують вхідне зображення, на якому відображена структура зрізу дорожнього полотна (рис. 1.14).



Рис. 1.14. Зображення зерної структури зрізу дорожнього полотна.

Виділення мінеральної складової

Для виділення складу мінеральної частини суміші стосовно зображення на рис. 1.14 застосовують порогові методи (рис. 1.15). Через недосконалість пристроїв фотофіксації, зовнішнього освітлення, вибір неоптимального порогу бінаризації та інші фактори на бінарному зображенні (рис. 1.15) присутні об'єкти, здебільшого малої площі, які не відносяться до мінеральної частини суміші асфальтобетону. Другим недоліком бінарного зображення, який може вносити суттєвий внесок у похибку аналізу є те, що об'єкти можуть перекриватися, або бути з'єднаними. Описані недоліки можуть бути частково усуненими за допомогою морфологічних методів ерозії та нарощування (рис. 1.16).



Рис. 1.15. Вхідне зображення після обробки пороговими методами.

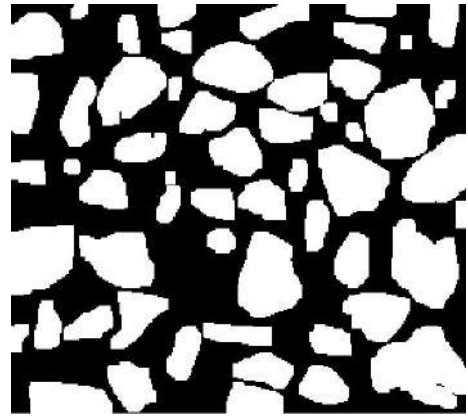


Рис. 1.16. Бінарне зображення (рис. 1.15) після обробки морфологічними методами.

Кількісний зеренний аналіз мінеральної складової асфальтобетонної суміші

На основі зображення на рис. 1.16 виконується зеренний аналіз мінеральної складової асфальтобетонної суміші. Для цього вимірюють площу кожного об'єкту на зображенні, їх діаметр та будують гістограму розподілу (рис. 1.17). Важливим аспектом при проведенні даного кількісного аналізу є переведення отриманих результатів з піксельної метрики в міліметри.

Використання еталону міри на практиці не є раціональним, оскільки фотографування керн проводиться з різної віддалі і це вимагає кожного разу розраховувати співвідношення піксель/мм. На практиці поступають наступним чином. При використанні одного і того ж фотофікуючого пристрою проводять фотофіксацію керн з постійної відстані. Це дає можливість лише раз розрахувати співвідношення піксель/мм та використовувати його при кожній фотофіксації.

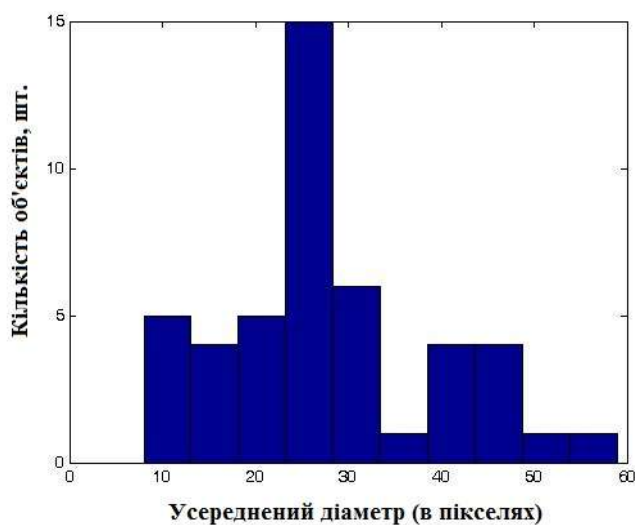


Рис. 1.17. Гістограма розподілу діаметрів зерен мінеральної частини асфальтобетонної суміші.

На основі зображення на рис. 1.16 можуть бути розраховані і інші параметри асфальтобетонних сумішей, зокрема, процентний вміст бітуму, пористість мінеральної частини, коефіцієнт кубовидності зерен та інші.

Отримані результати кількісного аналізу порівнюються з вимогами ДСТУ В.2.7-127:2015, які висуваються до даної асфальтобетонної суміші та робиться висновок про відхилення від нормативів при будівництві, виявлення невідповідності між заявленими та фактично використаними матеріалами та придатність до подальшої безпечної експлуатації.

Раніше подібні дослідження асфальтобетонів проводилися лише в лабораторних умовах та вимагали розплавлення кернів, ручного зважування та вимірювання мінеральних складових. Розроблена комп'ютеризована система

дозволила автоматизувати процес зернового аналізу асфальтобетонної суміші, що призвело до підвищення його швидкодії. Є параметри, які дана система не може оцінити – це водонасичення, границя міцності, умовний коефіцієнт внутрішнього тертя, умовне зчеплення при зсуві та інші. Перевагою розробленої системи є те, що вона може бути використана як первинний експрес-аналіз асфальтобетонної суміші.

1.2. Основні задачі систем аналізу зображень неруйнівного контролю

Вище зазначалося, що системи аналізу зображень неруйнівного контролю є проблемно-орієнтованими. До них ставляться ряд вимог, зокрема, вони повинні бути робастними до неякісного освітлення, зміни фону, невеликої зміни кутів розташування тощо. Бажаною властивістю є можливість гнучкості у переналаштуванні на контроль нових об'єктів, пристосування до нових умов і т.д.

Загалом робота більшості систем аналізу зображень складається з наступних етапів:

1) *Формування первинного зображення.* Зображення формується за допомогою цифрової відео фотокамери або сканера.

2) *Попередня обробка зображення.* Сформоване зображення може містити ряд недоліків, які негативно впливають на подальший аналіз – це фоновий шум, нерівномірне освітлення, геометричні спотворення зумовлені недосконалістю оптичної системи тощо. На цьому етапі реалізуються методи щодо усунення цих недоліків.

3) *Аналіз зображення.* На даному етапі визначаються певні, потрібні лише для вирішення даної задачі, ознаки зображення та проводиться їх аналіз за певним алгоритмом. Такими ознаками можуть бути розміри об'єктів, їх орієнтація, контури, текстурні ознаки тощо. набір виявлених ознак чи результат їх аналізу є характеристикою даного об'єкту на зображенні.

4) *Прийняття рішення.* Алгоритм прийняття рішення залежить від поставленого завдання, тобто є проблемно-орієнтованим. Алгоритм може включати статистичне опрацювання, порогове порівняння, класифікацію.

З описаного вище зрозуміло, що перш ніж приступати до побудови системи аналізу зображень неруйнівного контролю необхідно визначити завдання, які вона повинна виконувати. Потрібно визначити в яких умовах буде функціонувати система, яку точність результатів вона повинна забезпечувати. Чітко поставлена задача дозволить вибрати необхідне програмне та апаратне забезпечення.

Розвиток технологій призвів до того, що з апаратної точки зору сучасні системи аналізу представляються у вигляді набору уніфікованих модулів, які забезпечують широкі можливості щодо їх побудови, обслуговування та розширення і характеризуються високим рівнем надійності.

Програмне забезпечення створюється окремо під кожну задачу, з врахуванням всіх особливостей виробничих процесів. Щодо програмного забезпечення ставиться ряд вимог. Інтерфейс користувача повинен бути зручним та зрозумілим. Це пояснюється тим, що користувачами програми будуть переважно не спеціалісти в галузі обробки зображень, а звичайні інженери та виробничники. Вони повинні знати що робить алгоритм, а не як він це виконує.

Друга вимога стосується швидкодії системи аналізу зображень. Система аналізу зображень не повинна затримувати процеси на виробництві. Зрозуміло, що детальні зображення займають великі обсяги пам'яті, а їх обробка вимагає часових затрат. Проте на сьогоднішній день персональні комп'ютери є достатньо швидкими і можуть застосовуватися у більшості систем аналізу зображень неруйнівного контролю. Це дає певний економічний ефект, оскільки застосування спеціалізованого апаратного забезпечення суттєво здорожчує усю систему.

1.3. Застосування систем аналізу зображень у промисловості

Існує чимало прикладних систем аналізу зображень [23, 27, 139, 140, 172, 197]. Галузі їх застосування є дуже різноманітними – контроль якості матеріалу [139], контроль при збиранні урожаю [140]. Є чимало типів класифікацій систем. Зокрема, у [197, 23] наведена класифікація систем візуального контролю залежно від типу використаного зображення.

Умовно системи аналізу зображень неруйнівного контролю можна розділити на два типи. Перший тип - це системи аналізу геометричних розмірів об'єктів, другий – системи аналізу структури. Серед ознак об'єктів, які здебільшого використовуватимуться в системах першого типу – форма, розміри, розміщення, орієнтація. Для систем другого типу характерними ознаками є текстура, включення, кількість об'єктів на одиницю площі тощо. Хоча поділ систем на зазначені типи є умовним, оскільки потужні системи можуть одночасно і вимірювати розміри об'єктів і аналізувати структуру. Для виявлення цієї чи іншої ознаки використовуються певні алгоритми, які характеризуються більшою чи меншою складністю.

Наведені вище два типи характерні для систем аналізу зображень неруйнівного контролю у матеріалознавстві. Характерним завданням для цих систем є вимірювання метричних розмірів складових структури, аналіз їх статистичного розподілу, локалізація певних структур, їх аналіз та класифікація.

На сьогодні існує чимало систем технічного зору, які використовують у виробництві. Прикладом може бути система Xpectia FZD Omron [53]. Ця система проводить вимірювання одночасно в трьох напрямках. Вона має інтуїтивно зрозумілий сенсорний дисплей, що значно спрощує її експлуатацію. Дана система дозволяє проводити найбільш складні вимірювання у тривимірному просторі. Ще одна система технічного зору, розроблена НПК «Відеоскан», використовується в медичній галузі для дозованого виділення препаратів [141]. Для цього в нерозчинній оболонці кожної таблетки лазерним

променем пропалюється отвір строго певного розміру. Оскільки будь-яке відхилення від заданого параметру може бути фатальним для пацієнта, то автоматична система забезпечує стовідсотковий контроль розміру отворів в оболонці таблетки. В НТК «Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона» розроблено автоматизовану систему технічного зору для відслідковування стику при дуговому зварюванні [145].

Також існує чимало наукових досліджень задачі створення систем технічного зору. У роботах [143, 187, 211] запропоновано нову модель системи технічного зору для автомобіля. Розроблено математичний апарат для обробки цифрової інформації всередині системі і для визначення відстаней та кутових розмірів у запропонованій системі. Робота [13] присвячена принципам побудови багатоканальної системи технічного зору з використанням клітинних автоматів. На основі запропонованого поняття геометричного типу зображення розпізнаються візуальні дані, які інваріантні до повороту, масштабування і динамічних змін. Запропоновано методи побудови геометричного типу зображення на основі клітинних технологій. Проведені у роботі [11] дослідження оцінюють стан різального інструменту на основі 3D моделей. Побудовано метод точкового аналізу полігональних 3D моделей об'єктів з наступним їх перетворенням у хмару точок. Проведено моделювання із застосування розробленого методу в системі оцінювання стану різального інструменту. Сформовано рекомендації щодо використання розробленого методу в системах технічного зору.

Дослідження систем технічного зору та систем аналізу зображень показало, що кожна система є індивідуальною, розроблена для вирішення конкретної задачі. Разом з тим, багато елементів цих систем є подібними. Сучасний підхід до побудови систем аналізу зображень показує, що системи будують здебільшого з окремих готових модулів – пристрої фотовідеофіксації, комп'ютери і програмні частини. Якщо мова іде про системи аналізу зображень в неруйнівному контролі, то програмна частина також може містити багато

подібних функцій – усунення нерівномірного засвічення, виділення контурів об'єктів, порогова обробка, побудова гістограм, підсилення контрастів тощо.

1.4. Моделі складноструктурованих зображень у неруйнівному контролі

Технології обробки зображень мають важливе значення при опрацюванні зображень у сучасній науці, різноманітних дослідженнях, зокрема, і у неруйнівному контролі [109]. Ефективність запропонованих методів опрацювання буде суттєво залежати від адекватності моделі зображення, яка вибрана для вирішення для цього чи іншого завдання. Модель у багатьох випадках виявляється корисним, а часом єдиним інструментом дослідження. Цифрові зображення можуть бути представлені безліччю моделей. Наразі не існує загальноприйнятої класифікації видів моделей.

Математична модель зображення представляє собою набір функцій, які описують найбільш важливі для вирішення даної задачі ознаки. Розглянемо декілька найбільш поширених моделей зображень.

Імовірнісна модель зображення. Згідно цієї моделі цифрове зображення представляється у вигляді випадкової функції просторових координат (i, j) . Зображення, яке у даному випадку представлено як випадковий процес, описується щільністю розподілу ймовірності інтенсивності пікселів за просторовими координатами $p(i, j)$ у деякий момент часу t . Методи обробки та аналізу зображень, які побудовані на основі цієї моделі зображення, оперують такими величинами як математичне сподівання, дисперсія, автокореляційна функція. Прикладами методів, які використовують імовірнісну модель зображення є метод бінаризації металографічних зображень з оптимальним порогом [80], метод розпізнавання профілю зовнішньої різьби з використанням кореляційної функції [88] та ін.

Структурно-зв'язнісна модель зображення. Дана модель використовується як для на півтонових, так і для бінарних зображень у задачах

виділення контурів об'єктів [106, 107, 136]. Напівтонове зображення A подається у вигляді математичної структурної моделі як сукупність k бінарних зображень B відповідних рівнів інтенсивності:

$$A(M, N) = \bigcup_{k=1}^K B^k(M, N) \quad (1.16)$$

Дана модель дозволяє підвищити точність виділення контурів у порівнянні з відомими підходами та використовується при розпізнаванні і класифікації геометричних форм об'єктів.

Модель реалістичних зображень на основі двовимірних сплайнів, близьких до інтерполяційних у середньому. У запропонованій моделі [125] рекомендується використовувати двовимірні поліноміальні сплайни на основі B -сплайнів, які близькі до інтерполяційних у середньому, для побудови моделей аналогових реалістичних зображень. Даний підхід використовується для реалізації у програмному забезпеченні обробки цифрових зображень. Оскільки сплайн-оператори характеризуються обчислювальною простотою, то це дає змогу використовувати їх у режимі реального часу.

Фрактальна модель зображення. Цифрове зображення представляється сукупністю об'єктів, які характеризуються різним значенням фрактальної розмірності. Така модель є зручною при аналізі зображень зі складною текстурою, пошуку та розпізнаванні об'єктів. Зокрема, у роботах [163, 213] зазначено, що фрактальна розмірність є важливим параметром фрактальної геометрії, яка знаходить значне застосування в різних областях, включаючи обробку зображень, аналіз текстури, шорсткості, гладкості і площі об'єктів. У цих роботах пропонується алгоритм обчислення фрактальної розмірності цифрових зображень, проводиться порівняння фрактальної розмірності таких образів і доводиться, що фрактальна розмірність є зручним інструментом для вимірювання шорсткості чи текстури зображення.

Автором даної дисертаційної роботи запропоновано цілий ряд методів кількісного аналізу структури матеріалів на основі фрактальної моделі зображення. Згадана модель використовується для виділення різнорозмірних

об'єктів на зображенні [73], вимірювання усередненого розміру зерен металу [227], автоматичного розпізнавання крихкого та в'язкого зламів сталі 15Х1МФ [81], прогнозування залишкового ресурсу матеріалів [191], аналізу текстури фрактографічних зображень [82].

При дослідженнях використовуються зображення різного типу – бінарні, напівтонові та кольорові. Використання традиційних крапкового та клітинного методів обчислення фрактальних розмірностей [128] при побудові фрактальних моделей призводило до неточностей, оскільки вони за вхідні використовують лише бінарні зображення. Для усунення цього недоліку автором запропонований метод обчислення фрактальних розмірностей з використанням поверхневого інтегралу [74], який дозволяє обчислювати фрактальну розмірність напівтонових зображень без перетворення їх у бінарне представлення. Більш детально фрактальні методи обробки та аналізу зображень будуть розглянуті у роботі далі.

1.5. Методи обробки та аналізу зображень в неруйнівному контролі

З функціональної точки зору усі методи обробки зображень у неруйнівному контролі можна умовно розділити на дві групи – методи попередньої обробки та методи аналізу. Набір методів попередньої обробки для більшості видів неруйнівного контролю, де використовуються зображення, є приблизно однаковий – це методи покращання візуальної якості, усунення шумів, виділення меж об'єктів, вирівнювання фону, перетворення гістограми тощо. Вибір методів аналізу є проблемно-орієнтованим і суттєво залежить від мети поставленої задачі.

З точки зору використаного інструментарію розрізняють методи обробки зображень в просторовій області та частотній області. Вейвлет-перетворення [108, 201] є узагальненням спектрального аналізу, типовим представником якого є Фур'є-перетворення.

Вейвлети є потужним та універсальним інструментом для вирішення цілого ряду задач обробки та аналізу зображень. Вейвлет-перетворення володіють практично всіма перевагами Фур'є-перетворення, але на відміну від нього мають достатньо багато базових функцій, властивості яких орієнтовані на вирішення різноманітних задач. Суттєвим недоліком вейвлетних перетворень є їх відносна складність. Вона, зокрема, полягає у тому, що вибір типу вейвлетів у значній мірі залежить від досвіду та інтуїції дослідника. Для покращання характеристик вейвлетів потрібно здійснювати пошук базових функцій до вхідних сигналів. Зважаючи на це, у дисертаційній роботі досліджуються методи обробки зображень у просторовій області.

1.5.1. Методи попередньої обробки зображень у неруйнівному контролі

Одними з найбільш поширених недоліків зображень, сформованих у результаті неруйнівного контролю є:

- 1) низька контрастність, що не дозволяє локалізувати об'єкти інтересу на фоні завад;
- 2) зашумленість, яка в багатьох випадках обумовлена недосконалістю апаратури формування зображень неруйнівного контролю і теж суттєво впливає на якість розпізнавання та аналізу;
- 3) нерівномірність фону, яка обумовлена зовнішніми факторами, наприклад, неякісним освітленням, що також, як і в попередньому пункті, погіршує якість аналізу.

Для усунення наведених вище недоліків існує велика кількість підходів, але вони теж, в тій чи іншій мірі, мають бути адаптованими для вирішення поставленої задачі.

Підвищення контрасту зображення досягається такими методами як розтяг динамічного діапазону інтенсивностей [32, 37, 83, 208], вирівнювання гістограми [32, 44, 45], контрастування [46, 47, 85, 173, 175]. Вимога, яка висувається до методів попередньої обробки, полягає в тому, що вони не повинні

вносити ніяких спотворень об'єктів, що є особливо важливим у випадку, коли зображення в подальшому використовуються для метричних вимірювань. З досвіду практичної реалізації відомо, що методи підсилення контрастності доцільно проводити після усунення шуму на зображенні, в іншому випадку шумова складова буде ще більш підсилена.

Як вже було сказано вище, на більшості зображень присутня складова шуму. Це пояснюється некоректною роботою аналогово-цифрових перетворювачів, шумом ПЗЗ-матриць фотофіксуючих пристроїв. Наявність цих спотворень є особливо критичною при розв'язуванні задач метричних вимірювань, розпізнаванні та аналізі об'єктів. Для усунення зазначених недоліків використовуються різноманітні підходи – медіанна фільтрація, усереднення по заданому околу тощо. Задача усунення шуму є особливо актуальною при розв'язуванні задач аналізу структурних складових на зображенні.

1.5.2. Методи аналізу зображень у неруйнівному контролі

Аналіз зображень є дуже різноплановою задачею. Стосовно металографічних зображень неруйнівного контролю їх аналіз, здебільшого, зводиться до задач виявлення певних структурних складових на зображенні, їх подальших геометричних вимірювань та проведенні статистичного аналізу отриманих даних. За такі структурні складові на металографічному зображенні, залежно від поставленої мети, можуть бути прийняті карбіди, зерна, границі зерен, різноманітні включення, текстура тощо. Для того, щоб кожен об'єкт з перелічених вище був локалізований та однозначно ідентифікований, необхідно сформувати набір ознак, які будуть властиві лише йому. Таким чином, задача аналізу зводиться до задачі сегментації, тобто поділу зображення на локальні ділянки – об'єкти, для яких виконується сформований набір ознак.

Вибір вдалого методу сегментації в значній мірі залежить від вмінь та досвіду дослідника. Зазначимо, що не існує єдиної класифікації методів

сегментації. До найбільш відомих [179] відносяться класифікація за К. Фу [180], за Н. Палом [206], за В. Скарбеком та А. Кошаном [214], за Л. Лючісом та С. Мітрою [193]. Наведені вище види класифікацій включають алгоритми порогової обробки [186], алгоритми виділення границь областей [12, 205], алгоритми кластеризації, морфологічні алгоритми, алгоритми на базі теорії нечітких множин [180] тощо. Класифікація, яка була запропонована А.Розенфельдом [209], розділяє алгоритми сегментації на два типи з паралельною та послідовною обробкою. Підхід до класифікації алгоритмів сегментації Р.Гонсалеса та Р.Вудса [183] базується на аналізі подібності рівнів інтенсивностей напівтонових зображень і побудові на цій основі контурів об'єктів та дослідження їх подібності. Я.Чангом [225] на основі підходів А.Розенфельда, Р.Гонсалеса та Р.Вудса була проведена спроба побудови універсальної класифікації методів сегментації. Вона створена на основі двох інформаційних ознак – типу обробки (паралельна чи послідовна) і аналізі країв та околів.

Розглянемо найбільш вживані типи методів сегментації, які використовуються під час аналізу металографічних зображень. Оскільки більшість об'єктів інтересу на таких зображеннях представляють собою однорідні елементи на деякому фоні, то за основну ознаку при їх пошуку та локалізації використовують рівні інтенсивності [220]. Таким чином метод сегментації зводиться до використання глобального порогу, який поділяє напівтонове чи кольорове зображення на дві частини – об'єкт-фон. Вибір значення локального порогу може проводитися евристично, адаптивно, на основі аналізу гістограми тощо.

Для більш точного виявлення об'єктів на складноструктурованому зображенні неруйнівного контролю можуть використовуватися додаткові алгоритми, які базуються на методах виділення границь – Собеля, Оцу, Канні, Превіт [54], а також морфологічні методи. Морфологічні методи використовуючи операції злиття, поділу та заповнення областей дозволяють усунути недоліки «пересегментації» чи «недосегментації», які виникають через

неточності у виборі порогу. Також морфологічні операції доцільно використовувати для заливки отворів у об'єктах інтересу, які виникають при застосуванні порогових методів до зашумлених зображень.

У роботі [194] проведений аналіз відомих методів сегментації зображень показав, що кожен із підходів має свої переваги та недоліки залежно від поставленого завдання та вхідного зображення. В [223] представлено нову варіаційну модель для сегментації об'єктів встановленої статистичної форми. Запропонована модель може ефективно сегментувати складні форми на зашумлених зображеннях. Розроблений метод використовується здебільшого для сегментації різноманітних форм об'єктів на біомедичних зображеннях.

Деформуючі моделі є перспективними та надійно дослідженими методами комп'ютерного аналізу зображень [176]. Тут сегментація виконується за допомогою методу контурної еволюції. Точки управління автоматично розміщуються шляхом порогового порівняння, а потім контур застосовується для сегментації конкретної області. Аналіз виконується шляхом порівняння результату з іншими деформованими моделями.

У роботі [198] досліджено сучасні підходи до сегментації зображень. Автори розділили найбільш відомі методи сегментації на чотири категорії – апертурні, кластеризації, з використанням класифікатора та гібридні. Для прикладу, порогові методи (локальні, глобальні, Оцу) дуже чутливі до шуму, але вони прості в реалізації. Вони не забезпечують хороших результатів опрацювання без попередньої обробки, але є ефективними для зображень, які мають менше шуму. Кластеризація та класифікаційні методи відомі як методи, які потребують навчання, а це значно ускладнює їх реалізацію та потребує часових затрат. Гібридні методи сегментації використовують локальні характеристики зображення та дані про межі об'єктів. У [22] проаналізовані основні сучасні алгоритми сегментації зображень та розроблено метод автоматичного вибору алгоритмів сегментації та їх параметри на основі використання метрик Громова-Хаусдорфа та Громова-Фреше. Запропонований

підхід [22] дає змогу проводити сегментацію в автоматичному режимі залежно від класу зображень.

Огляд сучасних підходів до сегментації зображень показує, що результат проведення сегментації в значній мірі залежить від правильно вибраних параметрів, що, в свою чергу, залежить від досвіду та вмінь дослідника. З іншого боку, результат сегментації зображень суттєво впливає на точність їх аналізу. Для прикладу, при проведенні дистанційних геометричних вимірювань на основі зображень, неправильно підібрані параметри порогових та морфологічних методів можуть призвести до того, що вимірювання будуть проведені неточно.

Це зумовлює необхідність оцінювання роботи методів сегментації. Відомо декілька критеріїв оцінювання результатів сегментації [105, 117, 155, 160, 185, 210]. Підходи, які використовуються при сегментації металографічних зображень, є проблемно-орієнтованими [33, 80, 84, 217]. Це призводить до необхідності при оцінці методів сегментації враховувати особливості самого об'єкту досліджень – локалізовані структурні складові повинні мати гладкі та неперервні границі, не містити включень тощо.

Практична реалізація методів сегментації металографічних зображень показує, що досягнути такого результату не завжди вдається – краї отримуються не гладкими, межі розривними. Це призводить до необхідності додаткової обробки, наприклад, морфологічними методами. Автором цієї дисертаційної роботи запропоновано використовувати за критерій якості сегментації міру подібності вхідного і сегментованого зображень [80]. Цей критерій має суб'єктивний характер і при вирішенні задач метричних вимірювань може вимагати додаткового калібрування. Більш детально підходи до виділення об'єктів на складноструктурованих зображеннях будуть розглянуті у розділі 2.

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. 1.18).

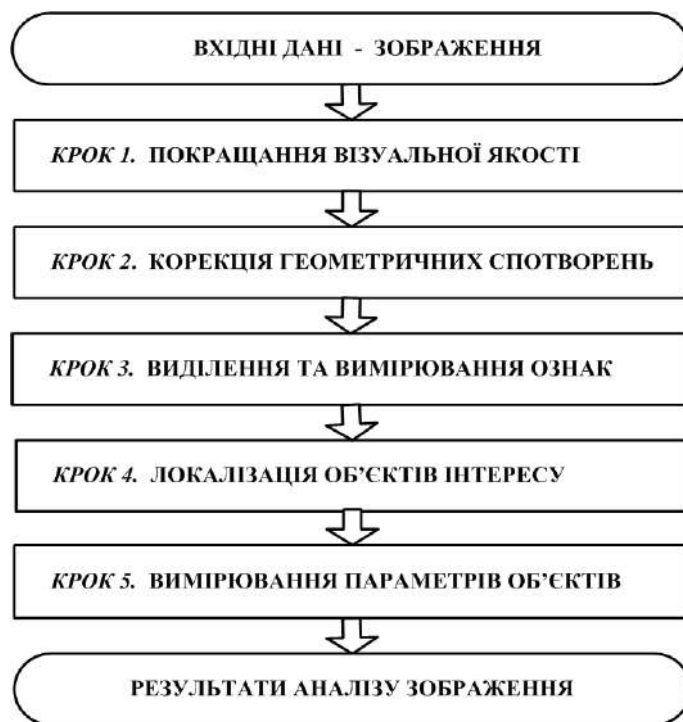


Рис. 1.18. Узагальнена послі-довність основних кроків об-робки та аналізу зображень.

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

Таким чином, проблема підвищення ефективності опрацювання зображень у металографії як нового інструменту сучасних інформаційних технологій

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 інформаційних технологій, опис і застосування яких подано у наступних розділах роботи.

Висновки до розділу 1

Проведено огляд основних підходів до неруйнівного контролю виробів та конструкцій у різноманітних галузях народного господарства. Це і рентгенографічний, і капілярний, за допомогою тепловізора та інші. У всіх цих підходах важливим аспектом є спосіб візуального представлення даних, оскільки надалі від цього залежить точність подальшого аналізу та коректність прийнятих на цій основі рішень.

Проведено аналіз систем обробки зображень неруйнівного контролю у промисловості та основних задач, які на них покладені. Встановлено, що використання таких систем дозволяє 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 для цього чи іншого завдання. 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 аналізу зображень у неруйнівному контролі. 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 більшість методів опрацювання зображень у неруйнівному контролі.

Виявлено та узагальнено недоліки, які притаманні більшості відомих комп'ютеризованих систем обробки, аналізу та розпізнавання металографічних зображень. До них, зокрема, відносяться - низька інформативності вхідних даних, низький рівень автоматизації, відсутність оптимізації вибору параметрів налаштувань та ознак об'єктів, інваріантних до процесу формування зображень тощо. На основі виявлених недоліків визначено напрямки досліджень стосовно створення інформаційних технологій обробки та аналізу металографічних та фрактографічних зображень.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ВИДІЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ НА СКЛАДНОСТРУКТУРОВАНИХ ЗОБРАЖЕННЯХ

Складноструктуроване зображення містить велику кількість об'єктів. Ці об'єкти відрізняються формою або/і рівнем інтенсивності, вони можуть розміщуватися на різному фоні, окремо чи перекривати один одного, сам об'єкт може мати неоднорідну структуру і т.п.

Розглянемо природу виникнення текстури матеріалів [115]. При виливанні металів, обробці під тиском, прокаті їх кристали зорієнтовуються вздовж певного напрямку та формують деяку структуру. Зазначимо, що при кристалізаційно-рекристалізаційних процесах буде один вид текстури, а при деформації інший. 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. Це методи рентгенівські, нейтрографічні, синхротронного випромінювання та ін. 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 сформувати 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 й 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 [115, 131, 154, 219]. Вибір того чи іншого методу залежить від багатьох факторів, наприклад, самого зображення, складності форми досліджуваного об'єкта, поставленої задачі тощо.

Загалом усі методи сегментації зводяться до поділу зображення на ділянки, пікселі яких об'єднані за деякою ознакою. У цьому плані структура більшості методів сегментації є схожою до методів класифікації текстури [142]. Вона складається з двох основних кроків – вибір ознак для характеристики локальних околів зображення та класифікація цих околів. Ознаками окремих пікселів чи локальних околів можуть бути значення інтенсивності, статистичні характеристики, характеристики матриці суміжності тощо. Від вибору ознак залежить точність характеристики локального околу, на основі якої буде відбуватися виділення об'єктів.

До найбільш вживаних методів сегментації у задачах технічної діагностики слід віднести порогові методи [155], методи водорозділу [219], з використанням опису на основі графу [154], текстурні методи та виділення границь [131].

Порогові методи сегментації є найбільш простими в реалізації. Точність сегментації залежить від вибору оптимального порогу. Метод порогової сегментації не забезпечує коректної роботи при опрацюванні зображень з нерівномірним освітленням та наявністю суттєвих шумів. Більш детально методи порогової сегментації будуть розглянуті далі у роботі.

Основними кроками метод водорозділу є побудова поля локальних контрастів зображення та пошук і формування водорозділів на основі областей високої контрастності. Цей метод сегментації ефективний для випадку, коли на

зображенні є невелика кількість локальних мінімумів, тобто немає багато дрібних деталей, в іншому випадку виникає надлишкове розбиття на сегменти. Незважаючи на ці недоліки даний підхід використовується для визначення усередненого розміру зерен при аналізі металографічних зображень, зокрема, про це зазначено в стандарті ASTM E1382-97. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis. До вхідних зображень згідно цього стандарту ставляться високі вимоги щодо якості, чіткості всіх меж і т.д., чого на практиці досягнути не завжди вдається.

В основі методу сегментації з використанням графу кожен піксель зображення представляється вершиною. Кожній парі вершин ставиться у відповідність ребро з ваговим коефіцієнтом, який відповідає подібності цих елементів. Далі на основі правил, які базуються на властивостях структурних елементів, відбувається розбиття на підграфи, в результаті чого виділяються області з однорідною інтенсивністю та різним рівнем деталізації.

Текстурна сегментація теж доволі часто використовується при аналізі металографічних зображень. Основна проблема полягає у пошуку таких ознак текстури локального околу, які б могли однозначно описувати та відрізняти, часом надто візуально схожі, текстури [170].

Надалі у цьому розділі розглянуто ряд підходів, які були розроблені автором для сегментації складноструктурованих зображень.

Оскільки металографічні зображення є основою для проведення кількісного аналізу зерен, карбідів і т.п., то це зумовлює необхідність усунення їх геометричних спотворень, спричинених недосконалістю оптичних систем.

2.1. Усунення геометричних спотворень в оптико-електронних системах формування цифрових зображень на основі перетворень Хафа

Під час розв'язання багатьох практичних задач виникає потреба використовувати оптико-електронні системи для формування цифрових

зображень [51]. Проте доволі часто недосконалість оптики є причиною спотворень на зображеннях. Такі спотворення називають аберациями. Вони виникають внаслідок обмежень під час проектування та виготовлення об'єктивів, а проявляються у тому, що оптичні зображення не точно відповідають досліджуваному об'єкту, з'являється розмиття, спотворюються рівні інтенсивностей та погіршується роздільна здатність. Розглянемо причину виникнення цих спотворень детальніше.

Відомо, що в околі оптичної осі, в параксіальній області, оптична система близька до ідеальної, тобто існує однозначна відповідність між об'єктом та його відображенням – точка відображається точкою, лінія – лінією і т.д. Але такий ідеалізований стан існує лише в обмеженій частині навколо оптичної осі. З віддаленням від неї закони параксіальної оптики порушуються – промені, які виходять з однієї точки предмета, перетинаються не в одній точці площини зображення, а утворюють пляму розмиття. Тоді зображення розмиваються та спотворюються – виникають аберації та проявляється дисторсія. Розглянуті геометричні спотворення вказують на недосконалість оптичних систем [122, 171].

Розглянемо основні типи аберацій та дисторсію і причини їх виникнення. Розрізняють п'ять основних типів аберацій – сферичну, кому, астигматизм, кривизну поля та хроматичні.

1. *Сферична аберация* полягає в тому, що лінза не може звести паралельний пучок світла строго в одну точку. Причиною є те, що оптична сила не є сталою в центрі та на краях лінзи (рис. 2.1).

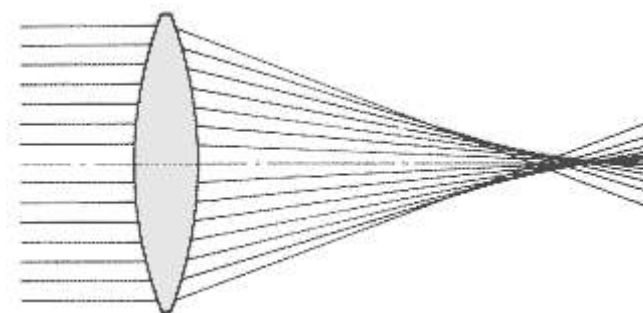


Рис. 2.1. Ілюстрація прояву сферичних аберацій.

2. Причиною виникнення *коми* є те, що збільшення змінюється зі зміною віддалі від центра лінзи. Точки, що знаходяться не на осі, відображаються з “хвостом”, як у комети. Такий їх вигляд зумовлює назву даного виду спотворень.

3. *Астигматизм*. Ці спотворення характеризуються різною кривизною оптичної поверхні в різних площинах перерізу і проявляються у тому, що пучок променів деформується під час проходження оптичної системи, оскільки фокус світлового пучка у різних площинах різних.

4. *Кривизна поля*. Така аберація проявляється у тому, що фокальна площина багатьох об'єктів не є площиною, а може бути поверхнею іншої форми.

5. *Хроматичні аберації*. Характеризуються розмиттям та появою псевдокольорів на зображеннях оптичних пристроїв, що пояснюється різним ступенем заломлення променів з різною довжиною електромагнетної хвилі чи різних кольорів.

Окрім аберацій, ще одним частим видом спотворень, які властиві оптичним системам, є дисторсія (рис. 2.2). Вона проявляється у тому, що масштаб зображення не є постійним зі зміною віддалі від центра поля. Залежно від характеристик об'єктива дисторсія є від'ємною (“подушкоподібною”, рис. 2.2 б) або додатною (“бочкоподібною”, рис. 2.2 в). Об'єктивам відеокамер притаманна здебільшого додатна дисторсія.

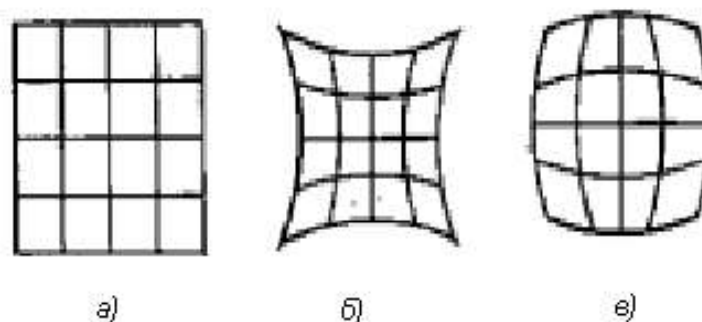


Рис. 2.2. Вплив дисторсії на формування зображення прямокутної сітки: *a* – вхідний об'єкт; *б* – зображення об'єкта за від'ємної дисторсії; *в* – зображення об'єкта за додатної дисторсії.

Загалом зображенням, що формуються оптико–електронною системою, властиві певні типи спотворень. Найчастіше їх основним джерелом є об’єктив, від складності якого залежить характер спотворень. Проте, найбільш вагому частину серед геометричних спотворень складає дисторсія. Існує низка задач, наприклад, оптико–електронні вимірювання, де до рівня геометричних спотворень ставляться жорсткі вимоги. Тому перед проведенням безконтактних вимірювань на основі отриманого зображення важливо усунути або зменшити геометричні спотворення, які зумовлені об’єктивом. Розглянемо це детальніше.

Відомо два основних шляхи усунення геометричних спотворень під час дистанційних оптико–електронних вимірювань [156]. Перший полягає у тому, що вимірювальну апаратуру калібрують, а параметри умов вимірювання фіксують. Надалі ці дані використовують для обчислення систематичних похибок цифрових зображень. Недолік цього підходу – потреба використовувати додаткову апаратуру, яку також необхідно калібрувати. Окрім цього, достатньо важко виявити та врахувати всі джерела систематичних похибок.

У другому підході об’єктом досліджень є безпосередньо самі зображення. Іншими словами, систематичні похибки визначаються на основі зображень, які отримані в реальних умовах. Такий підхід дозволяє врахувати сумарний вплив всіх джерел похибок без аналізу їх складових, законів утворення та ін. Саме цей підхід, зважаючи на простоту реалізації, перспективніший. Цьому підходу приділяли багато уваги, тому існує декілька відомих методів калібрування на основі аналізу зображень [52, 69, 92, 118, 122, 142, 144, 156, 158, 161, 164, 171, 218, 219]. Але згадані методи розроблені з урахуванням особливостей плівкових камер. У цифрових камерах інша технологія отримання зображень. Це зумовило створення нових підходів до розв’язання задачі калібрування, які б дозволяли виявляти, вимірювати та враховувати спотворення, властиві саме цифровим камерам [24, 122, 144].

У цій роботі за основу взято метод калібрування зображень [49, 34], який полягає у виявленні та подальшому врахуванні систематичних похибок, зумовлених дисторсією об'єктива.

Розглянемо відому методику [156, 158], яка дозволяє усунути вплив дисторсії та отримати не спотворене зображення. Нехай маємо деяке цифрове зображення (рис. 2.3), яке складається з H стрічок та W стовпців.

Геометричні спотворення, викликані дисторсією, залежать від віддалі точки до оптичного центру, тому для подальших розрахунків зручніше перенести початок системи координат iOj в точку (Ox, Oy) . Операцію переносу початку системи можна описати виразами

$$x = (i - Ox), \quad y = (j - Oy). \quad (2.1)$$

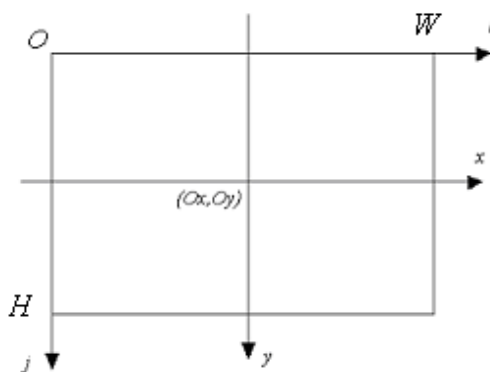


Рис. 2.3. Перенесення початку системи координат згідно виразу (2.1).

Дисторсію об'єктива моделюють вирази [156, 161, 218]

$$\begin{aligned} x &= xd \cdot (1 + k \cdot rd^2), \\ y &= yd \cdot (1 + k \cdot rd^2) \end{aligned} \quad (2.2)$$

де xd , yd – координати пікселів зображення, що містить геометричні спотворення, викликані дисторсією; $rd = \sqrt{xd^2 + yd^2}$.

Коефіцієнт k – основний параметр, що характеризує рівень дисторсії.

З виразу (2.2) слідує, що зв'язок між координатами відповідних пікселів спотвореного та неспотвореного зображень такий [156]:

$$\begin{aligned}x &= (id - Ox) \cdot (1 + k \cdot rd^2), \\y &= (jd - Oy) \cdot (1 + k \cdot rd^2),\end{aligned}\tag{2.3}$$

Отже, вирази (2.3) реалізують алгоритм регулювання геометричних спотворень, зумовлених дисторсією на зображенні. Основним регулюючим параметром є коефіцієнт k . Іншими словами, кожне зображення з тим чи іншим рівнем дисторсії характеризується відповідним значенням k . Знак коефіцієнта k вказує на тип дисторсії – додатну чи від’ємну. Обчисливши значення k , тобто оцінивши дисторсію в числовому представленні, можна усунути геометричні спотворення за виразами (2.3).

Найпростіший спосіб обчислення параметра k наступний. Підставляючи координати відповідних опорних точок на тестовому зразку (x, y) та на цифровому зображенні (xd, yd) у вираз (2.3), визначають параметр k [156]. Але основний недолік цього підходу зумовлений визначенням координат опорних точок в інтерактивному режимі, що призводить до похибок. Тому використовувати цей метод у вимірювальній системі недоцільно.

Побудуємо інший алгоритм оцінки рівня дисторсії, що еквівалентно пошуку числового значення параметра k [49]. Для цього розглянемо два зображення – “ідеалізоване” і таке, що містить геометричні спотворення (рис. 2.4). При цьому зазначимо, що для “ідеалізованого” зображення коефіцієнт дисторсії $k = 0$.

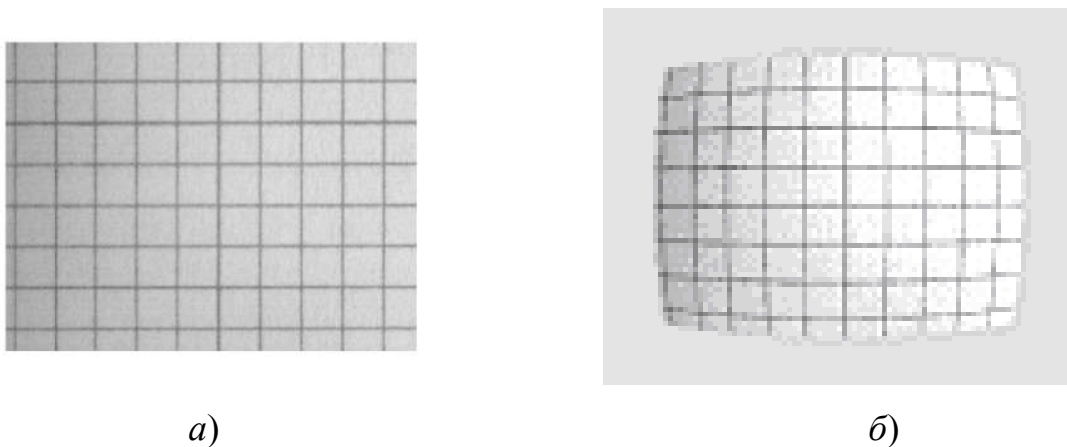


Рис. 2.4. Зображення тестового рисунку: *a* – “ідеалізоване”;
б – зі спотвореннями, зумовленими дисторсією.

Для виділення ліній тестових зображень, що на рис. 2.4, бінаризуємо їх одним із відомих методів, наприклад, Канні [171]. Результати бінаризації подані на рис. 2.5.

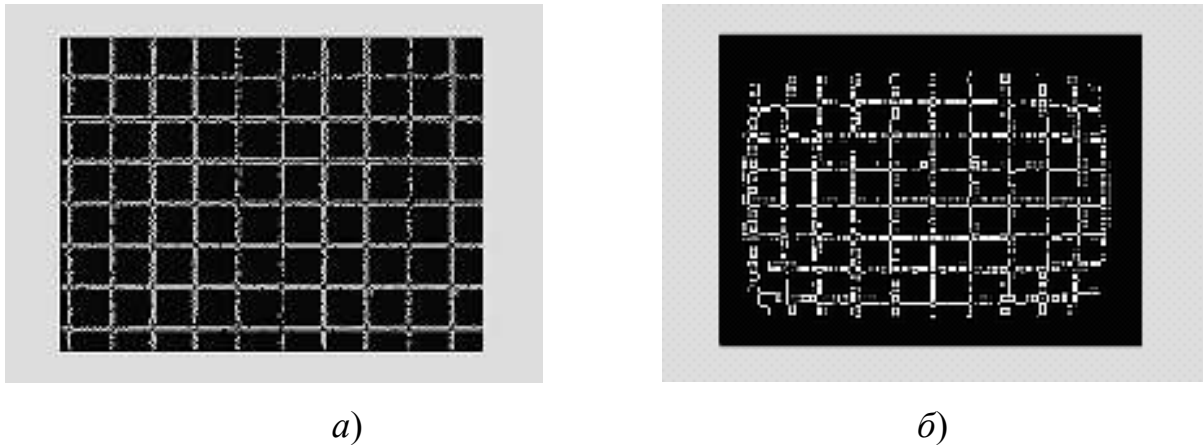


Рис. 2.5. Результати застосування бінаризації за методом Канні до “ідеалізованого” (а) та спотвореного (б) зображень.

Тепер до зображень на рис. 2.5 застосуємо перетворення Хафа [164], що дозволить аналізувати лінії тестового зображення. Результати цієї операції ілюструє рис. 2.6.

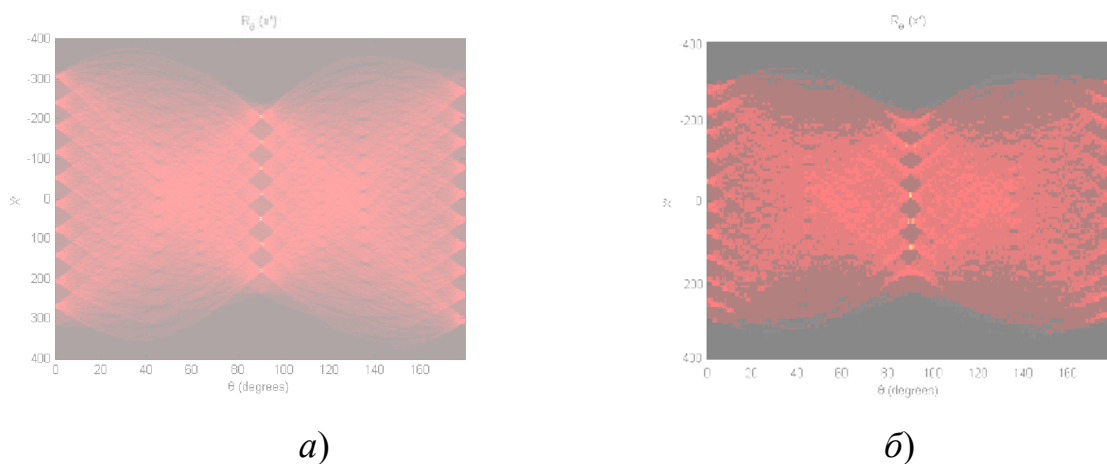
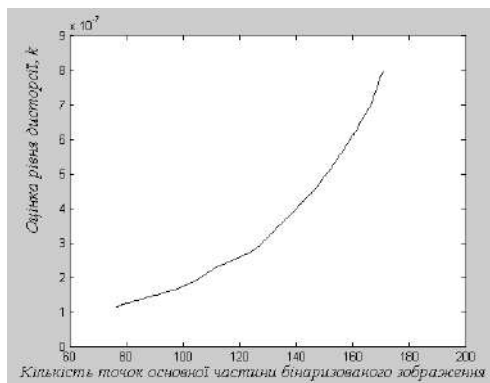
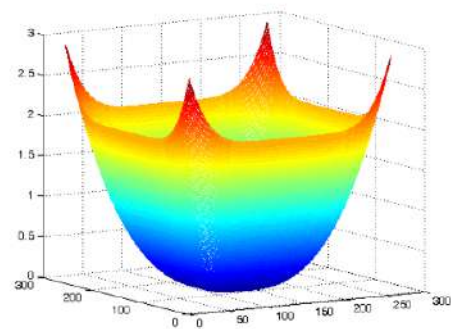


Рис. 2.6. Результати застосування перетворення Хафа до “ідеалізованого” та спотвореного бінарних зображень, що на рис. 2.5 а і б відповідно.

Для оцінки коефіцієнта дисторсії k потрібно проаналізувати зображення, які представлені на рис. 2.5 і їх представлення в просторі Хафа. З рис. 2.6 *a* і *б* можна зробити висновок, що зі збільшенням дисторсії, що тотожно збільшенню k , точки, які представляють лінії тестового рисунка, “розмиваються” в криві. Тому, знайшовши залежність між величиною такого “розмиття” точки та коефіцієнтом k , зможемо кількісно оцінити ступінь геометричних спотворень, викликаних дисторсією. Оцінювати таку залежність можна по-різному. Пропонуємо здійснити це наступним чином. Бінаризуємо за деяким порогом зображення на рис. 2.6 (лише середню інформативну їх частину), які представляють перетворення Хафа. Експериментально встановлено, що кількість світлих елементів бінаризованого зображення пропорційна одночасно рівню “розмиття”, рівню дисторсії, а також коефіцієнту k . Таким чином, для цієї оптико-електронної системи можна побудувати залежність рівня дисторсії k від кількості точок “розмиття” бінаризованого зображення (рис. 2.7). Зауважимо, що на практиці коефіцієнт k доцільно нормувати, що дозволить проводити порівняльний аналіз об’єктів щодо дисторсії та оцінити ефективність методів усунення цих спотворень.



a)



б)

Рис. 2.7. Залежність рівня дисторсії (*a*) від кількості точок “розмиття” бінаризованого зображення 2.6 *б* та кількісна оцінка спотворень (*б*), зумовлених дисторсією.

Надалі цю залежність використовуватимемо для автоматизації калібрування цифрових камер даної оптичної системи. Зазначимо, що кожній оптичній системі властива своя залежність (рис. 2.7 а).

Підсумовуючи, виділимо основні кроки під час розв'язку задачі калібрування цифрових камер з урахуванням того, що залежність рівня дисторсії (k) від кількості точок "розмиття" бінаризованого зображення побудована заздалегідь.

Крок 1. Налаштовуємо оптико-електронну вимірювальну систему (цифрову камеру) на певний режим роботи (визначаємо віддаль від об'єкта досліджень до камери і т.п.).

Крок 2. Формуємо цифрове зображення тестового зразка (рис. 2.4 б).

Крок 3. Застосовуємо метод бінаризації зображень та метод перетворення Хафа для оцінки "розмиття" точок та визначаємо кількість "світлих" точок.

Крок 4. Знаючи кількість "світлих" точок, за графіком залежності рівня дисторсії (k) від кількості точок бінаризованого зображення визначаємо безпосередньо коефіцієнт дисторсії k (для зображення на рис. 2.4 б коефіцієнт дисторсії $k = 7 \cdot 10^{-7}$).

Крок 5. Обчислений на попередньому кроці параметр k використовуємо у виразах (2.3) для усунення геометричних спотворень, викликаних дисторсією.

Проведемо комп'ютерне моделювання розробленого методу усунення геометричних спотворень на зображеннях, зумовлених дисторсією та кількісно оцінимо його вплив на обчислення усередненого діаметру зерен металу за його металографічним зображенням. За вхідні використано зображення мікроструктури сталі 12Х1МФ з прямої ділянки головного парогону ТЕС (підрозділ 5.2 цієї роботи). Для експериментів використовували недорогі металографічні мікроскопи типу ММПО-400 (960) у поєднанні з цифровими фотоапаратами типу Canon, Nikon та Olympus. Це дало можливість сформувати ще три набори зображень з різним рівнем геометричних спотворень, зумовлених дисторсією оптичних систем.

Кількісне оцінюванні рівня дисторсії k для кожного оптичного пристрою проводилося за допомогою тестової ґратки (рис. 2.4). Це дало можливість застосувати запропонований метод (2.3) для формування нових трьох наборів зображень з уже усунутими геометричними спотвореннями. Для кожного металографічного зображення із сформованих наборів проводилося обчислення усередненого діаметра зерен за розробленим у даній роботі методом (див. підрозділ 5.2). Результати обчислень наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Результати обчислення усереднених діаметрів зерен металу із застосування запропонованого методу усунення геометричних спотворень на металографічних зображеннях.

Зображення	Усереднений діаметр зерен металу зображень з спотвореннями, мкм	Оптичний мікроскоп 1 ($k = -10^{-7}$)		Оптичний мікроскоп 2 ($k = -5 \cdot 10^{-8}$)		Оптичний мікроскоп 3 ($k = -10^{-8}$)	
		Усереднений діаметр зерен металу для зображень з усунутими спотвореннями, мкм	Відносна похибка, %	Усереднений діаметр зерен металу для зображень з усунутими спотвореннями, мкм	Відносна похибка, %	Усереднений діаметр зерен металу для зображень з усунутими спотвореннями, мкм	Відносна похибка, %
2,5pr.bmp	29,9	28,1	6	28,1	5,9	28,7	3,9
17pr.bmp	24,3	23,6	2,7	23,7	2,5	23,7	2,4
33pr.bmp	29,7	27	9,2	24,4	8,9	27,1	8,7
Усереднене значення похибок			5,9		5,77		5

Проаналізуємо результати, які представлені у таблиці 2.1, на прикладі зображення 2,5pr.bmp. Усереднений діаметр зерен металу без усунення геометричних спотворень, які вносить оптична система, рівний 29,9 мкм (рис. 5.11 підрозділу 5.2 цієї роботи). Для зображення, яке сформовано на іншому оптичному мікроскопі з дисторсією $k = -10^{-7}$ та щодо якого застосовано запропонований метод усунення геометричних спотворень, усереднений діаметр зерен металу рівний 28,1 мкм. Таким чином, застосування розробленого методу призводить до підвищення точності обчислень на 6% для даного зображення. Обчислення усереднених діаметрів зерен металу для інших металографічних зображень, які були сформовані на оптичному мікроскопі 1 з

дисторсією $k = -10^{-7}$ та щодо яких також було застосовано розроблений метод усунення геометричних спотворень, показало усереднене підвищення точності обчислень на 5,9%. Для інших оптичних систем з рівнем дисторсії $k = -5 \cdot 10^{-8}$ та $k = -10^{-8}$ отримано підвищення точності вимірювань усереднених діаметрів зерен на 5,77% та 5% відповідно. Природно, що чим вища якість оптичної системи, тим менше спотворень вона вносить і тим меншим буде ефект від використання розробленого методу. Проведені експериментальні дослідження з використанням наявних оптичних систем показали, що запропонований метод забезпечує підвищення точності вимірювань мінімум на 5%.

Отже, за описаним підходом розроблено метод калібрування цифрових камер [34, 49]. Основна його перевага перед відомими методами [161] в тому, що можна автоматизувати процес усунення геометричних спотворень, які спричинені оптичними системами. Найдоцільніше використовувати цей метод у вимірювальних системах, оскільки його застосування підвищує точність метричних вимірювань. Розроблений метод має доволі широке поле застосувань. Для прикладу, експериментально встановлено, що навіть для зображення 256x256 пікселів, яке сформоване недорогою веб-камерою, геометричні спотворення становлять декілька пікселів (рис. 2.7 б), але для випадку метричних вимірювань це є суттєвим. Одним з можливих шляхів подальшого розвитку запропонованого підходу є покращання алгоритму бінаризації тестового зображення – ґратку тестового зображення (рис. 2.4 а) виділяти не двома, а однією лінією (рис. 2.5 а). Це сприятиме додатковому підвищенню точності калібрування цифрових камер.

2.2. Сегментація складноструктурованих зображень

Як уже зазначалося, велика кількість різноманітних металоконструкцій у багатьох народного господарства вже відслужили свій термін експлуатації або близькі до його завершення. Ведеться розробка нових матеріалів, постійно зростають вимоги до їх якості. В обох випадках є необхідність моніторити стан

матеріалу, тобто його механічні властивості. В першому випадку контроль дає відповідь на запитання стосовно безпечного використання виробу, у другому випадку – чи відповідає продукція поставленим вимогам щодо якості [33].

Основні підходи до оцінювання стану та якості матеріалу у цих двох випадках полягають у визначенні вмісту структурних і фазових складових, їх метричних характеристик, кількості, взаємного розташування. Взаємозв'язок параметрів мікроструктури сплаву з його фізичними та механічними властивостями в кількісній формі, формує простий і зрозумілий метод контролю цього матеріалу. Зауважимо, проведення такого аналізу на рівні мікроструктури візуально та вручну є дуже складним, а часом і не можливим процесом, тому це зумовлює необхідність розроблення та використання автоматизованих систем обробки і аналізу металографічних зображень для отримання числової оцінки взаємозв'язку “хімічний склад – структура – властивості”. Серед найбільш відомих програмних продуктів, які вирішують задачі цього напрямку, слід виділити системи, які розроблені фірмами SIAMS [5], PACE Technologies [195], ВідеоТест [189] та ін. Здебільшого у цих системах під час обробки та аналізу зображень є наявним крок, під час якого з вхідного напівтонового чи кольорового металографічного зображення формують бінарне і на основі нього визначають геометрію шуканих об'єктів, фрактальну розмірність тощо. Цей етап є найбільш відповідальним у дослідженні мікроструктури матеріалів, оскільки від коректності його проведення залежить точність отриманих результатів в цілому. Розглянемо задачу визначення оптимального порогу при формуванні бінарного зображення з напівтонового.

Проведемо короткий огляд деяких відомих підходів до порогового опрацювання зображень. При бінаризації зображення інтенсивність кожного пікселя $L(i, j)$ порівнюється з пороговим значенням інтенсивності L_T , яке може бути постійним для всього зображення чи адаптивним, тобто змінюватися в залежності від властивостей локального околу. Якщо значення інтенсивності пікселя більше за значення порогу, тоді на бінарному зображенні відповідний піксель буде представлений як “білий”, в іншому випадку – “чорний”. При

такому перетворенні важливим є правильний вибір порогового рівня, оскільки він визначально впливає на формування бінарного зображення, а отже і на результати його подальшого аналізу. На рисунку 2.8 представлено результати (б, в та г) обробки вхідного зображення (а) за використання різних порогових значень. Сформовані в результаті такого опрацювання зображення рис. 2.8 б, в, г є різними, результати їх аналізу теж будуть відрізнятися. Питання вибору порогу є актуальним у багатьох задачах, зокрема, при фрактальному аналізі металографічних та фрактографічних зображень, коли для обчислення фрактальних розмірностей необхідно використовувати бінарні зображення [228]; подібні проблеми виникають і при вимірюванні розмірів зерен [229], де їх межі представляються у бінарному вигляді тощо. Це ще раз доводить актуальність задачі вибору оптимального порогового рівня при бінаризації зображень.

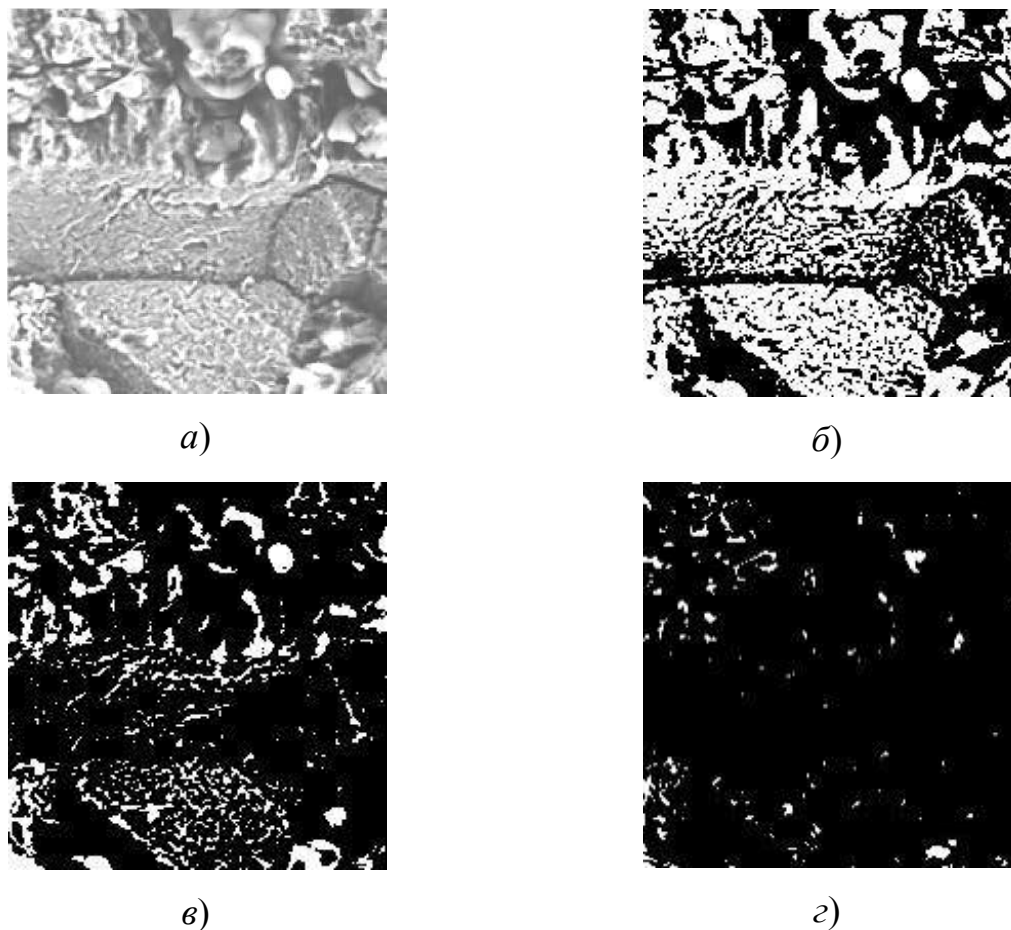


Рис. 2.8. Опрацювання вхідного зображення (а) глобальним пороговим методом при різних значеннях порогу: $L_T = 0,3$ (б), $L_T = 0,5$ (в), $L_T = 0,7$ (г).

Загалом усі методи бінаризації за способом побудови порогової поверхні L_T поділяються на дві групи: методи локальної та глобальної бінаризації. Порогова поверхня L_T представляє собою матрицю, розміри якої співпадають з розмірами оброблюваного зображення. Кожен елемент матриці L_T задає поріг бінаризації для відповідної комірки на напівтоновому зображенні. У глобальних методах порогової обробки порогове значення є постійним для всіх елементів зображення, у методах локальної бінаризації значення порогової поверхні змінюється від пікселя до пікселя і залежить від характеристик локального околу оброблюваного зображення [80].

Проаналізуємо деякі найбільш поширені методи порогового опрацювання напівтонових зображень. Основну увагу приділимо глобальним методам, які характеризуються більшою швидкістю опрацювання порівняно з локальними, що є актуальним для випадку обробки металографічних та фрактографічних зображень, які часто мають доволі великі розміри.

Найпростіший з методів порогової обробки полягає в поділі гистограми зображення на дві частини за допомогою єдиного глобального порогу L_T :

$$L_{bin}(i, j) = \begin{cases} 0, & L(i, j) \leq L_T; \\ 1, & L(i, j) > L_T, \end{cases} \quad (2.4)$$

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) .

Бінаризація зображення згідно виразу (2.4) здійснюється шляхом поелементного сканування зображення, при цьому кожний піксель відноситься до об'єкта або фону, залежно від того, чи перевищує інтенсивність даного пікселя значення порогу L_T чи ні. Визначення величини порогу за допомогою гистограми інтенсивностей є простим та дієвим методом у випадку, коли гистограма зображення має дві (чи більше) чітко виражені моди. Але переважно, на практиці, досліджувані складноструктуровані зображення мають

не бімодальну, а значно складнішу гістограму, тому вираз (2.4) не забезпечує потрібного результату опрацювання.

Іншим поширеним методом є метод порогової обробки на основі градієнта інтенсивності [182]. Реалізація цього підходу полягає в наступному. Спочатку обчислюємо модуль градієнту інтенсивності для кожного пікселя зображення

$$G(i, j) = \max \{ |L_i(i, j)|, |L_j(i, j)| \}, \quad (2.5)$$

де $L_i(i, j) = L(i + 1, j) - L(i - 1, j)$, $L_j(i, j) = L(i, j + 1) - L(i, j - 1)$.

Після цього обчислюємо порогове значення за виразом

$$L_T = \left(\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} L(i, j) \cdot G(i, j) \right) / \left(\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} G(m, n) \right), \quad (2.6)$$

де M, N – розміри вхідного зображення.

Результат опрацювання представлено на рис. 2.9.

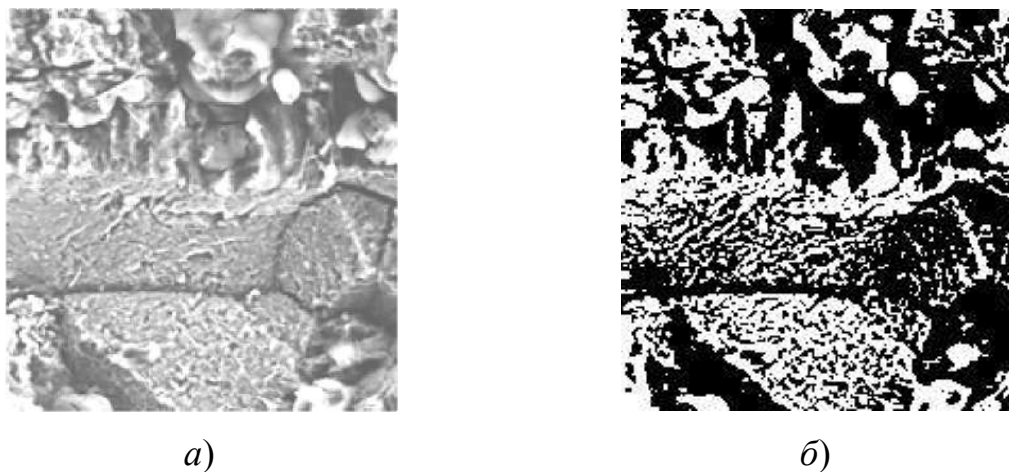
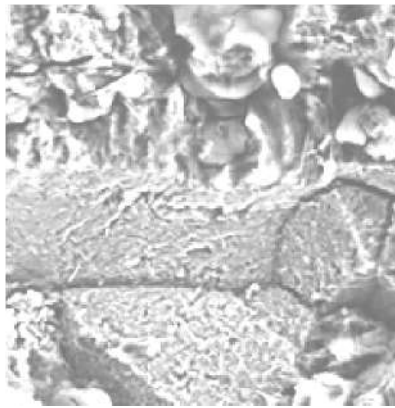
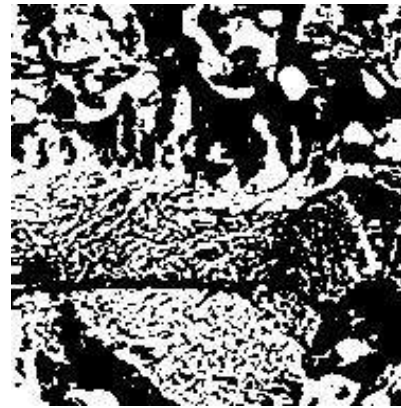


Рис. 2.9. Реалізація методу порогової обробки на основі градієнта інтенсивності: *a* – вхідне зображення, *б* – результат обробки розглянутим методом.

Серед найбільш вживаних методів глобальної бінарizaції слід виділити метод Отсу [202] (рис. 2.10).



a)



б)

Рис. 2.10. Обробка вхідного зображення (*a*) методом Отсу (*б*).

Цей метод для обчислення порогу бінаризації використовує гістограму зображення. Порогове значення за цим методом обчислюється так, щоб зробити мінімальною середню помилку бінаризації. Таким чином, обчислене таким чином порогове значення є оптимальним з точки зору мінімуму помилки бінаризації [202].

2.3. Метод бінаризації зображень з використанням оптимального порогу

В результаті проведеного аналізу відомих методів порогової обробки можна зробити висновок, що бінаризація є найкращою у тому випадку, коли на опрацьованому зображенні відображатимуться всі деталі вхідного напівтонового зображення. Тобто, вхідне напівтонове та результуюче бінарне зображення мають бути максимально візуально схожими. Ця концепція є основою розробленого методу [80]. Для цього вхідне напівтонове зображення перетворюють у бінарне згідно виразу (2.4), використовуючи всі можливі значення порогу L_T із заданого діапазону. Далі для кількісної оцінки подібності вхідного напівтонового та бінарного зображень використаємо коефіцієнт кореляції k :

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (L(i, j) - \bar{L}) \cdot (L_{bin}(i, j) - \bar{L}_{bin})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (L(i, j) - \bar{L})^2 \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (L_{bin}(i, j) - \bar{L}_{bin})^2 \right)}}, \quad (2.7)$$

де $L(i, j)$, $L_{bin}(i, j)$ – інтенсивності елементів вхідного та бінарного зображень в точці з координатами (i, j) відповідно; \bar{L} , \bar{L}_{bin} – середньоарифметичні значення інтенсивностей вхідного та бінарного зображень, які обчислюються за виразами відповідно

$$\bar{L} = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M L(i, j), \quad (2.8)$$

$$\bar{L}_{bin} = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M L_{bin}(i, j). \quad (2.9)$$

Зазначимо, що при розробці даного методу для кількісної оцінки подібності вхідного напівтонового та бінарного зображень пропонувалося використовувати також інші метрики, зокрема, на основі кількісної оцінки візуальної якості [87], але вони потребували модифікації з точки зору опрацювання бінарних зображень.

В результаті проведених обчислень отримаємо залежність між коефіцієнтами кореляції (2.7) та відповідними пороговими рівнями L_T (рис. 2.11). Зазначимо, що ця залежність сформована для зображення, яке наведене на рис. 2.8 а. Внаслідок експериментальних досліджень встановлено, що для інших зображень такі залежності будуть аналогічними.

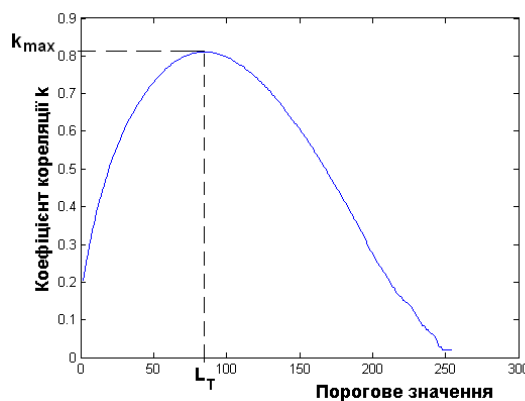


Рис. 2.11. Залежність коефіцієнту кореляції k від порогового рівня L_T .

Таким чином, із сказано вище та рисунку 2.11 слідує, що оптимальним у методі бінаризації буде таке порогове значення L_T , яке забезпечує максимум коефіцієнта кореляції k у виразі (2.7), тобто максимальну подібність вхідного напівтонового та бінарного зображень. Результати комп'ютерної реалізації розробленого методу представлені на рис. 2.12.

Комп'ютерне моделювання розробленого методу показало, що аналогічні результати забезпечує один з найбільш відомих підходів до бінаризації – метод Отсу [202].

Отже, розроблений метод бінаризації напівтонових зображень з використанням оптимального порогу, який обчислюється із застосуванням функції кореляції, за ефективністю не поступається відомим методам глобальної бінаризації, зокрема, методу Отсу [80].

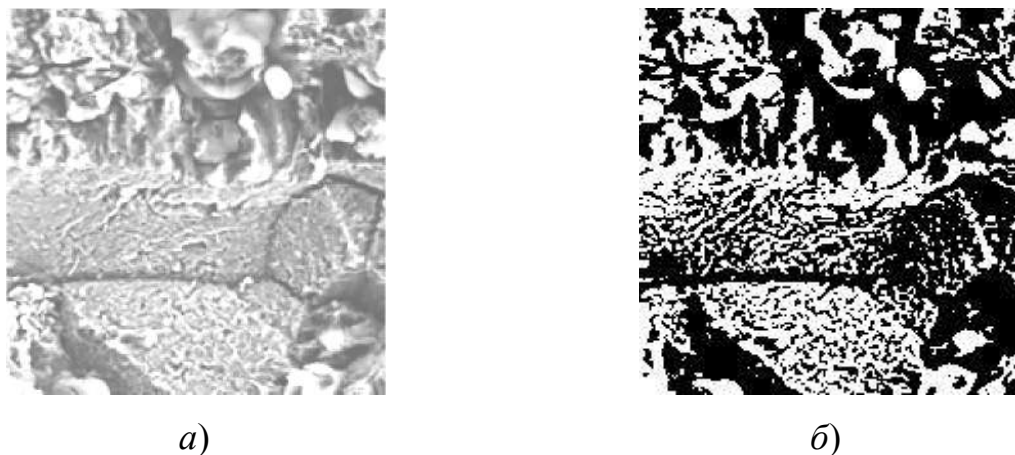


Рис. 2.12. Результати бінарного опрацювання зображення з використанням кореляційної функції: *a* – вхідне напівтонове зображення; *б* – результат застосування запропонованого методу [80].

Зауважимо, що ефективність 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 суттєвих переваг запропонованого методу полягає в усуненні суб'єктивного фактору при пороговому опрацюванні зображень. Це дає можливість порівнювати результати аналізу металографічних зображень,

отриманих, зокрема, за різних умов освітлення. Розроблений метод [80] буде корисним при вирішенні багатьох задач, зокрема, аналізі металографічних та фактографічних зображень, при обчисленні їх фрактальних розмірностей, виділенні країв, геометричному аналізі меж зерен тощо.

2.4. Модифікація методу адаптивної бінарizaції зображень

В різноманітних галузях існують певні типи прикладних задач, які найбільш ефективно можуть бути вирішені за допомогою методів та алгоритмів обробки зображень. Як приклад можна навести такі галузі – неруйнівний контроль, дистанційне безконтактне вимірювання, автоматизоване управління різноманітними технологічними процесами, візуальний контроль та інші. В свою чергу, при вирішенні цих задач виникає потреба у виявленні країв об'єктів зображення. Тобто потрібно локалізувати такі ділянки, які містять деякий перепад інтенсивностей, лінії дотику об'єктів і т.п. Найбільш часто для цього використовують бінарizaцію по порозу (рис. 2.13 б), різноманітні засоби виділення перепадів інтенсивностей такі як оператори Собеля (рис. 2.13 в), Робертса, Превіт та ін. Перевагою цих методів є проста програмна реалізація та висока швидкодія [1]. Спільний недолік методів полягає в тому, що у них недостатньо враховуються особливості локальних околів. Це призводить до похибок у виділенні країв об'єктів зображення та неприйнятності застосування одержаних результатів при вирішенні багатьох практичних задач.

Метод бінарizaції за порозом рівня інтенсивності детально розглядався у підрозділах 2.2 та 2.3 даної роботи. У багатьох випадках за порогове значення L_T приймають середню інтенсивність всіх елементів зображення \bar{L} , тобто $L_T = \bar{L}$. Параметр \bar{L} обчислюють за виразом (2.8).

Обчислене середньоарифметичне значення інтенсивності елементів зображення \bar{L} використовують як порогову величину при бінарizaції на півтонового зображення

$$L_{bin}(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{при } L(i, j) \leq \bar{L}; \\ 0, & \text{при } L(i, j) > \bar{L}. \end{cases} \quad (2.10)$$

Коли вхідне напівтонове зображення має складну структуру та містить багато малорозмірних об'єктів інтересу, то розглянуті методи глобальної бінаризації не забезпечують потрібної детальності. Більш ефективними у застосуванні є адаптивні методи бінаризації. Їх суть полягає у визначенні порогового значення інтенсивності для кожного елемента зображення на підставі аналізу особливостей локальних околів. До цих особливостей слід віднести значення інтенсивностей пікселів, їх кількісний склад, взаємне розташування тощо. Це дозволяє при проведенні адаптивної бінаризації забезпечувати підвищену детальність, що є важливим аспектом при подальшому аналізі таких зображень.

Відомий метод бінаризації, в основу якого покладено метод визначення порогового значення на підставі статистичного аналізу блоків зображення [64]. Основний недолік цього методу полягає в тому, що на обробленому зображенні проявляється небажана блочна структура (рис. 2.13 б). В даній роботі пропонується модифікація цього методу, яка полягатиме в усуненні цього недоліку [84]. Розглянемо коротко запропоновану модифікацію методу.



Рисунок 2.13. Результати комп'ютерного моделювання розробленого та відомого методів: а) вхідне зображення; б) обробка вхідного зображення відомим пороговим методом [64]; в) обробка вхідного зображення запропонованим методом [84] при розмірах локальної апертури $m \times n = 3 \times 3$ та $\alpha_1 = 0,6$, $\alpha_2 = 0,4$.

Для локального околу зображення L з розмірами $n \times m$ і центром в елементі з координатами (i, j) обчислюємо середнє значення інтенсивностей \bar{L}

$$\bar{L}(i, j) = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{a=-\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} \sum_{b=-\lfloor \frac{m}{2} \rfloor}^{\lfloor \frac{m}{2} \rfloor} L(i+a, j+b) \quad (2.11)$$

та середньоквадратичне відхилення значень інтенсивностей елементів околу $\sigma(i, j)$ згідно виразу

$$\sigma^2(i, j) = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{a=-\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} \sum_{b=-\lfloor \frac{m}{2} \rfloor}^{\lfloor \frac{m}{2} \rfloor} (L(i+a, j+b) - \bar{L}(i, j))^2. \quad (2.12)$$

Порогове значення інтенсивності визначаємо за виразом:

$$P(i, j) = \alpha_1 \cdot \bar{L}(i, j) + \alpha_2 \cdot \sigma(i, j), \quad (2.13)$$

де α_1 та α_2 – регуляризаційні коефіцієнти бінаризації.

Обчислення за виразами (2.11)–(2.13) проводяться для кожного елемента $L(i, j)$ вхідного зображення L . Далі для отримання результуючого зображення використовується вираз (2.10), у якому за параметр \bar{L} буде використовуватися обчислене порогове значення інтенсивності $P(i, j)$ (2.13).

Основні переваги запропонованого модифікованого методу [84] полягають в усуненні блочної структури на результуючому зображенні та можливості його адаптації стосовно різних класів зображень. Один із шляхів вдосконалення запропонованого методу полягає в обчисленні регуляризаційних коефіцієнтів α_1 та α_2 на основі аналізу гістограми локальних околів зображення. Це дозволить через врахування особливостей локальної структури підвищити ефективність вирішення задачі виділення країв об'єктів зображення.

2.5. Ітераційний метод статистичної сегментації

Задача аналізу візуальних даних неруйнівного контролю у різноманітних галузях вимагає локалізації об'єктів інтересу. Це можливо зробити за

допомогою методів бінаризації, тому у попередніх підрозділах дисертаційної роботи досліджувалися питання бінарної сегментації. Одне з ключових питань, яке вирішується при реалізації цих методів, полягає в обчисленні такого порогового значення інтенсивності, яке забезпечить найкращу локалізацію об'єктів інтересу. Другим важливим аспектом при реалізації бінарної сегментації є швидкодія. Методи глобальної сегментації вимагають менше часу для своєї реалізації, оскільки вони мають меншу обчислювальну складність. Вибір глобального чи локального методу сегментації суттєво залежить також від класу зображення, його текстури, вигляду гістограми тощо.

Існує декілька основних видів сегментації – за яскравістю, контурна, текстурна, по формі [1, 131]. Вибір того чи іншого виду сегментації, знову ж таки, залежить від поставленої задачі та вхідних даних. Припустимо, що предметом нашого дослідження є зображення, які містять об'єкт зацікавлення з деяким рівнем інтенсивності на якомусь фоні. Для прикладу, це можуть бути зображення з електронного мікроскопа, рентгенографічні зображення зварних швів, зображення систем машинного зору і т.п. Для такого типу зображень при локалізації об'єкту на деякому фоні доцільно використовувати яскравісну ознаку. Така багатоплановість задач змушує шукати нові підходи до сегментації за яскравістю з метою підвищення їх ефективності.

Порогова сегментація є одним з найбільш вживаних підходів до локалізації об'єктів [131]. Доволі часто зображення мають складну структуру та містять окрім фону та об'єкту інтересу ще інші складові, тому при локалізації об'єктів інтересу недостатньо використовувати сегментацію з одним порогом. Для зображення L , яскравість об'єктів інтересу якого належить обмеженому діапазону $[L_1, L_2]$, операція сегментації реалізовується формуванням нового зображення за правилом

$$L_{segm}(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } L_1 \leq L(i, j) \leq L_2, \\ 0, & \text{в інших випадках.} \end{cases} \quad (2.14)$$

Таким чином, окрім переваги, що полягає у простоті реалізації, порогові методи мають ряд недоліків, які накладають суттєві обмеження на його

використання. Серед них треба виділити наступні. Діапазони інтенсивностей об'єкта та фону не повинні перетинатися, оскільки в іншому випадку це призводить до некоректної обробки. Описаному підходу не властива адаптивність, що не дає йому можливості враховувати особливості локальних околів і, в результаті, негативно впливає на якість обробки. Тому існує ряд методів, які є більш досконалішими за описаний з точки зору адаптивності [65, 131].

Розглянемо один з відомих методів [65, 184], де сегментація зображення базується на принципі статистичного аналізу інтенсивностей пікселів зображення, за результатами якого відбувається визначення порогу.

Основні кроки реалізації даного методу наступні:

1. Вхідне зображення L з розмірами $N \times M$ ділиться на менші фрагменти з розмірами $k \times l$. Зауважимо, що бажано, щоб розмірність фрагментів була кратною трьом, оскільки вони надалі поділяються на 9 рівних областей з розмірами $(k/3) \times (l/3)$. Надалі кожному пікселю з фрагменту $k \times l$, в залежності від того, до якої області $(k/3) \times (l/3)$ він відноситься, буде присвоєний відповідний коефіцієнт k .

2. Для кожного з цих фрагментів обчислюються середнє значення інтенсивності $\bar{L}(k,l)$ та дисперсія $D(k,l)$.

3. Обчислені на попередньому кроці значення $\bar{L}(k,l)$ та $D(k,l)$ утворюють відповідні матриці з розмірами $p \times q$, де $p = N/k$ та $q = M/l$.

4. На цьому кроці відбувається обчислення порогу для кожного пікселя за виразом

$$T = \bar{L}(i, j) + \alpha \cdot D(i, j), \quad (2.15)$$

де α – деяка константа, яка початково рівна 0,1;

$$\begin{aligned} \bar{L}(i, j) = & k1 \cdot \bar{L}(k-1, l-1) + k2 \cdot \bar{L}(k-1, l) + k3 \cdot \bar{L}(k-1, l+1) + \\ & k4 \cdot \bar{L}(k, l-1) + k5 \cdot \bar{L}(k, l) + k6 \cdot \bar{L}(k, l+1) + \\ & k7 \cdot \bar{L}(k+1, l-1) + k8 \cdot \bar{L}(k+1, l) + k9 \cdot \bar{L}(k+1, l+1) \end{aligned} \quad (2.16)$$

та

$$\begin{aligned}
D(i, j) = & k1 \cdot D(k-1, l-1) + k2 \cdot D(k-1, l) + k3 \cdot D(k-1, l+1) + \\
& k4 \cdot D(k, l-1) + k5 \cdot D(k, l) + k6 \cdot D(k, l+1) + \\
& k7 \cdot D(k+1, l-1) + k8 \cdot D(k+1, l) + k9 \cdot D(k+1, l+1),
\end{aligned}
\tag{2.17}$$

$\bar{L}(k, l)$ і $D(k, l)$ – математичне сподівання та дисперсія інтенсивності для відповідного фрагменту, які обчислені на кроці 2;

$k1, \dots, k9$ – числові коефіцієнти, значення яких змінюються в залежності від того, в яку частину фрагменту (k, l) попадає заданий піксель.

5. Результат сегментації L_{segm} згідно цього підходу обчислюється за виразом

$$L_{segm}(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } L(i, j) \geq T, \\ 0, & \text{в інших випадках.} \end{cases}
\tag{2.18}$$

Проведемо аналіз комп'ютерної реалізації вищеописаних відомих методів.



Рис. 2.14. Вхідне зображення.

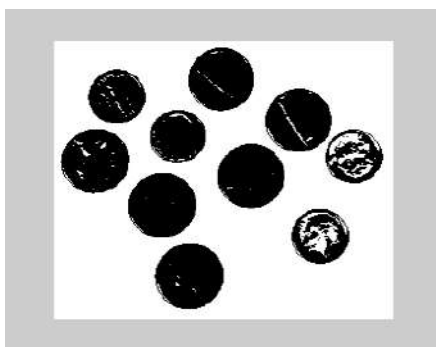


Рис. 2.15. Вхідне зображення, оброблене методом порогової сегментації за виразом (2.14) при $L_1 = 100$ та $L_2 = 224$.

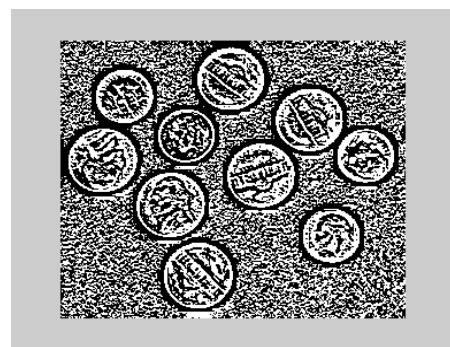


Рис. 2.16. Вхідне зображення, оброблене відомим методом статистичної сегментації [65] при розмірах фрагменту 3×3 .

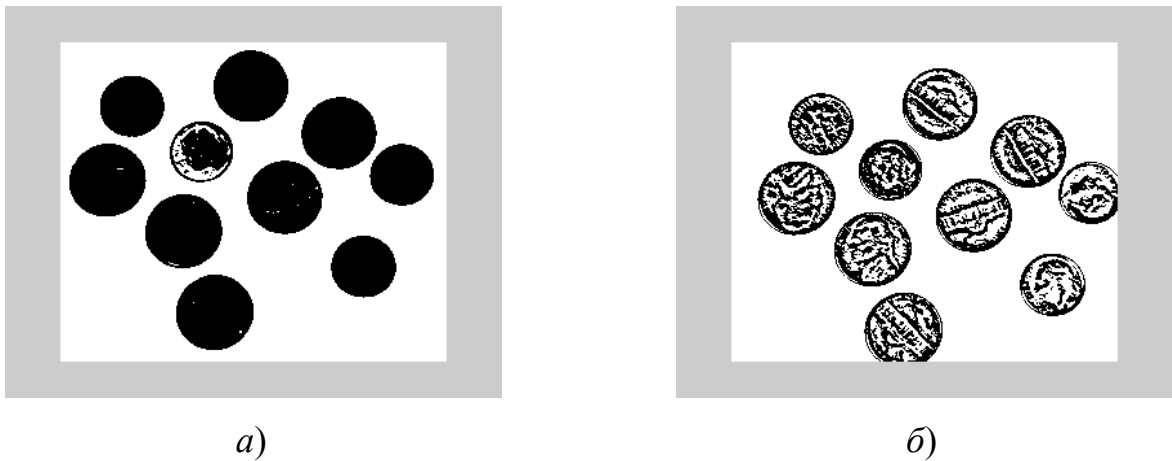


Рис. 2.17. Вхідне зображення, оброблене: *a)* методом статистичної сегментації [65] при розмірах фрагменту 36×36 ; *б)* запропонованим методом двохетапної статистичної сегментації [33].

На рис. 2.14 представлено вхідне зображення. Обробка цього зображення за методом порогової сегментації дозволяє виділити ізольовані об'єкти, якими у даному випадку є монети (рис. 2.15). Застосування відомого методу статистичної сегментації, в залежності від вибраного розміру фрагменту (k, l) , дозволяє локалізувати або об'єкти (рис. 2.17*a*), або лише їх структуру (рис. 2.16) без чіткого виділення самих об'єктів.

Аналіз описаних методів сегментації дозволив виявити ряд їх недоліків. Серед них слід виділити наступні. Якщо вхідне зображення містить об'єкти зацікавлення різних розмірів, або іншими словами, розміри об'єктів та розміри фрагментів (k, l) не є співмірними, тоді на зображенні, обробленому методом статистичної сегментації, проявляються спотворення у вигляді блочної структури. Другий недолік цього методу полягає в тому, що у випадку наявності різнорозмірних об'єктів найбільш ефективно, з точки зору детальності, оброблятимуться об'єкти, розміри яких будуть співмірні з розмірами фрагментів обробки (k, l) .

Для усунення вищезазначених недоліків розроблено модифікований метод статистичної сегментації [33]. У цьому методі взамін блочної обробки запропоновано ковзну реалізацію. Всі кроки модифікованого методу є

аналогічними до відомого методу статистичної сегментації за винятком того, що блоки обробки (k,l) формуються у кожній точці зображення (k,l) . Це дозволяє усунути небажану блочну структуру на результуючому зображенні.

Другий аспект модифікації торкається підвищення детальності обробки. Як було зазначено вище, сегментація буде ефективною, коли розміри ковзного блоку обробки (k,l) та об'єкту будуть співмірними. Але оскільки на зображенні присутні різнорозмірні об'єкти, то у модифікованому методі запропоновано проводити ітераційну обробку. Кожна ітерація повинна проводитися з такими розмірами ковзного вікна (k,l) , які співпадатимуть з розмірами об'єктів зацікавлення. Особливістю ітераційного підходу є те, що на першій ітерації сегментації підлягають найбільші об'єкти зацікавлення (рис. 2.17а). На другому кроці сегментуються деталі, які містяться на уже виділених при попередній ітерації об'єктах. Тому на другій ітерації обробці підлягатимуть лише ті елементи вхідного зображення (рис. 2.14), які були виділені на попередньому кроці.

Так для сегментації зображення на рис. 2.14 достатньо двох ітерацій. На першій ітерації розмір ковзного вікна має бути співмірним з розмірами об'єктів у вигляді монет, а на другій ітерації – з розмірами деталей на монетах. Це дозволить виділити монети та зображені на них деталі. Результат цієї обробки представлено на рис. 2.17б.

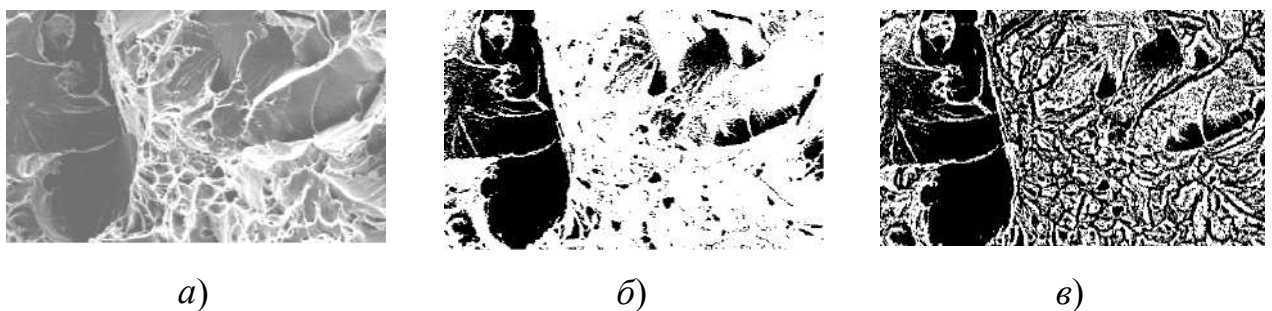


Рис. 2.18. Локалізація структурних складових на фрактографічному зображенні (а) через застосування відомого методу (б) статистичної сегментації [65] та запропонованого (в) методу двохетапної статистичної сегментації [33].

Розроблений метод [33] можна також застосовувати для опрацювання зображень різних класів, зокрема, для локалізації структурних складових на фрактографічних зображеннях (рис. 2.18). Як видно з рисунку 2.18 в, запропонований метод забезпечує суттєво краще виділення структурних складових зламу у порівнянні із відомим підходом (рис. 2.18 б).

Проведене дослідження дозволяє зробити наступний висновок. Запропонований модифікований метод статистичної сегментації [33] є більш складним у програмній реалізації та вимагає більших часових затрат через ітераційність у реалізації. Але на відміну від відомих методів даного класу він дозволяє проводити ефективнішу обробку з точки зору забезпечення реєстрації підвищеної детальності зображень об'єктів різних розмірів.

2.6. Модифікація методу Канні для виділення країв об'єктів зображення

Окрім методів сегментації, які розглядалися у попередніх підрозділах дисертаційної роботи, центральне місце при обробці інформації в системах неруйнівного контролю займає задача визначення країв об'єктів зображення. Від точності вирішення цієї задачі залежатиме в подальшому достовірність аналізу та розпізнавання зазначених об'єктів. Розглянемо основні підходи до вирішення цієї задачі.

Основними вимогами, які ставляться до методів даного класу, є забезпечення обчислювальної простоти, нечутливості до шуму, формування точних країв об'єктів. Методам виділення країв присвячено багато робіт [116, 120, 138, 166, 188, 207, 224], спільною для яких є двохетапна структура запропонованих підходів. На першому етапі обчислюють кількісну ознаку краю, а на другому приймають рішення - належить чи ні йому елемент зображення. Одними з найбільш вживаних підходів до вирішення цієї задачі є метод Превітт [207], Собела, Робертса та Канні [224]. Ці методи володіють різними чутливістю та обчислювальною складністю.

Експериментальні дослідження показали, що найбільш прийнятним при визначенні форми об'єктів в ряді систем машинного зору є метод Канні [224]. Цей метод реалізує операцію виділення країв об'єктів зображення. Він складається з декількох етапів – формування фільтра лапсасіан-гаусіана, згортки зображення із цим фільтром, бінаризації та потоншення. Суть методу полягає в аналізі перепадів інтенсивностей локальних ділянок. Перепади інтенсивностей визначаються за допомогою фільтрації по кожній з осей одновимірним фільтром лапсасіан-гаусіана. В методі Канні для класифікації перепадів на “слабі” та “сильні” використовується два пороги – нижній та верхній. “Слабкі” краї відзначаються на результуючому зображенні лише тоді, коли вони з'єднані з “сильними”. Для зображень із шумом цей метод забезпечує найкраще визначення країв в порівнянні з іншими методами та не потребує багато часових затрат. Розглянемо основні етапи даного методу на прикладі обробки зображення, представленого на рис. 2.19.



Рис. 2.19. Вхідне зображення.

Спочатку необхідно задати параметри – середньоквадратичне відхилення σ та розміри ковзних локальних апертур x і y , які будуть використані при формуванні фільтра

$$h = G(x, \sigma_1) * G'(y, \sigma_2), \quad (2.19)$$

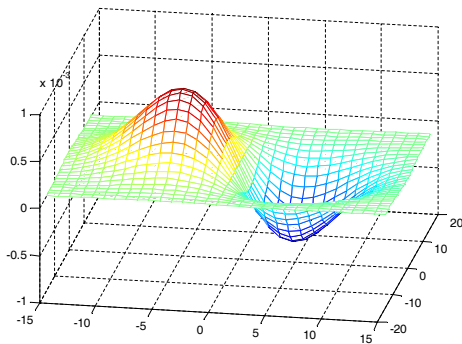
де функції $G(x, \sigma_1)$ і $G'(y, \sigma_2)$ представляють собою одновимірний розподіл Гауса та його похідну відповідно [155]

$$G(x, \sigma_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_1^2}} \text{ та } G'(y, \sigma) = -\frac{y}{\sigma^2} G(y, \sigma_1). \quad (2.20)$$

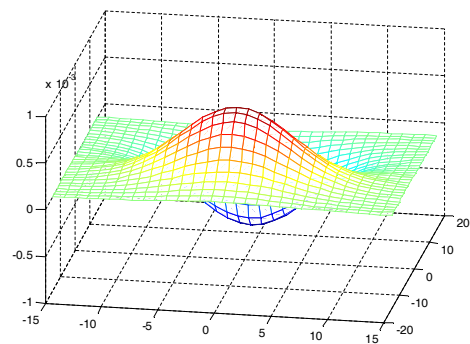
Значення середньоквадратичного відхилення σ задається оператором та повинно бути адекватним до розмірів досліджуваних об'єктів.

Графік функції (2.19) у тривимірному просторі, в залежності від того, в якому напрямку буде відбуватися згортка, представлений на рисунку 2.20.

Другий етап полягає в реалізації згортки вхідного зображення (рис. 2.19) з фільтром (2.19) по напрямку x та y , в результаті чого отримуємо зображення I_x (рис. 2.21 а) та I_y (рис. 2.21 б) відповідно.



а) для згортки по напрямку x



б) для згортки по напрямку y

Рис. 2.20. Графік функції (2.19) в тривимірному просторі.



а) зображення I_x , як результат згортки вхідного зображення з фільтром (2.19) по напрямку x .



б) зображення I_y , як результат згортки вхідного зображення з фільтром (2.19) по напрямку y .

Рис. 2.21. Згортки вхідного зображення з фільтром (2.19).



Рис. 2.22. Візуалізація градієнта, обчисленого за виразом (2.21).

На основі отриманих даних I_x та I_y формуємо зображення, на якому представлена норма градієнта, обчислена за виразом

$$NVI = \sqrt{I_x^2 + I_y^2}. \quad (2.21)$$

До отриманого на рисунку 2.22 зображення норми градієнта NVI застосовується операція бінаризації згідно виразу

$$L_{bw}(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{коли } NVI(i, j) \geq level; \\ 0, & \text{коли } NVI(i, j) < level, \end{cases} \quad (2.22)$$

де L_{bw} – результуюче бінарне зображення;

$level$ – поріг бінаризації, який обчислюється за виразом

$$level = k \cdot (NVI_{\max} - NVI_{\min}) + NVI_{\min}, \quad (2.23)$$

де NVI_{\min} , NVI_{\max} – мінімальне та максимальне значення норми градієнта NVI ;

k – коефіцієнт, який впливає на чутливість методу виділення країв.

Для того, щоб краї виділених об'єктів були чіткими та окреслювалися тонкими лініями, стосовно бінарного зображення L_{bw} виконують морфологічну операцію потоншення.



Рис. 2.23. Результат застосування морфологічної операції потоншення стосовно бінарного зображення L_{bw} .

Зображення на рис. 2.23 представляє результат застосування методу виділення країв Канні стосовно вхідного зображення (рис. 2.19). Як було зазначено вище, метод Канні є одним з найбільш ефективних методів виділення країв об'єктів на зображенні. Проте аналіз зображення на рисунку 2.23 показує, що цей метод не є оптимальним щодо обробки зображень з різновеликими об'єктами, як наслідок – межі деяких об'єктів можуть бути не виділені в результаті проведеної обробки. Причина полягає у тому, що ковзне вікно є постійним, внаслідок чого не враховуються локальні особливості досліджуваного зображення.

В даній роботі розроблена модифікація методу Канні [77], основна ідея якої полягає в адаптації розмірів ковзного вікна обробки до локальних характеристик зображення. Іншими словами, розмір ковзного вікна обробки в кожній точці зображення залежатиме від середньоквадратичного відхилення $\sigma(i, j)$ рівнів інтенсивностей локального околу. Для реалізації цього підходу необхідно провести наступні операції. Спочатку обчислюють середньоквадратичне відхилення інтенсивностей елементів локальних околів зображення $\sigma(i, j)$ за виразом

$$\sigma(i, j) = \left(\frac{1}{mn} \sum_{a=-\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}^{n-\lfloor \frac{n}{2} \rfloor-1} \sum_{b=-\lfloor \frac{m}{2} \rfloor}^{m-\lfloor \frac{m}{2} \rfloor-1} [L(i+a, j+b) - \bar{L}(i, j)]^2 \right)^{0,5}, \quad (2.24)$$

де n, m – розміри локального околу; $\bar{L}(i, j)$ – середньоарифметичне значення інтенсивностей елементів локального околу.

Всі подальші обчислення відбуваються за наведеним вище алгоритмом. Різниця полягатиме лише у тому, що фільтр h (2.19) потрібно буде формувати для кожного локального околу, а вхідні параметри σ_1 та σ_2 для його формування обчислюватимуться за виразом (2.24). Зазначимо, що значення лінійних розмірів маски фільтра залежатимуть від величини середньоквадратичного відхилення рівнів інтенсивностей елементів локальних околів зображення $\sigma(i, j)$, що дозволяє врахувати особливості цих локальних ділянок, тобто зробити метод адаптивним.

На рис. 2.24 наведено приклади обробки зображення за модифікованим методом при різних розмірах ковзного вікна обробки.



а) ковзне вікно 3×3



б) ковзне вікно 7×7

Рис. 2.24. Приклад обробки вхідного зображення (рис. 2.19) за модифікованим методом [77].

Розроблений метод використовується також для виділення границь об'єктів на зображеннях, які характеризуються складною структурою і до яких, зокрема, відносяться металографічні та фрактографічні зображення. На рисунку 2.25 представлено результат комп'ютерного моделювання побудованого методу на прикладі деякого фрактографічного зображення.

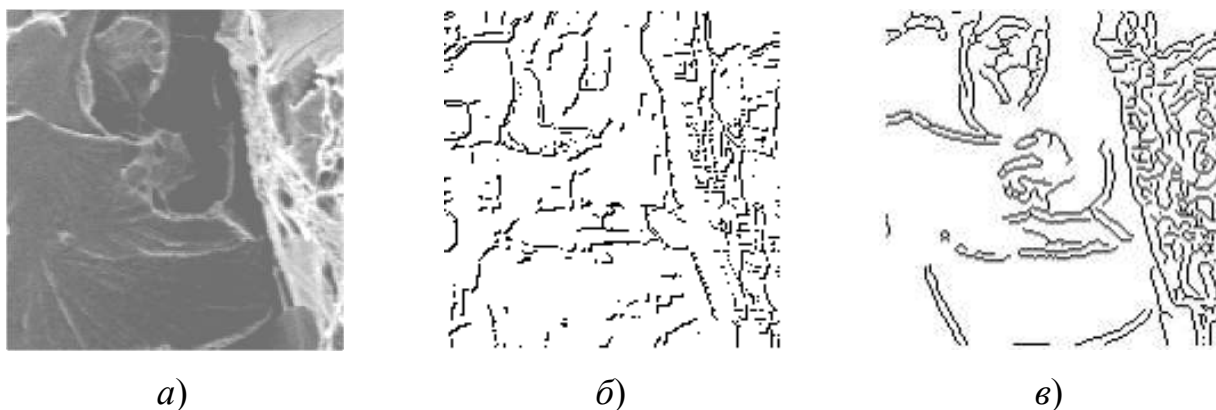


Рис. 2.25. Виділення країв об'єктів складноструктурованого зображення (а) відомим (б) та модифікованим методом.

До переваг запропонованого модифікованого методу [77] відносяться більш ефективна обробка з точки зору детальності, а саме забезпечується більш чітке виділення елементів структури. Тобто через зміну розміру ковзного околу досягається зміна детальності обробки зображення.

Недолік полягає у збільшенні часових затрат на реалізацію методу, оскільки, на відміну від відомого методу, формування фільтру h (2.19) відбувається не лише один раз для всього зображення, а для кожного локального околу зображення.

Отже, в даній роботі запропоновано модифікацію методу Канні [77], яка полягає у реалізації його адаптивності стосовно локальних околів. Такий підхід дозволяє керувати чутливістю методу, що суттєво впливає на його ефективність. Оскільки модифікований метод вимагає достатньо великих часових затрат, то подальше вдосконалення методу може стосуватися оптимізації часу його програмної реалізації.

2.7. Покращання слабоконтрастних зашумлених зображень

У попередніх підрозділах було розглянуто підходи до виділення об'єктів на зображеннях, які мають складну структуру. Такими є практично усі зображення неруйнівного контролю незалежно від його виду.

Серед найбільш важливих об'єктів контролю на таких відповідальних об'єктах та спорудах типу корпуси літаків, реакторів, газопроводи та інших є зварні з'єднання. Їх стан є визначальним для безпечної роботи цілої системи. Серед інших, найбільш часто для неруйнівного контролю та діагностування таких об'єктів використовують рентгенівський метод. Зображення досліджуваного об'єкту чи його елемента реєструється на рентгенівську плівку у вигляді радіографічного знімку, який використовується для проведення дефектоскопічного контролю. Тому важливим є формування знімка внутрішньої будови контрольованого об'єкту з високою візуальною якістю. За цим знімком проводиться аналіз на предмет виявлення дефектів. Візуальна якість рентгенівського знімка є визначальною його ефективного аналізу. В багатьох випадках розшифрування знімка проводиться дефектоскопістом вручну з використанням дефектоскопу та лупи без застосування спеціальних технічних засобів. Процес розшифрування є дуже трудомістким та вимагає від дефектоскопіста великого досвіду та уваги. Іншими словами, ефективність аналізу суттєво визначається якістю підготовки спеціаліста та його фізичного стану чи самопочуття. Часто зустрічаються випадки, коли на рентгенівських знімках міститься інформація про структуру об'єкту, яку дефектоскопіст не може виявити візуально [70].

Зважаючи на сказане, підвищення якості розшифрування рентгенівських знімків можливе через зменшення впливу людського фактору та автоматизацію аналізу рентгенографічних знімків. Для цього застосовуються, здебільшого, технології опрацювання, аналізу та розпізнавання зображень [204].

Рентгенографічні зображення об'єктів неруйнівного контролю переважно характеризуються низьким контрастом та високим рівнем шумів. Все це

приховує дійсну структуру об'єктів інтересу та робить неможливим безпосередній аналіз цих зображень. Характерною особливістю таких зображень реальних об'єктів є те, що вони містять великі ділянки з нерівномірним освітленням та з нечіткими межами. Значення інтенсивності всередині таких об'єктів змінюється відносно повільно. Це викликає труднощі при розпізнаванні та вимірюванні геометричних розмірів об'єктів на таких зображеннях. В результаті, актуальним є завдання покращання візуальної якості та опрацювання рентгенографічних зображень. В рамках цього завдання слід виділити наступні задачі – підвищення візуальної якості слабоконтрастних зашумлених зображень [148], порогове опрацювання рентгенографічних зображень та локалізація контурів на малоконтрастних та розмитих зображеннях [70, 146].

З вищесказаного слідує, що рентгенографічні зображення характеризуються низьким контрастом та високим рівнем шумів, це робить актуальною задачу підсилення контрастності таких зображень та усунення шумів. Розв'язування цієї задачі ускладнюється тим, що, здебільшого, підсилення контрастності призводить також і до підвищення рівня шумів, а їх фільтрація може призвести і до усунення корисної інформації. У роботі [148] розглянуто метод статистичної диференціації та його модифікації. Відмінною рисою цього підходу є те, що він дозволяє підвищити контраст та одночасно знизити рівень шуму на зображенні.

Іншою задачею в рамках попереднього опрацювання рентгенографічних зображень є сегментація. Ефективний розв'язок цієї задачі впливає на успішне виявлення та точність оцінювання розмірів дефектів. Автоматичні порогові методи, в більшості випадків, не дають бажаного результату. Тому вибір того чи іншого підходу до сегментації є об'єктно-орієнтованим і вимагає подальшого доопрацювання результатів дослідником в інтерактивному режимі [146].

Окрім того, що багато об'єктів на рентгенографічних зображеннях характеризуються низьким контрастом, вони ще мають розмиті межі (рис. 2.26

a). Існує багато відомих підходів до вирішення цієї задачі, але більшість із них не забезпечує стабільного результату [129].

Розглянемо модифікацію методів класичної та статистичної диференціації. Ці методи представлені у роботах [148, 204]. Метод статистичної диференціації вперше був запропонований Уоллесом [204] та реалізується за допомогою виразу:

$$L_{out}(i, j) = \alpha \cdot m + (1 - \alpha) \cdot \langle L(i, j) \rangle + (L(i, j) - \langle L(i, j) \rangle) \cdot \frac{A \cdot \sigma}{A \cdot \sigma(i, j) + \sigma}, \quad (2.25)$$

де $L(i, j)$ та $L_{out}(i, j)$ - вхідне та вихідне зображення відповідно; $\langle L(i, j) \rangle$ - зображення, розмите за деяким колом; m , σ - потрібка усереднена інтенсивність і середній розкид інтенсивності на зображенні; $\alpha \in [0, 1]$; $\sigma(i, j) = \langle (L(i, j) - \langle L(i, j) \rangle)^2 \rangle$ - середньоквадратичне відхилення інтенсивності; A - граничний коефіцієнт підсилення деталей.

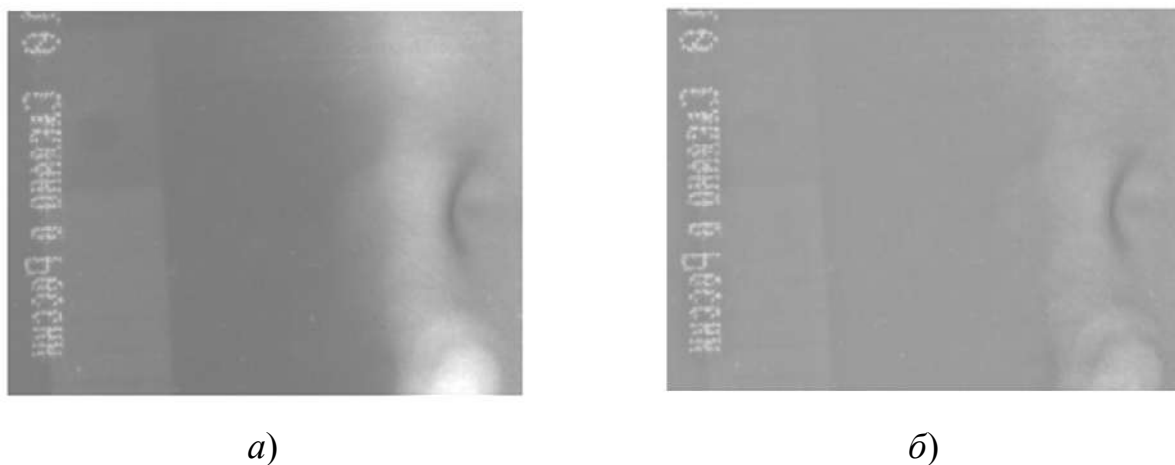


Рис. 2.26. Вихідне зображення (a) та оброблене методом Уоллеса (б).

Цей метод через вибір розміру локальної апертури опрацювання дає можливість локалізувати об'єкти з наперед відомими розмірами (рис. 2.26). При цьому можна виділити деталі $K-1$ характерних розмірів. Правильний підбір параметрів знижує рівень високочастотного шуму [148]. Досліджений підхід містить декілька параметрів, які встановлюються користувачем і вибір яких суттєво впливає на якість опрацювання зображення. Це розширює можливості

методу щодо обробки деякого конкретного зображення, але вимагає постійного переналаштовування при зміні типу вхідного зображення. Ще одним важливим недоліком цього підходу є те, що він забезпечує однакове підсилення інформативних ділянок та шумів. Слід зазначити, що використання операції згладжування за деяким локальним околom може призводити до появи подвійних границь на покращеному зображенні.

Наведені вище недоліки призвели до необхідності розробки методу багатомасштабної статистичної диференціації [148, 204]. Його суть полягає в наступному. Формується послідовність зображень $L_0(i, j)$, $L_1(i, j)$, ..., $L_k(i, j)$, причому $L_k(i, j) = \langle L_{k-1}(i, j) \rangle$, $k = 1..K$, $\langle \bullet \rangle$ - оператор згладжування, а локальні вікна $W_k < W_{k+1}$. Метод реалізується за допомогою виразу

$$L_{out}(i, j) = \alpha \cdot m + (1 - \alpha) \cdot L_K(i, j) + \sum_{k=0}^{K-1} D_k(i, j) \cdot \frac{A_k \cdot \sigma}{A_k \cdot \sigma_k(i, j) + \sigma}, \quad (2.26)$$

де $D_k(i, j) = L_k(i, j) - L_{k+1}(i, j)$ - різницеве зображення; $\sigma_k(i, j) = \langle D_k^2(i, j) \rangle$ - параметр, який характеризує розкид інтенсивностей на різницевому зображенні; A_k - параметр підсилення детальності для k -го зображення.

Результати експериментального дослідження розглянутого вище методу (2.26) представлено на рисунку 2.27.

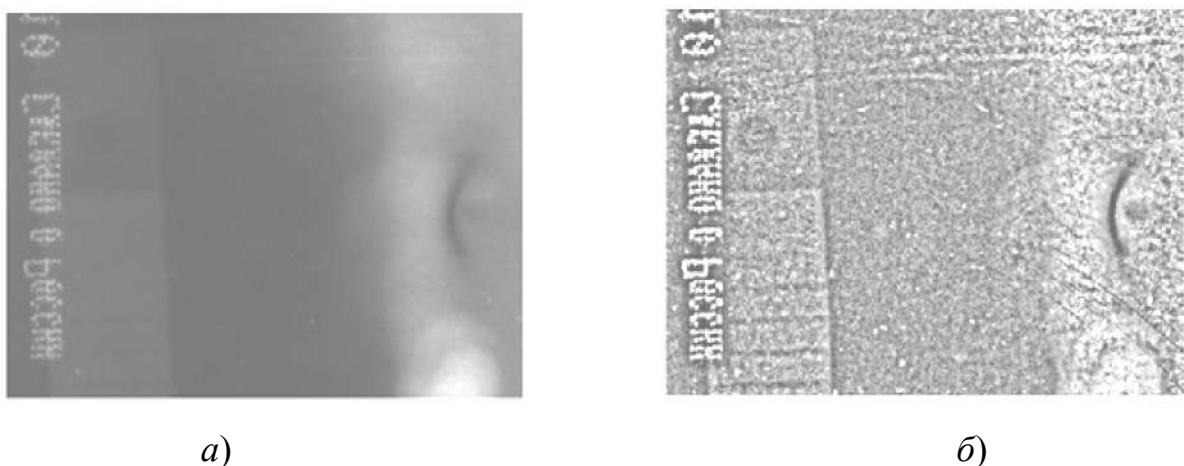


Рис. 2.27. Вихідне зображення (а) оброблене методом багатомасштабної класичної диференціації (б).

Цей підхід дозволяє ефективно підвищувати візуальну якість об'єктів, розмір яких співмірний з розміром локального околу. Тому в цьому розумінні коефіцієнт підсилення можна вважати адаптивним, оскільки він підсилює лише ці деталі зображення, які з ним співмірні. Але вони можуть бути розміщеними на ділянках, які вже є достатньо високий контраст. Експериментальні дослідження цього методу [148] показали, що коефіцієнт A_k у виразі (2.26) не достатньо враховує рівень контрасту у локальних областях, що призводить до надмірної деталізації на висококонтрастних ділянках.

Окрім того, через використання функції згладжування на висококонтрастних ділянках зображення виникають спотворення у вигляді подвійних меж або ореолів. У роботі [159] для усунення цієї проблеми запропоновано використовувати рангові алгоритми, зокрема усереднення по KNV-околу, які не призводять до розмиття границь об'єктів. Для усереднення по KNV-околу використовуються K найближчих сусідніх елементів за значенням інтенсивності:

$$KNV(L(i, j)) = \left\{ L_W(q) : \sum_{q=p}^{p+K} |L(i, j) - L_W(q)| = \min_q \right\}, \quad (2.27)$$

де $L_W(q)$ - найближчі сусідні елементів за значенням інтенсивності до елементу $L(i, j)$ у деякому локальному околі W .

Окрім згаданого KNV-околу використовують EV-окіл

$$EV(L(i, j)) = \{L_W(q) : L(i, j) - \varepsilon_V \leq L_W(q) \leq L(i, j) + \varepsilon_V\}, \quad (2.28)$$

де ε_V - деяка константа;

використовують також медіану значень елементів околу

$$MED(M) = L_{med}(r = (N_{med} + 1)/2), \quad (2.29)$$

де r , N_{med} - порядковий номер елементу у варіаційному ряді та загальна кількість елементів околу.

На рисунку 2.28 наведено результати комп'ютерної реалізації описаного вище методу з використанням усереднення за KNV-околом. Основним недоліком цього підходу є те, що він забезпечує однакове підсилення усіх

ділянок зображення. Така неадаптивність даного підходу призводить до того, що висококонтрастні ділянки зображення підсилюються надмірно.

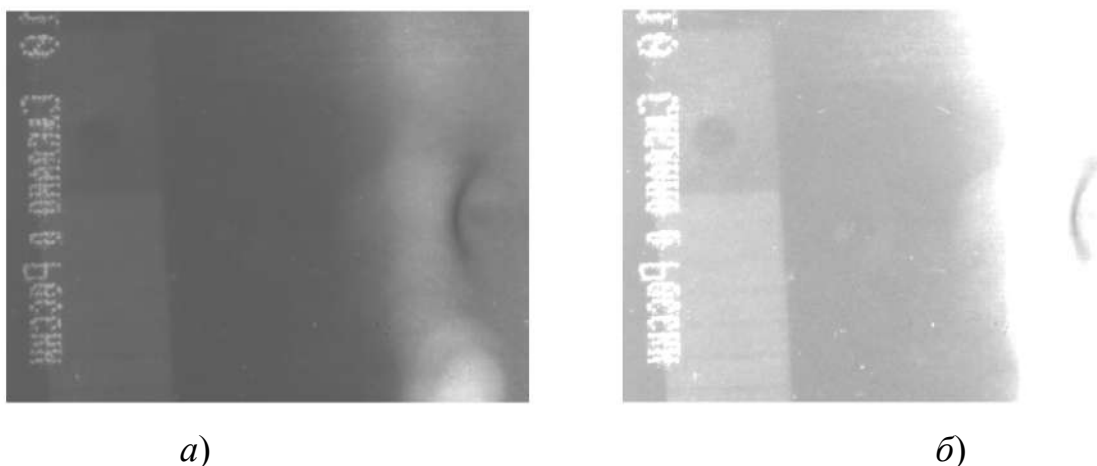


Рис. 2.28. Вихідне зображення (а) та оброблене методом багатомасштабної класичної диференціації з використанням KNV-околу (б).

Для усунення зазначеного вище недоліку у роботі запропоновано використовувати адаптивний коефіцієнт підсилення детальності зображення A_k [70]. Даний коефіцієнт повинен забезпечувати більше підсилення на слабкоконтрастних ділянках зображення та мінімальне підсилення на ділянках зображення з високим рівнем контрастності. Для кількісної оцінки локального контрасту використовується наступний вираз [174]

$$C(i, j) = \frac{|\overline{L}_1(i, j) - \overline{L}_2(i, j)|}{\overline{L}_1(i, j) + \overline{L}_2(i, j)}, \quad (2.30)$$

де

$$\overline{L}_1(i, j) = \frac{1}{n^2} \sum_{(i, j) \in W_1} L(i, j), \quad (2.31)$$

$$\overline{L}_2(i, j) = \frac{1}{m^2} \sum_{(i, j) \in W_2} L(i, j), \quad (2.32)$$

а $m=3n$, $n>1$. Області W_1 та W_2 представляють собою ковзні вікна у вигляді квадрата з центром в елементі з координатами (i, j) . Ковзне вікно W_1 розміщене всередині ковзного вікна W_2 . Для зменшення часу обчислень значень

локального контрасту за виразом (2.30) та рангових підходів (2.27-2.29) при згладжуванні використовують рекурсивні методи.

Надалі числова оцінка локального контрасту використовується для формування коефіцієнта підсилення детальності зображення

$$A_k = A_{\max} \cdot (1 - C(i, j)), \quad (2.33)$$

де A_{\max} - максимальне значення коефіцієнта підсилення.

Кінцевий вигляд виразу, який реалізує запропонований підхід, наступний

$$L_{out}(i, j) = \alpha \cdot m + (1 - \alpha) \cdot L_K(i, j) + \sum_{k=0}^{K-1} D_k(i, j) \cdot \frac{A_{\max} \cdot (1 - C(i, j)) \cdot \sigma}{A_{\max} \cdot (1 - C(i, j)) \cdot \sigma_k(i, j) + \sigma}. \quad (2.34)$$

На рисунку 2.29 показано результати комп'ютерної реалізації запропонованого підходу (2.34).

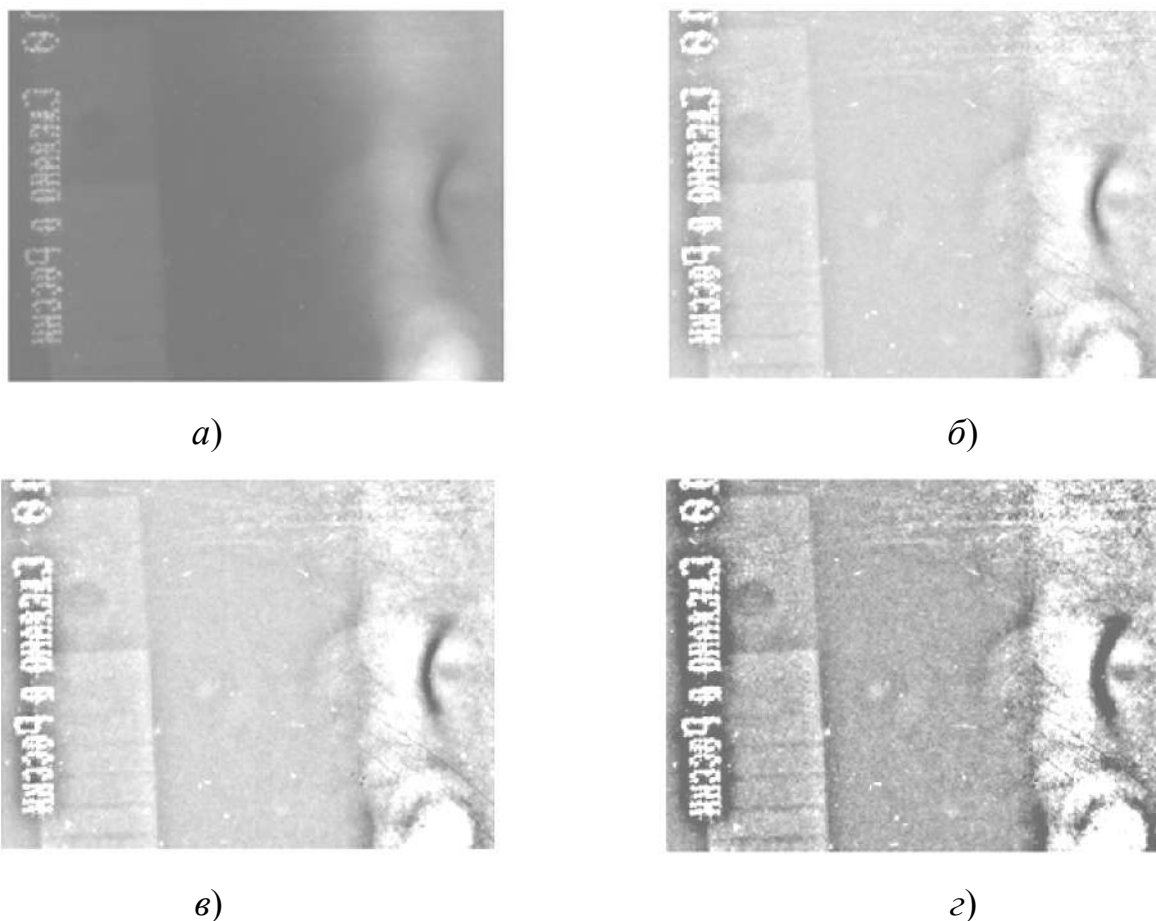


Рис. 2.29. Вихідне зображення (а) оброблене розробленим методом багатомасштабної диференціації з адаптивним коефіцієнтом підсилення детальності зображення при різних A_{\max} - б) $A_{\max} = 1$, в) $A_{\max} = 5$, з) $A_{\max} = 7$.

З рисунку 2.29 видно, що використання адаптивного коефіцієнта підсилення детальності (2.33) забезпечило підсилення детальної структури зображення з врахуванням контрасту локальних околів. Це усунуло надмірне підсилення висококонтрастних деталей на зображенні.

Розроблений у роботі підхід [70] призводить до підвищення візуальної якості слабкоконтрастних зашумлених рентгенографічних зображень та збільшення ефективності та достовірності їх аналізу в цілому. Вдосконалення побудованого підходу можливе через автоматизацію вибору параметрів у виразі (2.34) на основі аналізу вихідного зображення.

Висновки до розділу 2

Через використання перетворень Хафа розроблено імітаційну модель калібрування цифрових відеокамер. На відміну від відомих підходів вона дозволяє автоматизувати процес усунення геометричних спотворень, які спричинені недорогими оптичними системами, що призводить до підвищення точності метричних вимірювань мінімально на 5 %.

Сегментація об'єктів інтересу є одним з перших та важливих кроків при вирішенні задачі аналізу зображень технічного зору. Різноманіття зображень та багатоплановість задач аналізу призводить до того, що задача сегментації є проблемно-орієнтованою та вимагає створення нових та модифікації відомих підходів до її реалізації.

У цій роботі розроблено метод бінаризації напівтонових зображень з використанням оптимального значення порогу, який обчислюється із застосуванням кореляційної функції. Одна з переваг запропонованого методу полягає в тому, що усувається суб'єктивний фактор у виборі порогу бінаризації та з'являється можливість аналізу зображень, зокрема, металографічних, отриманих, за різних умов освітлення.

Розроблено адаптивний метод бінаризації, у якому порогове значення інтенсивності обчислюється на основі аналізу особливостей локальних околів. Запропонований підхід до бінаризації усуває блочну структуру на результуючому зображенні та дає можливість адаптувати його стосовно різних класів зображень.

Модифіковано метод статистичної сегментації, який на відміну від відомих підходів, через використання відповідних розмірів локальних апертур забезпечує реєстрацію підвищеної детальності зображень об'єктів зацікавлення різних розмірів. Недоліком цього підходу є те, що він є більш складним у програмній реалізації та вимагає більших часових затрат через згадану вище ітераційність у реалізації.

Через адаптивний вибір локальний оточів запропоновано модифікований метод Канні до виділення границь об'єктів. Такий підхід, на відміну від відомого методу, дозволяє ефективно виділяти різнорозмірні об'єкти на зображенні.

На основі використання адаптивного коефіцієнта підсилення детальності зображення запропонована модифікація методу багатомасштабної статистичної диференціації для покращання слабкоконтрастних зашумлених зображень, що дає можливість підвищувати їх візуальну якість та ефективно використовується при опрацюванні рентгенографічних зображень неруйнівного контролю.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИ ОБЧИСЛЕННЯ ФРАКТАЛЬНИХ РОЗМІРНОСТЕЙ ЗОБРАЖЕНЬ

3.1. Аналіз структури матеріалів з використанням фрактальних розмірностей

Існує ряд задач, які вимагають оцінки стану матеріалу та його механічних характеристик. Такі задачі можуть виникати на стадії виготовлення, коли потрібно контролювати вміст різних складових матеріалу, міцність, твердість і т.п. Також схожі задачі виникають в процесі експлуатації матеріалів, що особливо актуально в наш час, коли більшість відповідальних виробів і конструкцій в галузі атомної енергетики, хімічної промисловості, машинобудівної промисловості перебувають на грані зношення [110].

Раніше для оцінки надійності таких матеріалів та виробів застосовували, в основному, методи дефектоскопії. Ці методи давали інформацію про наявність чи відсутність дефекту. Але для запобігання аварійних ситуацій необхідна інформація про переддефектний стан самого матеріалу та ступінь його деградації.

Більш інформативними для опису стану деградації стали підходи з залученням методів і засобів фізики твердого тіла, механіки, хімії, матеріалознавства та інших наукових дисциплін. Проте ці методи є достатньо трудомісткими і тривалими в часі та не можуть бути застосованими для швидкоплинних процесів.

Тому актуальною є розробка такого методу, який би на основі аналізу мікроструктури матеріалу дозволив би отримати його числові механічні характеристики. Такий підхід використовувався б на стадії виготовлення матеріалів для визначення їх складників і механічних характеристик та на стадії експлуатації для визначення ступеня деградації матеріалу.

У роботах [26, 29] показано, що фрактальна розмірність кожної мікроструктури матеріалу є індикатором його якісних характеристик. Таким чином, числове значення фрактальної розмірності встановлює зв'язок між структурою та механічними властивостями матеріалу.

Фрактальна розмірність

При описі властивостей фрактала важливу роль відіграє така його характеристика як фрактальна розмірність. На рівні інтуїції ми розуміємо, що у евклідовому просторі лінія має розмірність 1, квадрат – 2, а куб – 3. Розглянемо способи обчислення цих чисел.

Розглянемо це на прикладі. Нехай необхідно покрити квадрат S , довжина сторони якого рівна 1.

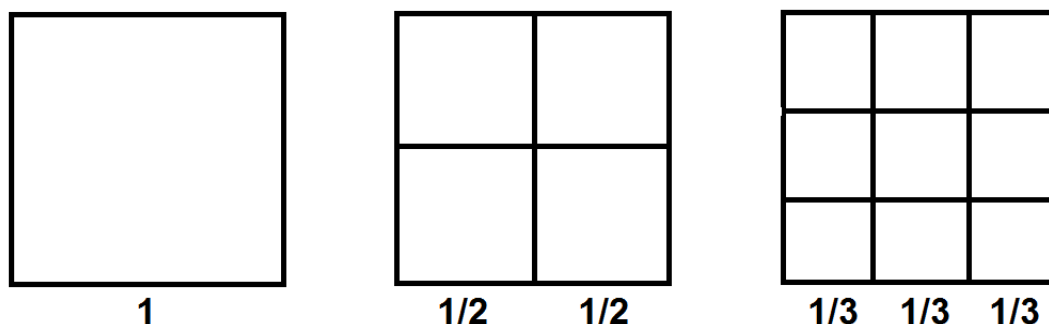


Рис. 3.1. Розбиття квадрату на блоки.

Щоб покрити вхідне зображення потрібно один блок з довжиною сторони, рівною 1, $2^2 = 4$ блока з довжиною сторони рівною $\frac{1}{2}$, $3^2 = 9$ блоків з довжиною сторони, яка рівна $\frac{1}{3}$ і т.д. Нехай $N_s(1/n)$ – це число блоків з однієї сторони, яка рівна $\frac{1}{n}$, що потрібно для того, щоб покрити квадрат. Легко побачити, що це число рівне

$$N_s(1/n) = n^2. \quad (3.1)$$

Розмірність квадрату, яка рівна 2, міститься в показнику степеня в правій частині рівняння. Цю розмірність можна виразити наступним чином:

$$d = 2 = \ln(N_s(1/n)) / \ln(n) \quad (3.2)$$

Зазначимо, що ліва частина рівняння (3.2) не залежить від n , а отже, і права частина не залежить теж. Зокрема, для множини A можна визначити її розмірність d_A наступним чином:

$$d_A = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln(N_A(1/n))}{\ln(n)}, \quad (3.3)$$

де $N_A(1/n)$ число блоків з довжиною сторони $1/n$, яке необхідне для того, щоб покрити множину A .

Способи обчислення фрактальної розмірності зображення

Існують різні методи обчислення фрактальної розмірності. Найбільш вживаними є клітинний та крапковий [128]. В основі цих методів лежить оцінювання площі фрактальної фігури при різних значеннях кроку вимірювання, а відрізняються вони лише способом обчислення цієї оцінки. Для прикладу, крапковий метод обчислення фрактальної розмірності приймає за первісну дискретизацію вхідного зображення матрицю комірок (пікселів зображення). Далі підраховують імовірність $P(m, L)$ попадання в клітинку з стороною L (в пікселях), у центрі якої знаходиться комірка, що належить фрактальній фігурі, для $m = 1 : L^2$. Оцінка площі фрактальної фігури визначається за формулою:

$$\langle N(L) \rangle \geq M \sum_{m=1}^{L^2} \frac{P(m, L)}{m}, \quad (3.4)$$

де M – загальне число клітонок, що належать фрактальній фігурі. Подальші обчислення фрактальної розмірності проводять за загальною для всіх методів схемою, яка описана вище [128].

Найбільш близьким до розглянутого є клітинний метод. Згідно цього методу на вхідне зображення фракталу накладають сітки з квадратними клітками із різними значеннями кроку сітки, який залежить від етапу вимірювання, та обчислюють кількість кліток, які покривають цю фрактальну фігуру для кожного кроку виміру. Далі визначають фрактальну розмірність

зображення як тангенс кута нахилу прямої, яка отримана внаслідок апроксимації сформованого набору точок методом найменших квадратів [128].


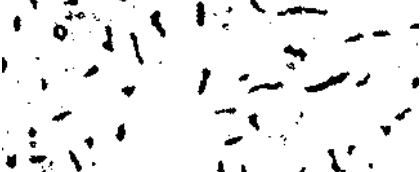
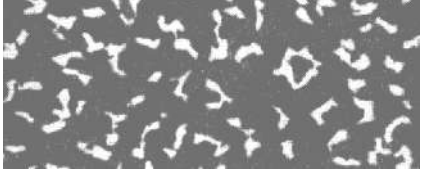
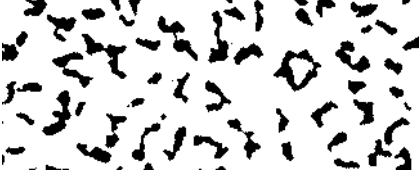
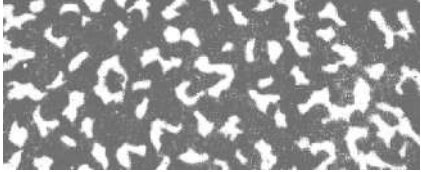

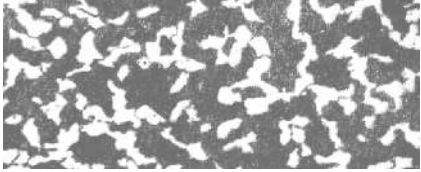

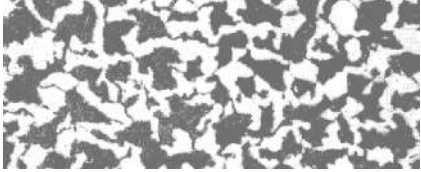

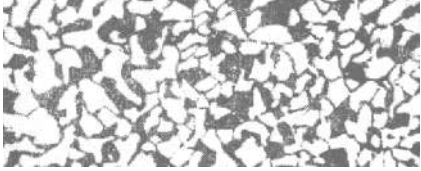

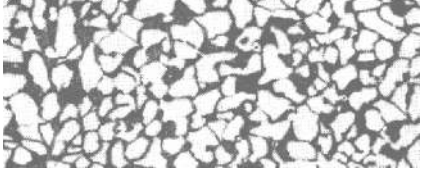

Застосування фрактальних розмірностей при визначенні якісних характеристик металу.



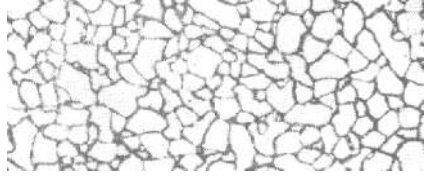
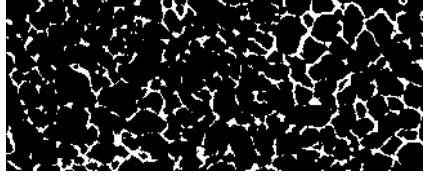
Експериментально встановлено, що фрактальна розмірність представляє собою кількісну характеристику структури будь-якого матеріалу. Тому апарат фрактальної геометрії доцільно використовувати для кількісної оцінки фрактальної мікроструктури, оскільки фрактальна розмірність кожної мікроструктури корелює з її якісними характеристиками. Таким чином, існує взаємозв'язок між фрактальною розмірністю мікроструктури металу та його характеристиками, зокрема, фізико-механічними властивостями, що дає можливість визначати якісні характеристики металу на основі аналізу фрактальної розмірності його мікроструктури [29].

Розглянемо приклад зміни фрактальної розмірності зображень матеріалу при зміні процентного співвідношення перліту і фериту [25, 31, 41]. В якості вхідних використаємо еталонні зображення мікроструктури сталі (згідно ГОСТу 823-56 (ASTM E 112)), які представлені в першій колонці таблиці. Оскільки фрактальна розмірність обчислюється для бінарних зображень, то при її обчисленні будуть використовуватися бінаризовані вхідні зображення, які для зручності програмної обробки були ще інвертовані (третя колонка таблиці 3.1).

Таблиця 3.1. Зміна фрактальної розмірності зображень мікроструктури матеріалу (ГОСТ 823-56 (ASTM E 112)) при зміні процентного співвідношення перліту і фериту

Вхідні зображення	Процентне співвідношення перліту та фериту	Бінаризоване (інвертоване) зображення із усуненим шумом	Фрактальна розмірність
1	2	3	4
	100/0		2,1320

1	2	3	4
	95/5		2,1403
	85/15		2,1485
	75/25		2,1264
	65/35		2,1084
	50/50		2,1046
	35/65		2,0730
	20/80		2,0972

1	2	3	4
	5/95		2,0684
	0/100		2,0705

Результати експерименту показують, що із збільшенням процентного вмісту фериту фрактальна розмірність зображень збільшується.

Мультифрактальна модель зображення структури матеріалу.

Використання лише одного параметру – фрактальної розмірності – в багатьох випадках не дозволяє описати всю різноманітність властивостей зображення такої складної структури. Реальні зображення відрізняються від фрактальних нерівномірністю розподілу інформаційних ознак по структурі. Тому звичайну хаусфордову розмірність потрібно розглядати як грубу характеристику структури.

Для аналізу зображень з неоднорідним розподілом інформаційних ознак по структурі використовується відома мультифрактальна модель [50]. Основна ідея мультифрактального аналізу полягає у тому, що досліджуване зображення розбивається на однорідні підмножини з чітко вираженою фрактальною розмірністю.

Нехай зображення має розмірність d та містить деякий фрактальний об'єкт, який складається з $N \gg 1$ точок. Розіб'ємо все зображення на комірки зі стороною ε . Надалі нас цікавлять лише ці комірки, де є хоча б одна точка (мається на увазі точка як частинка фракталу). Нумерація зайнятих комірок буде змінюватися згідно $i = 1, 2, \dots, N(\varepsilon)$, $N(\varepsilon)$ – загальна кількість зайнятих комірок. Зрозуміло, що $N(\varepsilon)$ залежить від розміру комірки.

Нехай $n_i(\varepsilon)$ – це кількість точок в i -й комірці. Відносна заповненість комірок буде рівна

$$p_i(\varepsilon) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n_i(\varepsilon)}{N}. \quad (3.5)$$

З умов нормування випливає, що

$$\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i(\varepsilon) = 1. \quad (3.6)$$

Стандартний метод мультифрактального аналізу базується на розгляді узагальненої статистичної суми $Z(q, \varepsilon)$:

$$Z(q, \varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q(\varepsilon). \quad (3.7)$$

Спектр узагальнених фрактальних розмірностей D_q (розмірностей Реньї), який характеризує даний розподіл точок в області, визначається за допомогою співвідношення

$$D_q = \frac{\tau(q)}{q-1}, \quad (3.8)$$

де нелінійна функція $\tau(q)$ - так звана скейлінгова компонента – має вигляд

$$\tau(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln(Z(q, \varepsilon))}{\ln \varepsilon}. \quad (3.9)$$

Якщо $D_q = const$, тобто не залежить від q , то це є звичайний фрактал.

Коли ж D_q залежить і змінюється з q , то маємо справу з мультифракталом.

Методи мультифрактального аналізу

Окрім розглянутого раніше методу мультифрактального аналізу відомі також інші підходи. В їх основі лежить припущення, що при розбитті простору, де є досліджуваний об'єкт, на комірки з розмірами ε , нам відомі “ваги окремих комірок”, сума яких рівна

$$\sum_{i=1 \dots N} p_i = 1. \quad (3.10)$$

Розглянемо метод мультифрактального аналізу, який був запропонований в [108]. В основу цього методу покладено наступні вирази:

$$\alpha(q) = \frac{d\tau}{dq} = \lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \frac{\sum_i \mu_i \ln p_i}{\ln \varepsilon}, \quad (3.11)$$

де

$$\mu_{1i}(q) = \frac{(p_i)^q}{\chi(q)}, \quad \chi(q) = \sum_{i=1..N} p_i^q, \quad f(q) = q\alpha(q) - \tau(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_i \mu_{1i}(q) \ln p_i(q)}{\ln \varepsilon}.$$

На рисунку 3.2 показані залежності фрактальної розмірності від процентного співвідношення перліту та фериту [30], які обчислені методами фрактального (рис. 3.2 а) та мультифрактального аналізу (рис. 3.2 б).

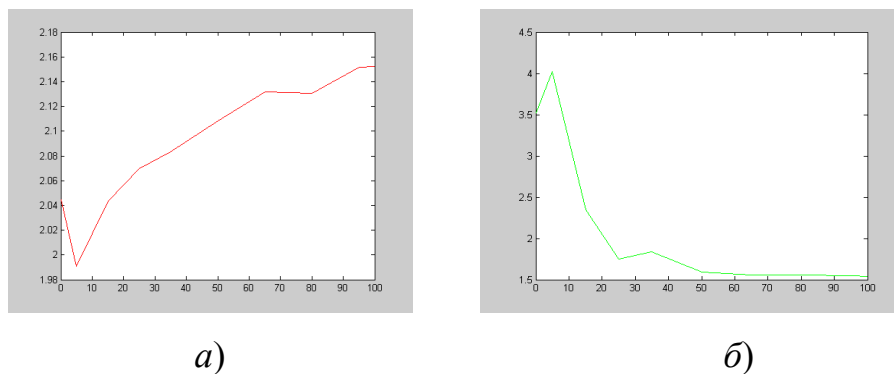


Рис. 3.2. Залежності фрактальної розмірності від процентного співвідношення перліту та фериту, які обчислені методами фрактального (рис. 3.2 а) та мультифрактального аналізу (рис. 3.2 б).

З рисунку 3.2 видно чітку однозначну залежність між процентним співвідношенням перліту та фериту і числовим значенням фрактальної розмірності. Проте відмінності між графіками на рис. 3.2 а та 3.2 б все ж таки є. Пояснюється це насамперед це тим, що при мультифрактальному підході враховується неоднорідний розподіл ознак по полю зображення, в результаті чого оцінка фрактальної розмірності є більш точною.

Зауважимо, що таке мультифрактальне представлення може бути узагальнене на випадок, коли в заданій області задати будь-яку іншу міру, яка має різний фізичний зміст. Це дозволить чисельно аналізувати не лише

кількісний склад матеріалу, але й його механічні властивості – міцність, твердість, ударну в'язкість та ін.

Незважаючи на новизну підходу, розглянуті методи мають недоліки. Серед них виділимо два – велика обчислювальна складність та можливість виникнення похибок при обчисленні фрактальної розмірності через неточності при проведенні бінаризації. Для вдосконалення цього методу пропонується враховувати форму оброблюваних об'єктів. Це дозволить уникнути процесу бінаризації та використовувати як вхідні напівтонові зображення. З іншого боку, це призведе до підвищення точності обчислень, оскільки буде обчислюватися фрактальна розмірність об'єктів лише заданої форми.

Загалом розроблений метод [30] має перспективу, оскільки дозволяє однозначно і з меншими обчислювальними затратами аналізувати структуру матеріалу та описувати залежності між фрактальною розмірністю мікроструктури та його механічними властивостями.

3.2. Обчислення фрактальних розмірностей з використанням поверхневого інтеграла

У процесі проведення різноманітних досліджень зображення є одним із зручних способів подання інформації. Наприклад, рентгенографічні зображення, одержують у разі неруйнівного контролю зварних з'єднань, оптико-електронні зображення мікроструктури матеріалу – у результаті металографічних дослідженнях тощо. Досі найчастіше для аналізу таких зображень застосовували візуальний метод, який проводив оператор-дефектоскопіст. Результат такого аналізу значною мірою залежить від професійних навиків оператора. З огляду на це важливим є переведення процесу обробки та прийняття рішення на формальну основу через аналіз кількісних показників, які б характеризували досліджуване зображення в цілому, щоб вже за

цими кількісними показниками приймати рішення як результат обчислень за чіткими правилами, що не беруть до уваги вплив суб'єктивного чинника.

Дослідження останніх років виявили можливість використання теорії фракталів для розв'язання задач оцінювання структури матеріалу за їх зображенням [91]. Зображення матеріалу розглядають як об'єднання різних типів структурних складових. Ступінь заповнення простору тими чи іншими типами структурних складових матеріалу можна охарактеризувати за допомогою числового значення фрактальної розмірності. Природно, що одним числом можна лише наближено описати складну структуру. Тому у роботі [91] для фрактального аналізу зображень запропоновано використовувати поле фрактальних розмірностей, що є масивом числових значень фрактальних розмірностей, обчислених у кожній точці зображення. Є декілька підходів до обчислення фрактальної розмірності [29, 91]. Один з них – метод многогранників (призм) [91]. На відміну від більшості відомих підходів [29, 128], його можна використовувати для обчислення фрактальної розмірності не тільки бінарних, але й напівтонових (монохромних) зображень.

Суть цього методу полягає в тому, що напівтонове зображення розділяють на локальні околи розміром $m \times m$ елементів, для кожного з яких обчислюють значення фрактальної розмірності $D(i, j)$. Розглянемо деякий локальний окіл $ABCD$, який є проекцією околу $abcd$ на площину $io'j$ у тривимірному вигляді (рис. 3.3).

Точки a, b, c, d та o є числовими значеннями інтенсивностей пікселів, які розміщені у відповідних кутах та центрі локального околу. З'єднавши відповідно точки, одержимо чотири трикутники abo, bco, cdo та ado . Ці трикутники становлять бічну поверхню многогранника. Використовуючи відомі аналітичні вирази під час обчислення площ трикутників, можемо записати площу бічної поверхні многогранника через суму площ чотирьох трикутників:

$$S = S_{abo} + S_{bco} + S_{cdo} + S_{dao}. \quad (3.12)$$

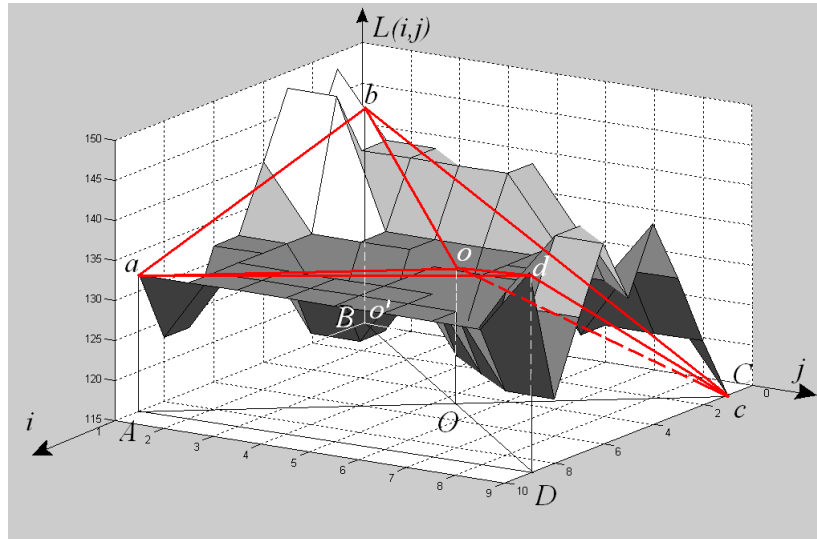


Рис. 3.3. Тривимірне зображення локального околу.

Щоб побудувати залежність між величиною площі S та стороною локального околу m , однієї пари значень S та m є замало. Зважаючи на це, далі локальний окіл розбивають на декілька менших квадратів зі стороною m_1 . Менші квадрати $m_1 \times m_1$, відповідно, можна розбивати на ще менші квадрати і т.д. Сумарне значення площі залежатиме від вибору локального вікна $m \times m$ та кількості квадратів, на які його розбиватимуть. У результаті одержимо два набори точок. Перший з них міститиме значення розмірів сторін квадратів m, m_1, \dots , на які розбитий цей локальний окіл $m \times m$. Другий – відповідні їм значення площ поверхонь околів – $S(m), S(m_1), \dots$. Ці пари точок утворюватимуть залежність, яку можна апроксимувати прямою $m_i = D \cdot S(m_i) + b$ таким чином, щоб сума квадратів відхилень значень координат $\Delta = \sum_i (m_i - D \cdot S(m_i) - b)^2$ одержаних точок від прямої була мінімальною. Величина Δ буде тим меншою, чим ближче точки i лежатимуть до апроксимуючої прямої. Іншими словами, необхідно знайти такі значення D та b , при яких функція Δ досягає мінімуму. Значення цих параметрів можна обчислити із системи рівнянь

$$\begin{cases} -2\sum_i (m_i - D \cdot S(m_i) - b)^2 = 0, \\ -2\sum_i S(m_i) \cdot (m_i - DS(m_i) - b)^2 = 0. \end{cases} \quad (3.13)$$

Тоді розв'язок рівняння (3.13) буде таким:

$$D = \frac{\sum_i [(S(m_i) - \overline{S(m_i)}) \cdot m_i]}{\sum_i (S(m_i) - \overline{S(m_i)})^2}, \quad (3.14)$$

$$b = \overline{m_i} - D \cdot \overline{S(m_i)}, \quad (3.15)$$

де $\overline{m_i}$ та $\overline{S(m_i)}$ – середньоарифметичні значення відповідних величин.

Значення кутового коефіцієнту D , взяте з протилежним знаком, відповідає фрактальній розмірності околу $abcd$.

Значення фрактальних розмірностей $D(i, j)$ локальних околів формують поле фрактальних розмірностей [8], яке є основою фрактального аналізу зображень.

Описаний підхід до визначення фрактальної розмірності має один суттєвий недолік. У ньому обчислюється не площа поверхні, яка утворена внаслідок тривимірного подання деякого околу $abcd$ зображення (рис. 3.3), а площа трикутників abo , bco , cdo та ado , які її наближають. Таке наближення вносить неточності під час обчислення площі поверхні локального околу. Особливо суттєвими вони стають, коли розмір об'єктів зображення значно менший від розмірів локального околу чи коли в локальному околі є різкі перепади рівнів інтенсивностей.

Для усунення зазначених вище недоліків запропоновано в процесі оцінки площі поверхні використовувати поверхневий інтеграл [74]. Для цього розглянемо цей же локальний окіл зображення з розмірами $m \times m$ пікселів (див. рис. 3.3). Тривимірне зображення цього околу формуватиме деяку поверхню з площею S . Величину S можна подати як суму площ ΔS_k ($k=1,2,\dots,m \times m$) елементарних областей (пікселів) зображення

$$S = \sum_{k=1}^{m \times m} \Delta S_k . \quad (3.16)$$

Нехай окіл $abcd$ проектується на площину $io'j$ і $ABCD$ – це її проекція (рис. 3.3). Елементарній площині $didj$ області $ABCD$ на площині $io'j$ відповідає елементарна площа поверхні $abcd$, величина якої зв'язана з площею пікселя і описується виразом

$$dS = \frac{didj}{|\cos \alpha_{ij}|}, \quad (3.17)$$

де α_{ij} – кут між нормаллю до поверхні S та нормаллю до площини $ABCD$. Тому у випадку неперервних зображень визначення площі поверхні S зводиться до обчислення подвійного інтегралу

$$S = \iint_{ABCD} \frac{didj}{|\cos \alpha_{ij}|} \quad (3.18)$$

за проекцією поверхні на площину $ABCD$.

У нашому випадку поверхня околу (рис. 3.3) задається дискретизованими величинами $L = L(i, j)$, де $L(i, j)$ – числовий еквівалент інтенсивності елемента зображення у точці з координатами (i, j) . В узагальненому випадку для неперервних зображень $|\cos \alpha_{ij}|$ визначатиметься виразом [8]

$$|\cos \alpha_{ij}| = \frac{1}{\sqrt{(L'_i)^2 + (L'_j)^2 + 1}}, \quad (3.19)$$

де $L'_i(i, j) = \frac{dL(i, j)}{di}$ та $L'_j(i, j) = \frac{dL(i, j)}{dj}$ часткові похідні функції $L(i, j)$.

Тоді згідно з виразами (3.18) та (3.19) площу поверхні S локального околу з розмірами $m \times m$ та центром в точці (i, j) обчислюємо за виразом

$$S = \iint_{ABCD} \sqrt{(L'_i)^2 + (L'_j)^2 + 1} \cdot didj, \quad (3.20)$$

для дискретизованих цифрових зображень –

$$S(i, j) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sqrt{(L(i, j) - L(i+1, j))^2 + (L(i, j) - L(i, j+1))^2 + 1}. \quad (3.21)$$

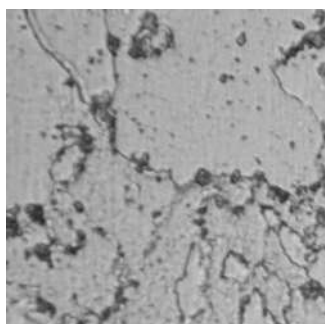
Далі фрактальну розмірність $D(i, j)$ локального околу визначаємо за аналогією з [114] згідно виразу:

$$D(i, j) = \frac{\lg(S(i, j))}{\lg m} \quad (3.22)$$

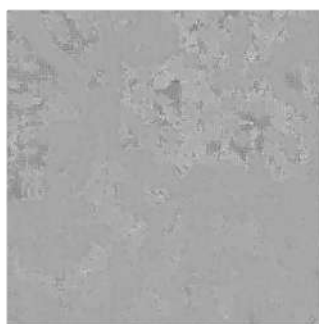
або

$$D(i, j) = \frac{\lg \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sqrt{(L(i, j) - L(i+1, j))^2 + (L(i, j) - L(i, j+1))^2 + 1} \right)}{\lg m}. \quad (3.23)$$

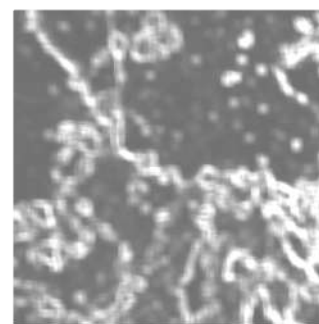
Обчислені поля фрактальних розмірностей з використанням відомого (3.14) та запропонованого (3.23) підходів зображено на рис. 3.4.



a)



б)



в)

Рис. 3.4. Поля фрактальних розмірностей вхідного зображення (a), обчислені за відомим (б) та запропонованим (в) методами.

Проаналізуємо відомий (3.14) та запропонований (3.23) вирази визначення фрактальних розмірностей. Головна відмінність між цими методами полягає у різних підходах до оцінення площі поверхні фрактальної фігури. У відомому методі визначення фрактальної розмірності (3.14) площа поверхні локального околу $abcd$ фрактальної фігури апроксимується чотирма трикутниками. 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.

Перевага запропонованого методу [74] полягає у тому, що беручи до уваги всі локальні перепади рівнів інтенсивностей, площа поверхні $abcd$ фрактальної фігури визначається точніше, отже, і фрактальна розмірність обчислюється більш коректно. Ілюстрацією такої переваги є приклад обчислення поля фрактальних розмірностей (рис. 3.4), де наведено вхідне зображення (рис. 3.4 *a*), яке містить невеликі за розмірами об'єкти. Якщо розміри локального околу вибрати більшими за розмір об'єктів, то у відомому методі (3.14), на відміну від запропонованого (3.23), внаслідок використання наближень ці об'єкти можуть бути пропущеними.

Також слід зазначити особливість запропонованого підходу [74], яка полягає у тому, що фрактальна розмірність зображення, обчислена згідно з виразом (3.23), пропорційна до його контрастності. Тому подальші дослідження доцільно спрямувати в напрямку визначення цього взаємозв'язку, що дасть змогу використовувати вирази визначення контрасту та розширить можливості аналізу зображень з малими та видовженими деталями.

3.3. Дослідження інваріантів зображення на основі його фрактальної моделі

Автоматизована обробка інформації, зокрема, візуальної, дозволяє ефективно вирішувати наукові та прикладні задачі у різноманітних галузях. Зростання обсягів інформації призводить до того, що питання підвищення ефективності її автоматизованої обробки є постійно актуальним [137]. При вирішенні будь-яких задач важливим чинником є повторювальність результатів, отриманих при аналізі досліджуваних об'єктів [79]. Вхідні дані, у нашому випадку це зображення об'єкту, можуть формуватися у різний час, при різному зовнішньому освітленні, під різним ракурсом. Тому важливим є дослідження впливу перелічених вище чинників на результати опрацювання та аналізу зображення об'єкту цим чи іншим методом.

При дослідженні цієї задачі слід зазначити, яку модель зображення буде використано при його аналізі [79]. Є два підходи до вирішення цього завдання. Перший шлях полягає у тому, що усі вхідні зображення будуть проходити нормування для усунення впливу зовнішніх чинників – освітлення, повороту, масштабу. Відносно легко можна провести нормалізацію інтенсивностей елементів зображення. Нормалізація ж зображення в плані кута повороту та масштабу є утруднена, оскільки вимагає додаткових даних про умови їх формування, які не завжди є в наявності. Другий шлях спрямований на вибір таких методів обробки та аналізу зображень, які є нечутливими до перерахованих вище зовнішніх чинників.

Методи опрацювання та аналізу можуть мати різну чутливість до впливу зовнішніх умов при формуванні цифрових зображень. У багатьох роботах [25, 73, 74, 229] при розробленні методів аналізу зображень, зокрема, металографічних застосовують фрактальну геометрію. Враховуючи це, для розв'язування поставленої у роботі задачі доцільно застосувати фрактальну модель зображення, за допомогою якої, як показано у роботах [228, 229] можна аналізувати основні фізико-механічні властивості матеріалів, які представлені у візуальному вигляді. Надалі у роботі буде показано, що основною перевагою вибраної моделі зображення є те, що вона забезпечує повторювальність результатів при опрацюванні зображень одного і того ж об'єкту, отриманих при різному освітленні, куті повороту та масштабуванні.

Зважаючи на вибрану прикладну галузь, об'єктом досліджень у роботі є металографічні зображення сталі 15X1МФ (рис. 3.5). Вони поєднують різні складові – зерна, межі зерен, карбіди. Статистичний аналіз цих складових, їх розподіл за різними ознаками, зокрема, площею, орієнтуванням тощо є важливим при проведенні матеріалознавчих досліджень та вивченні механічних властивостей матеріалів. Ще одним важливим аспектом при цьому є встановлення закономірностей між кількісними показниками складових мікроструктури та властивостями металів.

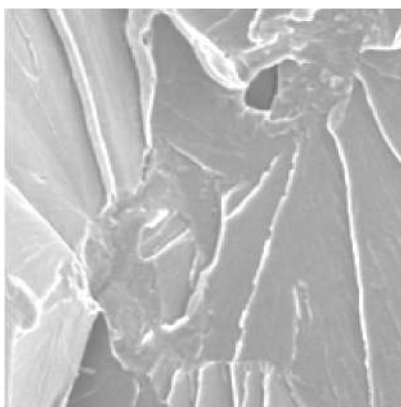


Рис. 3.5. Металографічне зображення сталі 15X1МФ.

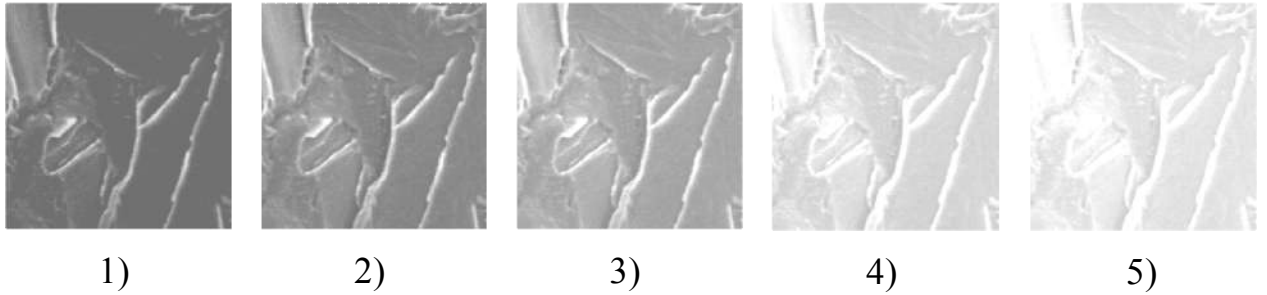
З точки зору опрацювання зображень, мікроструктуру металографічного зображення можна вважати набором текстурних областей [73, 74]. Задача аналізу текстур, в свою чергу, включає цілий ряд окремих питань – вибір та формування ознак для опису текстур; класифікація текстур; ідентифікація об'єкту за його текстурою. Дослідимо є вибір інструментарію для опису текстури зображення, який характеризується стійкістю до деяких типів афінних перетворень, зокрема, зміни усередненого рівня інтенсивності зображення, кута його повороту та масштабування. Зосередження уваги на саме цих типах афінних перетворень пояснюється необхідністю дослідження впливу зовнішнього освітлення, віддалі від досліджуваного зразка до об'єктиву та його повороту при формуванні металографічних зображень за допомогою мікроскопу чи фото- відеокамери.

На рис. 3.6 продемонстровано серії зображень, що використовувалися при проведенні досліджень у даній роботі. На рисунках 3.6 1-5 представлені зображення, що сформовані з різним значенням середньої інтенсивності і які моделюють різний рівень зовнішнього освітлення. Зображення на рис. 3.6 6-10 отримані під різним кутом повороту в площині предметного столика, наприклад, мікроскопу, а зображення на рис. 3.6 11-15 сформовані при різному оптичному збільшенні.

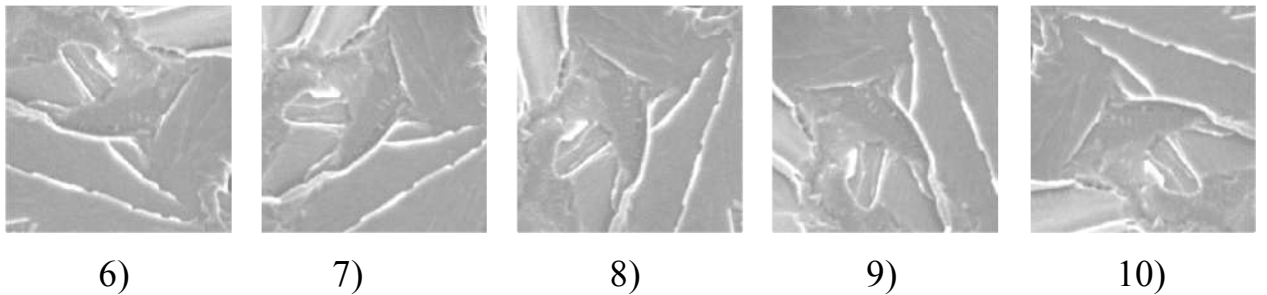
Для кожного зображення з наведених наборів були обчислені фрактальні розмірності на основі найкращої збіжності клітинного та крапкового методів

[29, 128]. Способи обчислення фрактальної розмірності зображення цими підходами детально розглянуті у підрозділі 3.1 цієї дисертаційної роботи.

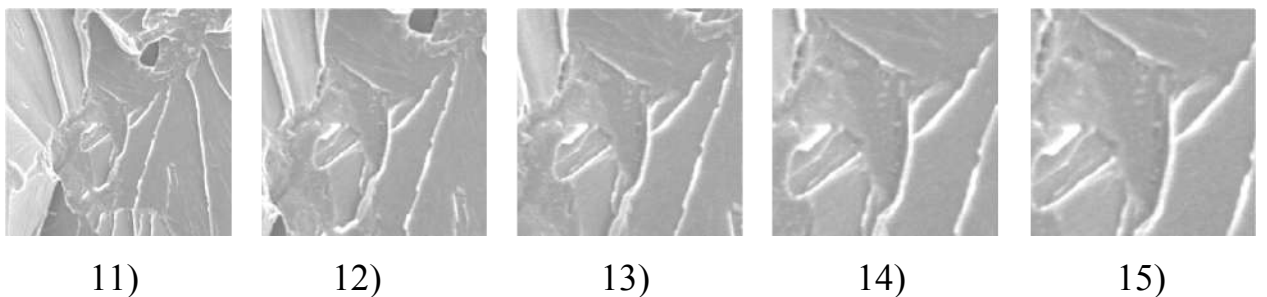
Оскільки дані методи працюють лише з бінарними зображеннями, то використаємо найбільш простий метод бінаризації з порогом рівним половині діапазону інтенсивностей.



Дані з різним рівнем середньої інтенсивності.



Зображення, отримані під різним кутом.



Зображення з різним збільшенням (масштабом).

Рис. 3.6. Набори зображень, які використовуються при дослідженні впливу афінних перетворень (середньої інтенсивності, кута повороту та масштабування) на їх фрактальну розмірність.

Отримані результати обчислення фрактальних розмірностей для описаних наборів зображень (рис. 3.6) представлені у вигляді графіків на рис. 3.7.

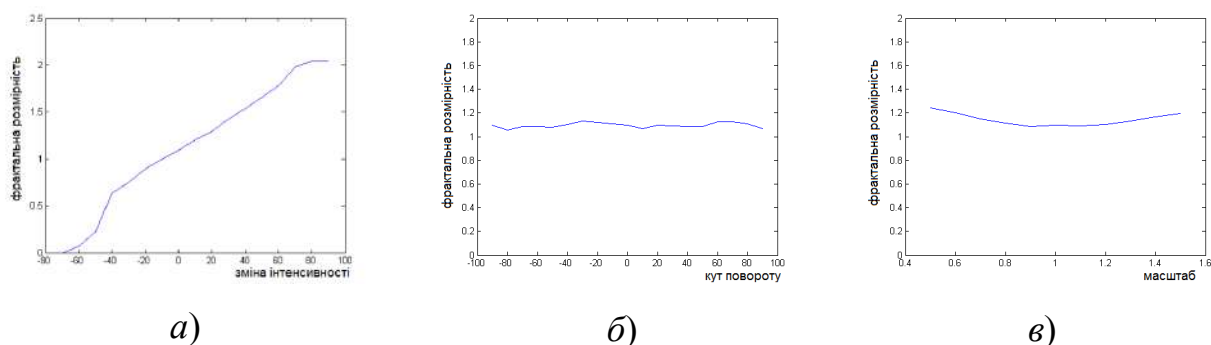


Рис. 3.7. Вплив зміни інтенсивності зображення (а), кута його повороту (б) та масштабу (в) на його фрактальну розмірність.

Проведемо аналіз отриманих у роботі результатів. З графіку на рис. 3.7 а видно, що зміна зовнішнього освітлення при проведенні металографічних досліджень суттєво впливає на фрактальну розмірність зображення. Вона змінюється від 0 - коли фрактальне зображення є практично чорним і до 2 - коли фрактальне зображення є 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 3.7 б демонструє, що середня фрактальна розмірність рівна 1,1689, максимальне відхилення від середнього значення - 0,035 або 3%, тобто фрактальна розмірність практично не змінюється при зміні кута повороту зображення металографічного шліфа в площині предметного столика. На рис. 3.7 в 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 [79].

Проведені вище експерименти показали, що фрактальні розмірності зображень, які отримані при різному зовнішньому освітленні суттєво відрізняються. Один з варіантів вирішення цієї проблеми полягає у нормалізації

зображення, тобто приведенні до вигляду, коли середнє значення інтенсивності по полю зображення наближено рівне середині діапазону інтенсивностей. Візьмемо зображення 1-5 на рис. 3.6 (для досліджень було використано більше зображень) з різним рівнем середньої інтенсивності та проведемо нормування фону (рис. 3.8). Існує декілька виразів для реалізації вирівнювання фону по полю зображення. В даній роботі для нормалізації таких зображень за рівнем інтенсивності було використано наступну формулу

$$L^*(i, j) = L(i, j) - L_f(i, j) + R/2, \quad (3.24)$$

де $L^*(i, j)$ – значення інтенсивності елемента з координатами (i, j) зображення з нормованим фоном; R – максимальне значення інтенсивності елемента зображення; $L(i, j)$ – значення інтенсивності елемента вхідного зображення з координатами (i, j) ; $L_f(i, j)$ – значення інтенсивності елемента фону вхідного зображення у точці з координатами (i, j) , яке обчислюється за виразом

$$L_f(i, j) = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{(i, j) \in W} L(i, j), \quad (3.25)$$

де n та m – розміри сторін локального околу W .

Розміри локального вікна n та m підбираються емпірично.

Обчислимо фрактальні розмірності (рис. 3.9) для сформованого набору зображень з вирівняним фоном 6-10 на рис. 3.8.

Як бачимо з рисунку 3.9, значення фрактальних розмірностей для серії зображень, які мали різне значення усередненої інтенсивності (рис. 3.8 1-5), але зазнали операції вирівнювання фону (рис. 3.8 6-10), 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 та масштабі (рис. 3.7 б та в).

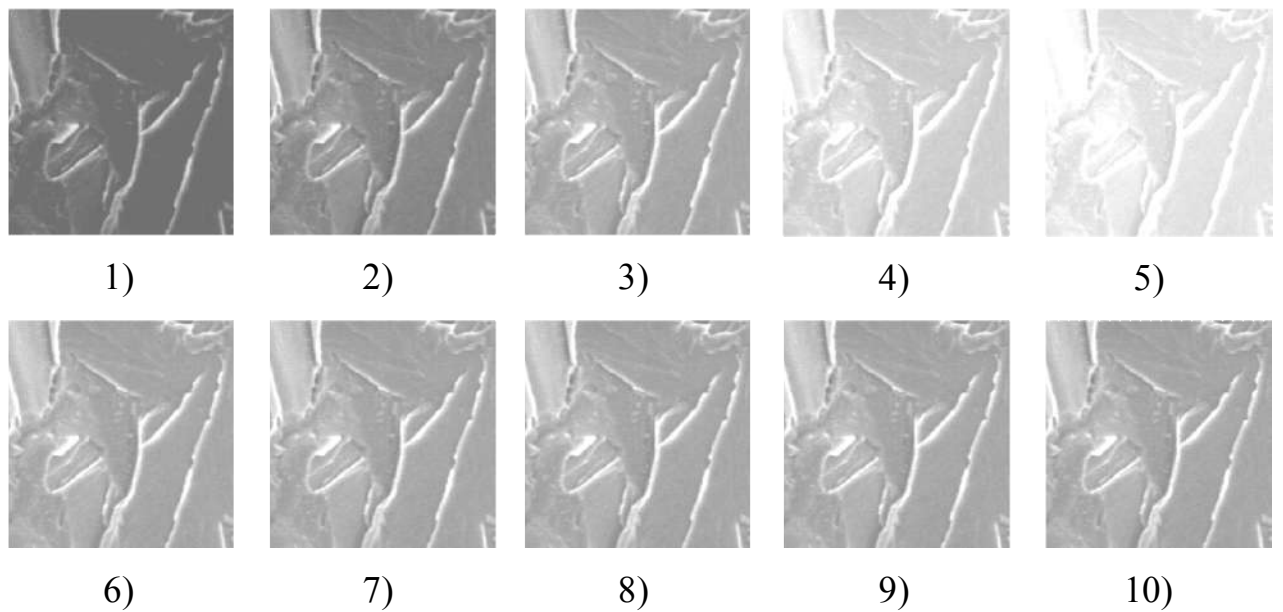


Рис. 3.8. Зображення 1-5 після вирівнювання фону 6-10.

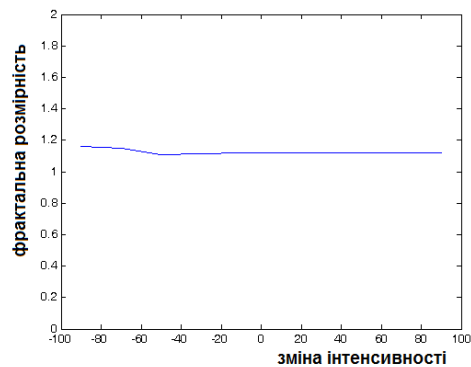


Рис. 3.9. Фрактальні розмірності для набору зображень 6-10 на рис. 3.8 після вирівнювання фону.

Таким чином, на підставі проведених вище досліджень можна зробити висновок, що фрактальна розмірність є інваріантною ознакою для описаних вище афінних перетворень зображення при умові дотримання вимог, які описані вище, а саме – застосування методу вирівнювання інтенсивності та зміни масштабу зображення у невеликих межах [79]. У роботі коефіцієнт збільшення (масштабування) знаходився у межах від 0,5 до 1,5. З'ясування можливості використання фрактальної розмірності в якості інваріантної ознаки для коефіцієнтів масштабування в більш широкому діапазоні, потребує додаткових досліджень.

3.4. Вибір параметрів при обчисленні фрактальних розмірностей

Як вже не раз зазначалося у роботі, що доволі часто інформація, яка отримується у різноманітних комплексах технічних засобів при проведенні неруйнівного контролю, представляється у вигляді зображень. Візуальний метод при аналізі таких даних у більшості випадків не дає вичерпних та достовірних результатів. Особливо це є актуальним для зображень, які містять велику кількість дрібних об'єктів, мають складну структуру, вимагають кількісних оцінок геометричних даних тощо. Традиційні засоби обробки зображень є малоефективними та дозволяють отримати лише загальні відомості про досліджуване зображення. Вирішення спеціалізованих задач потребує розробки та застосування нових 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 розмірності використовують таке поняття як поле фрактальних розмірностей [74]. 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 [76].

3.4.1. Вплив розмірів локальної апертури на результати формування поля фрактальних розмірностей зображення

При побудові поля фрактальних розмірностей деякого зображень $M \times N$ його сканують локальною апертурою, здебільшого квадратної форми, з розмірами $n \times n$. Центральний елемент апертури збігається з поточним елементом зображення (i, j) . Фрактальна розмірність даного локального околу $n \times n$ присвоюється елементу $D(i, j)$ поля фрактальних розмірностей з

координатами (i, j) . Просканувавши таким чином усе зображення, отримують поле фрактальних розмірностей D .

Ще одним важливим параметром є крок зміщення k локальної апертури від свого попереднього розміщення. При $k = 1$ апертура є ковзною, при $k > 1$ - “стрибкоподібною” по полю зображення. У випадку, коли $k = 1$, розмір сформованого поля фрактальних розмірностей D співпадатиме з розміром вихідного зображення, а при $k > 1$ - буде меншим.

Дослідимо вплив розмірів локальної апертури $n \times n$ та кроку зміщення k на результат формування поля фрактальних розмірностей D . За вхідне приймемо деяке фрактографічне зображення сталі 12Х1МФ (рис. 3.10).



Рис. 3.10. Фрактографічне зображення сталі 12Х1МФ.

На основі вхідного зображення (рис. 3.10) сформуємо поле фрактальних розмірностей, використавши локальні апертури з розмірами 3×3 , 7×7 , 15×15 та 31×31 піксель. При цьому крок зміщення k приймемо рівнім одиниці, тобто локальна апертура буде ковзною. Вибір методу обчислення фрактальної розмірності не має принципового значення. В даному випадку будемо обчислювати фрактальну розмірність на основі збіжності значень клітинного та крапкового методів [26, 74, 128]. Результати обчислень представлені на рис. 3.11.

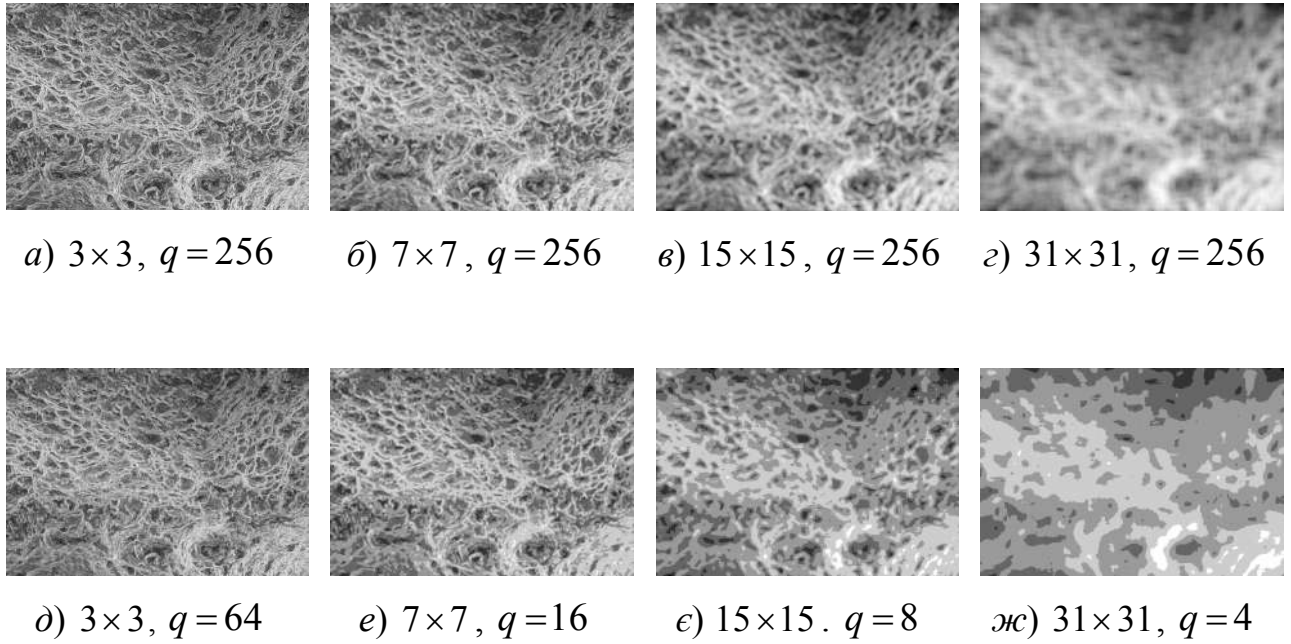


Рис. 3.11. Зображення полів фрактальних розмірностей для різних значень локальної апертури $n \times n$, кроку зміщення $k = 1$ та діапазону інтенсивностей q (д-ж).

Зображення *a-г* на рис. 3.11 представлені в діапазоні 256 градацій, а їх формування проводилося з розміром локальної апертури 3×3 , 7×7 , 15×15 та 31×31 пікселів відповідно. Доволі часто для представлення результатів побудови поля фрактальних розмірностей використовують не усі градації з діапазону від 0 до 256, а використовують квантування з декількох рівнів (рис. 3.11 д-ж), які обчислюють за виразом

$$L^*(i, j) = \text{fix} \left(\frac{L(i, j)}{256} \cdot q \right) \cdot \frac{256}{q}, \quad (3.26)$$

де $\text{fix}(\bullet)$ - операція заокруглення інтенсивностей вхідного зображення L в меншу сторону; q - кількість градацій на результуючому зображенні L^* .

Представлення результуючого зображення з використанням виразу (3.26) є візуально зручнішим та дає можливість більш укрупнено побачити неоднорідності на досліджуваних зображеннях.

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 [76]. Загалом, розмір досліджуваних неоднорідностей повинен бути співмірним з розміром локальної апертури.

3.4.2. Вплив кроку зміщення локальної апертури k на формування зображення поля фрактальних розмірностей

Дослідимо вплив кроку зміщення локальної апертури k на формування зображення поля фрактальних розмірностей. Для цього на основі вхідного зображення на рис. 3.10 сформуємо поле фрактальних розмірностей при розмірі локальної апертури 3×3 і кроці зміщення k рівному 1, 3 та 7.

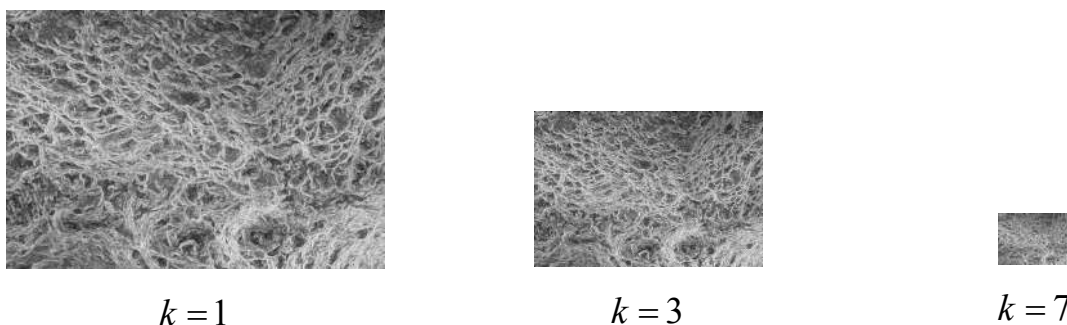


Рис. 3.12. Зображення поля фрактальних розмірностей при різних значеннях кроку зміщення k .

Проведені дослідження показали, що збільшення кроку зміщення локальної апертури k призводить до зменшення розміру результуючого зображення поля фрактальних розмірностей та зменшення часу його обчислення [76]. Значення $k > 1$ доцільно використовувати при опрацюванні зображень великого розміру за умови відсутності на них об'єктів з високою деталізацією.

3.4.3. Обчислення фрактальної розмірності зображень з різним діапазоном інтенсивностей та з використанням різних методів бінаризації

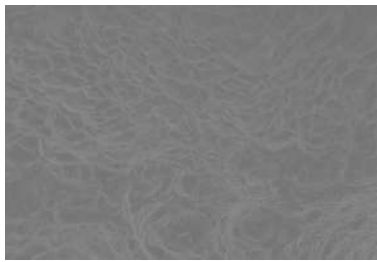
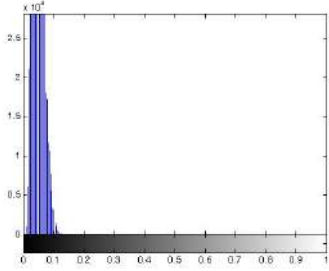
В описаних вище дослідженнях за вхідні використовувалися зображення з діапазоном інтенсивностей від 0 до 255. У багатьох випадках за вхідні можуть використовуватися зображення однієї і тієї ж сцени, отримані за різних умов освітлення, де значення інтенсивностей займають не весь діапазон, а лише його частину. Дослідимо вплив діапазону інтенсивностей вхідного зображення на результати обчислення фрактальної розмірності [76]. Для цього сформуємо набір зображень з різними діапазонами інтенсивностей, використовуючи наступний вираз

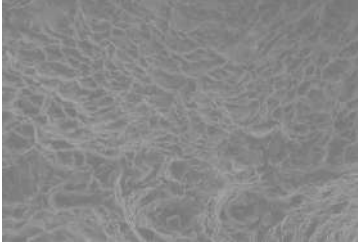
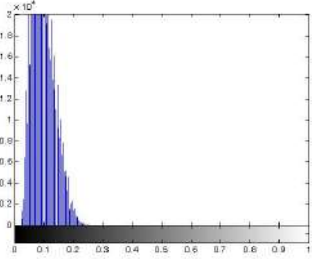

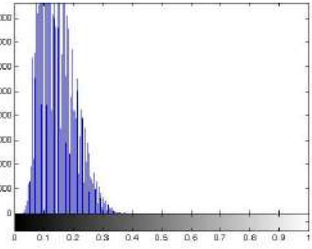

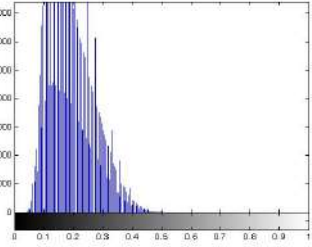

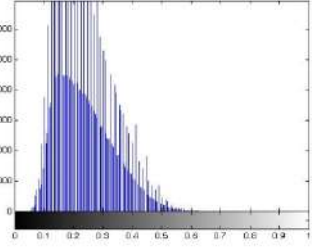

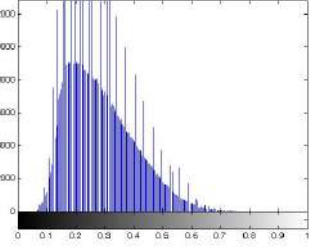

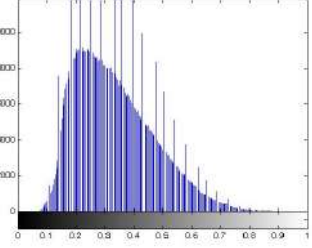
$$L^*(i, j) = R \cdot \left(\frac{L(i, j) - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}} \right), \quad (3.27)$$

де $L(i, j)$ та $L^*(i, j)$ - елементи відповідно вхідного та перетвореного зображень з координатами (i, j) ;

R - діапазон інтенсивностей результуючого зображення;

L_{\min} , L_{\max} - мінімальне та максимальне значення інтенсивностей вхідного зображення.

Діапазон інтенсивностей, R	Зображення	Гістограма
1	2	3
32		

1	2	3
64		
96		
128		
160		
192		
224		

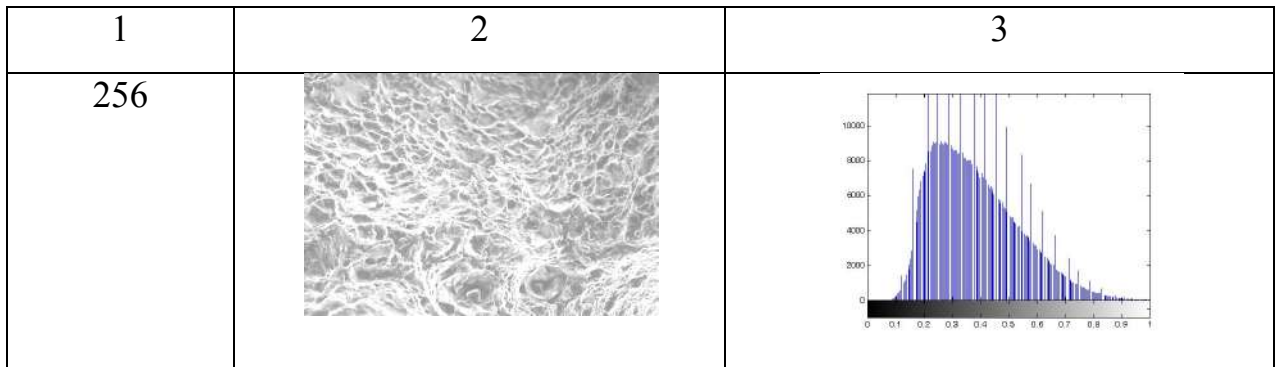


Рис. 3.13. Зображення однієї сцени з різним діапазоном інтенсивностей.

Для сформованих згідно виразу (3.27) зображень обчислимо значення фрактальної розмірності на основі найкращої збіжності клітинного та крапкового методів [29, 128]. Оскільки згадані вище методи обчислення фрактальної розмірності працюють лише з бінарними зображеннями, то стосовно сформованих на рис. 3.13 зображень необхідно застосувати один із методів бінаризації. Методи бінаризації бувають різними [80]. Дослідимо вплив вибору цього чи іншого методу бінаризації на результати обчислень фрактальної розмірності. Для цього застосуємо три підходи до бінаризації зображень на рис. 3.13.

Перший підхід буде реалізовано згідно виразу

$$L(i, j) = \begin{cases} 255, & \text{при } L(i, j) \geq L_{ser}; \\ 0, & \text{при } L(i, j) < L_{ser}, \end{cases} \quad (3.28)$$

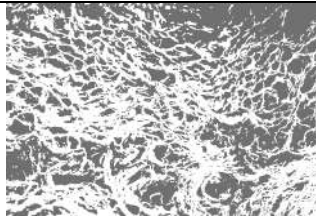
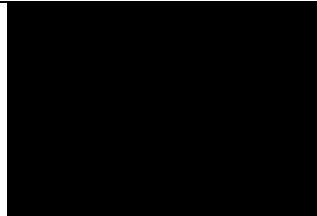
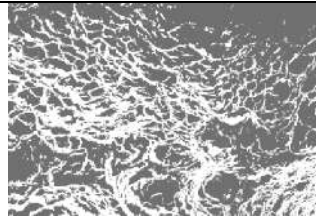
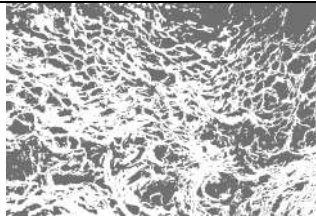
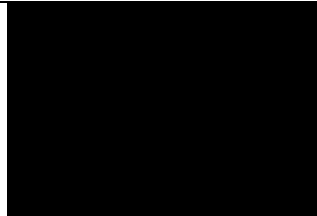
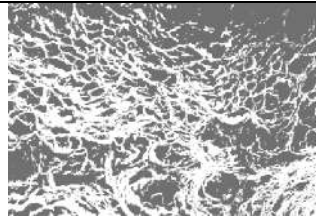
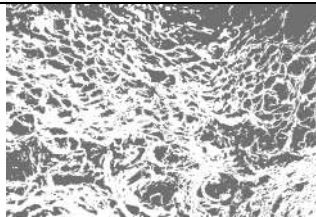
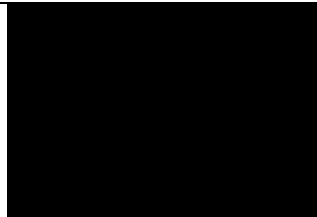
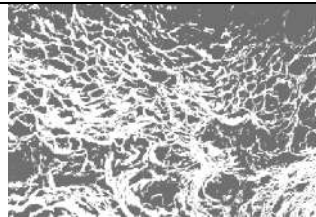
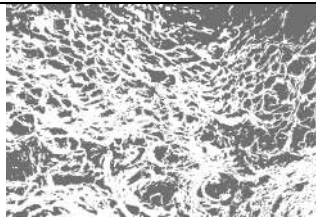
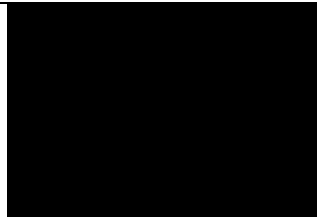
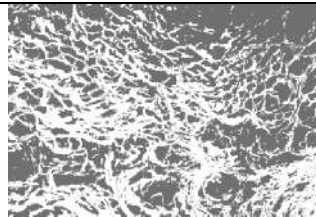
де $L_{ser} = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M L(i, j)$ - усереднене значення інтенсивності зображення L з розмірами $N \times M$.

За порогове значення у даному підході використовується L_{ser} .

Другий підхід до бінаризації є подібним, але замість параметру L_{ser} за порогове значення буде використано значення середини діапазону інтенсивностей $R/2$, яке при $R = 256$ буде рівне 128.

$$L(i, j) = \begin{cases} 255, & \text{при } L(i, j) \geq R/2; \\ 0, & \text{при } L(i, j) < R/2. \end{cases} \quad (3.29)$$

За третій метод використаємо метод бінаризації зображень з оптимальним порогом [80], де поріг інтенсивностей визначається за максимальною схожістю напівтонового та бінарного зображень. Результати опрацювання серії вхідних зображень (рис. 3.13) з використанням описаних вище підходів до бінарної сегментації представлені на рис. 3.14.

<i>Діапазон інтенсивностей R</i>	<i>Метод бінаризації з використанням L_{ser} (3.28)</i>	<i>Метод бінаризації з використанням $R/2$ (3.29)</i>	<i>Метод бінаризації з оптимальним порогом</i>
1	2	3	4
32	 1,9581	 1,0194	 1,9380
64	 1,9588	 1,0194	 1,9481
96	 1,9592	 1,0194	 1,9510
128	 1,9592	 1,0194	 1,9524

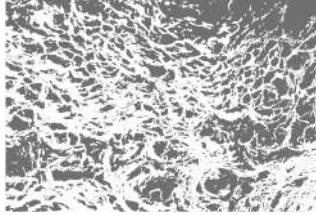
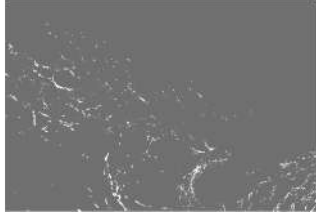
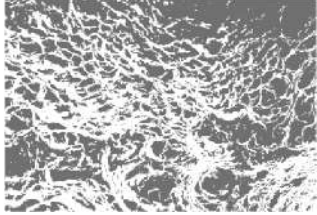
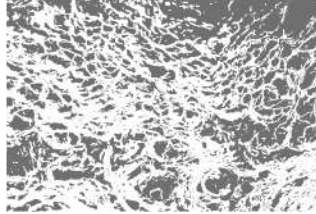
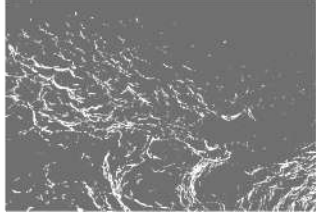
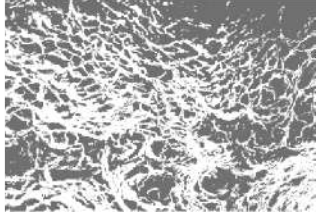
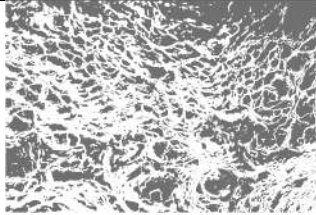
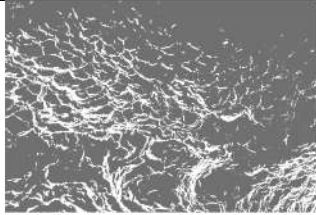
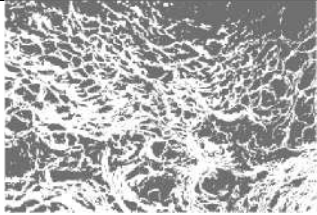
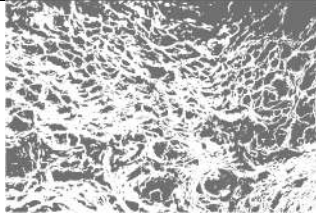
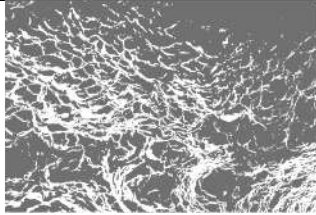
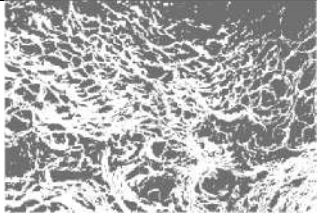
1	2	3	4
160	 1,9592	 1,6467	 1,9510
192	 1,9600	 1,7933	 1,9524
224	 1,9592	 1,8802	 1,9524
256	 1,9592	 1,9193	 1,9524

Рис. 3.14. Результат бінаризації серії зображень на рис. 3.13 з використанням порогових значень L_{ser} , $R/2$ та оптимального порогу і відповідні їм фрактальні розмірності.

Для зручності порівняння та аналізу результатів обчислення фрактальних розмірностей (рис. 3.14), отриманих при застосуванні різних методів бінаризації, представимо їх на одному графіку (рис. 3.15).

Проаналізуємо представлені на рисунку 3.15 дані.

Отже, на рис. 3.15 представлені результати обчислення фрактальних розмірностей для серії зображень (рис. 3.13) однієї і цієї ж сцени, але з використанням різного діапазону інтенсивностей, що моделює формування зображень при різних умовах зовнішнього освітлення.

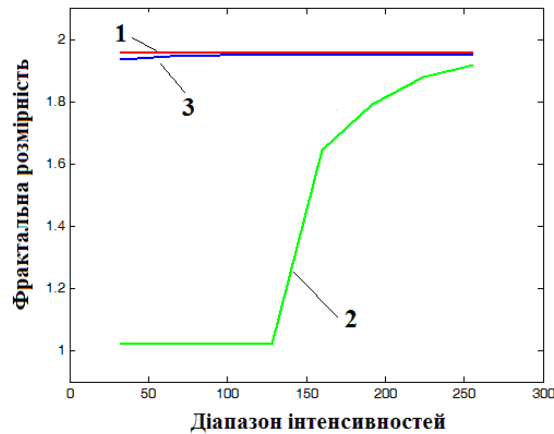


Рис. 3.15. Значення фрактальних розмірностей, обчислених для однієї серії зображень при застосуванні різних підходів до їх бінаризації: 1 – з використанням порогового значення L_{ser} , 2 – з використанням за порогове значення $R/2$, 3 – з використанням оптимального порогу [80].

Обчислення фрактальних розмірностей проводилися із застосуванням клітинного та крапкового методів [29, 128], які використовують за вхідні лише бінарні зображення. Бінарні зображення формувалися на основі даної серії (рис. 3.13) трьома різними методами – з використанням за порогове значення L_{ser} (рис. 3.14, другий стовпець), $R/2$ (рис. 3.14, третій стовпець) та з використанням оптимального порогу (рис. 3.14, четвертий стовпець). Бінарні зображення, сформовані з використанням в якості порогового значення L_{ser} та з використанням оптимального порогу, забезпечують добру деталізацію, а зображення є майже схожими. Як результат, їх фрактальні розмірності є близькими за значеннями (рис. 3.15, криві 1 та 3) та не залежать від діапазону інтенсивностей вхідних зображень (рис. 3.13), а отже і від умов зовнішнього освітлення при формуванні цих зображень. При формуванні бінарних

зображень з використанням порогового значення $R/2$, важливе значення має діапазон інтенсивностей вхідних зображень. Якщо діапазон інтенсивностей вхідних зображень від 0 до $R/2$, то бінарне зображення отримується абсолютно чорним. В інших випадках даний підхід теж не працює коректно, деякі деталі будуть на бінарному зображенні відсутніми, що призводить до занижених значень фрактальних розмірностей (рис. 3.15, крива 2). Даний підхід з використанням порогового значення $R/2$ може бути застосований лише після нормалізації вхідних зображень (рис. 3.13) за рівнем інтенсивності [76]. Більш детально це досліджено у підрозділі 3.3 цієї дисертаційної роботи.

3.5. Вплив шуму на фрактальну розмірність зображень

Як уже не раз зазначалося у роботі, зорове сприйняття людини є переважаючим серед усіх інших. Через це набуло широкого поширення представлення інформації у вигляді зображень. Незважаючи на постійне вдосконалення технічних засобів формування та відображення візуальної інформації, сформовані дані вимагають постійного використання технологій обробки та аналізу зображень. Серед цих методів важливе місце займають методи попередньої обробки, зокрема, фільтрації шумів. Розглянемо природу шуму більш детально.

Світло, яке попадає на елементи матриці формування зображень, перетворюється у відповідний йому електричний сигнал, що бере безпосередню участь у формуванні зображення. Система перетворення світло-сигнал характеризується певними похибками, які мають випадковий характер і це є причиною виникнення шуму. На рівень шуму суттєво впливає розмір та тип елементів матриці, їх спотворення, чутливість матриці, час експонування тощо.

Загалом існує два основних типи шумів – шум інтенсивності та хроматичний. У першому випадку відбуваються спотворення рівнів

інтенсивностей, в другому – кольору. Шум спотворює візуальне сприйняття зображення. Він особливо помітний на ділянках зображень з низьким рівнем інтенсивності. На локальних околах з високим рівнем інтенсивності шум є менш помітним, оскільки ці області відповідають більш сильному сигналу, і як наслідок, там більше співвідношення сигнал/шум. На практиці це означає, що коли при формуванні буде застосовано малу витримку затвору об'єктиву, то на зображеннях буде присутній видимий шум. Його не вдасться усунути навіть при висвітлюванні, тобто розтягу інтенсивностей, таких зображень. Перевага занадто великої витримки у тому, що на зображеннях буде значно менше шуму, їх можна затемнити. Тут потрібно лише слідкувати, щоб при цьому жодна з областей такого зображення не була засвітлена до верхнього діапазону інтенсивностей, тобто до білого кольору. Слід зазначити, що така ситуація є характерною для цифрових фотокамер.

Відомо багато методів усунення шумів. Це пояснюється існуванням великої кількості класів зображень та характером дії шуму на зображення – адитивний, мультиплікативний та імпульсний.

Дослідимо вплив різних типів та рівнів шумів зображення на обчислення їх фрактальної розмірності [76]. При обчисленні фрактальної розмірності зображення будемо використовувати найкращу збіжність клітинного та крапкового методів [29, 128].

Для оцінки рівня спотворення зображень різними типами шумів використаємо відношення пікового рівня сигналу до шуму PSNR, яке обчислимо за наступними виразами

$$PSNR = 10 \cdot \lg \left(\frac{R^2}{\frac{1}{N \cdot M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (L(i, j) - L_{noise}(i, j))^2} \right), \quad (3.30)$$

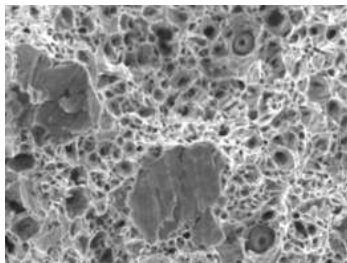
де $L(i, j)$ та $L_{noise}(i, j)$ - елементи вхідного та зашумленого зображення, розміри яких рівні $N \times M$; R - діапазон інтенсивностей зображення (для восьми бітних $R = 256$).

Одним з найбільш розповсюджених типів шумів є гаусівський шум. Він характеризується нормальним розподілом (3.31) та адитивним способом впливу на відліки зображення.

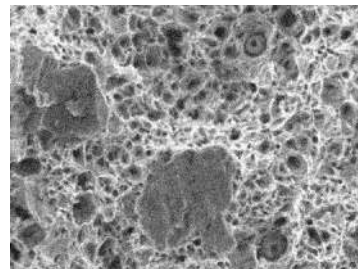
$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.31)$$

де μ - математичне сподівання; σ^2 - дисперсія випадкової величини.

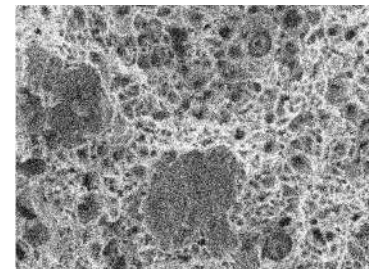
При формуванні тестових зображень з накладанням гаусівського шуму прийmemo математичне сподівання $\mu = 0$, а дисперсія σ^2 нехай буде рівна 0,01, 0,05, 0,10 та 0,15 для випадку, коли значення інтенсивності восьмибітного зображення буде займати весь можливий діапазон $[0, 255]$ (рис 3.16).



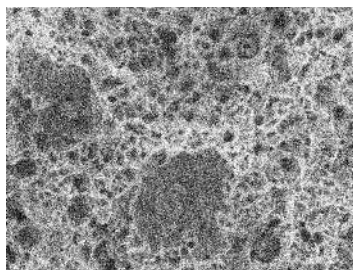
a) Вхідне зображення
 $fr = 1,9574$



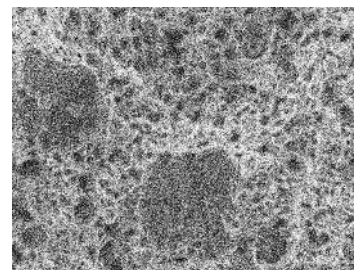
б) $\sigma^2 = 0,01$,
 $PSNR = 20,11$,
 $fr = 2,0053$



в) $\sigma^2 = 0,05$,
 $PSNR = 13,61$,
 $fr = 2,0223$



г) $\sigma^2 = 0,10$, $PSNR = 11,31$
 $fr = 2,0250$



д) $\sigma^2 = 0,15$, $PSNR = 10,18$
 $fr = 2,0259$

Рис. 3.16. Серія зображень з різним рівнем гаусівського шуму та відповідними значеннями фрактальної розмірності fr .

На рис. 3.16 наведені значення фрактальних розмірностей для одного і цього ж тестового зображення, але з різним рівнем гаусівського шуму. Вони змінюються від 1,9574 до 2,0259 при зміні дисперсії шумової складової σ^2 від 0,01 до 0,15. За отриманими результатами можна зробити висновок, що наведений гаусівський шум лише в незначній мірі впливає на обчислення фрактальних розмірностей, оскільки максимальне відхилення від фрактальної розмірності вхідного зображення становить 2,5%.

Проведемо аналогічні дослідження для інших типів шумів – імпульсного та мультиплікативного.

На рис. 3.17 наведені зображення з різним рівнем імпульсного шуму. Параметр d вказує частку спотворених шумом пікселів зображення.

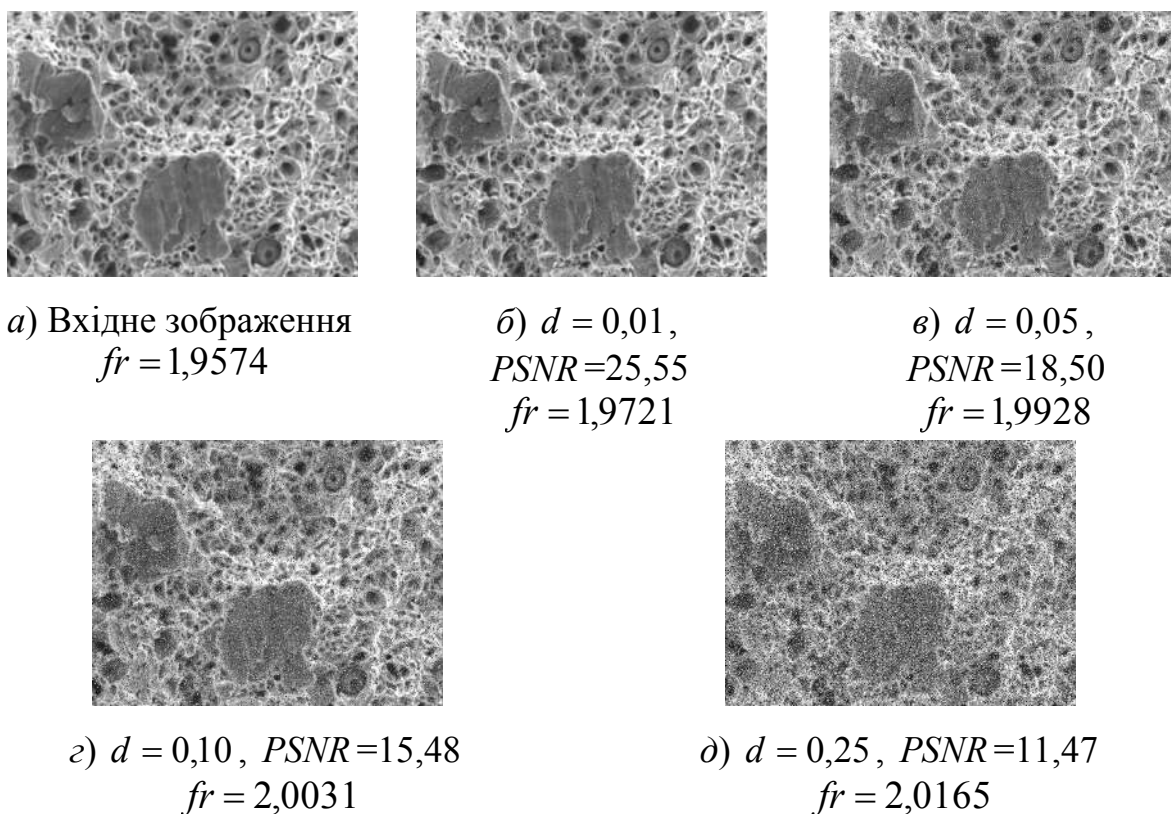


Рис. 3.17. Серія зображень з різним рівнем імпульсного шуму та відповідними значеннями фрактальної розмірності fr .

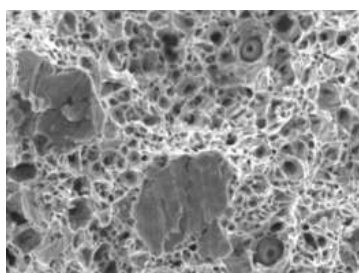
Значення фрактальних розмірностей, які обчислені для серії зображень з часткою спотворених пікселів від 1% до 25%, змінюється в межах від 1,9721 до

2,0165, у той час коли фрактальна розмірність вхідного зображення рівна 1,9574. В даному випадку відхилення фрактальної розмірності від відповідного значення для вхідного зображення становить 3%. Для деяких практичних застосувань можна стверджувати, що рівень імпульсного шуму з часткою спотворених пікселів до 0,25, теж незначно впливає на значення фрактальної розмірності зображення.

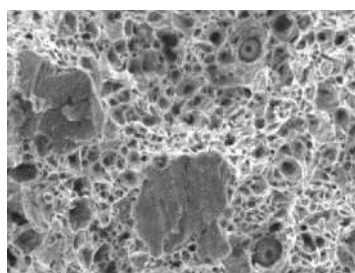
На рис. 3.18 наведено серію зображень з різним рівнем мультиплікативного шуму. Формування зображень проводилося згідно виразу

$$L_{out} = L_{in} + n \cdot L_{in}, \quad (3.32)$$

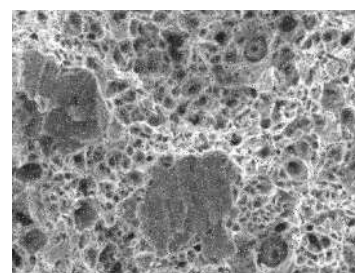
де L_{in} , L_{out} - відповідно матриця вхідного та результуючого зображення; n - рівномірно розподілений випадковий шум з математичним сподіванням $\mu = 0$ та відповідною дисперсією σ^2 .



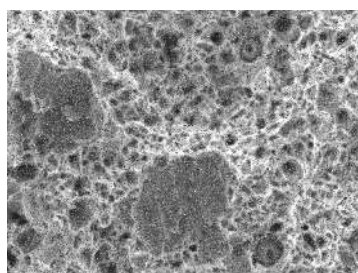
а) Вхідне зображення
 $fr = 1,9574$



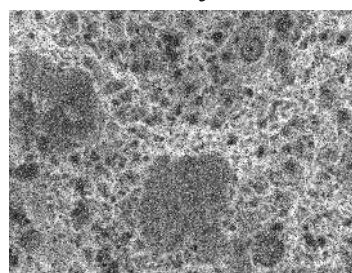
б) $\sigma^2 = 0,01$,
 $PSNR = 24,75$
 $fr = 1,9803$



в) $\sigma^2 = 0,05$,
 $PSNR = 18,01$
 $fr = 2,0077$



з) $\sigma^2 = 0,10$,
 $PSNR = 15,19$, $fr = 2,0175$



д) $\sigma^2 = 0,25$,
 $PSNR = 11,66$, $fr = 2,0233$

Рис. 3.18. Серія зображень з різним рівнем мультиплікативного шуму та відповідними значеннями фрактальної розмірності fr .

З рисунку 3.18 видно, що для серії зображень з рівнем дисперсії (нормованої) мультиплікативного шуму від 0,01 до 0,25 фатальна розмірність змінюється в межах від 1,9803 до 2,0233 та відрізняється від фрактальної розмірності вхідного зображення на 3,3%.

На рис. 3.19 наведено графік залежностей фрактальних розмірностей від типу та рівня шуму, який виражений параметром PSNR.

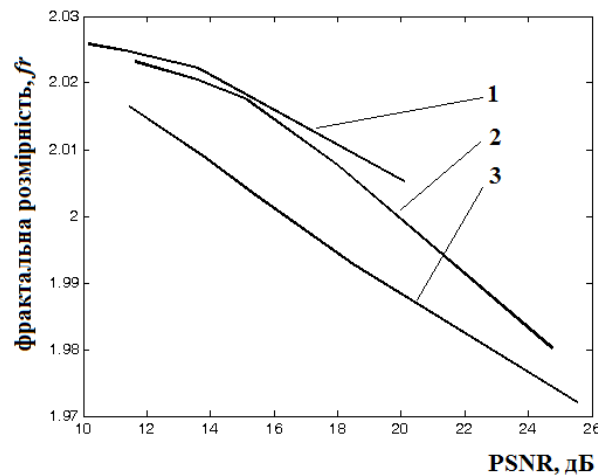


Рис. 3.19. Графіки залежностей фрактальних розмірностей від типу (1 – гаусівський, 2 – мультиплікативний, 3 – імпульсний шуми) та рівня шуму, який виражений параметром PSNR.

З наведених вище досліджень та графіку на рис. 3.19 можна зробити висновок, що вплив гаусівського, імпульсного та мультиплікативного шумів зображення на значення фрактальної розмірності є несуттєве. Якщо розглядати фрактальні розмірності вхідного та зашумленого зображень, то максимальна відносна відносна похибка становитиме 3,3%.

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. Але не усі методи обчислення фрактальних розмірностей є нечутливими чи малочутливими до шумової складової на зображеннях. Наведемо приклад одного з таких методів, де обчислені значення будуть змінюватися в дещо більшому діапазоні.

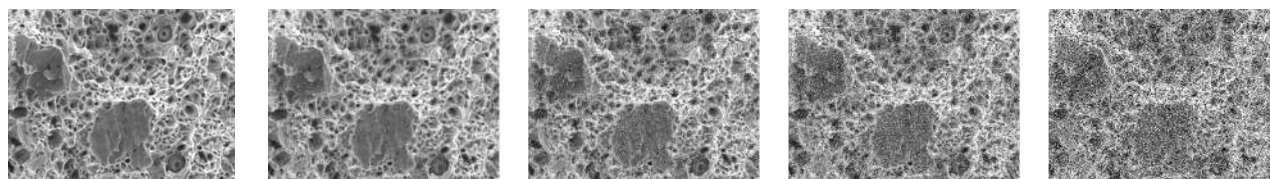
Оскільки металографічне чи фактографічне зображення можна вважати стохастичною структурою, то для оцінки її фрактальної розмірності можна використати дисперсійну фрактальну розмірність [124], яка обчислюється за виразом

$$D_{\sigma} = D_0 + \frac{3 - D'}{2}, \quad (3.33)$$

де D_0 - розмірність евклідового простору, в який вкладений фрактал; D' - оцінка фрактальної розмірності, яка, у свою чергу, обчислюється за виразом

$$D' = 1 - \frac{\log_a \sigma_1^2 - \log_a \sigma_2^2}{\log_a m - \log_a n}. \quad (3.34)$$

Вибір основи логарифму a не має принципового значення і впливає лише на зручність обчислень. На рис. 3.20 наведена серія зображень з накладеним імпульсним шумом, для яких обчислені дисперсійні фрактальні розмірності за виразом (3.33).



а) Вхідне	б) $d = 0,01$,	в) $d = 0,05$,	г) $d = 0,10$,	д) $d = 0,25$,
зображення	$PSNR=25,55$	$PSNR=18,50$	$PSNR=15,48$	$PSNR=11,47$
$fr = 1,9574$	$fr = 2,1601$	$fr = 2,1928$	$fr = 2,2531$	$fr = 2,2716$

Рис. 3.20. Обчислення фрактальних розмірностей для серії зображень з різним рівнем імпульсних шумів.

Рівень шуму описується параметром PSNR, який даного набору знаходиться в межах від 25,55 до 11,47 дБ. Для кожного із цих зображень обчислені значення дисперсійних фрактальних розмірностей, діапазон зміни яких є від 1,9574 для вхідного зображення до 2,2716 для зображення з найвищим рівнем шуму. Максимальна зміна дисперсійної фрактальної розмірності відносно вхідного зображення становить більше 16%. Аналогічні

обчислення для випадку імпульсного шуму та цього ж набору зображень при розрахунку фрактальних розмірностей за допомогою клітинного та крапкового методів становили 3%. Отже, з наведених вище досліджень можна зробити висновок, що методи обчислення фрактальних розмірностей володіють різною чутливістю щодо шумів на зображеннях [76]. Для випадку аналізу зашумлених зображень доцільно використовувати найкращу збіжність клітинного та крапкового методів.

3.6. Аналіз зображень через розподіл фрактальних розмірностей

Перспективним шляхом підвищення ефективності аналізу зображень, зокрема, в неруйнівному контролі, є використання фрактальної топології. Фрактальні розмірності можуть успішно використовуватися для дешифрування зображень. 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 таких 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 більш-менш 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.

При побудові поля фрактальних розмірностей може використовуватися клітинний та крапковий метод [29, 128] або метод з використанням поверхневого інтегралу [74].

Розглянемо приклади декількох задач, які вирішуються із застосуванням поля фрактальних розмірностей досліджуваного зображення.

Локалізація об'єктів на зображенні.

Як уже не раз зазначалося у роботі, зображення неруйнівного контролю, зокрема металографічні та фрактографічні, у більшості випадків відносяться до зображень зі складною структурою. Елементи цієї структури характеризуються різними значеннями фрактальних розмірностей. В результаті, після побудови поля фрактальних розмірностей отримаємо багатомодальний розподіл. Кожна мода такого зображення відповідає певному фрактальному об'єкту чи текстурі та може використовуватися для їх локалізації.

Розглянемо зображення зламу металу шва (рис. 3.21), експлуатованого впродовж 190 тис. годин на паропроводі ТЕС. Тут на фоні в'язкого руйнування з'являються крихкі елементи зламу – вони виділені на рис. 3.21 . Ці елементи появляються внаслідок дії робочого середовища на метал за умов високої температури. Міцність, а особливо пластичність, при цьому знижується. Саме ці елементи викликають зацікавленість з боку матеріалознавців, тому їх потрібно локалізувати та проаналізувати їх метричні характеристики.

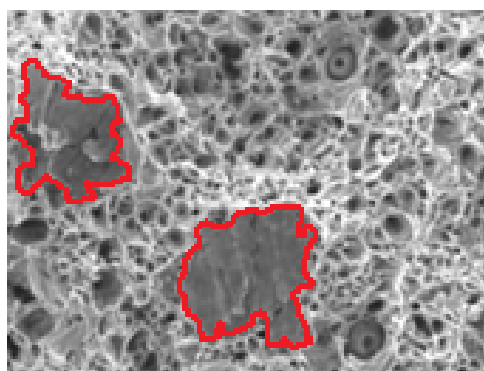
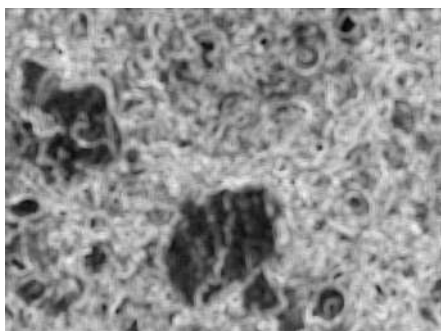


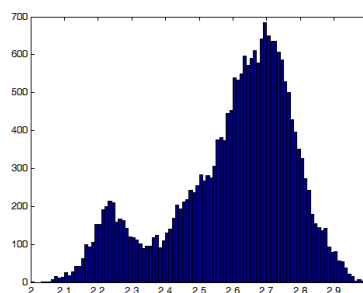
Рис. 3.21. Зображення зламу металу шва з елементами крихкого руйнування.

З точки зору обробки зображень, дані на рис. 3.21 містять два типи структур. Очевидно, що вони будуть характеризуватися різними значеннями фрактальних розмірностей. Побудуємо поле фрактальних розмірностей для зображення на рис. 3.21. З метою виявлення кращого підходу для побудови поля фрактальних розмірностей використаємо два методи: відомий метод многокутників [91] та розроблений у даній роботі метод обчислення

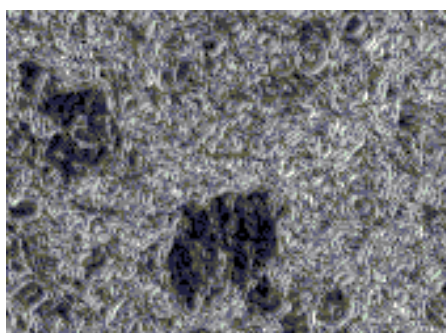
фрактальної розмірності на основі поверхневого інтегралу [74]. У попередній частині роботи (підрозділ 3.4) встановлено, що розмір локальної апертури суттєво впливає на ефективність аналізу. Він має бути якомога меншим для забезпечення детальності і бути співмірним з об'єктами інтересу для забезпечення їх локалізації. Для нашого випадку прийнятним буде розмір локальної апертури в межах від 10 до 20.



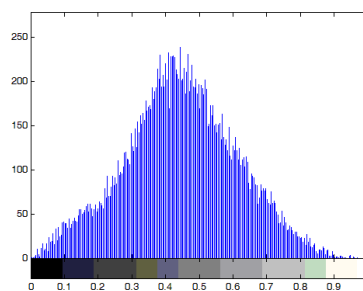
a)



б)



в)



г)

Рис. 3.22. Поле фрактальних розмірностей, обчислене за допомогою відомого методу багатокутників (*a*) та запропонованого методу з використанням поверхневого інтегралу (*в*) та відповідні їм гістограми *б* та *г*.

На рис. 3.22 *a* та *в* у вигляді зображення продемонстровано результати обчислення поля фрактальних розмірностей за допомогою відомого методу багатокутників [91] та розробленого у даній роботі методу обчислення фрактальних розмірностей з використанням поверхневого інтегралу [74] відповідно. З метою візуалізації значення фрактальних розмірностей були приведені до діапазону $[0,1]$. На рис. 3.22 *б* та *г* представлено розподіл

обчислених значень поля фрактальних розмірностей. Представлена на рис. 3.22 *б* гістограма має дві чітко виражені моди. Це свідчить про те, що на досліджуваному зображенні (рис. 3.21) є два основних види текстур, які характеризуються діапазонами розмірностей $2,2 \pm \varepsilon$ та $2,65 \pm \varepsilon$. Ці значення можуть бути використані в якості порогових при бінарному виділенні типів текстур (рис. 3.23 *в*). Параметр ε визначає ширину діапазону значень фрактальних розмірностей, які властиві певному типу текстури чи певній ділянці на зображенні. Також параметр ε впливає на точність локалізації об'єктів та їх метричні характеристики. Визначається він, здебільшого, експериментальним способом. Оскільки на вхідних зображеннях містяться шуми, різноманітні вclusions, то для їх усунення може виникнути необхідність у додатковій морфологічній обробці. Щодо гістограми на рис. 3.22 *г*, яка отримана з використанням відомого методу багатокутників, то вона є одномодальною та не містить чіткої інформації про основні типи текстур на зображенні.

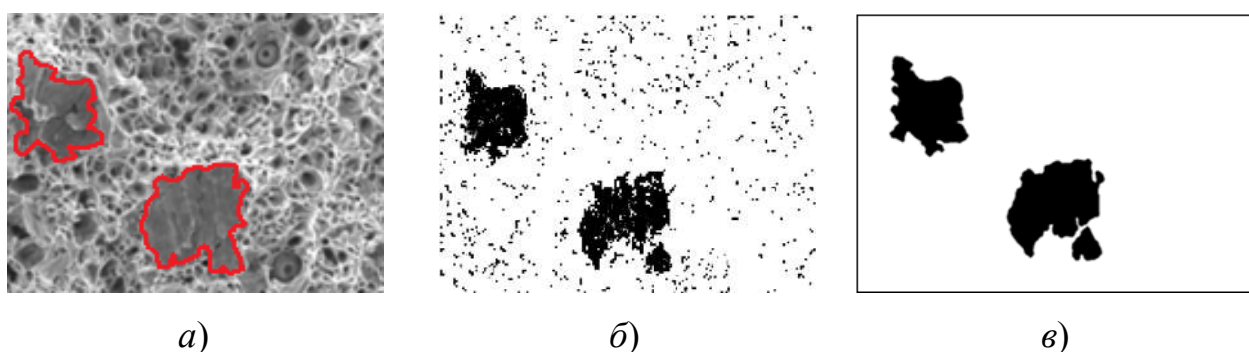


Рис. 3.23. Зображення крихких елементів зламу, локалізованих за допомогою методу багатокутників (*б*) та методу з використанням поверхневого інтегралу (*в*).

На рис. 3.23 *а* представлено фрактографічне зображення з елементами крихкого руйнування, які виділені експертами-матеріалознавцями. Рисунки 3.23 *б* та *в* представляють зображення, які сформовані за допомогою відомого методу багатокутників (*б*) та розробленого методу з використанням поверхневого інтегралу (*в*). На цих зображеннях у вигляді чорних об'єктів представлені результати локалізації крихких елементів зламу. Білий фон - це

в'язке руйнування. Бінарне зображення на рис. 3.23 б окрім елементів крихкого руйнування містить також багато інших помилково виділених об'єктів. Запропонований у роботі метод обчислення фрактальної розмірності з використанням поверхневого інтегралу забезпечив більш точне виділення елементів крихкого руйнування (рис. 3.23 в). Цю перевагу запропонованого методу можна пояснити використанням поверхневого інтегралу, який, на відміну від відомого методу багатокутників, враховує всі перепади інтенсивностей локального околу та дає можливість більш точно обчислити його фрактальну розмірність.

Якщо площу елементів крихкого руйнування, виділених експертами-матеріалознавцями (рис. 3.23 а), вважати еталонною, то метод з використанням поверхневого інтегралу забезпечує на 17% більшу точність локалізації об'єктів інтересу порівняно із відомим методом багатокутників. При цьому слід зазначити, що точність локалізації є чутливою до налаштувань, зокрема, розміру локальної апертури та візуальної якості зображення.

Загалом, результати, які отримані при дослідженні способів локалізації областей різних типів руйнувань, служать дослідникам-матеріалознавцям основою для проведення різноманітних метричних досліджень, обчислення процентного співвідношення в'язкого та крихкого руйнування тощо.

Вплив розміру локальної апертури на розподіл фрактальних розмірностей.

У підрозділі 3.4.1 цієї дисертаційної роботи проводилися дослідження впливу розміру локальної апертури на формування поля фрактальних розмірностей. Було встановлено, що розмір локальної апертури впливає на деталізацію обробки та повинен співпадати з розмірами досліджуваних об'єктів.

Дослідимо як впливає розмір локальної апертури на розподіл фрактальних розмірностей. Результати цього дослідження є важливими, оскільки гістограма розподілу фрактальних розмірностей використовується при виявленні об'єктів, зокрема, при їх локалізації.

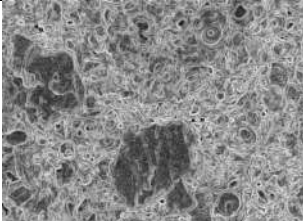
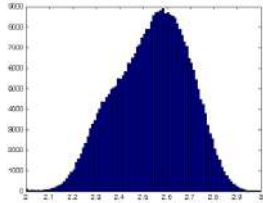
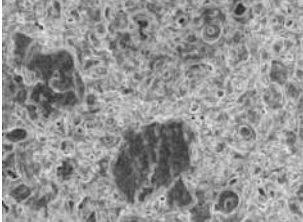
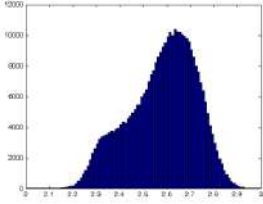
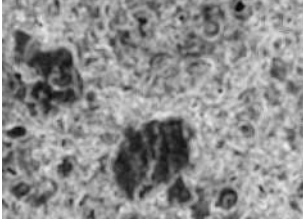
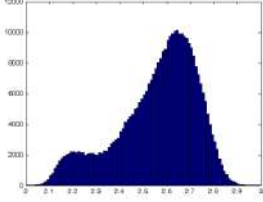
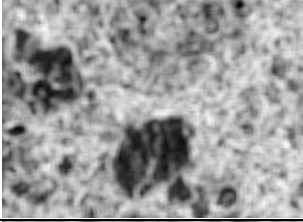
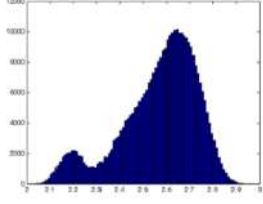

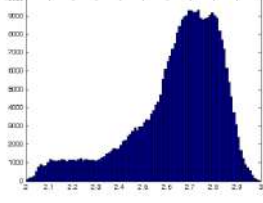

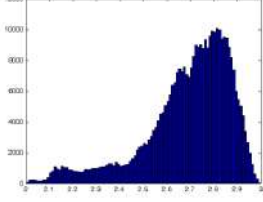
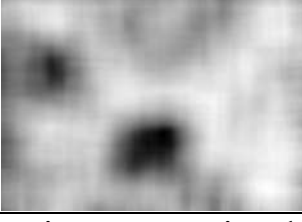
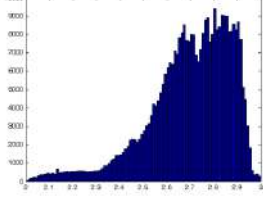
Розмір сторони квадратної локальної апертури	Зображення поля фрактальних розмірностей	Розподіл фрактальних розмірностей
3		
5		
10		
15		
25		
45		
91		

Рис. 3.24. Залежність розподілу фрактальних розмірностей від розміру локальної апертури.

На рис. 3.24 наведені результати побудови полів фрактальних розмірностей за різних розмірів локальних апертур. Для візуалізації обчислені значення фрактальних розмірностей були приведені до діапазону $[0, 1]$. В останньому стовбці наведені гістограми розподілу миттєвих значень фрактальних розмірностей, які отримані при формуванні полів фрактальних розмірностей при різних розмірах апертури.

З отриманих результатів видно, що гістограма розподілу фрактальних розмірностей суттєво залежить від розміру апертури. При деяких значеннях локальної апертури моди розподілу стають особливо вираженими. Для прикладу, на рис. 3.24, коли розмір локальної апертури рівний 15, тоді гістограма розподілу локальних фрактальних розмірностей має дві чіткі моди. Вище було показано, що така гістограма може використовуватися для локалізації об'єктів на зображенні.

Отже, при розмірах локальної апертури, які співмірними з розмірами досліджуваних об'єктів, на гістограмі розподілу фрактальних розмірностей формуються чітко окреслені моди, які характеризують дані об'єкти. На практиці характерні розміри локальних апертур здебільшого визначають експериментально.

Взаємозв'язок між фрактальною розмірністю та дефокусуванням на зображенні.

Доволі частою є ситуація, коли дослідник має набір зображень однієї і тієї ж сцени, які сформовані з різним рівнем фокусування. З цього набору необхідно вибрати зображення, яке є найбільш сфокусованим, оскільки лише таке зображення дасть найбільш точні результати аналізу, особливо, метричного. Поширені підходи до визначення дефокусування на зображенні базуються на обчисленні кількісної оцінки візуальної якості [31], застосуванні двохвимірного перетворення Фур'є та обчисленні ентропії [190]. Існують також алгоритмічні та апаратні методи усунення похибки дефокусування [147]. Альтернативними до класичних підходів є методи фрактальної геометрії.

Розглянемо запропонований нами метод оцінки рівня дефокусування, який базується на статистичних оцінках розподілу миттєвих значень фрактальних розмірностей. На основі зображення зруйнованого зразка металу шва теплостійкої сталі 15X1M1Ф на рис. 3.25 та виразу (3.35) з різними розмірами локальних апертур $n \times m$ сформуємо серію зображень \bar{L} з різним рівнем дефокусування (рис. 3.26).

$$\bar{L}(i, j) = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M L(i, j), \quad (3.35)$$

де N і M - розміри зображення L .

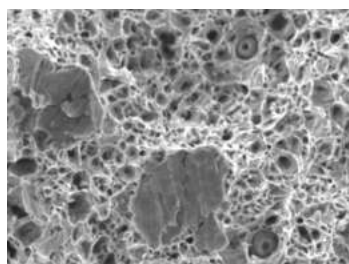
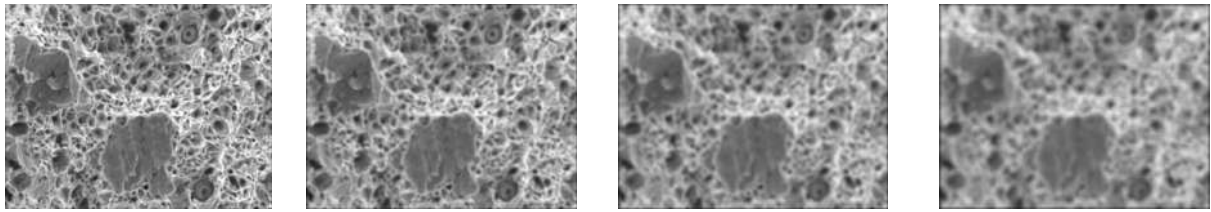


Рис. 3.25. Зображення зруйнованого зразка металу шва теплостійкої сталі 15X1M1Ф.

Для кожного із зображень сформованої серії (рис. 3.26) на основі методу з використанням поверхневого інтегралу [74] побудуємо поле фрактальних розмірностей. За параметр, який характеризуватиме рівень розфокусування, приймемо середнє значення миттєвих фрактальних розмірностей fr_c .

З наведених на рис. 3.26 даних найменший рівень дефокусування має зображення a), яке має найбільшу середню фрактальну розмірність із наведеної серії дефокусованих зображень.

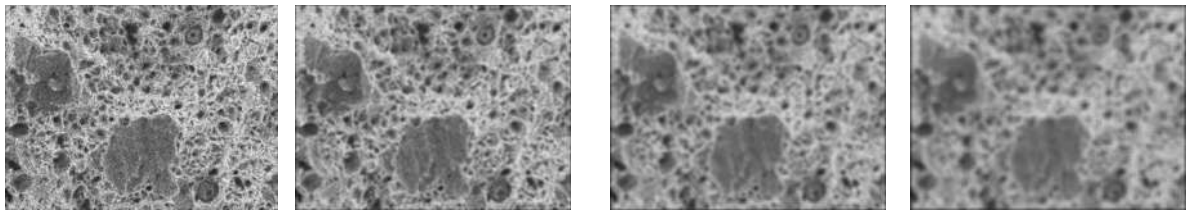
На дефокусованих зображеннях, особливо за умов недостатнього освітлення чи не надто якісних пристроїв фотофіксації, у більшості випадків присутній шум. Проведемо дослідження впливу шуму на середнє значення миттєвих фрактальних розмірностей для випадку дефокусованих зображень.



а) 3×3 , $fr_c = 2,5736$
 б) 7×7 , $fr_c = 2,5394$
 в) 11×11 , $fr_c = 2,4989$,
 г) 15×15 , $fr_c = 2,4399$

Рис. 3.26. Середні значення миттєвих фрактальних розмірностей fr_c серії зображень, сформованої через ковзне усереднення зображення на рис. 3.25 з різним розміром локальної апертури.

Для цього сформуємо зображення з накладеним нього мультиплікативним шумом ($\sigma^2 = 0,25$, $PSNR = 11,66$). Далі, аналогічно як і у попередньому дослідженні, необхідно сформувати серію зображень з різним рівнем дефокусування. Це реалізується через усереднення зображень з різним розміром ковзної локальної апертури (рис. 3.27).



а) 3×3 , $fr_c = 2,6779$
 б) 7×7 , $fr_c = 2,5559$
 в) 11×11 , $fr_c = 2,4808$,
 г) 15×15 , $fr_c = 2,4317$

Рис. 3.27. Середні значення миттєвих фрактальних розмірностей fr_c серії зашумлених зображень.

З рис. 3.27 видно, що аналогічно як і у випадку дослідження серії незашумлених зображень (рис. 3.26), найбільше середнє значення фрактальної розмірності має зображення а), яке сформоване з найменшою апертурою усереднення і якому властивий найменший рівень дефокусування. Таким чином, накладений на зображення шум не порушив виявленої раніше закономірності у встановленні найкращого з точки зору фокусування

зображення. Така ситуація є властивою для зображень, які формуються за однакових умов.

Отже, з наведених вище досліджень можна зробити наступні висновки. З набору різнофокусних зображень найменш розфокусованим буде зображення, яке характеризується найбільшою усередненою фрактальною розмірністю fr_c . Це твердження є справедливим і для випадку, коли ці зображення будуть містити шумову складову на рівні $PSNR=11,66$.

Висновки до розділу 3

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

Запропоновано метод обчислення фрактальної розмірності з використанням поверхневого інтегралу, який, на відміну від відомих підходів, дає можливість коректно опрацьовувати напівтонові зображення без необхідності їх бінарного представлення.

Встановлено, що фрактальна розмірність є інваріантною ознакою при деяких видах афінних перетворень за умови дотримання певних вимог. Максимальна відносна похибка обчислення фрактальної розмірності становить 3,4%. Ця властивість дає можливість описувати зображення однієї сцени, які сформовані при різних умовах освітлення, з різним коефіцієнтом масштабування та різним кутом повороту.

Встановлено, що при обчисленні поля фрактальних розмірностей та фрактальної розмірності цілого зображення важливим є правильний вибір налаштувань. Зокрема, у випадку побудови поля фрактальних розмірностей розмір локальної апертури повинен бути співмірним з розміром об'єктів зацікавлення на зображенні. При обчисленні фрактальних розмірностей за клітинним та крапковим методом важливим є вибір методу бінаризації, який має забезпечити найкращу деталізацію дрібних предметів на бінарному зображенні.

Встановлено, що вплив гаусівського, імпульсного та мультиплікативного шумів зображення для рівнів PSNR від 11 до 26 дБ на значення фрактальної розмірності залежить від методу її обчислення, що слід враховувати при

фрактальному аналізу зображень. При обчисленні фрактальної розмірності зображення за найкращою збіжністю клітинного та крапкового методів максимальна відносна похибка становить 3,3%.

Перспективною технологією аналізу зображень є використання розподілу фрактальних розмірностей по полю зображення. Гістограма розподілу поля фрактальних розмірностей суттєво залежить від розміру апертури. Встановлено, що при розмірі локальної апертури, який співмірний з розміром досліджуваних об'єктів, моди розподілу стають особливо вираженими. Кожна з цих мод свідчить про наявність текстури, яка характеризується певною фрактальною розмірністю. Ця властивість використовується для локалізації об'єктів на зображенні. Зокрема, при застосуванні методу обчислення фрактальної розмірності з використанням поверхневого інтегралу, забезпечується на 17% менша середня похибка локалізації об'єктів інтересу у порівнянні з відомими аналогами.

Гістограма розподілу фрактальних розмірностей по полю зображення може використовуватися для оцінки дефокусування зображення. Встановлено, що з серії зображень, сформованих при різному фокусуванні, найменш розфокусованим буде зображення, яке характеризується найбільшою усередненою фрактальною розмірністю fr_c . Ця властивість є справедливою і для випадку, коли ці зображення будуть містити шумову складову.

РОЗДІЛ 4

КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ФРАКТАЛЬНИХ РОЗМІРНОСТЕЙ

4.1. Аналіз текстури фрактографічних зображень на основі спектру фрактальних розмірностей Реньї

При будівництві мостів, трубо- та газопроводів, машинобудуванні та ін. найбільш часто використовують метал, зокрема, різноманітні сталі. Під час експлуатації, з плином часу і під впливом зовнішніх факторів метал втрачає свої початкові механічні властивості, деградує та руйнується. Основними типами руйнування є в'язке або пластичне та крихке [81, 137], які залежать від умов, в яких відбувається експлуатація. Для прикладу, сталь при температурі біля 20⁰ для випадку простих сил (розтягування, стиснення, згинання) має меншу протидію зсуву, ніж відриву, тому руйнується пластично. При цих же зовнішніх діях, але при низьких температурах, відбувається крихке руйнування [89, 100].

Отже, знаючи тип руйнування металу, можна змоделювати причини, які до цього призвели. Це робить актуальною задачу автоматичного визначення типу руйнування.

Для опису текстур зображень з різними типами руйнування здебільшого використовують два підходи – статистичний та текстурний [81, 152]. Серед основних труднощів при вивченні та описі текстур виділимо це, що важко розробити універсальний метод їх розпізнавання. Іншими словами, завжди можна розробити метод розпізнавання будь-якої конкретної текстури, який буде характеризуватися високою ефективністю, але не буде придатний для розпізнавання іншого типу текстури. Одна з причин полягає в тому, що при розробленні методів розпізнавання складних текстур здебільшого використовується евклідова геометрія. Вона може характеризувати симетричні

структури, які не надто часто зустрічаються у фрактографічних зображеннях. Експериментальні дослідження показали, що для опису таких об'єктів доцільно використовувати фрактальну геометрію, яка характеризується спектром фрактальних розмірностей для кожного елементу текстури металу та чутлива до зміни конфігурації текстури.

Проведені дослідження показали, що фрактографічні зображення характеризуються різними значеннями фрактальних розмірностей [81]. Для кількісного оцінювання фрактальних розмірностей використано клітинний та крапковий методи [128]. На рисунку 4.1 наведено приклади фрактографічних зображень крихкого та в'язкого зламів сталі 15Х1МФ та відповідні їм фрактальні розмірності.

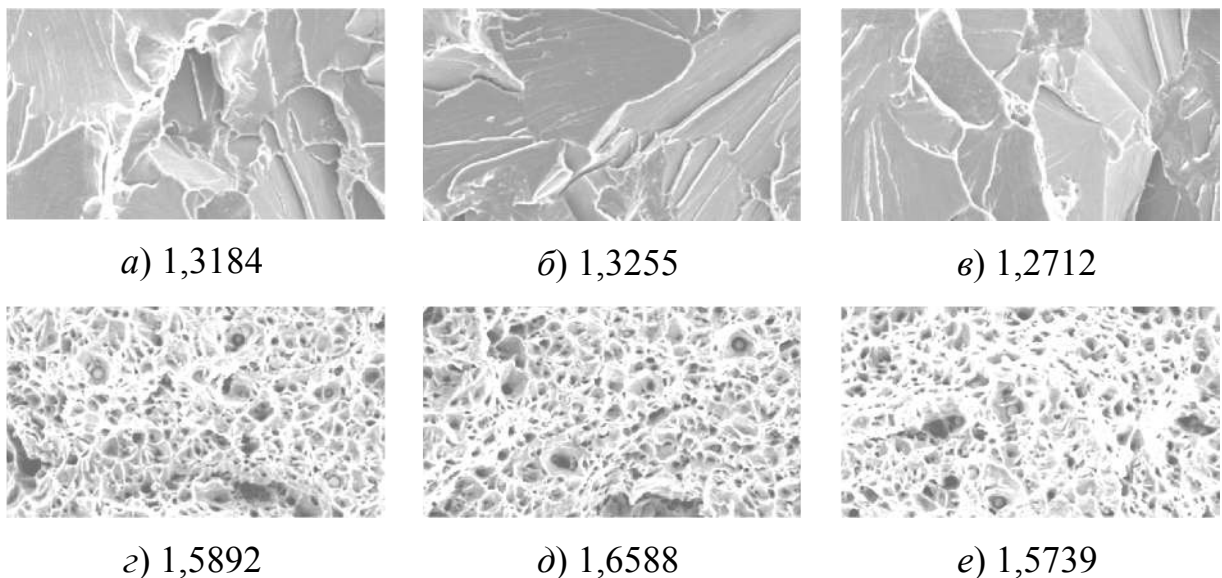


Рис. 4.1. Зображення крихкого (а, б, в) та в'язкого зламів (з, д, е) сталі 15Х1МФ та відповідні їм значення фрактальних розмірностей.

З рисунку 4.1 видно, що фрактальна розмірність представляє собою одне число – інтегральну оцінку, яка не завжди може надати вичерпну характеристику зображення складної текстури. Доволі часто для оцінювання складних текстур використовують мультифрактальні методи [132]. Для цього використовують спектр розмірностей Реньї, складові якого мають певний

фізичний зміст. Для прикладу, D_0 – просторова розмірність фракталу, D_1 – інформаційна розмірність і т.д. Хоч використання лише окремих значень без використання всього спектру розмірностей є недостатнім для повної характеристики структури матеріалу.

Спект фрактальних розмірностей представляє собою набір фрактальних розмірностей D_q , який можна представити деякою функцією $\tau(q)$ з нелінійним характером. Значення D_q не можна назвати фрактальними розмірностями у звичному розумінні, для цього разом з ними застосовується так звана функція мультифрактального спектру $f(\alpha)$. Її обчислюють шляхом перетворення Лежандра функції $\tau(q)$ [132]:

$$f(\alpha(q)) = \alpha(q) \cdot q - \tau(q). \quad (4.1)$$

Фрактальну розмірність можна інтерпретувати як обчислення деякої міри за зображенням. Застосуємо представлення, яке дещо подібне до клітинного методу обчислення фрактальної розмірності зображення. Нагадаємо, що мова йде про бінарне фактографічне зображення. Змоделюємо зображення у вигляді поверхні інтенсивностей, яка покривається клітинами з розміром r_k , де $k = 1 \dots K$ [82]. Кожна комірка оцінюється величиною

$$\mu_{(i,j),k} = \frac{n_{(i,j),k}}{N}, \quad (4.2)$$

де $n_{(i,j),k}$ – кількість пікселів зображення фракталу, які попали в квадратну комірку з розміром апертури r_k та центром в (i, j) ; N – сумарна кількість пікселів у клітині.

Прийmemo за N_k кількість комірок з розміром r_k , які потрібно, щоб покрити досліджувану фрактальну фігуру. Тоді у виразі (4.1) $f(\alpha(q))$ та $\alpha(q)$ обчислюємо наступним чином:

$$\alpha(q) \approx \frac{A_k(q)}{\ln(r_k)}, \text{ де } A_k(q) = \frac{\sum_{(i,j)}^{N_k} ((\mu_{(i,j),k})^q \cdot \ln(\mu_{(i,j),k}))}{\sum_{(i,j)}^{N_k} (\mu_{(i,j),k})^q}, \quad (4.3)$$

$$f(\alpha(q)) \approx \frac{F_k(q)}{\ln(r_k)}, \text{ де } F_k(q) = \frac{\sum_{(i,j)}^{N_k} \left((\mu_{(i,j),k})^q \cdot \ln \left(\frac{(\mu_{(i,j),k})^q}{\sum_{(i,j)}^{N_k} (\mu_{(i,j),k})^q} \right) \right)}{\sum_{(i,j)}^{N_k} (\mu_{(i,j),k})^q}. \quad (4.4)$$

Алгоритм обчислення мультифрактальних розмірностей згідно виразів (4.3) та (4.4) є наступним. Бінарне зображення покривають сіткою, розмір комірки якої r_k при кожному покритті буде різним. При цьому на кожному кроці обраховують величини $A_k(q)$ та $F_k(q)$. Отже, буде очислено K значень $A_k(q)$ та $F_k(q)$, які в системах координат $(A_k(q), \ln(r_k))$ та $(F_k(q), \ln(r_k))$ представляються наборами із K точок. Методом найменших квадратів обчислюємо $\alpha(q)$ та $f(\alpha(q))$. Надалі, згідно виразу (4.1) обчислюємо величину $\tau(q)$ [132]. Після цього розраховуємо значення спектру узагальнених фрактальних розмірностей Реньї

$$D_q = \frac{\tau(q)}{q-1}. \quad (4.5)$$

Для випадку, коли $q=1$, тоді $D_1 = f(\alpha(1)) = \alpha(1)$. Використаємо отриманий вираз обчислення спектру Реньї для аналізу зображень [82, 132]. Зокрема, використаємо описаний метод для аналізу текстури фрактографічних зображень, які наведені на рис. 4.1. Обчислимо спектр Реньї для кожного із фрактографічних зображень. Після цього ці спектри попарно порівнюємо між собою. Це дасть можливість виявити ознаки, які використаємо для класифікації зображень за типом зламу. Схожість або відмінність між об'єктами класифікації встановлюється залежно від вибраної метричної відстані між ними. У цьому випадку об'єктом досліджень є зображення, які описуються спектром Реньї D_q , що являє собою вектор параметрів D_i . У цьому сенсі, зображення може бути представлене як деяка точка в i -вимірному просторі. Отже, подібність між зображеннями буде визначатися як відповідна віддаль між цими точками. Для класифікації застосовують різноманітні міри відстаней між об'єктами – це різні типи евклідових відстаней, відстань за Хемінгом,

процент невідповідності тощо. Найбільш простою та ефективною мірою відстаней між двома спектрами є відстань Чебишева, яка приймає значення найбільшого модуля різниці між значеннями відповідних властивостей об'єктів. Стосовно нашого випадку цей вираз прийме наступний вигляд:

$$d = \max_q \left| D_q - D_q' \right|. \quad (4.6)$$

Важливим питанням при побудові спектру Реньї є вибір діапазону зміни степеня q . В багатьох роботах [50, 132] за ознаки зображення використовують лише значення спектрів D_q при $q \geq 0$. Для розширення діапазону ознак, які використовуються для опису досліджуваного зображення, а отже, і підвищення його точності, обчислимо значення спектру Реньї як для $q < 0$, так і для $q \geq 0$.

Згідно викладеного вище, обчислимо спектр Реньї для кожного зображення на рис. 4.1. Після цього для кожної пари зображень знайдемо відстань між їх спектрами за допомогою виразу (4.6). Результати проведених досліджень наведені в таблиці 4.1 [82].

Таблиця 4.1. Результати обчислення відстаней Чебишева для спектрів Реньї пар зображень, які представлені на рис. 4.1.

Зображення	a)	б)	в)	г)	д)	е)
a)	0	0,0665	0,0319	1,0042	0,9671	0,9502
б)		0	0,0955	0,9971	0,9600	0,9431
в)			0	1,0180	0,9809	0,9639
г)				0	0,0676	0,0540
д)					0	0,0682
е)						0

В таблиці 4.1 представлені результати дослідження відстаней Чебишева для спектрів Реньї набору зображень, які представлені на рисунку 4.1. Сформовані результати обчислення за значеннями можна розділити на три

групи. Перша група – це відстані за Чебишовим для набору зображень $a)$, $b)$ і $в)$, які представляють собою фрактографічні зображення крихкого зламу. Значення цих відстаней знаходяться в діапазоні від 0,0319 до 0,0955. Другу групу становлять результати обчислення відстаней за Чебишевим для пар фрактографічних зображень крихкого зламу $a)$, $b)$, $в)$ та в'язкого зламу $г)$, $д)$ і $е)$. Ці результати знаходяться в діапазоні від 0,9431 до 1,0180. Третя група – це відстані за Чебишовим для набору зображень $г)$, $д)$ і $е)$, які представляють собою фрактографічні зображення в'язкого зламу. Числові значення цих відстаней знаходяться в діапазоні від 0,0540 до 0,0682. Отже, відстань згідно вибраної міри для пари фрактографічних зображень, які представляють один тип руйнування, є невеликою – максимум 0,0955. Для пари фрактографічних зображень з різними типами руйнування відстань за Чебишевим є на порядок вищою і становить мінімально 0,9431. Отже, якщо у досліджуваній парі використати еталонне фрактографічне зображення з відомим типом руйнування, то в автоматичному режимі, в залежності від значення відстані за Чебишевим, можна встановлювати тип руйнування другого фрактографічного зображення. Цей тип зламу буде співпадати з типом зламу на еталонному зображенні, якщо відстань за Чебишевим буде меншою за 0,09, та відмінним від еталонного, якщо цей параметр буде більшим за 0,9431.

В даній роботі [82] розроблено метод класифікації фрактографічних зображень зламів через використання спектру узагальнених фрактальних розмірностей Реньї. Встановлено, що використання запропонованого підходу дає можливість класифікувати досліджувані зображення за мінімальною відстанню Чебишева. Перевагою запропонованого методу є те, що відстань Чебишева для спектрів Реньї пар зображень з різними типами зламів відрізняється на порядок. У випадку використання клітинного та крапкового методів фрактальна розмірність різнилася сотими долями числа. Таким чином, розроблений підхід дає можливість більш точно та однозначно класифікувати тип зламу на зображенні.

4.2. Виділення різнорозмірних об'єктів на зображенні за допомогою фрактальних розмірностей

Аналіз зображень є однією з важливих задач обробки візуальної інформації. Результати досліджень цієї проблеми знайшли своє застосування при вирішенні багатьох практичних задач, зокрема, при оцінці мікроструктури та якісних характеристик матеріалів. Оскільки між внутрішньою структурою матеріалу та його механічними властивостями існує відповідність, то на основі знань про внутрішню структуру можна визначати механічні характеристики матеріалу [29, 128].

Задача оцінки структури матеріалів не є новою, проте протягом тривалого періоду вона вирішувалася методами та засобами механіки, хімії та інших дисциплін. Незручності полягали у тому, що ці комплексні дослідження представляли собою трудомісткий і довготривалий процес та не давали повної інформації стосовно якісних характеристик матеріалу. Тому виникла необхідність у застосуванні нових, більш ефективних, з точки зору точності та часових затрат, підходів до кількісної оцінки внутрішньої структури матеріалів. В багатьох роботах [29, 108, 110, 128, 227] для формування однозначної кількісної оцінки параметрів структури, кількісного вмісту різних об'єктів і т.п. використовують фрактальну розмірність. Дослідження, які проводилися в цьому напрямку, виявили великий потенціал у застосуванні теорії фракталів до обробки зображень. Розглянемо нові підходи до виділення контурів та об'єктів різних розмірів на зображенні [73]. Для цього розглянемо модель, яка буде використовуватися при визначенні якісних характеристик матеріалів та виділенні різнорозмірних об'єктів на зображеннях.

Мультифрактальна модель зображення структури матеріалу. У підрозділі 3.1 цієї роботи для кількісного визначення процентного вмісту перліту (фериту) було використано лише фрактальну розмірність. Проте використання лише одного параметра (фрактальної розмірності) не дозволяє однозначно описати всю різноманітність такої складної структури. Це

пояснюється тим, що реальні зображення характеризуються нерівномірністю розподілу інформаційних ознак по поверхні всієї структури. Тому звичайну хаусфордову фрактальну розмірність потрібно розглядати тільки як приблизну кількісну оцінку структури.

Для аналізу зображень з неоднорідним розподілом інформаційних ознак по структурі використовується мультифрактальна модель [108]. Основна ідея мультифрактального аналізу полягає у тому, що досліджуване зображення розбивається на однорідні підмножини з чітко вираженою фрактальною розмірністю. Такий підхід дозволяє підвищити точність при обчисленні фрактальної розмірності. Зазначимо також, що мультифрактальне представлення може бути узагальнене на випадок, коли в заданій області задається будь-яка інша міра, яка має фізичний зміст.

В більшості робіт фрактальні розмірності використовуються лише для кількісного оцінювання структури матеріалів [29, 110, 128]. Проте проведені дослідження показують, що підходи на основі теорії фракталів можна застосовувати також при вирішенні інших задач [73, 91].

Як було зазначено раніше, реальні зображення характеризуються нерівномірним розподілом інформаційних ознак по полю зображення. Це зумовлює доцільність використання мультифрактального підходу, суть якого полягає у врахуванні локальних особливостей при обчисленні фрактальної розмірності зображення.

Згідно цього підходу зображення розбивається на локальні околиці розміром $m \times m$, для кожного з яких обчислюється значення фрактальної розмірності $D(i, j)$. Якщо зображення бінарне, то, здебільшого використовується клітинний і крапковий метод обчислення фрактальної розмірності [128]. Для обчислення фрактальної розмірності об'єктів напівтонових зображень застосовують інші підходи. Найбільш зручним з точки зору обчислень є метод призм [91] або метод з використанням поверхневого інтегралу [74].

Використаємо метод призм [91] для формування поля фрактальних розмірностей і розв'язання задачі виділення контурів та об'єктів на зображенні [73]. Побудова поля фрактальних розмірностей з використанням цього підходу детально розглядалася у підрозділі 3.2 цієї роботи.

Метод виділення контурів. Етапи процедури виділення контурів на основі розглянутого підходу наступні. У кожній точці (i, j) зображення обчислюємо фрактальну розмірність за виразом

$$D(i, j) = \frac{\lg S(i, j)}{\lg m}, \quad (4.7)$$

$S(i, j)$ – площа поверхні, яка утворена значеннями інтенсивностей локального околу з центром в точці (i, j) та обчислена згідно виразу (3.12); m – розмір сторони локального околу (припускається, що локальний окіл квадратний).

Фрактальна розмірність $D(i, j)$ обчислюється в кожній точці зображення і таким чином формуємо поле фрактальних розмірностей D деякого металографічного зображення (рис. 4.2 а). При цьому слід зазначити, що розмір локального околу m повинен бути співмірним з розміром досліджуваного об'єкту. Оскільки мова іде про виділення контурів, то допустимим може бути розмір околу 3×3 . Сформоване згідно (4.7) поле фрактальних розмірностей D , значення якого промасштабовані для зручності візуального сприйняття, представлено на рис. 4.2 б.

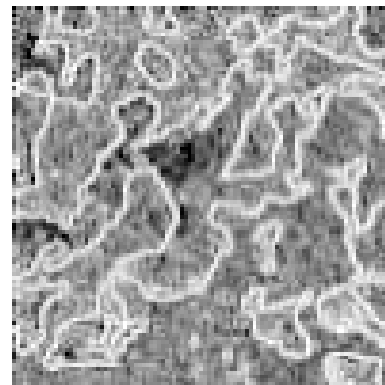
Далі за допомогою порогового методу виділяємо контури об'єктів на зображенні (рис. 4.2 в). Запропонований метод за своїми результатами подібний до відомих градієнтних методів виділення контурів. Спільним для них є те, що аналогічно до градієнтних методів, значення фрактальної розмірності пропорційне величині перепаду інтенсивностей в даній локальній області.

Метод виділення об'єктів. При дослідженні та розробці методу виділення об'єктів на зображенні було виявлено, що згаданий вище метод призм для обчислення фрактальної розмірності [91] є інерційним. Іншими словами, якщо на зображенні є ділянка, яка описується великим значенням фрактальної

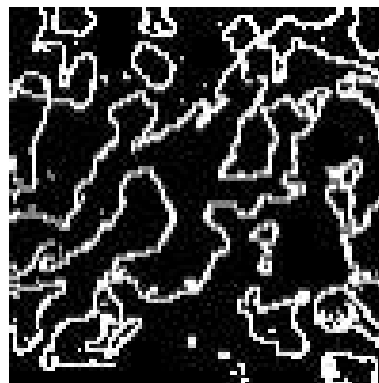
розмірності $D(i, j)$, то це значення знайде своє відображення, тобто буде враховане з певним ваговим коефіцієнтом також в околі цієї точки (рис. 4.3). Цю особливість неважко пояснити. У тому випадку коли ковзна апертура переміщується на межу “фон–об’єкт”, що характеризується стрибком рівня інтенсивностей, тоді різко зростає площа поверхні, яка утворюється цими інтенсивностями (3.12), що призводить до різкого збільшення значення фрактальної розмірності [73].



а) вхідне зображення.



б) зображення поля фрактальних розмірностей D .



в) зображення контурів об’єктів вхідного зображення.

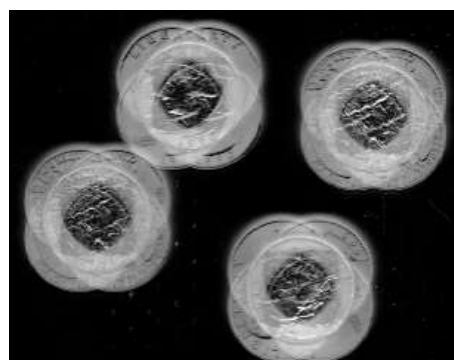
Рис. 4.2. Комп’ютерне моделювання методу виділення контурів на основі використання поля фрактальних розмірностей.

Таким чином, ще на підході до об’єкта відбувається зростання рівня фрактальної розмірності. Цей ефект спостерігається і після проходу об’єкта

локальною апертурою. Ділянка інерційності визначається розмірами локальної апертури. Найбільш наочно цю властивість можна продемонструвати на прикладі зображення монет (рис. 4.3*а, б*), проте даний недолік проявляється при опрацюванні різних класів зображень, у тому числі металографічних (рис. 4.3*в, г*). Проілюструємо цю властивість ковзної фрактальної обробки зображень.



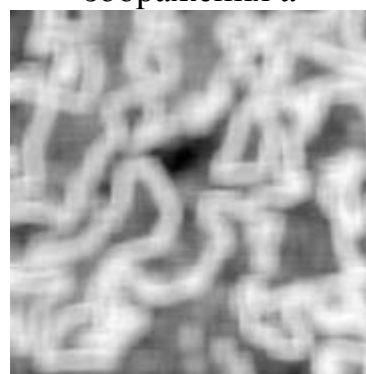
а) вхідне зображення



*б) поле фрактальних розмірностей із розмиттям зображення *а**



в) металографічне зображення



*г) поле фрактальних розмірностей із розмиттям зображення *в**

Рис. 4.3. Ілюстрація інерційності методу фрактальних розмірностей.

В методі виділення контурів використовувалися апертури малих розмірів (3×3), тому явище інерційності не було помітним. В методі ж виділення об'єктів використовуються локальні апертури, розміри яких співмірні з розмірами об'єктів, тому явище інерції проявляється достатньо сильно (рис. 4.3 *б* та *г*). Це призводить до того, що масив поля фрактальних розмірностей практично неможливо використовувати для подальшого аналізу.

Для усунення цього недоліку нами запропоновано модифікувати метод призм [73]. Суть модифікації наступна. Припустимо, що на ділянках зображення з близькими значеннями рівнів інтенсивності, наприклад фону, всі доданки у виразі (3.12) є приблизно однаковими. Тому середньоквадратичне відхилення значень площ трикутників abo , bco , cdo та ado на рис. 3.3 є незначним:

$$\sigma[S_{abo}, S_{bco}, S_{cdo}, S_{ado}] \approx 0. \quad (4.8)$$

Коли ж локальна апертура підходить до контуру, який характеризується стрибкоподібною зміною інтенсивностей, площа одного або двох трикутників різко зростає. Це призводить до збільшення середньоквадратичного відхилення значень площ згаданих вище трикутників. Таким чином, якщо середньоквадратичне відхилення перевищує деякий поріг A

$$\sigma[S_{abo}, S_{bco}, S_{cdo}, S_{ado}] > A, \quad (4.9)$$

то це свідчить про наближення локальної апертури до об'єкта. Поріг A визначає рівень чутливості методу. Якщо ж при обчисленні значень поля фрактальних розмірностей

$$D(i, j) = \frac{\lg(S_{abo} + S_{bco} + S_{cdo} + S_{ado})}{\lg(m)} \quad (4.10)$$

не враховувати (чи враховувати з певним ваговим коефіцієнтом) площу трикутника, значення якої суттєво відрізняється від площ інших трикутників, то можна позбутися явища інерційності у методі призм.

Результати комп'ютерної реалізації запропонованого підходу представлені на рис. 4.4.

З рисунків 4.4 б та з випливає, що модифікація описаних вище обчислень значень поля фрактальних розмірностей призводить до усунення інерційності при виділенні об'єктів на зображенні, що проявляється при використанні відомих підходів (рис. 4.3 б та з).

Отже, вище досліджено два підходи до аналізу зображень з використанням побудови поля фрактальних розмірностей [73]. На основі обчислення поля локальних фрактальних розмірностей зображення побудовано

метод виділення контурів та метод локалізації об'єктів. Перевага запропонованого підходу полягає в усуненні інерційності при побудові поля фрактальних розмірностей, що дозволило підвищити ефективність локалізації об'єктів інтересу.

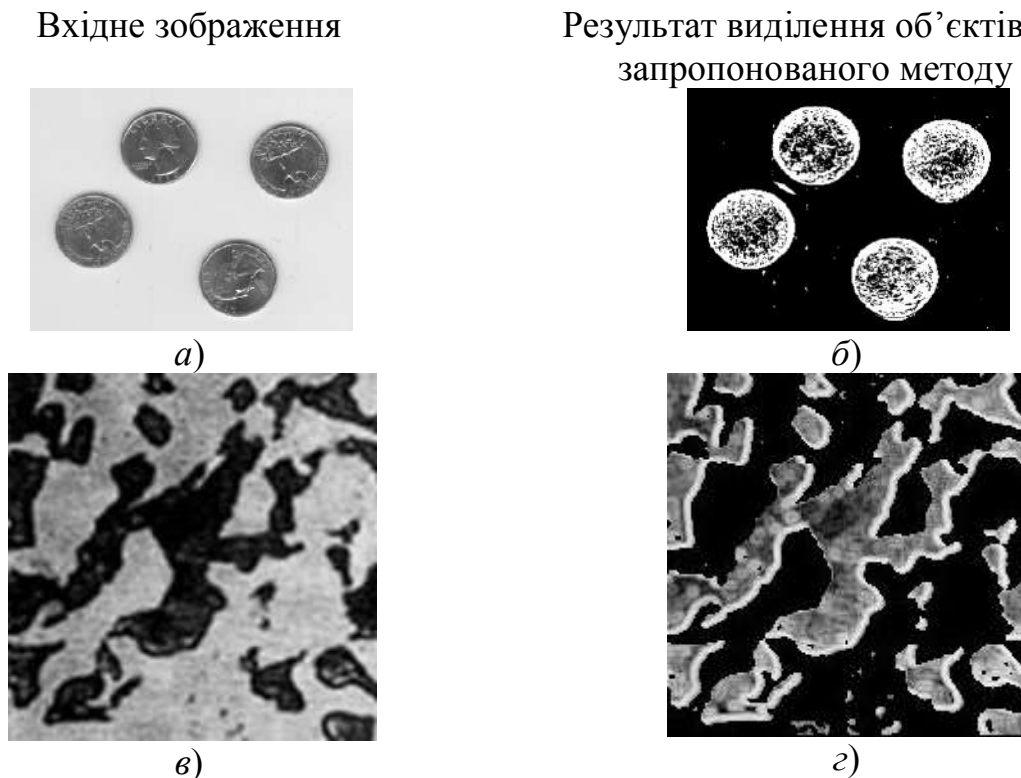


Рис. 4.4. Результати моделювання запропонованого методу виділення об'єктів.

Одним із недоліків розглянутого підходу є його чутливість до шумових викидів на зображенні. Наступні вдосконалення цього підходу можливі у напрямку підвищення його робастності до шумів.

4.3. Вимірювання усередненого розміру зерен металу з використанням фрактальної розмірності

Рівень деградації і властивості матеріалу в металоконструкціях тривалої експлуатації вимагають постійного контролю. Одним із ключових чинників, який тісно корелює з механічними властивостями, є розмір зерна металу [90, 150]. Більшість існуючих способів визначення розмірів зерен розроблені з дотриманням відповідних регламентуючих документів [10, 58-63]. Але їх

практичне застосування характеризується великими трудовими та часовими затратами через потребу набирати статистику і, як наслідок, сформовані результати є дещо суб'єктивними. Другим суттєвим недоліком більшості відомих програмних систем є необхідність використання лише високоякісних металографічних та фрактографічних зображень з чітко окресленими межами зерен. Але здебільшого якість вхідних металографічних зображень не відповідає таким вимогам, особливо при виготовленні шліфів безпосередньо на досліджуваному об'єкті. Такі умови не дозволяють досягнути потрібної якості формування зображення структурних складових: межі зерен досить часто розривні та розмиті. Крім того, на металографічних зображеннях структури практично завжди існує градієнт фону за освітленістю. Тому актуальним є розроблення комп'ютеризованого методу визначення метричних характеристик зерен металів і сплавів, який відповідав би вимогам стандартів [58-63] та забезпечував оброблення металографічних зображень з розмитими та розривними межами зерен.

Результати досліджень та їх обговорення. Методи формування бінарного зображення меж зерен металу за його металографічним зображенням детально описано в [80, 226], тому в цій частині роботи дослідимо метод обчислення розмірів зерен металу за бінарним зображенням його меж зерен [226, 227]. В методах опрацювання зображень та у матеріалознавчих дослідженнях здебільшого використовують евклідову цілочисельну розмірність. Але, як було зазначено вище, цілочисельна евклідова геометрія, на відміну від фрактальної, не є зручним інструментом для опису зміни конфігурації структурних складових [26]. Тому нами застосовано один із найуживаніших клітинний метод обчислення фрактальної розмірності [114]. Відповідно до цього підходу вхідне зображення фракталу покривають сітками у вигляді квадратних комірок з різною величиною кроку сітки, що дорівнює кроку виміру. Далі обчислюють кількість кліток, які покривають досліджувану фрактальну фігуру для кожного кроку виміру. Фрактальну розмірність зображення визначають як тангенс кута нахилу прямої, що апроксимує отриманий набір точок прямої і обчислюється за

допомогою методу найменших квадратів [128]. Більш детально це описано у підрозділі 3.1 цієї дисертаційної роботи. Для обчислення фрактальної розмірності f_r зображень з високою точністю, обчислення слід проводити за найкращою збіжністю клітинного та крапкового методів [26].

Обчислені фрактальні розмірності f_r еталонних зображень представлених в ГОСТ 5639-82 (ASTM E 112) [10, 58], показали, що між усередненим діаметром d та фрактальною розмірністю f_r існує однозначна відповідність (рис. 4.5).

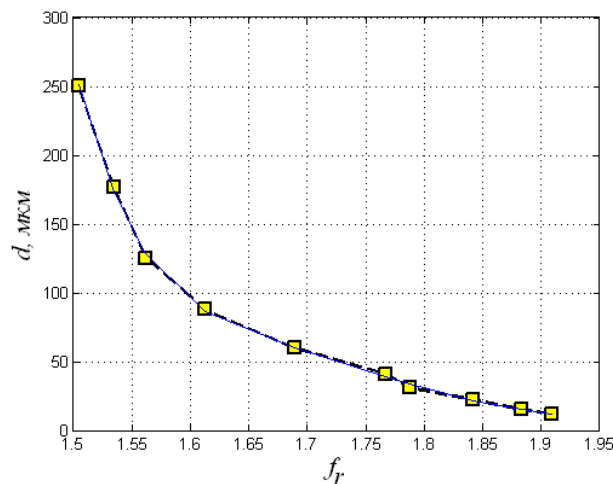


Рис. 4.5. Взаємозв'язок усередненого діаметра зерна d від фрактальної розмірності f_r меж зерен металу: крива – апроксимація залежністю (4.13).

Використавши метод найменших квадратів, апроксимуємо отриману залежність наступним виразом:

$$d = -129250,5 \cdot f_r^5 + 1151402,2 \cdot f_r^4 - 4098157,2 \cdot f_r^3 + 7285297,8 \cdot f_r^2 - 6469045,5 \cdot f_r + 2295716,3 \quad (4.11)$$

Вираз (4.11) моделює залежність усередненого розміру зерен від фрактальної розмірності бінарного зображення меж зерен. Важливо зазначити, що він стосується лише зображень, які сформовані на мікроскопі із збільшенням 100.

Для перевірки достовірності запропонованого підходу обчислимо середній діаметр зерен сталі 12Х1МФ (рис. 4.6 а) та порівняємо його з результатами, які отримані іншим методом.

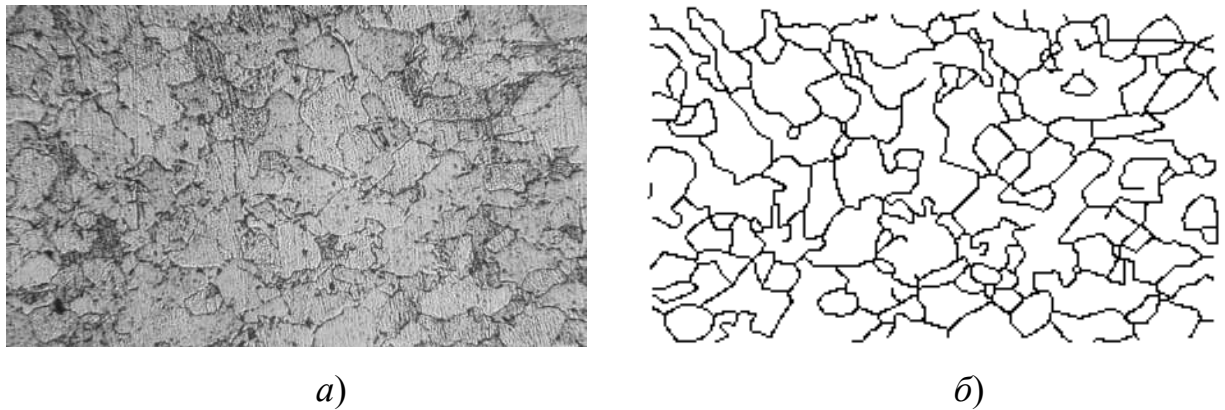


Рис. 4.6. Мікроструктура сталі 12X1МФ (а) та відповідне їй зображення меж зерен (б).

Фрактальна розмірність зображення меж зерен (рис. 4.6 б) рівна 1,77. За виразом (4.11) обчислимо, що цій фрактальній розмірності відповідає усереднений розмір зерна 38,3 мкм. У статті [226] наведено результат вимірювань усередненого діаметру зерен саме цієї ділянки зразка сталі 12X1МФ (рис. 4.6 а) згідно вимог нормативних документів – він становить 36 мкм. Порівняння з результатами обчисленнями за запропонованим методом, які проведені на тестових еталонних зображеннях, показали, що похибка вимірювань становить 6 %.

Отже, побудовано метод визначення усередненого розміру зерен металу за металографічними зображеннями [227], який дозволяє автоматизувати процес обчислення та дає можливість аналізувати металографічні зображення з незамкнутими та розмитими межами зерен без необхідності їх інтерактивного редагування.

4.4. Автоматичне розпізнавання крихкого та в'язкого зламів сталі 15X1МФ з використанням фрактальної розмірності

Сталь є одним з найбільш вживаних матеріалів, який використовується у найрізноманітніших металоконструкціях. Під впливом зовнішніх дій метал втрачає свої механічні властивості, деградує та руйнується [81].

Причини руйнування можуть бути різноманітними – неправильна технологія виготовлення металу, недотримання правил та вимог експлуатації, механічні руйнування. Аналіз зображення зламу дозволяє встановити його тип та виявити причину.

За характером руйнування поділяються на в'язке, крихке та втомне. Для в'язкого руйнування характерною є пластична деформація металів. На зображенні такий злам немає металічного блиску, а поверхня виглядає матовою. Крихке руйнування переважно відбувається під дією одноразових чи повторювальних ударних сил. Зображення ділянок металу з крихким руйнуванням містить гладкі рівні ділянки. При циклічних навантаженнях на металоконструкції виникає втомне руйнування матеріалу. Здебільшого цей тип руйнування не буває раптовим і йому передують накопичення різноманітних пошкоджень, наприклад, мікротріщин.

В даній частині роботи дослідимо зображення крихкого та в'язкого типів руйнування металів [81].

Як було зазначено вище, через аналіз типу руйнування металу, можна визначити причини, які до цього призвели. Тому актуальним є питання автоматичного визначення типу руйнування. Ідея розв'язку цієї задачі полягає в наступному. Спочатку необхідно набрати статистику ознак для зображень в'язкого та крихкого руйнування, які будемо вважати еталонними. Далі через порівняння цих ознак та ознак, які обчислені для конкретного зображення зламу, робимо висновок про його належність до того чи іншого типу.

При розробці даного методу [81] за вхідні використовувались цифрові фрактографічні зображення зламів сталі 15Х1МФ. На рисунку 4.7 представлені приклади фрактографічних зображення крихкого та в'язкого зламів.

Для кожного зображення на рис. 4.9 обчислені значення фрактальної розмірності. Існує декілька методів обчислення фрактальної розмірності об'єктів на зображенні [74, 128].

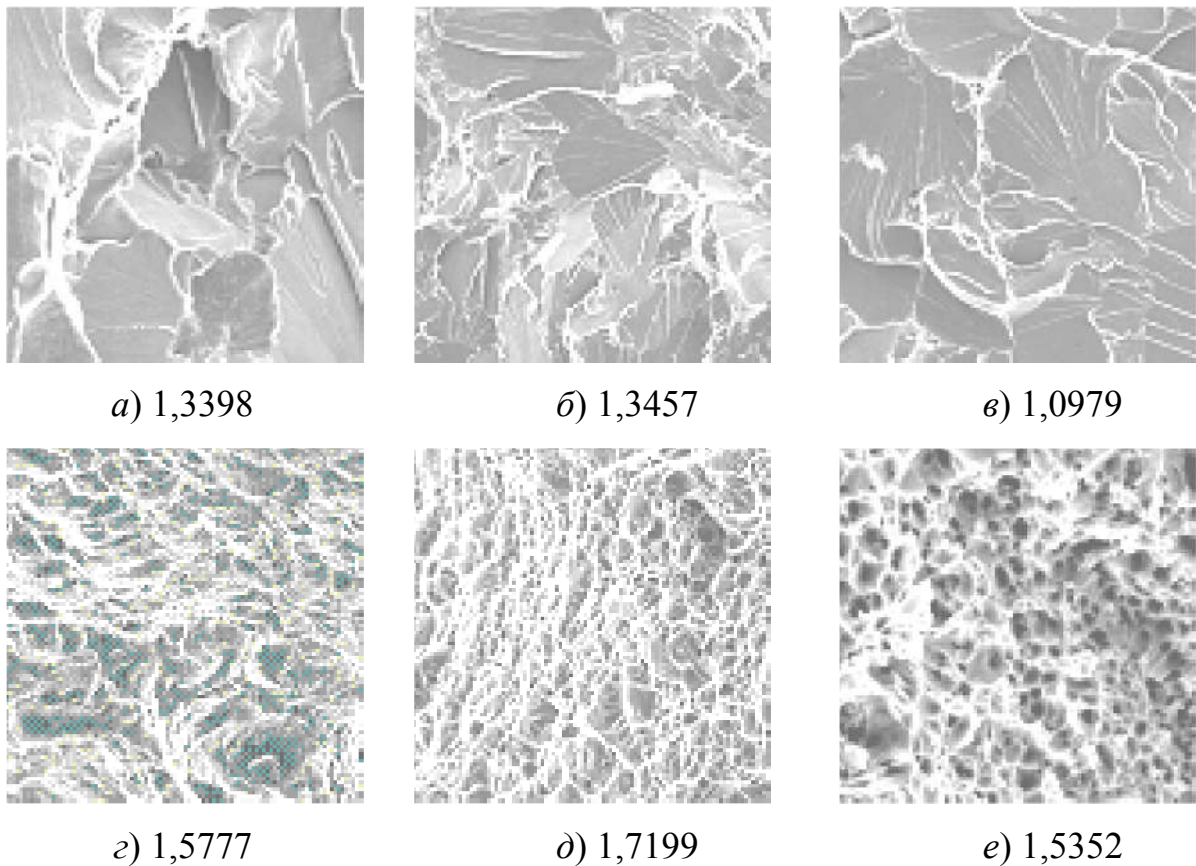


Рис. 4.7. Діагностичні зображення крихкого (*a*, *б*, *в*) та в'язкого руйнувань (*г*, *д*, *е*) сталі 15Х1МФ та відповідні їм значення фрактальних розмірностей.

Найбільш вживаними є клітинний та крапковий підхід [128]. Їх основою є обчислення площі фрактальної фігури при різних значеннях кроку вимірювання, а відмінністю – способи обчислення цієї оцінки. Більш детально основні підходи до обчислення фрактальних розмірностей бінарних та напівтонових зображень розглядалися у розділі 3 цієї дисертаційної роботи.

На практиці, коли за вхідні використовують бінарні зображення, для підвищення точності вимірювань фрактальну розмірність обчислюють як результат найкращої збіжності клітинного та крапкового методів [128]. У тому випадку, коли вхідними є напівтонові зображення, то для обчислення фрактальної розмірності використовується метод призм [91], або метод з використанням поверхневого інтегралу [74].

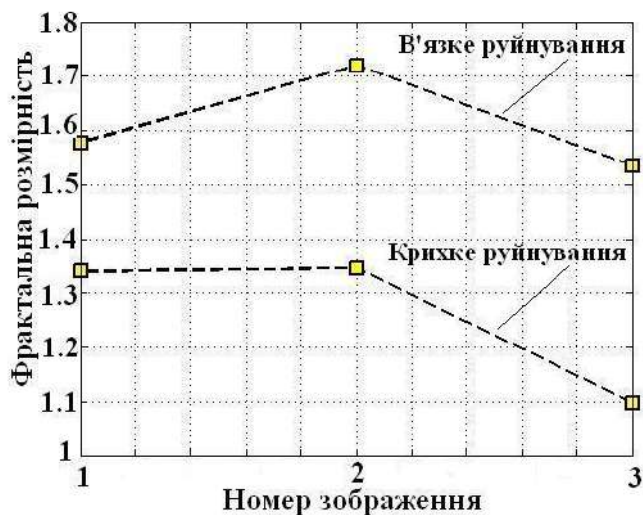


Рис. 4.8. Графік значень фрактальних розмірностей зображень зламів при крихкому та в'язкому руйнуванні.

З рис. 4.8 видно, що за значенням фрактальні розмірності фрактографічних зображень (рис. 4.7) різних типів зламів відрізняються між собою більш суттєво, ніж для одного типу. Таким чином, фрактальна розмірність може бути використана в якості однієї з ознак при автоматичному розпізнаванні типу зламу. При цьому зазначимо, що у запропонованому підході при обчисленні та порівнянні фрактальних розмірностей необхідно, щоб масштаб усіх зображень був однаковим.

Для підвищення точності розпізнавання типу зламу можуть використовуватися також і інші ознаки, наприклад, текстурні характеристики, які обчислюються на основі матриці суміжності рівнів інтенсивностей.

Отже, вище досліджено та встановлено [81], що зображення різних типів зламів описуються різними значеннями фрактальних розмірностей. Це може бути використано як важлива ознака при побудові автоматичних методів розпізнавання типів зламів. Особливістю даного підходу є те, що він дає інтегральну оцінку фрактальної розмірності зображення зламу, тому його доцільно використовувати у випадках, коли на зображенні присутній лише один тип зламу. У випадку присутності на зображенні ділянок з різними типами

руйнування доцільно використовувати інші підходи, які досліджені у підрозділі 3.6 цієї дисертаційної роботи.

4.5. Метод визначення фрактальної розмірності на основі тривимірного представлення зображень неруйнівного контролю авіаційних конструкцій

Корпуси літаків належать до дуже відповідальних конструкцій, від справного та надійного стану яких залежить безпека людей. Дані конструкції працюють в складних умовах навантажень, які можуть бути причиною виникнення різноманітних дефектів та втомних пошкоджень [67]. Для забезпечення безпечної експлуатації літальних апаратів виникає необхідність в постійному контролі стану конструкції на предмет виявлення та оцінки втомних пошкоджень. Існує велика кількість неруйнівних методів оцінки накопиченого втомного пошкодження. Ці дослідження можуть проводитися безпосередньо на об'єкті, а також в лабораторних умовах. Показником накопиченого втомного пошкодження може бути деформаційний рельєф, який формується при циклічному навантажуванні. Такий рельєф характерний для плакованого алюмінієвого сплаву Д16АТ, який є найбільш поширеним матеріалом в конструкції літака [68]. Цей матеріал може бути використаний і для виготовлення зразків-свідків (сенсорів) втоми [99, 100].

Нижче наведено результати дослідження [119, 191], націленого на обґрунтування кількісних параметрів деформаційного рельєфу, які можуть бути використані в задачах прогнозування залишкового ресурсу авіаційних конструкцій.

Дослідження проведено на зразках-смугах з центральним отвором, виготовлених з плакованого алюмінієвого сплаву Д16АТ [191]. Матеріал плакування – технічний алюміній АД1. Товщина плакувального шару 0,05 мм з кожної сторони. Розмір зразків становив 150x10x1 мм, а діаметр отвору – 1 мм. Наявність концентратора напружень забезпечувало локалізацію пошкодження і зручність моніторингу деформаційного рельєфу в процесі навантажування.

Зразки навантажувались консольним згином. Максимальне напруження циклу навантажування в зоні концентратора становило $\sigma_{max}=147$ МПа, коефіцієнт асиметрії $R=0$.

Для контролю деформаційного рельєфу застосовували оптичний металографічний мікроскоп зі збільшенням $\times 150-400$.

Існує декілька параметрів для кількісної оцінки накопиченого втомного пошкодження. Один з них параметр пошкодження D [68, 101, 102], який визначається поблизу концентратора напружень та обчислюється як відношення площі поверхні з ознаками рельєфу до загальної площі поверхні на ділянці, розмір якої визначається збільшенням мікроскопу і знаходиться в діапазоні 0,3 – 0,5 мм. Даний параметр описує насиченість рельєфу, проте не може описати форму кластерів рельєфу, яка змінюється в процесі навантажування. Власне форма є інформативний параметром, який свідчить про досягнення певної стадії пошкодження.

Схожість деформаційного рельєфу з природним фракталом дає можливість застосувати для його кількісного оцінювання технологію фрактальної геометрії.

Існує значна кількість підходів до визначення фрактальних розмірностей природних об'єктів [26, 74, 128].

Більшість підходів за вхідні використовує бінарні зображення, які формуються через застосування порогових методів. Ділянки чорного кольору вважаються ділянками з ознаками деформації, а ділянки білого кольору - не пошкодженими [103, 151]. Залежність кількості комірок, які покривають площу чи контури кластерів рельєфу від їх розмірів є вихідними даними для визначення фрактальної розмірності клітинним методом [128, 151]. Такий алгоритм дозволяє визначати фрактальну розмірність насиченості поверхні – D_s , фрактальну розмірність контурів кластерів D_p і фрактальну розмірність відношення периметру кластерів деформаційного рельєфу до площі кластерів. Основні етапи визначення фрактальних розмірностей деформаційного рельєфу

клітинним методом для зразка з напрацюванням рівним 530000 циклів, що відповідає 33% від загального напрацювання, показано на рис. 4.9.

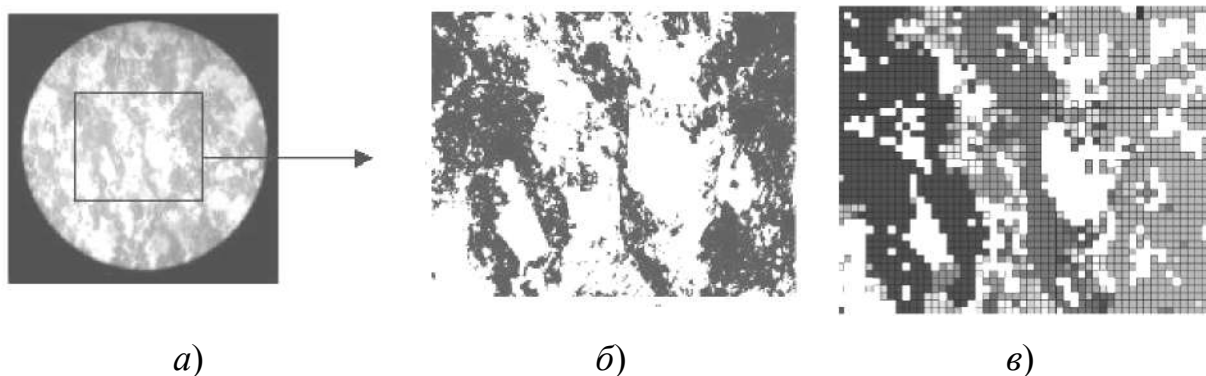


Рис. 4.9. Визначення фрактальної розмірності деформаційного рельєфу клітинним методом: виділення ділянки деформаційного рельєфу (а); монохромне зображення ділянки деформаційного рельєфу (б); нанесення сітки комірок (в).

Фрактальна розмірність деформаційного рельєфу може визначатися також і за допомогою методу крапок [128].

Недоліком описаних методів є те, що вони працюють лише з бінарними зображеннями. Як було зазначено вище, для отримання бінарних зображень з напівтонових чи кольорових використовуються порогові методи. Вибір порогу є тим суб'єктивним фактором, який суттєво впливає на числове значення фрактальної розмірності [80].

Метод визначення фрактальної розмірності на основі тривимірного представлення зображення [74] дозволяє уникати проблем процесу порогової обробки оптичних зображень поверхні для виділення кластерів деформаційного рельєфу. У цьому випадку вхідними даними для визначення фрактальної розмірності будуть безпосередньо напівтонові зображення рельєфу. В основу цього методу покладено відношення площі локального околу до його сторін. Особливість даного підходу полягає в тому, що за вхідне використовується напівтонове зображення і під площею розуміємо площу поверхні, утвореної значеннями інтенсивностей елементів локального околу (рис. 4.10).

Сформуємо тривимірне представлення частини напівтонового зображення, де третьою координатою є рівень інтенсивності (рис. 4.10).

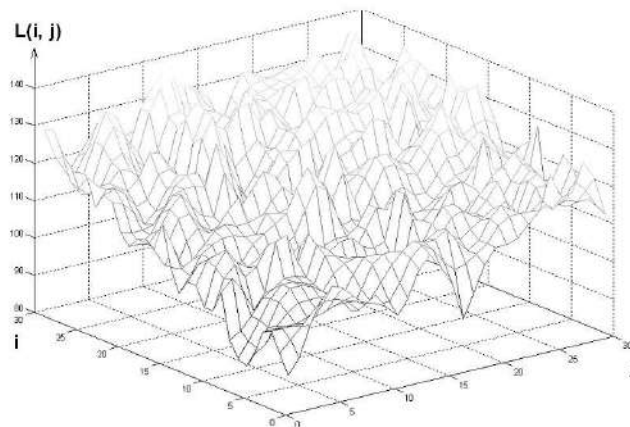


Рис. 4.10. Поверхня інтенсивностей напівтонового зображення деформаційного рельєфу.

Розглянутий метод не надає необхідної чутливості до невеликих змін площі пошкоджених ділянок, тому нами запропоновано інший підхід до обчислення фрактальної розмірності таких зображень. Його суть полягає у наступному [191]. У класичному клітинному методі при обчисленні фрактальної розмірності використовували різну кількість клітин залежно від розміру її сторони. Аналогічним способом створена об'ємна фігура покривається кубиками. Природно, що при меншій стороні ребра куба, потрібно менше кубиків для покриття фігури і навпаки. Так формують залежність 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 у даній роботі як один з методів обчислення фрактальних розмірностей зображень деформаційного рельєфу.

На рис. 4.11 і 4.12 наведено результати дослідження зміни обраних характеристик деформаційного рельєфу залежно від кількості циклів навантаження N_i до зародження тріщини в околі концентратора. Спільним для

всіх отриманих залежностей є їх монотонний характер. Це означає, що всі вони можуть бути застосовані для моніторингу втомного пошкодження [191].

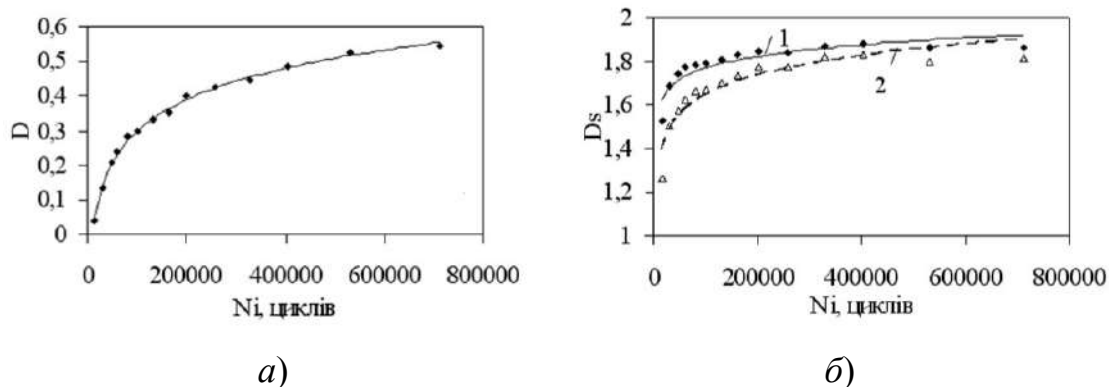


Рис. 4.11. Еволюція кількісних параметрів деформаційного рельєфу: а) параметру пошкодження [68, 101, 102]; б) фрактальної розмірності, визначеної методом клітинок (1) та методом клітинок та крапок (2).

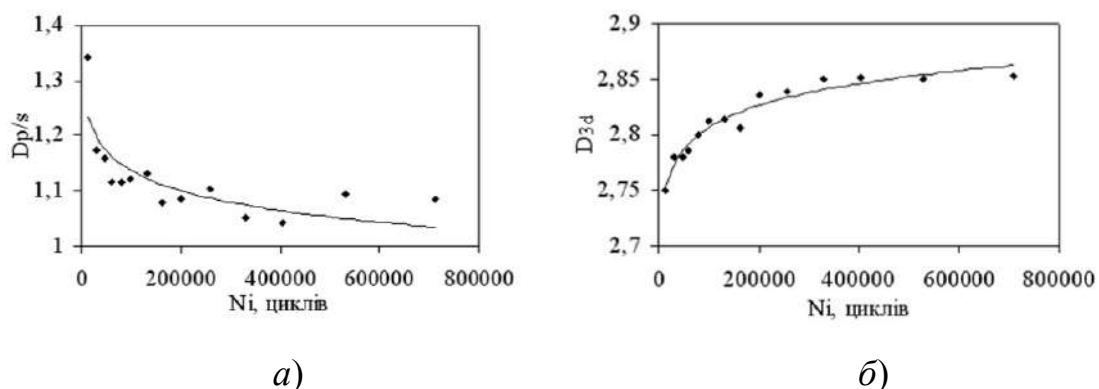


Рис. 4.12. Еволюція фрактальних розмірностей деформаційного рельєфу, визначених: а) з відношення периметру кластерів деформаційного рельєфу до їх площі; б) на основі тривимірного представлення оптичного зображення.

Еволюція параметру пошкодження D (рис. 4.11 а), як показали численні дослідження [98], відображає зростання кількості зерен, залучених до процесу формування рельєфу і загальної площі поверхні, зайнятої деформаційним рельєфом.

Зміни фрактальних розмірностей D_s (рис. 4.11 б), визначених методом клітинок та методом клітинок і крапок, повторюють характер еволюції

параметру пошкодження D , відображаючи зростання наповненості площі поверхні ознаками рельєфу.

Еволюція фрактальної розмірності Dp/s (рис. 4.12 а), визначеної з відношення периметру елементів деформаційного рельєфу до їх площі характеризується швидким зменшенням значень на початковій стадії пошкодження і стабілізацією в подальшому. Еволюція розмірності Dp/s відображає два процеси: процес росту кількості кластерів деформаційного рельєфу і процес їх злиття.

Еволюція фрактальної розмірності D_{3d} (рис. 4.12 б), обчисленої на основі тривимірного представлення оптичного зображення повторює загальний характер зміни параметру пошкодження D і фрактальної розмірності D_s .

Параметри, які визначають заповнення площини знаходяться в діапазоні від 1,0 до 2,0. Розмірність обчислена з урахуванням інтенсивності напівтонового зображення рельєфу знаходиться в діапазоні між 2,0 і 3,0.

Проведені дослідження показали, що фрактальні розмірності деформаційного рельєфу можуть бути обчислені за різними методиками. Вибір методу, оптимального для проведення контролю втомного матеріалу, повинен ґрунтуватися на порівняльному аналізі моделей прогнозування залишкового ресурсу з визначенням взаємозв'язку між кількістю циклів навантажування і значенням певної фрактальної розмірності. Враховуючи це, що досліджені методи оцінюють різні складові формування деформаційного рельєфу, доцільним є їх комплексне застосування в задачах аналізу накопичення втомного пошкодження і прогнозування залишкового ресурсу [191].

Контроль втомного пошкодження матеріалу може бути проведений шляхом оптичного контролю геометричних характеристик деформаційного рельєфу, який формується і розвивається внаслідок дії циклічного навантажування [119, 191]. Деформаційний рельєф поверхні є природнім фракталом, що визначає можливість застосування апарату фрактальної геометрії для його кількісної оцінки.

Висновки до розділу 4

Розроблено метод класифікації текстур фрактографічних зображень через використання спектру узагальнених фрактальних розмірностей Реньї. Використання запропонованого підходу дає можливість класифікувати досліджувані зображення текстур за мінімальною відстанню Чебишева. У розробленому методі значення параметрів, які описують різні злами, різняться на порядок. При використанні відомих методів ця різниця становила соті долі значень фрактальної розмірності. Отже, запропонований метод підвищив ефективність класифікації типів крихкого та в'язкого зламів за їх зображеннями.

Розроблено метод виділення об'єктів на зображенні з використанням фрактальних розмірностей. Перевагою цього методу є те, що через адаптацію розміру ковзної локальної апертури, він дозволяє одночасно локалізувати об'єкти різних розмірів.

На основі фрактальних розмірностей розроблено метод визначення усередненого розміру зерен металу за металографічними зображеннями. У порівнянні з відомими, даний метод має похибку 6%. Перевагою ж розробленого методу є можливість автоматизації процесу обчислень та можливість проведення аналізу металографічних зображень з незамкнутими та розривними межами зерен без необхідності їх інтерактивного редагування.

Розроблено метод визначення фрактальної розмірності на основі тривимірного представлення зображень неруйнівного контролю. Такий підхід забезпечує підвищену, у порівнянні з відомими методами, чутливість до невеликих змін площі пошкоджених ділянок та використовується для моніторингу втомного пошкодження плакованого алюмінієвого сплаву Д16АТ, який є основою багатьох авіаційних конструкцій.

РОЗДІЛ 5

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ МЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРНИХ ОБ'ЄКТІВ НА МЕТАЛОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕННЯХ

5.1. Метод визначення величини зерна металевих матеріалів

Багато відповідальних виробів та конструкцій у суднобудівній галузі, в атомній енергетиці та на різноманітних трубопроводах є доволі застарілими і перебувають на грані безпечного терміну експлуатації. Зазвичай, для опису деградації металу використовують різноманітні фізичні, хімічні методи та проводять механічні випробування. Але застосування деяких із цих методів стосовно описаних вище виробів та конструкцій є дещо утрудненим, оскільки більшість із згаданих виробів перебувають в робочому стані. Тому, як правило, неруйнівний контроль таких виробів обмежується їх дефектоскопією [110].

Загальновідомо, що між якісними характеристиками досліджуваного металу та його внутрішньою структурою існує однозначна відповідність [29, 137]. 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. При такому підході до досліджень цікавими з точки зору матеріалознавства є дослідження кінетики росту зерна матеріалу при дії на нього деяких факторів зовнішнього впливу, наприклад, температури.

Для визначення розміру зерна використовують різні підходи. Серед них виділимо метод визначення величини зерна на основі порівняння з еталонними шкалами, метод підрахунку зерен та метод підрахунку перетинів границь зерен [127].

Зазначені вище методи мають ряд суттєвих недоліків, серед яких виділимо наступні.

По–перше, у названих вище методах та й в інших підходах такого типу оперують усередненими статистичними величинами, а об’єктом аналізу є не окремі зерна, а деяка, часом достатньо велика, група зерен. Оскільки на шліфі можуть бути присутніми різні за розмірами зерна, то це призводить до появи методичної похибки при обчисленні геометричних параметрів зерна.

По–друге, розглянуті методи придатні для аналізу зерен лише опуклої форми. Коли ж форма зерен буде відрізнятися від опуклої, то це також сприятиме появі додаткової методичної похибки.

По–третє, описані у роботі методи не є автоматизованими, що вимагає додаткових часових затрат на підрахунок кількості зерен, кількості точок перетинів ліній і границь зерен тощо.

Таким чином, аналіз виявлених недоліків розглянутих методів призвів до необхідності розробки автоматизованого комп’ютеризованого методу контролю величини зерен матеріалів, який дозволяв би обчислювати не лише усереднені геометричні характеристики групи зерен, але й аналізувати геометрію окремих зерен.

Комп’ютеризований метод контролю величини зерна металевих матеріалів.

З врахуванням недоліків відомих підходів, нами розроблено комп’ютеризований метод контролю величини зерна металевих матеріалів [71]. Розглянемо його детальніше.

За вхідне використаємо синтезоване зображення, яке представлено на рис. 5.1. На цьому рисунку змодельовано зображення зерен деякого металевого матеріалу.

Далі необхідно задати початкові точки (рис. 5.2) та кут сканування контуру зерен (рис. 5.3). Встановивши початкові точки, кут α та просканувавши кожне зерно, отримаємо для кожного зерна два масиви даних – вектор кутів $\vec{\alpha} = \{0^0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n\}$ та відповідні йому значення відстаней від початкової

точки до границі зерна у вигляді вектора відстаней $\vec{d} = \{d_0, d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_n\}$.
 Зазвичай, $\alpha_n \approx 360^\circ$, що відповідає повному круговому скануванню зерна.

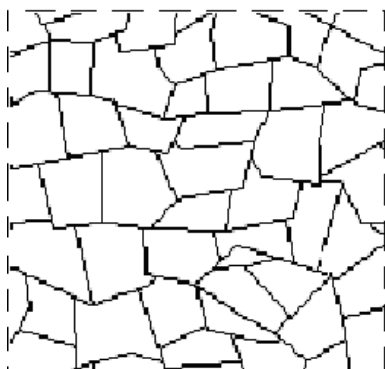


Рис. 5.1. Вхідне зображення.



Рис. 5.2. Формування початкових точок.

Таким чином, кожне зерно, яке містить початкову точку, описується набором даних $\vec{\alpha}$ та \vec{d} , на основі яких можна повністю відтворити його форму. Точність відтворення форми зерна залежатиме від величини кута сканування α_i .

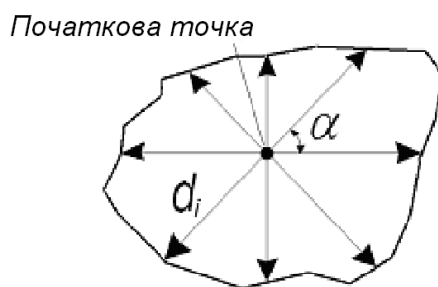


Рис. 5.3. Сканування зерна при куті α .

Візьмемо деяке зерно, яке описується наборами даних $\vec{\alpha}$ та \vec{d} (рис. 5.4), і обчислимо його основні геометричні параметри, наприклад, максимальну d_{\max} , мінімальну d_{\min} та середню d_c величину зерна і площу S .

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. 5.5).

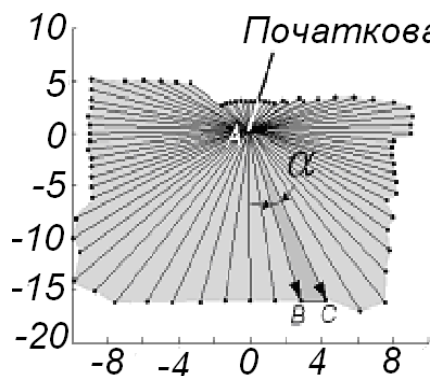


Рис. 5.4. Сканування окремого зерна.

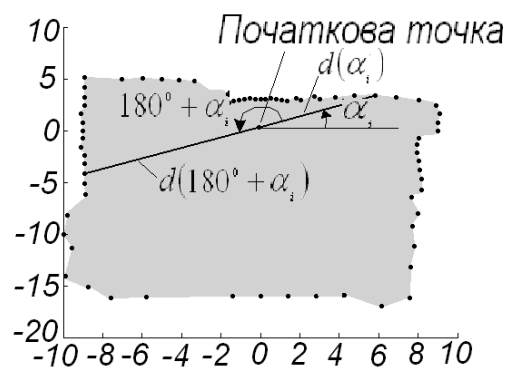


Рис. 5.5. Обчислення геометричних параметрів зерна.

Далі, з отриманого набору сум $\{d(\alpha_i) + d(\alpha_i + 180^\circ)\}$ знаходять максимальне, мінімальне та середнє значення, яке відповідатиме максимальній d_{\max} , мінімальній d_{\min} та середній d_c величині зерна

$$d_{\max} = \max \{d(\alpha_i) + d(\alpha_i + 180^\circ)\}, \quad (5.1)$$

$$d_{\min} = \min \{d(\alpha_i) + d(\alpha_i + 180^\circ)\}, \quad (5.2)$$

$$d_c = \text{mean} \{d(\alpha_i) + d(\alpha_i + 180^\circ)\}. \quad (5.3)$$

При обчисленні площі зерно розбивається на трикутники (рис. 5.4), які містять дві сусідні лінії сканування. На рис. 5.4 показано один із таких трикутників – ABC . У цьому трикутнику відомі координати всіх його вершин та довжини сторін AB та AC . Далі обчислюють площу трикутника за однією із загально відомих формул. Наприклад, знаючи координати вершин B та C , нескладно знайти довжину d_{BC} сторони BC за виразом:

$$d_{BC} = \sqrt{(x_B - x_C)^2 + (y_B - y_C)^2}, \quad (5.4)$$

де (x_B, y_B) та (x_C, y_C) – координати точок B та C відповідно.

Далі, використовуючи формулу Герона, обчислюють площу трикутника ABC

$$S_{ABC} = \sqrt{p \cdot (p - d_{AB}) \cdot (p - d_{BC}) \cdot (p - d_{AC})}, \quad (5.5)$$

де d_{AB} , d_{BC} та d_{AC} – довжини відповідних сторін трикутника;

p – півпериметр трикутника, який обчислюється за виразом

$$p = \frac{d_{AB} + d_{BC} + d_{AC}}{2}. \quad (5.6)$$

Аналогічним чином знаходять площу всіх трикутників в межах одного зерна (рис. 5.4). Сума площ всіх трикутників рівна площі досліджуваного зерна. Слід зауважити, що при обчисленні площі зерна виникає похибка, яку можна мінімізувати, зменшуючи величину кута сканування α .

Обчисливши площі зерен S , можна побудувати гістограму $H(S)$ їх розподілу за значенням (рис. 5.6).

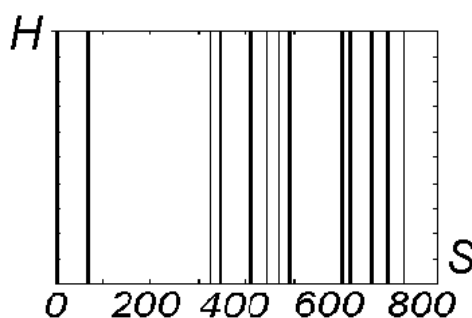


Рис. 5.6. Гістограма розподілу площ зерен симульованого зображення на рис. 5.1.

Представлена на рис. 5.6 гістограма дозволяє аналізувати розподіл зерен досліджуваного металу за площею.

В даній роботі запропоновано метод контролю величини зерна на основі аналізу металографічних зображень. Оскільки координати краю зерна є відомими, то окрім описаних вище геометричних параметрів – площі зерна та його діагоналей – можна обчислити додатково будь-які інші показники, які характеризуватимуть геометрію зерна. Цей метод має велику практичну

цінність, особливо при аналізі зерен цих матеріалів, де величина та форма зерна суттєво впливає на властивості матеріалу.

Беззаперечна перевага запропонованого методу [71] полягає у тому, що він дає можливість отримати всю інформацію про геометрію зерна – діаметр, видовженість орієнтація тощо. Метод дає не усереднену характеристику по зображенню, а аналізує кожне зерно окремо. Недоліком даного підходу є те, що він за вхідні використовує зображення з неперервними межами зерен. У випадку, коли зображення меж зерен будуть розривними, то отримані результати не будуть коректними. Ще одним важливим моментом запропонованого підходу є правильний вибір початкових точок – вони повинні охопити максимальне число зерен на зображенні; виключеним має бути випадок попадання в середину зображення зерна більше однієї початкової точки.

5.2. Автоматизоване визначення геометрії зерен в експлуатованій паропровідній сталі

Тривала високотемпературна експлуатація конструкційних сталей часто спричиняє суттєві зміни їх мікроструктури, які супроводжуються деградацією фізико-механічних властивостей матеріалу, що визначають роботоздатність конструкції [57, 89, 135]. Це зумовлено дифузійними процесами у металі за підвищеної температури, які інтенсифікуються за його наводнювання [192]. Паропроводи теплових електростанцій є саме таким об'єктом, а обґрунтування безпечної експлуатації особливо важливе з огляду на можливі важкі наслідки у випадку їх непрогнозованого руйнування. Відомо, що в процесі експлуатації паропроводів зменшується доля цементитної складової, а розмір зерна фериту зростає [113, 115]. Оскільки розмір зерен тісно пов'язаний з механічними властивостями [90, 150], його можливій зміні надають значну увагу. Окрім цього, за зміною мікроструктури можна періодично стежити впродовж

експлуатації і таким чином моніторити можливу деградацію властивостей без використання руйнівних методів контролю.

Середній розмір зерен визначають з дотриманням регламентуючих документів таких як ASTM E 112, ГОСТ 5639 і ГОСТ 21073.0-75 – ГОСТ 21073.4-75 [10, 58-63]. Разом з тим можуть бути важливими такі параметри геометрії зерен як їх нерівноосність. Зазначимо, що використання цих регламентних норм передбачає аналіз високоякісних шліфів з чітко окресленими межами зерен. Їх прорисовування вручну сприяє однозначній ідентифікації меж зерен, проте такі процедури тривалі і трудомісткі. Це зумовило розробку методів з відповідним програмним забезпеченням для автоматизованого аналізу металографічних зображень, зокрема, системи Thixomet [7], SIAMS-CP Grain [5], Grainsizer™ [196], описано автоматизований метод і в американському стандарті ASTM E1382-97 [215]. Такі методи дають можливість уникнути в значній мірі суб'єктивізму, істотно розширити вибірку аналізованих структур для забезпечення достатньої статистики та достовірно оцінювати геометрію зерен в різних перерізах і таким чином будувати об'ємну картину зміни параметрів структури.

Суттєвим недоліком більшості відомих програмних систем є необхідність використання лише високоякісних зображень структури металів з чітко окресленими межами зерен. Разом з тим доволі часто якість вхідних металографічних зображень не відповідає таким вимогам, особливо при виготовленні шліфів безпосередньо на експлуатованому об'єкті. При цьому важко добитися необхідної якості як самого шліфа, так і травлення структурних складових: межі зерен досить часто перервні, не завжди контрастно і чітко окреслені. Окрім того, на металографічних зображеннях структури практично завжди існує градієнт фону за освітленістю. Тому актуальним є розроблення комп'ютеризованого методу визначення геометрії зерен металів і сплавів, який базувався би на стандарті ASTM E 112 (ГОСТ 21073.4) та забезпечував оброблення металографічних зображень з нечітко окресленими межами зерен.

Таке завдання поставлене в даній роботі для досягнення конкретної мети - дослідження геометрії зерен експлуатованого парогону [226].

Аналізували мікроструктуру сталі 12Х1МФ з прямої ділянки і з зони розтягу гину головного парогону ТЕС, експлуатованого впродовж $\sim 13 \cdot 10^4$ год (температура 540 °С, тиск технологічного середовища 14 МПа). Розрахунковий ресурс таких ділянок $25 \cdot 10^4$ год. І хоч тривалість експлуатації аналізованого гину склала лише половину розрахункового ресурсу, на зовнішній поверхні гину труби в зоні максимального розтягу виявили мережу повздовжніх тріщин. Подібні пошкодження спостерігали і на інших гинах, експлуатованих за ідентичних умов.

Однією з найвірогідніших причин виникнення таких тріщин на гинах парогонів вважають повзучість металу [9, 121], опір до якої в значній мірі залежить від величини зерна [134, 181, 212]. У цьому зв'язку вивчали зміну структури сталі поперек стінки труби в розтягнутій зоні гину та для порівняння – на прямій її ділянці.

Про механічні властивості сталі судили за твердістю, яку визначали поперек стінки труби.

Метод автоматизованого визначення розміру зерна. Об'єкт аналізу – цифрові металографічні зображення сталі, отримані на оптичному мікроскопі NEOFOT 21 з використанням комп'ютеризованої системи фіксації зображення. Контури меж зерен виділяли у дві стадії. Спочатку межі зерен виділяли в автоматичному режимі. Якщо лінії меж зерен були несучільними або взагалі не виділилися в такому режимі, то на другій стадії це робили в інтерактивному режимі. Послідовність основних кроків вирішення задачі автоматизованого визначення геометрії зерен з нечіткими та несучільними межами зерен наступна.

Попередня обробка. Перший крок спрямований на покращення візуального сприйняття вхідних металографічних зображень. Для цього усуваються шуми, підвищується контрастність та вирівнюється за яскравістю фон.

Сегментація. Наступний крок - отримання бінарного зображення, для чого використали простий і швидкий в реалізації метод порогового оброблення вхідного поліпшеного зображення згідно з

$$L_{bin}(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{коли } L(i, j) > T; \\ 0, & \text{коли } L(i, j) < T, \end{cases} \quad (5.7)$$

де $L(i, j)$ – рівні сірого в пікселях (i, j) вхідного зображення L ; $L_{bin}(i, j)$ – бінаризоване значення пікселя (i, j) перетвореного зображення; T – поріг бінаризації.

Під час вибору порогу бінаризації брали до уваги, що він не повинен бути ні надто високим, щоб гарантувати максимальне відтворення наявних меж зерен, ні надто низьким, щоб виключити появу неінформативних деталей (рис. 5.7 б). Разом з тим, щоб виключити втрату меж зерен, поріг T краще вибирати вищим, навіть якщо це приведе до виділення малоінформативних складових, які пізніше прийдеться усувати (рис. 5.7 в). Ще одним підходом до отримання бінарно сегментованого металографічного зображення є використання розробленого у цій дисертаційній роботі методу бінаризації з оптимальним порогом [80], який детально розглядався у пірозділі 2.2.

Морфологічна обробка. Наступні кроки спрямовані на усунення неперервності меж зерен. Для цього використали відомі морфологічні операції [54, 222]: скелетизації, потовщення та потоншення ліній (рис. 5.7 в).

Інтерактивне редагування меж зерен. Бінарне зображення (рис. 5.7 г) все ще має ряд недоліків. На попередніх етапах оброблення зображення усунуто незначні розриви меж зерен, проте великі розриви залишилися. Їх кількість значною мірою залежить від використаного порогу бінаризації T і за його вдалого вибору вона незначна. Разом з тим редагування отриманого зображення найдоцільніше завершити в інтерактивному режимі.

Автоматичне формування замкнутого контуру з меж зерен. За інтерактивного редагування не завжди вдається з'єднати межі зерен, не утворивши при цьому нових розривів контуру (рис. 5.7 г). Першим кроком

алгоритму усунення розривів меж зерен є сканування усього зображення L та виявлення місць з недотягнутими межами (рис. 5.8).

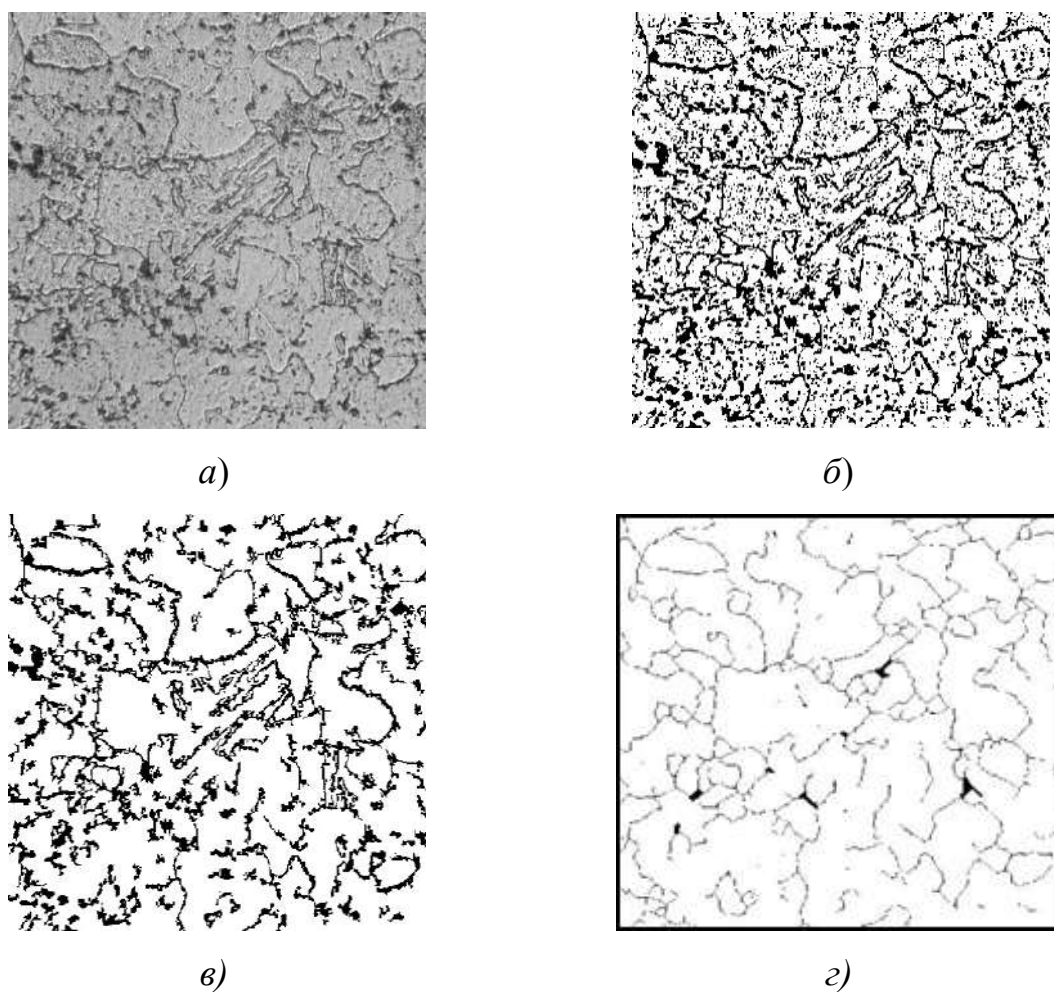


Рис. 5.7. Вихідне зображення структури сталі 12X1МФ (а) та після її бінаризації (б), усунення низькоінформативних деталей (в) та представлення меж зерен лініями (г).

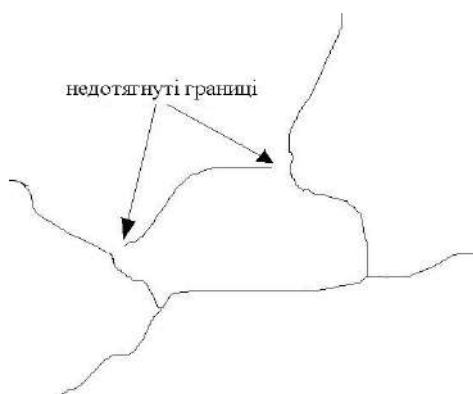


Рис. 5.8. Схема розривів на межах зерен.

Щоб сполучити кінці недотягнутої межі DA з найближчою точкою на чітко окресленій межі зерен (рис. 5.9), викреслюються кола різних діаметрів з центром на кінці недотягнутої межі (точка A).

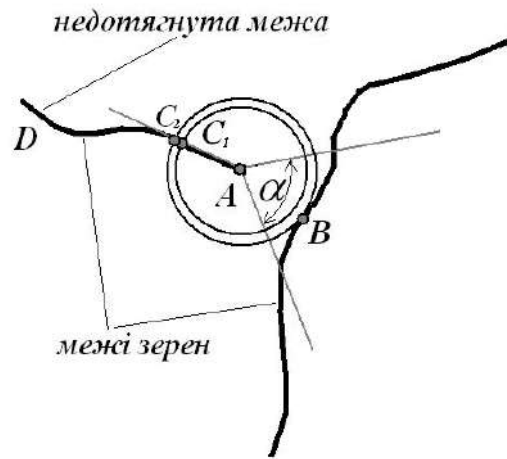


Рис. 5.9. Схема визначення напрямку дотягування відсутньої частини межі зерна.

Різниця між сусідніми колами за діаметром повинна бути мінімальною. Від неї залежатиме, з одного боку, чутливість методу, з іншого – його швидкодія. Зауважимо, що концентричні кола перетинають також і саму недотягнуту межу зерен (точка C). Щоб не враховувати точки перетину кіл з недотягнутою межею зерен (точки C_1 і C_2), задавалися певним гострим кутом α , і лише в його межах аналізували точки перетину кола з межею зерен. Вибираючи сектор для аналізу точок перетину, недотягнуту межу зерен розташовували вздовж бісектриси кута $(360^\circ - \alpha)$. Тоді найближчою до точки A в межах заданого кута α виявляється точка B . Таким чином, щоб усунути розрив межі DA , сполучали точки A і B .

Визначення розміру зерна. Реставрація недотягнутих меж зерен дозволила отримати однозв'язну нерозривну сітку меж зерен. Отримане зображення використано для визначення розміру зерна. Для цього на нього наносилася сітка з взаємно перпендикулярних ліній. Стосовно перерізу труби твірні цієї

сітки зорієнтовані в радіальному і тангенціальному напрямі. Тоді підраховувалася кількість перетинів горизонтальних і вертикальних твірних сітки з усіма межами зерен.

Для оптимізації густини сітки оцінювали, як змінюється розмір зерна на зображеннях, отриманих на різній віддалі від внутрішньої стінки труби, в залежності від густини сітки. Незалежно від місця розташування зони аналізу в перерізі стінки труби отримали якісно подібні результати. Типовий результат оцінки розміру зерна залежно від густини сітки наведено на рис. 5.10. Стабільні значення величини зерна отримували за використання 30...45 ліній перетину. Тому під час визначення величини зерна на металографічних зображеннях структури рекомендується використовувати 45 ліній перетину.

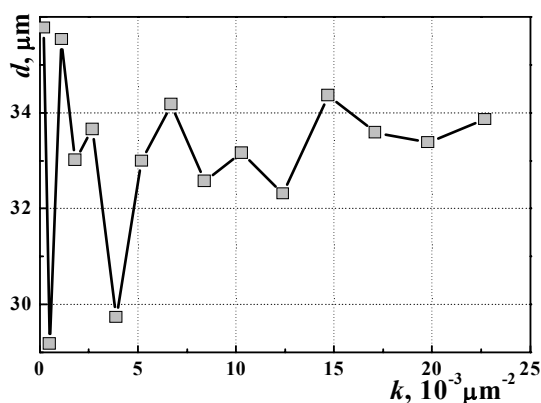


Рис. 5.10. Залежність величини зерна d від густини оціночної сітки k , яку використовували під час реалізації методу січних в автоматичному режимі.

Апробація створеного методу. Дослідження геометрії зерен ручним способом виявили, що на прямій ділянці парогону середнє значення величини зерна d у внутрішніх шарах перерізу труби дещо менше, ніж біля її обох поверхонь (рис. 5.11а, криві 1, 2). Причому на всіх рівнях вимірювання поперек стінки труби значення d у радіальному напрямі є дещо більшими, ніж в осьовому, що є ознакою нерівноосності зерен.

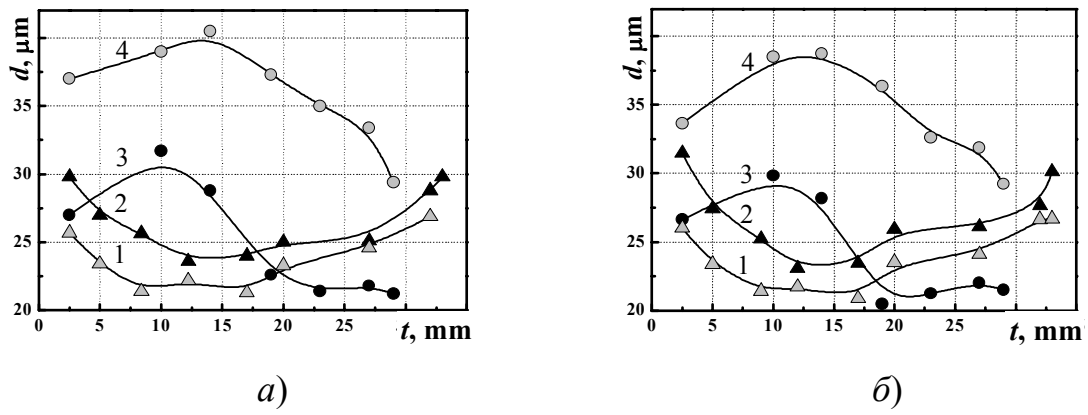


Рис. 5.11. Зміна величини зерна d поперек стінки труби в осьовому перерізі прямої ділянки труби (1, 2) і розтягнутої зони гину (3, 4) за визначення вручну (а) і з використанням розробленого методу автоматизованого оцінювання (б). Діаметр зерна визначали в осьовому (1, 4) і радіальному (2, 3) напрямках на різній віддалі t від внутрішньої поверхні труби.

Виразніші і протилежні ефекти виявили під час аналізу геометрії зерен у розтягнутій зоні гину (рис. 5.11а, криві 3, 4). По-перше, діаметр d у радіальному напрямі відчутно менший, ніж в осьовому. Це вказує на те, що деформаційна текстура зерен під час гину труби не усунута ні термічним обробленням, ні тривалою високотемпературною експлуатацією. По-друге, мінімальний діаметр d виявлено не всередині перерізу, що властиво прямій ділянці труби, а поблизу її зовнішньої поверхні. Оскільки осьові тріщини повзучості виявлено після експлуатації саме на зовнішній поверхні труби в розтягнутій зоні гину приходимо до висновку, що менша опірність повзучості деградованого в експлуатаційних умовах металу зумовлена саме істотним подрібненням зерна. Останнє може бути наслідком рекристалізаційних процесів, які повинні бути найінтенсивнішими саме в зовнішніх шарах перерізу труби через максимальну деформацію гину. Така рекристалізація могла відбутися як під час термічного оброблення гину, так і впродовж експлуатації.

Наведені результати досліджень зміни геометрії зерен, отримані вручну (рис. 5.11 а), корелюють з даними, отриманими з використанням розробленого

методу автоматизованого оцінювання (рис. 5.11 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.

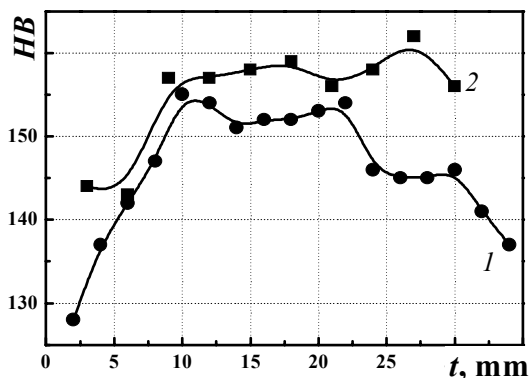


Рис. 5.12. Зміна твердості HB поперек стінки труби в осьовому перерізі прямої ділянки труби (1) і розтягнутої зони гину (2). Твердість визначали на різній віддалі t від внутрішньої поверхні труби.

Зв'язок границі текучості і розміру зерна металу описується в загальному випадку відомим рівнянням Холла-Петча. Враховуючи це, що твердість і характеристики міцності металу пов'язані між собою, то природно очікувати відповідності їх зміни зі зміною розміру зерна [226]. Проте оцінювання твердості (рис. 5.12) не виявило її однозначного зв'язку з розміром зерна. Зокрема, для металу з прямої ділянки труби заміри твердості узгоджуються з прогнозованими відомим рівнянням Холла-Петча, оскільки менша твердість (і відповідно нижчий рівень границі текучості) біля обох зовнішніх поверхонь труби відповідає більшому d (крива 1). Разом з тим для металу гину спостережено іншу тенденцію і зростання діаметру d біля поверхневих шарів труби не супроводжується зниженням твердості (крива 2) як це прогнозується рівнянням Холла-Петча. Можливо деградація металу в експлуатаційних умовах зумовлює порушення загальновизнаної закономірності зміни границі текучості від розміру зерна.

Запропоновано метод автоматизованого визначення геометрії зерен на прикладі аналізу металографічних зображень мікроструктури експлуатованої

паропровідної сталі 12Х1МФ [226]. Метод дає можливість аналізувати зображення з нечітко окресленими границями зерен, для чого на заключному етапі використовується інтерактивне оброблення зображення.

З наближенням до зовнішньої і внутрішньої поверхонь труби розмір зерна на прямій ділянці труби зростає, а в зоні розтягу гину - зменшується, що може бути зумовлено специфікою рекристалізаційних процесів у істотно деформованому металі. Зміна твердості від розміру зерна поперек стінки труби в розтягнутій зоні гину не узгоджується з прогнозованою за законом Холла-Петча, що може бути проявом інтенсивної деградації металу гину в експлуатаційних умовах.

5.3. Уточнення при обчисленні усередненого діаметру зерен металу

Фізико-механічні властивості будь-якого металу чи сплаву визначаються його внутрішньою структурою. Тому при створенні нових матеріалів чи оцінці деградації старих важлива роль відводиться мікроструктурі та методам її оцінки.

Згідно ГОСТ 5639-82 (ASTM E 112) [10, 57] є декілька підходів до визначення величини зерна. У даній роботі розглянемо детальніше лише один підхід - метод пересічень меж зерен, оскільки решту є подібними за методологією. Особливу увагу звернемо на моменти, які призводять до виникнення неточностей при проведенні таких обчислень. Суть методу пересічень меж зерен наступна. На металографічних зображеннях проводять N відрізків з сумарною довжиною L у взаємно перпендикулярних напрямках. Середній умовний діаметр зерна обчислюють за виразом

$$d = \frac{L}{N}. \quad (5.8)$$

Описаний підхід має методичну помилку, яка призводить до значних похибок у визначенні середнього умовного діаметра [72]. Розглянемо це детальніше. Згідно вимог ASTM E 112 досліджувані зерна повинні бути

рівновеликими та округлими. Але однакові перерізи в площині шліфа не завжди відповідають реальним зернам однакового розміру у тривимірному просторі (рис. 5.14).

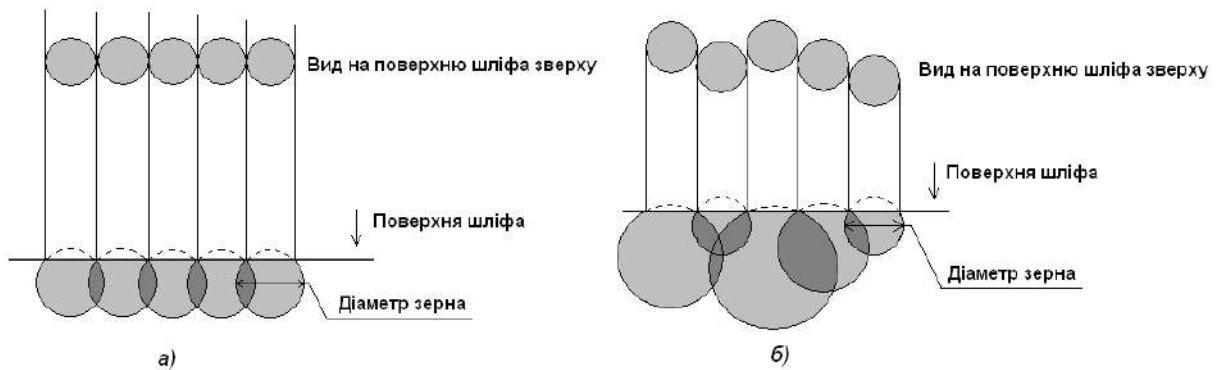


Рис. 5.14. Тривимірна модель зерен та їх зріз на поверхні шліфа.

Під величиною зерна у ASTM E 112 мають на увазі усереднену величину випадкових пересічень меж зерен в площині металографічного шліфа. Тому надалі під усередненим діаметром зерна чи іншими геометричними характеристиками зерна матимемо на увазі геометричні характеристики пересічень меж зерен в площині шліфа.

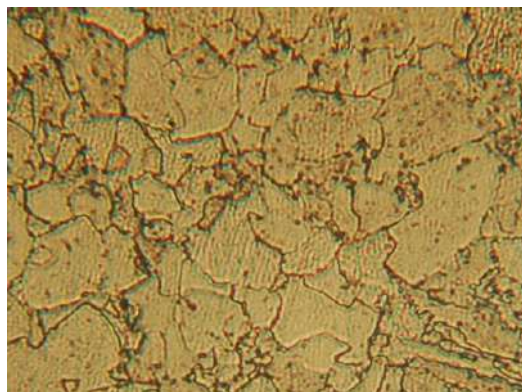


Рис. 5.15. Типове металографічне зображення сталі.

Реальні металографічні зображення, які досліджуються матеріалознавцями, містять зерна різних розмірів (рис. 5.15). Проаналізуємо чи відповідають результати, отримані згідно нормативних документів [57, 215], дійсному усередненому діаметру зерна у тривимірному представленні. Округле

зерно у тривимірному просторі може бути перерізано площиною шліфа у будь-якій його частині (рис. 5.16).

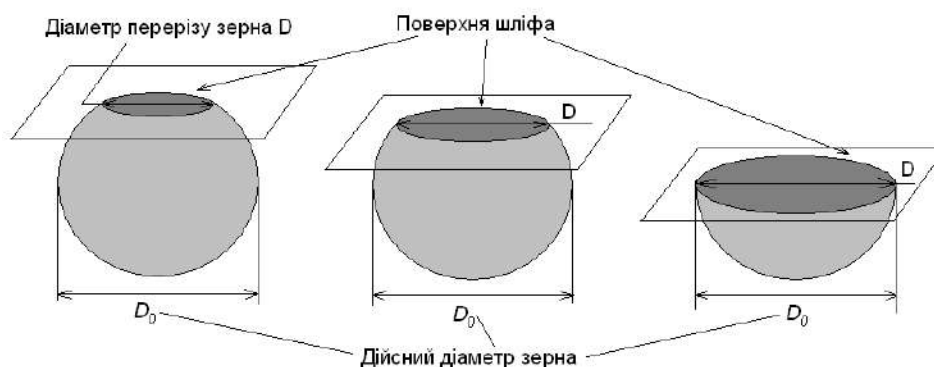


Рис. 5.16. Варіанти перерізу зерен металу площиною шліфа.

Це призводить до того, що зерно, яке у тривимірному просторі має діаметр D_0 , у площині шліфа може бути з однаковою ймовірністю представлене перерізом у вигляді круга з довільним діаметром D , значення якого лежать у діапазоні від мінімально можливого до максимального D_0 . Проаналізуємо як співвідносяться між собою діаметр D перерізу зерна металу в площині шліфа та діаметр зерна в тривимірному просторі [72, 137].

Отже, припускаємо, що всі зерна металу в об'ємі даного шліфа є рівновеликими та мають у тривимірному просторі діаметр D_0 . Дослідник бачить на поверхні шліфа лише перерізи цих зерен. Оскільки зерна можуть бути перерізані площиною шліфа у різних частинах, через це діаметр перерізів на поверхні шліфа буде також різний - $D_1, D_2, \dots, D_i, \dots$ (рис. 5.17). Якщо один переріз зерна відрізнятиметься від іншого на величину шару Δ , то, згідно теореми Піфагора, між діаметром зерен D_0 у тривимірному просторі та діаметрами зерен $D_1, D_2, \dots, D_i, \dots$ у площині шліфа існуватиме наступний взаємозв'язок

$$\frac{D_1}{2} = \sqrt{\left(\frac{D_0}{2}\right)^2 - \Delta^2}; \frac{D_2}{2} = \sqrt{\left(\frac{D_0}{2}\right)^2 - (2 \cdot \Delta)^2}; \dots \frac{D_i}{2} = \sqrt{\left(\frac{D_0}{2}\right)^2 - (i \cdot \Delta)^2}. \quad (5.9)$$

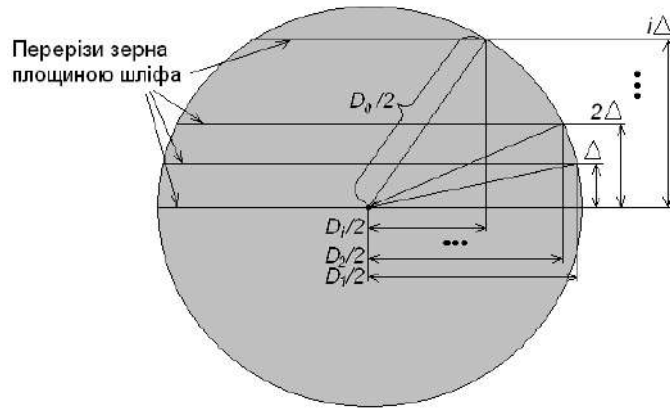


Рис. 5.17. Переріз зерна.

Оскільки, як зазначалося вище, ймовірність перерізу зерна у будь-якій його частині є однаковою, то товщина шару Δ буде визначатися як

$$\Delta = \frac{D_0}{2 \cdot n}, \quad (5.10)$$

де n - кількість перерізів зерен в площині шліфа.

Знаючи всі діаметри перерізів зерен в площині шліфа $D_1, D_2, \dots, D_i, \dots$, (5.9) обчислимо усереднений діаметр зерна в площині шліфа

$$D_{mean} = \frac{D_1 + D_2 + \dots + D_i + \dots}{n} = \frac{\sum_{i=0}^n 2 \sqrt{\left(\frac{D_0}{2}\right)^2 - (i \cdot \Delta)^2}}{n} = \frac{D_0}{n^2} \sum_{i=0}^n \sqrt{n^2 - i^2}. \quad (5.11)$$

З виразу (5.11) можна отримати вираз для обчислення діаметра зерна у тривимірному просторі D_0

$$D_0 = \frac{D_{mean} \cdot n^2}{\sum_{i=0}^n \sqrt{n^2 - i^2}}. \quad (5.12)$$

З виразу (5.12) видно, що дійсний діаметр зерна у тривимірному просторі D_0 не відповідає за величиною усередненому діаметру зерен D_{mean} , який обчислюється згідно ASTM E 112. Ці величини пов'язані між собою через поправочний коефіцієнт

$$k = \frac{n^2}{\sum_{i=0}^n \sqrt{n^2 - i^2}}, \quad (5.13)$$

який залежить від кількості зерен металу n , які знаходяться на зображенні площини шліфа та використовуються при обчисленні усередненого діаметру D_{mean} (рис. 5.18).

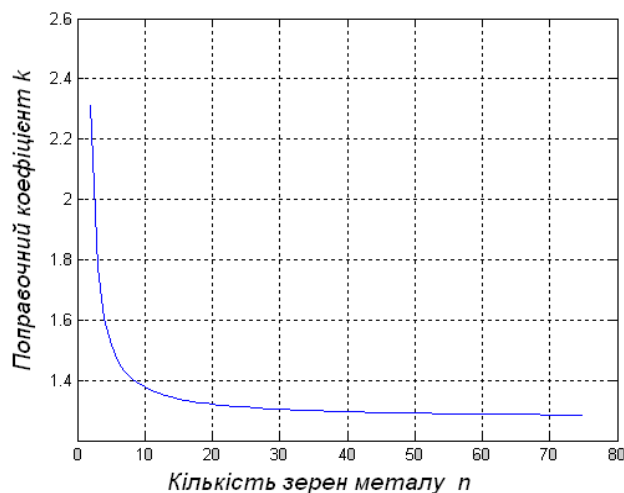


Рис. 5.18. Графік залежності значень поправочного коефіцієнта k від кількості зерен металу n (5.13).

Згідно ГОСТ 5639-82 (ASTM E 112) мінімальна кількість зерен при обчисленні їх усередненого діаметра повинна бути не меншою 50. З рисунку 5.18 видно, 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 ГОСТ 5639-82 (ASTM E 112), необхідно збільшити в 1,3 рази і лише в цьому випадку отримаємо усереднений діаметр D_0 зерен у їх тривимірному представленні.

Таким чином, проведені дослідження та математичні розрахунки виявили, що обчислення усередненого діаметра зерен металу згідно ГОСТ 5639-82 (ASTM E 112) та інших подібних нормативних документів містять суттєву методичну похибку [72]. Для її усунення необхідно використовувати поправочний коефіцієнт, що дасть можливість підвищити точність проведених обчислень усередненого діаметру зерен металу на основі зображень металографічних шліфів.

5.4. Автоматичне виділення та кількісний аналіз карбідів на межах зерен сталі 12X1МФ після експлуатації на парогоні ТЕС

Аналіз поточного технічного стану деградації металу відповідальних металоконструкцій, які експлуатуються за сумісного впливу високих напружень та корозивно-наводнювальних середовищ, все частіше привертає увагу фахівців і дослідників. Пояснюється це тим, що більшість таких великогабаритних об'єктів або вже вичерпали свій розрахунковий термін експлуатації, або ж доходять до межі його завершення. Зміна мікроструктури [20, 112, 115, 220], механічних властивостей [149, 200], характеристик статичної [135] та циклічної [200, 216] тріщиностійкості матеріалів після їх взаємодії з технологічними, як правило, корозивноактивними наводнювальними середовищами – це основні прояви їх високотемпературної водневої деградації. Одним з найуживаніших методів оцінювання властивостей металу є метод металографічного аналізу структури сталей. Загальновідомим є також великий масив результатів щодо характерних змін у сталях, які спричинені їх тривалою високотемпературною експлуатацією. Зокрема, в структурі зруйнованих ділянок парогонів переважно виявляють феритно-карбідну структуру зі значними проявами об'єднання карбідів уздовж меж зерен [126, 169, 177, 178, 199, 201, 230]. Такі достатньо великі виділення іншої фази послаблюють когезивну міцність меж зерен, що сприяє міжзеренному руйнуванню. Зрозуміло, що така структура металу суттєво впливає на його опір руйнуванню. Разом з тим, візуальний аналіз деградації конструкційних сталей через зміну їх мікроструктури характеризується значним суб'єктивізмом. Крім того, процес кількісного аналізу елементів мікроструктури матеріалу на основі візуальних спостережень є тривалий та трудомісткий. Для подолання цих недоліків актуальною є автоматизація кількісного аналізу елементів мікроструктури матеріалу за його цифровим зображенням.

Нижче розглянемо задачу автоматичної локалізації та подальшого кількісного аналізу карбідів, розташованих у металі вздовж меж зерен. Для досягнення цієї мети проф. Воробель Р.А. запропонував поділ складного

зображення (структура у вигляді меж зерен з карбідами вздовж і всередині них та артефактів) на його складники (межі зерен і карбіди на них) [220].

За вхідне використали металографічне зображення сталі 12Х1МФ (рис. 5.19).

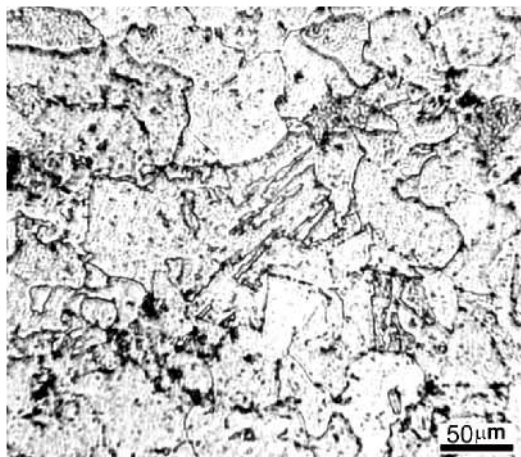


Рис. 5.19. Типове зображення структури сталі 12Х1МФ.

Воно повинно відповідати певним вимогам, щоб забезпечувати якість візуального сприйняття (мати достатній рівень контрастності, рівномірну освітленість тощо). Найчастіше через складність підготовки шліфів необхідної якості безпосередньо на експлуатованому об'єкті, недосконалість зображень, отриманих з пластикових відбитків структури, та устаткування для формування зображень, їх якість є низькою, що, природно, негативно впливає на результат кількісного аналізу.

Одним з найчастіших і суттєвих недоліків металографічних зображень є нерівномірність освітлення під час їх формування. Такий недолік можна усунути шляхом нормалізації зображень за рівнем інтенсивності фону (рис. 5.20). Для цього застосували метод вирівнювання фону зображення, який подано виразом [130]:

$$L^*(i, j) = L(i, j) - L_f(i, j) + 0,5 \cdot R \quad (5.14)$$

де $L^*(i, j)$ – значення інтенсивності елемента зображення з координатами (i, j) після нормалізації фону; R – максимальна інтенсивність елементів зображення; $L(i, j)$ – значення інтенсивності елемента вхідного зображення з координатами

(i, j) ; $L_f(i, j)$ – значення інтенсивності фону вхідного зображення у точці з координатами (i, j) , яку обчислюють за виразом

$$L_f(i, j) = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{(i, j) \in W} L(i, j), \quad (5.15)$$

де n та m – визначають розміри локального прямокутного околу (локальної апертури) $W = n \times m$.

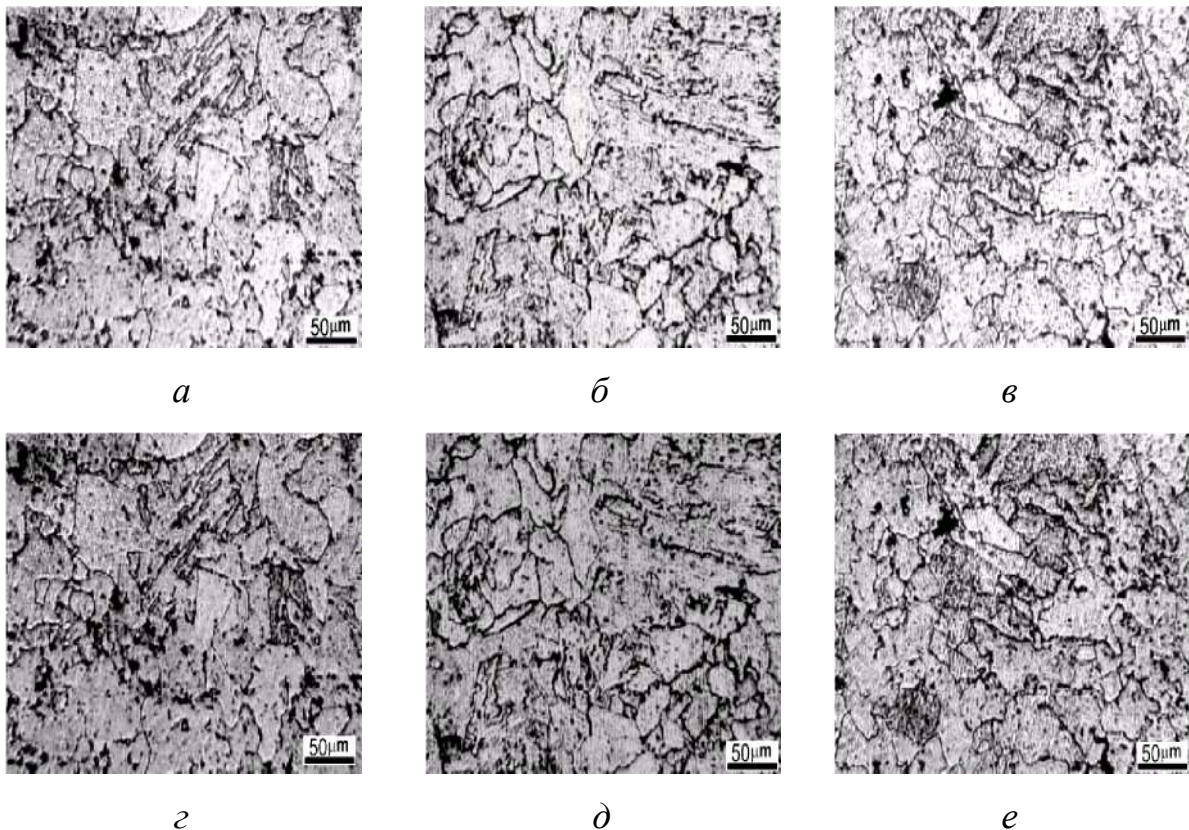


Рис. 5.20. Зображення мікроструктури сталі 12X1МФ перед (а, б, в) та після (г, д, е) вирівнювання фону.

Результат кількісного аналізу геометричних розмірів карбіді суттєво залежить від розмірів локальної апертури ($n \times m$). Для виключення такого впливу автором дисертаційної роботи проведена оптимізація розмірів локальної апертури на основі наступних досліджень. Для одного і того ж вхідного металографічного зображення обчислили геометричні характеристики структурних складових (наприклад, площі на зображенні, яка припадає на карбіді) при різних розмірах локальної апертури W (рис. 5.21).

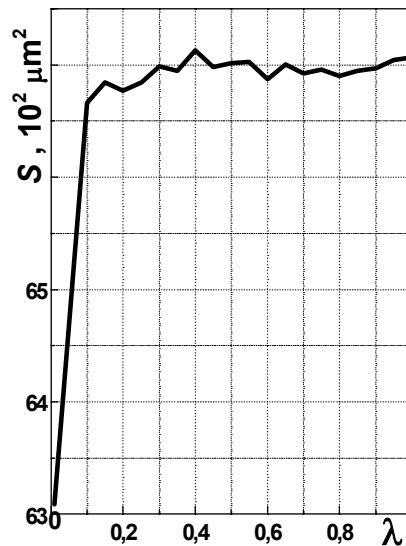


Рис. 5.21. Вплив співвідношення λ між розмірами локальної апертури ($n \times m$) і вхідного зображення ($k \times l$) на загальну площу карбідів S , розміщених уздовж меж зерен.

В результаті проведених досліджень можна зробити наступний висновок. Якщо під час вирівнювання фону розмір локальної апертури перевищуватиме 30 % від розміру вхідного зображення, то визначена площа карбідів практично не залежатиме від розмірів апертури (рис. 5.21). А це одна з необхідних передумов достовірності оцінювання цієї площі [220].

Таким чином, розроблений підхід усуває вплив нерівномірності освітлення під час цифрової реєстрації металографічних зображень. Це дає змогу нормалізувати їх за інтенсивністю та забезпечити повторюваність результатів кількісного аналізу зображень, отриманих дослідниками на різному обладнанні і за різних умов освітлення.

Оскільки карбіди на металографічному зображенні (див. рис. 5.19) відрізняються від решти фону, то для їх локалізації доцільно використати простий і швидкий в реалізації метод порогового опрацювання вхідного зображення згідно з виразом [130]

$$L_{bin}(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{коли } (L(i, j) - \bar{L}) > T; \\ 0, & \text{в інших випадках,} \end{cases} \quad (5.16)$$

де $L(i, j)$ – рівень інтенсивності пікселя з координатами (i, j) на вхідному зображенні L ; $L_{bin}(i, j)$ – рівень інтенсивності пікселя з координатами (i, j) перетвореного бінарного зображення; T – константа, яка відповідає порогу бінаризації; \bar{L} – середньоарифметичне значення інтенсивності елементів околу W , яке обчислюють за виразом

$$\bar{L} = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{(i,j) \in W} L(i, j). \quad (5.17)$$

При виборі константи T слід враховувати, що вона не повинна бути ні надто велика (щоб локалізувати усі наявні карбідів), ні надто мала (щоб не локалізувати хибні деталі). Для того, щоб унеможливити втрату карбідів, поріг T краще вибирати меншим, навіть якщо це призведе до виділення неінформативних деталей, які пізніше доведеться усунути (рис. 5.22 *a*). Дійсно, в результаті вибору низького порогу T , на бінарному зображенні, окрім меж зерен, наявні також неінформативні деталі. Характерним для цих ізольованих об'єктів є те, що вони відносно невеликі за площею. Застосувавши цю ознаку для усунення неінформативних об'єктів, отримали нове зображення (рис. 5.22 *b*). Зазначимо, що внаслідок порогового оброблення не всі неінформативні об'єкти вдалось усунути. Крім того, порушилася нерозривність меж зерен.

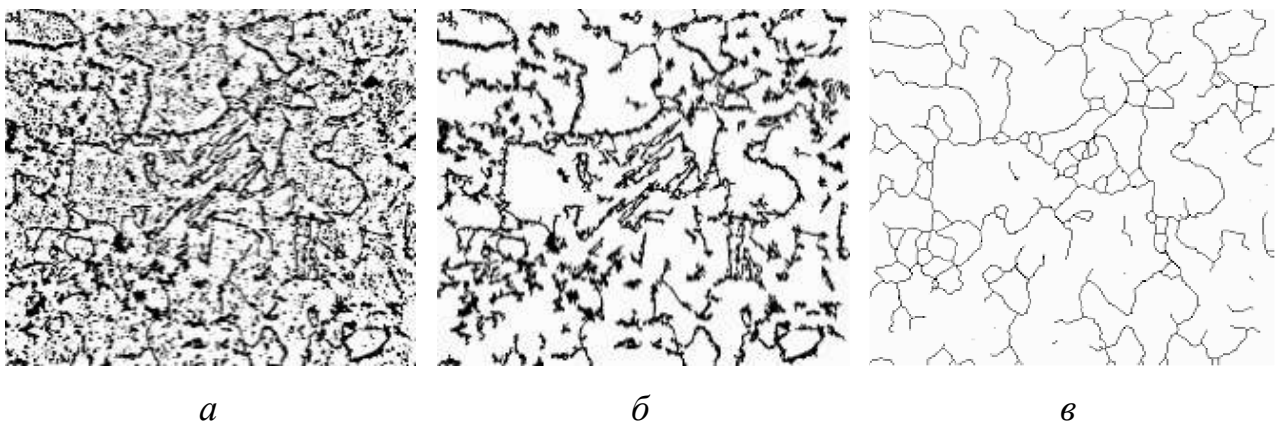


Рис. 5.22. Бінарне зображення структури (*a*) після усунення неінформативних деталей (*б*) та невеликих розривів меж зерен (*в*).

Для усунення розривів використали відомі морфологічні операції [55]: потовщення і потоншення ліній та скелетування. Здійснення цих операцій дало

змогу усунути лише невеликі розриви. Більші розриви на зображенні, які не могли бути усунуті за допомогою морфологічних операцій, залишились (рис. 5.22 *в*). Також деякі межі зерен виділяються помилково та є розривними. Повне усунення таких недоліків передбачає інтерактивне редагування меж зерен, за результатами якого отримали остаточне зображення, використане для аналізу (рис. 5.23 *а*).

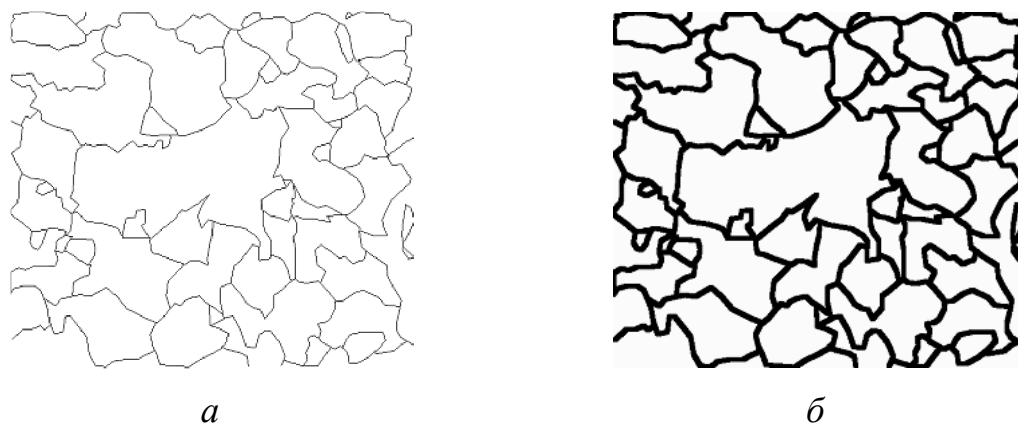


Рис. 5.23. Скориговані в інтерактивному режимі межі зерен (*а*) та бінарне зображення після нарощування їх товщини (*б*).

На наступному етапі опрацювання зображення локалізували карбіди. Для цього використовували морфологічні операції, зокрема, нарощування (рис. 5.23 *б*). Кількість ітерацій під час операції нарощування вибирали таким чином, щоб забезпечити сумірність товщини новоутворених контурів меж зерен та розмірів карбідів, які розташовані вздовж них [220, 222].

Отримане зображення розширених контурів меж зерен сумістили із зображенням реальних меж зерен з розміщеними на них карбідами (рис. 5.24 *а*). Застосувавши до нового зображення (лише в межах потовщеного контуру) метод бінаізації, виділили фрагменти контурів меж зерен та розміщені вздовж них карбіди (рис. 5.24 *б*). Контури зерен стали тоншими порівняно з розмірами карбідів. Це забезпечило можливість їх усунення шляхом послідовного застосування морфологічних операцій потоншення та потовщення (рис. 5.24 *в*).

Зображення з карбідами, розташованими вздовж меж зерен вхідного зображення (див. рис. 5.19), подано на рис. 5.24 *з*. Отримане зображення використали для кількісного аналізу структурних складових металу.

Враховуючи це, що кожен карбід на зображенні розглядають як окремий об'єкт, то це дало можливість кількісно оцінити геометричні розміри та форму як кожного карбїду, так і всієї їх сукупності. Обмеження можуть виникати лише через неможливість розділення групи карбїдів та низьку роздільну здатність зображення [220].

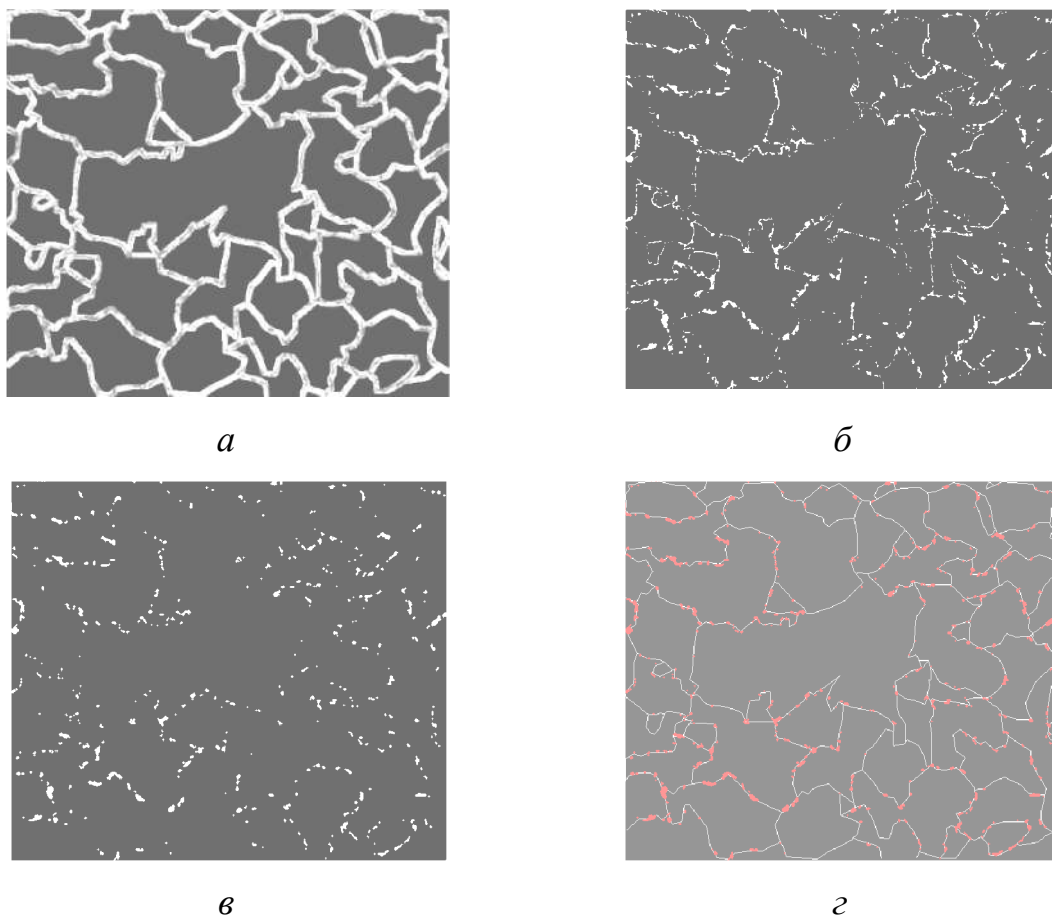


Рис. 5.24. Контури потовщених меж зерен з розташованими на них карбідами (*а*), бінарні зображення не усунутих пороговим опрацюванням фрагментів меж зерен разом з карбідами на них (*б*), самих карбїдів (*в*) та карбїдів, розташованих уздовж меж зерен (*г*).

Розглянутий метод має широкі можливості для налаштування під час опрацювання та аналізу зображень [220], зокрема, обчислення статистичних

характеристик геометричних параметрів карбідів (їх площі, орієнтації, співвідношення осей тощо).

Для прикладу, розглянутий метод застосовували для кількісного аналізу карбідів на межах зерен в сталі 12Х1МФ з прямої ділянки та розтягнутої зони гину головного парогону ТЕС після їх експлуатації впродовж $\sim 13 \cdot 10^4$ h.

Результати, наведені на рис. 5.25 свідчать, що попри однакову тривалість експлуатації металу на прямій ділянці та у зоні гину головного парогону ТЕС кількість карбідів на межах зерен та площа, яку вони займають на аналізованих зображеннях, істотно відрізняються для них [220]. Зокрема і кількість, і площа карбідів на межах зерен в металі гину перевищує відповідні параметри для прямої ділянки. Це може слугувати прямим доказом того, що деградація металу гину відбувається інтенсивніше, ніж металу прямої ділянки труби. Крім того, цим аналізом однозначно показано, що і кількість, і площа карбідів на межах зерен в обох випадках (пряма ділянка і гин) якісно однаково змінюється поперек стінки труби. Причому поблизу їх внутрішніх поверхонь обидва оцінювані показники мають мінімальні значення. Це може означати, що перерозподіл карбідів на межі зерен внаслідок тривалої експлуатації відбувається активніше біля зовнішньої поверхні труби. Повзучість металу парогонів під час їх тривалої експлуатації, зумовлена внутрішнім тиском пари у трубах, найінтенсивніше відбувається біля їх зовнішньої поверхні. Враховуючи це, можна стверджувати, що за ідентичних технологічних параметрів експлуатації деградація металу гину повинна відбуватися активніше через його відому сильнішу схильність до повзучості [123]. З цих досліджень можна зробити висновок, що активніша деформація повзучості металу гину стимулювала перерозподіл карбідів (рис. 5.25), що є структурною ознакою деградації металу.

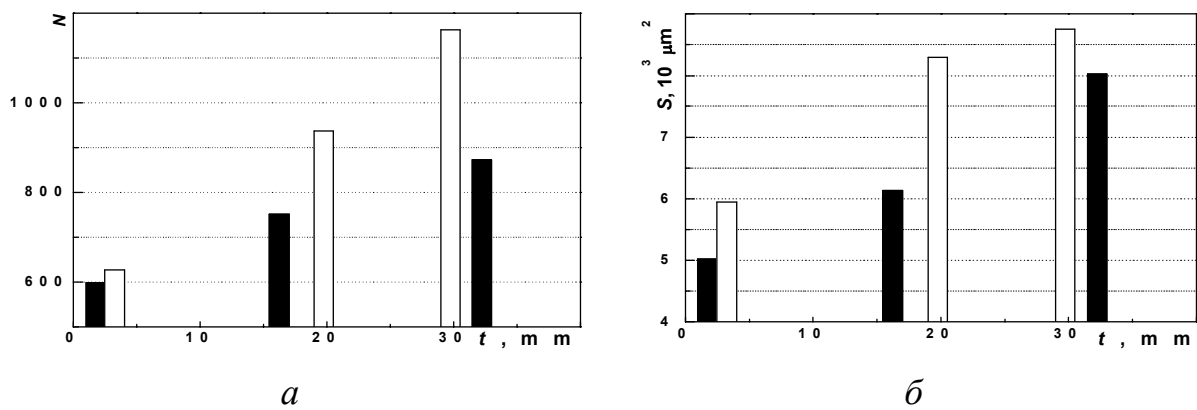


Рис. 5.25. Залежність сумарної кількості N (а) та площі S карбідів (б), автоматично виділених на межах зерен, від віддалі від внутрішньої поверхні труб t , визначені кількісним аналізом оброблених зображень структури сталі 12Х1МФ у діаметральному перерізі труб (прямої ділянки (чорні стовпчики) і розтягнутої зони гину (білі стовпчики), експлуатованих впродовж $\sim 13 \cdot 10^4$ h на головному парогоні ТЕС [220].

Перевага методу полягає у можливості уникати тривалої і виснажливої роботи з виділення карбідів вручну, що на металографічних зображеннях подекуди взагалі неможливо реалізувати через велику кількість об'єктів аналізу. Друга важлива перевага – можливість проведення кількісного аналізу карбідів за їх формою і розмірами, за їх розташуванням. Цей метод може стати в нагоді під час пошуку кореляційних залежностей між структурними та механічними показниками, чутливими до деградації конструкційних сталей. У цьому випадку за достатньо широкої бази даних з різних показників технічного стану металу після експлуатації можна буде прогнозувати механічні властивості деградованого металу без проведення механічних випроб, тобто без вирізання металу з діючої конструкції, а лише через оцінювання структурних показників. Отже, вищеповисаний метод надає можливість проведення неруйнівного контролю технічного стану конструкційних сталей на проміжних етапах експлуатації (під час планових обстежень конструкцій).

5.5. Аналіз орієнтації зерен на металографічних зображеннях за допомогою перетворень Хафа

Мікроструктуру будь-якого металевого сплаву можна представити як набір структурних елементів одного чи декількох типів. В площині зображення шліфа ці структури відображаються у вигляді деяких геометричних фігур, які характеризуються певною формою та геометричними параметрами. Природно припустити, що у деякому об'ємі сплаву та, відповідно, у площині шліфа не існує двох структур з однаковою формою та геометричними параметрами, тому для їх аналізу, як і в багатьох попередніх методах, будуть використовуватися усереднені параметри.

Одним із параметрів, які характеризують структуру, є усереднена орієнтація зерен чи її відсутність [78]. Якщо на поверхні шліфа відсутня будь-яка переважаюча спрямованість меж зерен, то таку структуру називають ізометричною. У випадку орієнтованих структур межі зерен металу є частково чи повністю зорієнтованими вздовж деякого напрямку. Кількісне оцінювання орієнтації зерен є важливим при розв'язуванні багатьох матеріалознавчих задач. 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. Він дозволяє кількісно оцінювати залишкову напруженість через рівень спотворення кристалічної ґратки. Недоліком такого підходу є те, що він вимагає дороговартісного рентгенівського обладнання, а спотворення кристалічної ґратки аналізуються не в автоматизованому чи автоматичному режимі, що може призвести до значних похибок через наявність людського фактору.

Існує багато способів визначення переважної орієнтації об'єктів на зображенні. Серед них слід виділити методи на основі дифракційних спектрів (Островский І.О.), методи на основі Фур'є-перетворення (Smart P., Tovey K.), за градієнтом інтенсивності (Unitt B.M.), метод січних (Каменська К.В., Кузьмін

В.А.). Кожен із них має певні недоліки. Метод на основі дифракційних спектрів вимагає складного обладнання. У методі на основі Фур'є-перетворення важко визначити, які гармоніки визначають досліджувані структурні елементи. Градієнтний метод не може аналізувати бінарні зображення. Метод січних не придатний для аналізу зображень з розривними межами зерен, оскільки буде давати велику похибку.

Актуальною є розробка технології, яка б дозволяла автоматизувати аналіз орієнтації зерен матеріалу. Ускладнення сучасних задач аналізу цифрових зображень призвело до цього, що можливостей традиційних підходів до опрацювання візуальних даних є недостатньо. Це зумовило необхідність розроблення нових та адаптації відомих технологій для вирішення поставлених задач. Доволі часто при аналізі об'єктів на цифрових зображеннях використовується перетворення Хафа [164]. Відомо, що даний підхід дозволяє шукати та локалізувати на зображенні прямі, кола, еліпси.

Розглянемо найпростіший випадок пошуку прямих на зображенні. Зазначимо, що даний метод за вхідні використовує монохромні зображення. Пряма на площині описується рівнянням $y = k \cdot x + b$ та може бути задана двома точками. В перетворенні Хафа пряма описується двома параметрами - ρ та θ . ρ - це відстань від початку координат до прямої, а θ - кут між прямою, перпендикулярною до заданої та додатнім напрямком осі абсцис (рис. 5.26). Площину (ρ, θ) ще називають простором Хафа.

У цьому просторі пряма y представляється через параметри ρ та θ наступним виразом

$$x \cdot \cos\theta + y \cdot \sin\theta = \rho, \quad (5.18)$$

де (x, y) - точка об'єкту, в даному випадку, прямої на монохромному зображенні.

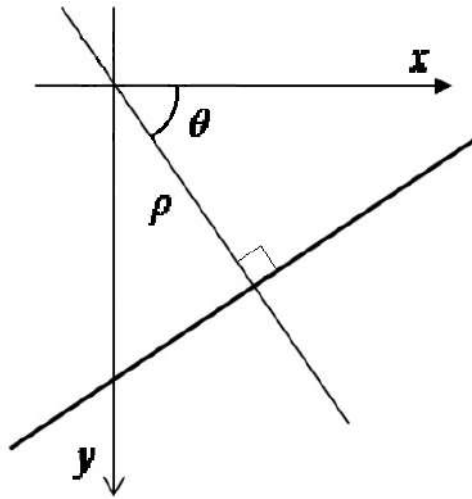


Рис. 5.26. Представлення прямої у просторі Хафа.

Вираз (5.18) реалізує трансформацію представлення деякої точки (x_0, y_0) прямої з декартового простору у простір Хафа. З іншого боку, через дану точку можна провести безліч прямих, які згідно (5.18) можна представити рівнянням

$$x_0 \cdot \cos \theta + y_0 \cdot \sin \theta = \rho . \quad (5.19)$$

В просторі Хафа рівняння (5.19) відповідає синусоїді. Таким чином кожна пряма, яка містить точку (x_i, y_i) в декартовому просторі представляється синусоїдою в просторі Хафа

$$x_i \cdot \cos \theta + y_i \cdot \sin \theta = \rho . \quad (5.20)$$

Якщо точки (x_i, y_i) належать одній прямій, тоді синусоїди, які їм відповідають, перетнуться в одній точці простору Хафа. Координати цієї точки (ρ, θ) є параметрами цієї ж прямої, представленої в просторі Хафа.

Оскільки на реальних монохромних зображеннях може бути багато об'єктів, елементи яких не завжди лежать на прямих, то такі зображення представляються в просторі Хафа множиною синусоїд. Ці синусоїди перетинаються у багатьох точках. Координати точки перетину найбільшої кількості синусоїд є параметрами прямої лінії (рис. 5.27).

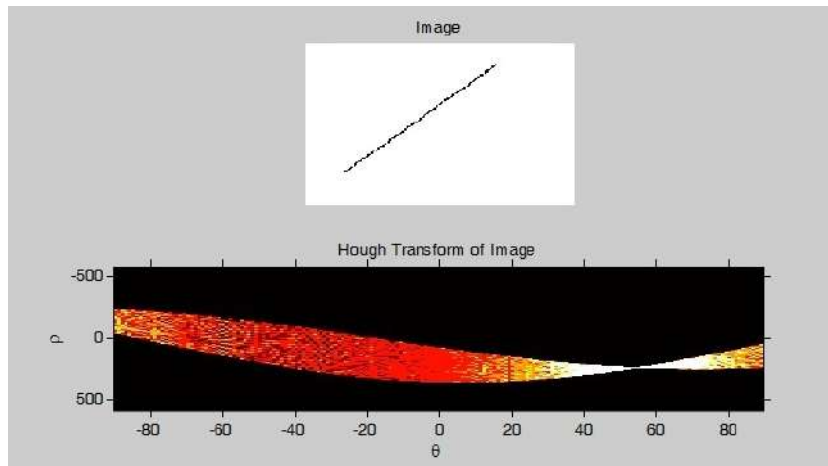


Рис. 5.27. Зображення прямої та відповідне йому перетворення Хафа.

Отже, розглянутий метод Хафа може використовуватися для виявлення прямих на зображенні. На багатьох реалістичних зображеннях, зокрема металографічних, є лінії, які лише з деяким наближенням можна назвати прямими. Їх представлення в просторі Хафа (рис. 5.28) буде відрізнятися від прямих ліній (рис. 5.27), а саме точки перетину косинусоїд будуть більш розпливчастими.

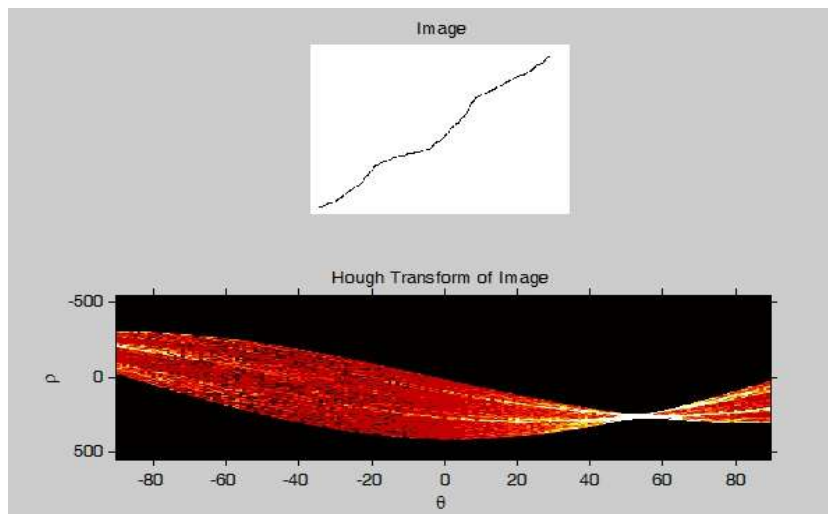


Рис. 5.28. Зображення умовно прямої лінії та відповідне перетворення Хафа.

Отже, вище було досліджено представлення прямих та умовно прямих ліній в просторі Хафа. Багато зображень, які є основою для проведення аналізу, мають складну структуру, тому виявити прямі чи, тим більше, умовно прямі лінії є досить складно. Перетворення Хафа дає можливість виявляти ці об'єкти на складноструктурованих зображеннях. До таких зображень належать,

зокрема, металографічні зображення. Застосуємо цю технологію для аналізу орієнтації структурних складових на металографічних зображеннях та кількісної оцінки їх видовження.


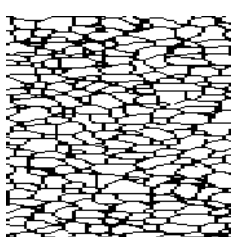
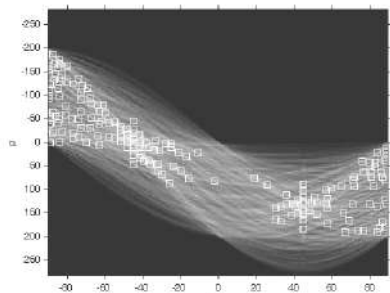
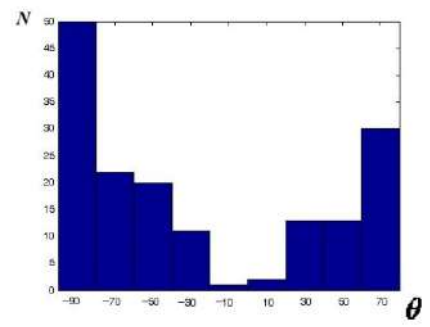
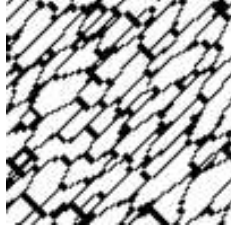
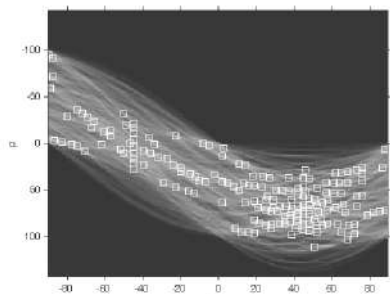
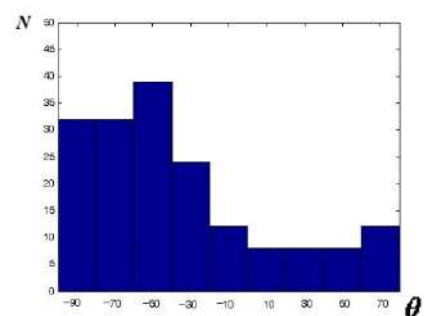
Оцінка орієнтації та видовження складових, зокрема, зерен металів є важливим параметром при дослідженні багатьох матеріалознавчих задач, зокрема деформацій, залишкових напружень, деградацій матеріалу. У багатьох роботах [33, 137] для вивчення зміни орієнтування та видовження елементів мікроструктури проводили наступні експерименти – зразки металу розтягували, стискали, крутили, а потім вивчали як змінилася їх мікроструктура до та після експерименту. Встановлено, що до прикладення зовнішніх дій зерна є переважно округлої форми та не мають чітко вираженої орієнтації. Із збільшенням деформацій зерна витягуються вздовж певних ліній. Коли зовнішня дія є суттєвою, то це призводить до текстурної деформації, а зерна металу зорієнтовуються вздовж сили навантаження та витягуються пропорційно до прикладеної сили. Зважаючи на сказане, важливою є задача аналізу орієнтації зерен металу та кількісного оцінювання їх видовження.

5.5.1. Аналіз орієнтації зерен металу.

Дослідимо чутливість методу з використанням перетворення Хафа до зміни напрямку орієнтації зерен металу [78]. За вхідні використаємо змодельовані зображення, які представлені на рис. 5.29 у першому стовбці. Це зображення меж зерен, які сформовані під різним кутом повороту α площини самого зображення. До кожного з цих зображень було застосовано перетворення Хафа (рис. 5.29, другий стовбець).

До рис. 5.29 необхідно дати пояснення стосовно систем координат, які використовуються при формуванні вхідних зображень, кута повороту α та їх представлення в просторі Хафа. Для вхідних зображень використовується традиційна система координат – додатній напрямок кута повороту спрямований від осі OX проти руху годинникової стрілки. Для вхідних зображень, які

представлені на рис. 5.29 (перший стовпець) кут повороту визначається напрямком видовженості зерен металу на зображенні, тобто їх орієнтацією. При представленні цих зображень в просторі Хафа рис. 5.29 (другий стовпець) використовується система відліку, де додатній напрямок кута повороту спрямований від осі Ox за рухом годинникової стрілки, але під кутом повороту мається на увазі кут повороту не прямої $y(x)$ (5.20), а перпендикуляру до неї. В просторі Хафа цей кут прийнято позначати буквою θ .

Зображення, сформоване під певним кутом α	Представлення зображення в просторі Хафа	Гістограма розподілу прямих під певним кутом
1	2	3
<p>Пояснення щодо кута повороту зображення α та кута повороту перпендикуляру в просторі Хафа θ.</p> 		
 <p>1) $\alpha = 0^\circ$</p>	 <p>2)</p>	 <p>3)</p>
 <p>4) $\alpha = 45^\circ$</p>	 <p>5)</p>	 <p>6)</p>

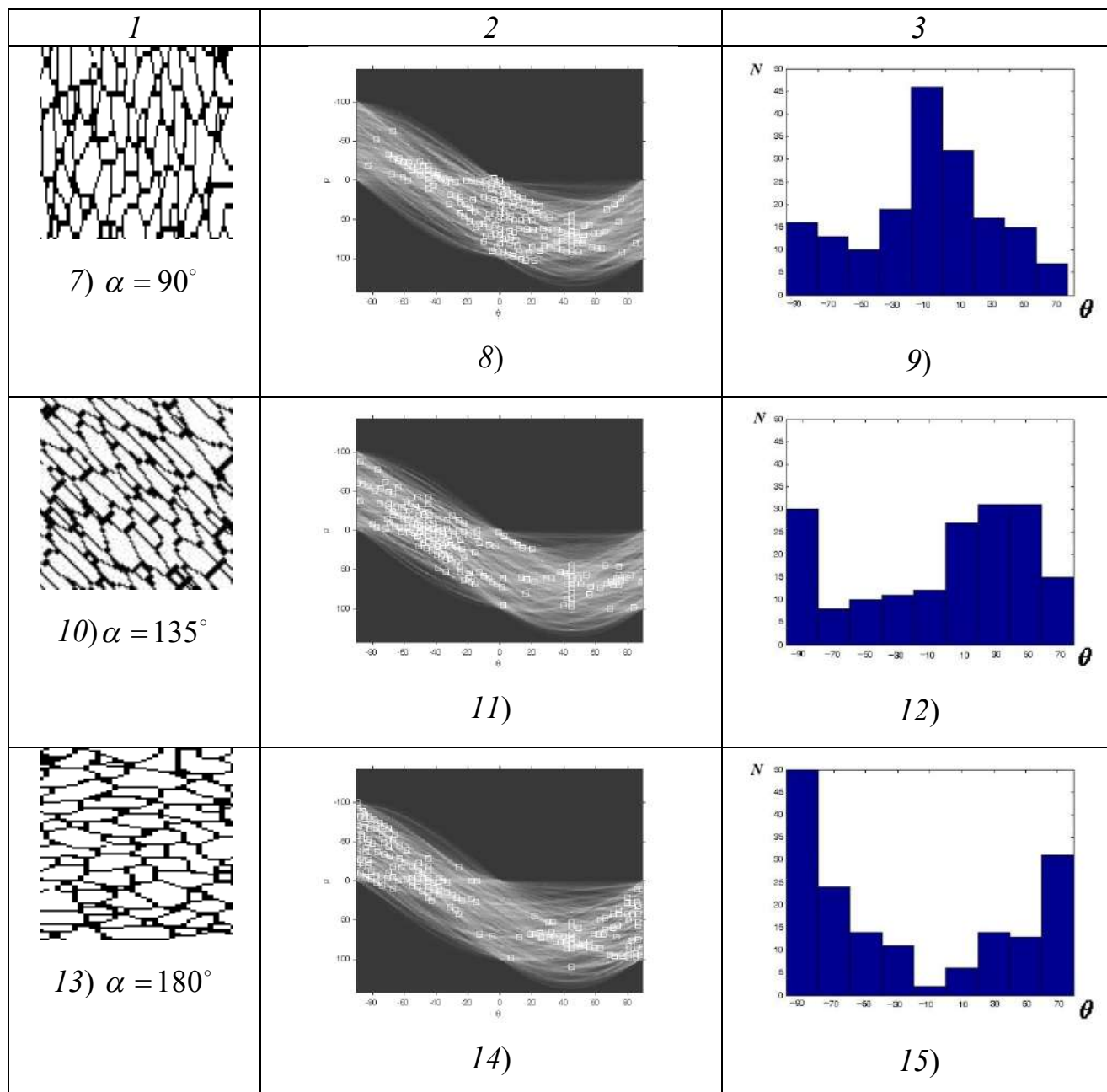


Рис. 5.29. Дослідження чутливості методу з використанням перетворення Хафа до зміни напрямку орієнтації зерен металу.

На рисунках 5.29 2, 5, 8, 11, 14, які відображають представлення вхідних зображень 5.29 1, 4, 7, 10, 13 в просторі Хафа, білими квадратиками позначено максимальні значення акумулюючої матриці. Зазначимо, що ці піки групуються біля таких значень θ в просторі Хафа, які відповідають перпендикуляру до напрямку орієнтації зерен металу.

Розглянемо це на прикладі зображень 5.29 1-3. На рис. 5.29 1 представлено зображення меж зерен. Візуально помітно, що більшість зерен є зорієнтовані в

горизонтальному напрямку, тобто $\alpha = 0^\circ$. Застосуємо до цього зображення перетворення Хафа (рис. 5.29 б) та побудуємо гістограму розподілу кількості піків в просторі Хафа залежно від кута θ (рис. 5.29 в). Максимальне значення піків відповідає $\theta = -90^\circ$, тобто перпендикуляру до горизонтальної лінії ($\alpha = 0^\circ$). Таким чином, в результаті проведених досліджень встановлено, що за допомогою перетворення Хафа в автоматичному режимі можна визначити переважаючий напрям орієнтації зерен металу на зображенні шліфа.

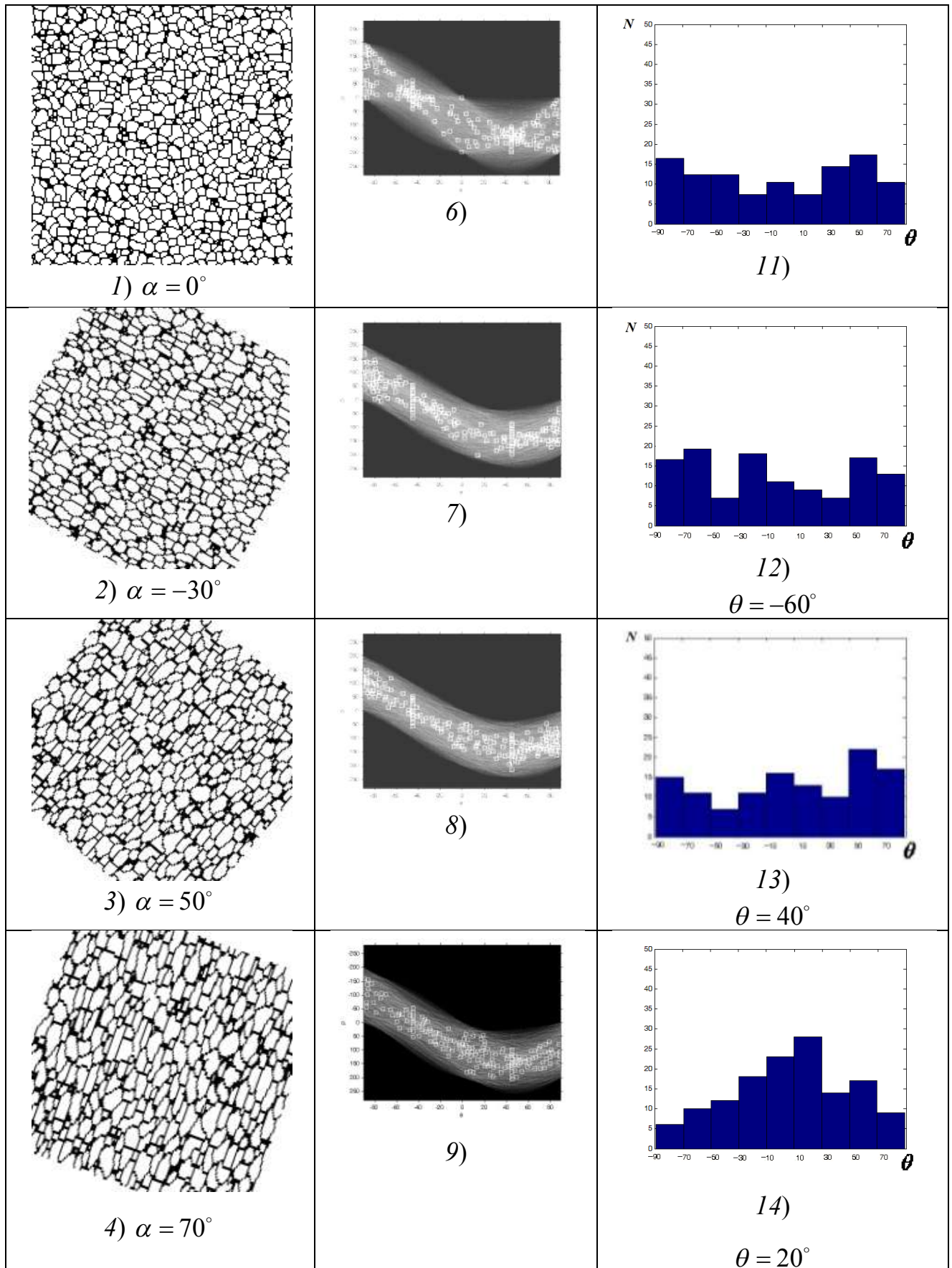
5.5.2. Визначення видовженості зерен металу

Представлені на рис. 5.29 тестові зображення (перший стовбець) мають доволі чітку видовженість у певному напрямку. Зерна металів на реальних металографічних зображеннях характеризуються різним рівнем видовженості або її цілковитою відсутністю. Дослідимо чутливість перетворення Хафа до кількісного оцінювання рівня видовженості зерен металу [78].

Для проведення дослідження змодельуємо зображення з різним рівнем видовження зерен металу (рис. 5.30 1-5). Оскільки зображення можуть бути сформованими під різним кутом повороту в площині предметного стола, то параметр, який характеризує конкретний рівень видовження, повинен бути однаковим для різних кутів повороту та не залежати від нього, тобто бути інваріантним. Застосуємо до кожного із зображень цього набору перетворення Хафа [137, 164] (рис. 5.30 6-10).

Проаналізуємо представлення вхідних зображень в просторі Хафа (рис. 5.30 6-10). На цих рисунках білими квадратиками позначено локальні максимуми акумулюючої матриці. Для кожного вхідного зображення характерний свій розподіл максимумів на зображенні в просторі Хафа. Також із зображень на рисунку 5.30 6-10 видно, що локальні максимуми розподілені по полю зображення не рівномірно, а групуються біля певних значень кута θ в просторі Хафа. Для більш детального аналізу побудуємо для кожного вхідного зображення гістограми розподілу локальних максимумів в просторі Хафа

залежно від кута θ (рис. 5.30 11-15). Для зручності порівняння гістограми побудовані в одному і цьому ж масштабі.



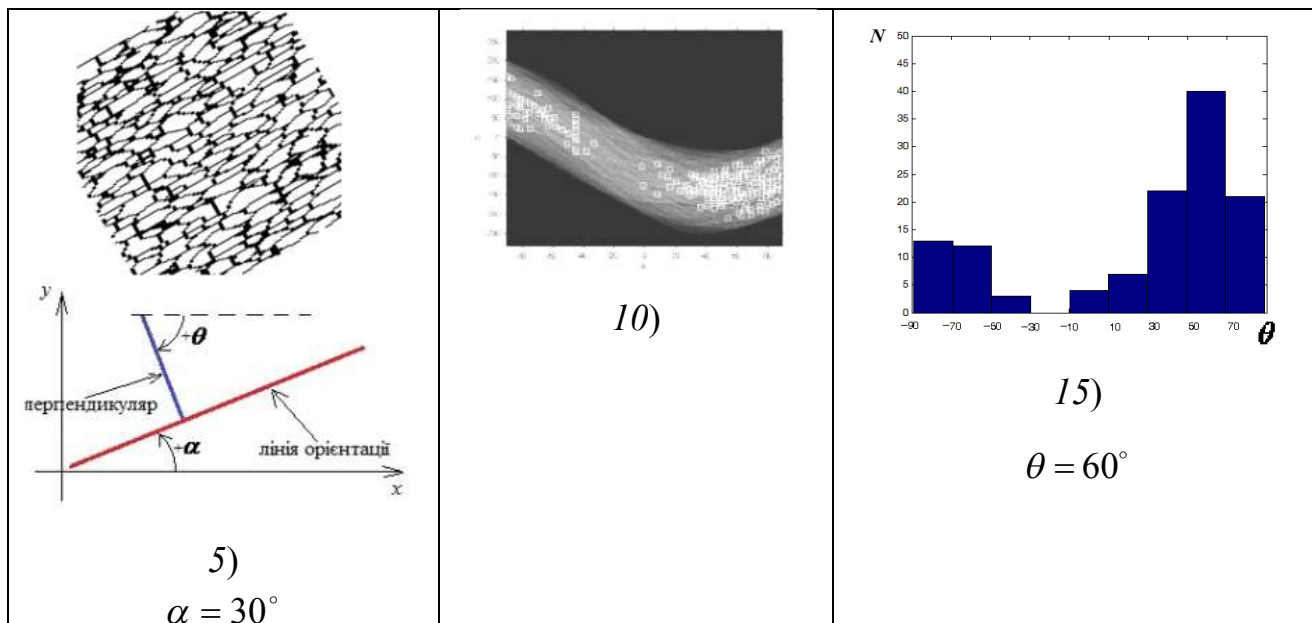


Рис. 5.30. Дослідження чутливості перетворення Хафа до кількісного оцінювання рівня видовженості зерен металу.

Проведемо аналіз сформованих гістограм (рис. 5.30 11-15). Кожна із цих гістограм має максимум, який для вхідних зображень (рис. 5.30 1-5) є різним та відповідає різним кутам θ . Більшій видовженості зерен металу відповідає більше абсолютне значення максимуму. Для прикладу, на рис. 5.30 1 зерна металу не мають очевидного видовження в деякому напрямку, тому і гістограма не має чітко виражених максимумів. На рис. 5.30 5 зерна металу є суттєво видовженими. Видовженість зерен орієнтована в напрямку прямої, яка розміщена під кутом $\alpha = 30^\circ$ до осі Ox . Перпендикуляр до цієї прямої розміщений під кутом $\theta = 60^\circ$ та відповідає координаті максимуму в просторі Хафа (рис. 5.30 15) для цього зображення.

Другим важливим аспектом при аналізі гістограм, представлених на рис. 5.30 11-15, є те, що моди цих гістограм пропорційні до видовження зерен металу на відповідних зображеннях 5.30 1-5. 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.

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 після 133431 годин експлуатації. Результати проведених досліджень представлені на рис. 5.31. Параметр видовженості S обчислюється як відношення максимальної кількості піків при певному куті θ до загальної їх кількості в просторі Хафа рис. 5.30 (11-15).





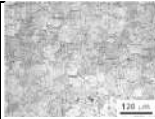
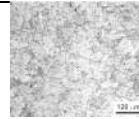
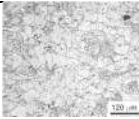
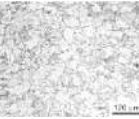

Зображення з прямої ділянки труби									
									
Відстань від внутрішньої стінки, мм	2,5	5	9	12	17	20	27	32	33
Витягнутість зерен, S	18	18	17,9	17,6	16,91	17,42	18,6	15,5	16,9
Зображення із зони гину труби									
									
Відстань від внутрішньої стінки, мм	2,5	10	14	19	23	27	29		
Витягнутість зерен, S	21,6	22,5	26,1	27,6	25,5	27,11	23,52		

Рис. 5.31. Результати кількісного оцінювання видовження зерен шліфів сталі 12Х1МФ, вирізаних з прямолінійної ділянки та зони гину труби парогону ТЕС.

Для більш наочного представлення результатів проведеного дослідження представимо їх у вигляді графіка (рис. 5.32).

Представлені на рис. 5.32 результати добре корелюють з результатами розподілу розміру зерен та зміни твердості залежно від віддалі від внутрішньої стінки труби, які описані в п. 5.2. Це дає можливість розповсюдити отримані у

п.5.2 висновки до поточних досліджень (п. 5.5.2) та прив'язати їх до оцінки витягнутості S .

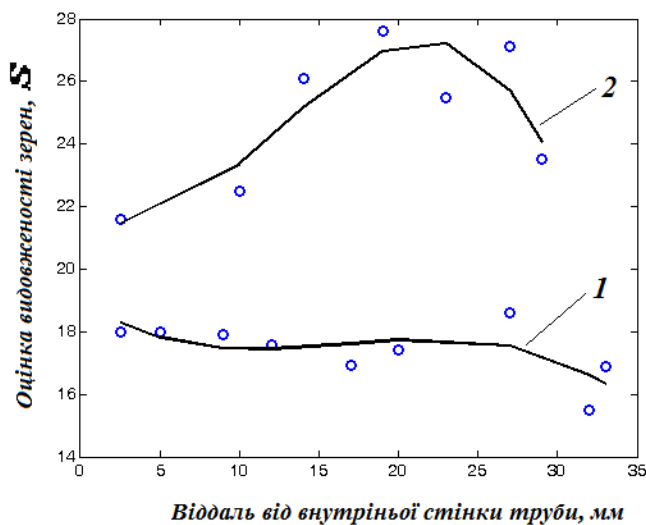


Рис. 5.32. Оцінка видовженості зерен шліфів сталі 12X1МФ, вирізаних з прямолинійної ділянки (1) та зони гину (2) труби парогону ТЕС.

На прямолинійній 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 [78].

5.6. Точність статистичної оцінки вимірювань діаметра зерна матеріалу

Необхідність моніторингу стану відповідальних конструкцій та виробів у різних галузях народного господарства обумовлена тим, що більшість із цих конструкцій вже відслужили свій термін експлуатації, або підходять до нього та зазнають незворотних процесів деградації, яка може вплинути на їх безпечну експлуатацію. Другий чинник, який зумовлює необхідність досліджень в галузі кількісної металографії, полягає у тому, що розвиток техніки призводить до

потреби у пошуку нових матеріалів з новими механічними, фізико-хімічними та технологічними властивостями. Будь-який метал має певну складну внутрішню структуру, яка визначається його хімічним складом. Експериментально встановлено, що між фізико-механічними властивостями матеріалу, станом його деградації та його внутрішньою мікроструктурою існує тісний однозначний взаємозв'язок [137].

Сказане вище робить актуальною задачу пошуку інструментарію для опису та вивчення мікроструктури матеріалів. Існує три основних підходи до вивчення мікроструктури матеріалів: якісно-описова, оцінка за допомогою балів та метрична оцінка. Перші два підходи мають суб'єктивний характер, доволі часто результати їх аналізу є суперечливими та взаємовиключними, тому їх не раціонально використовувати для конструктивних досліджень. Метрична оцінка з залученням математичного апарату та обчислювальної техніки на сьогодні є найбільш перспективною, оскільки забезпечує кількісний аналіз складної мікроструктури матеріалів та виявлення взаємозв'язків між мікроструктурою та властивостями матеріалів. Тому в даній роботі буде розглянута задача створення нових та вдосконалення існуючих інформаційних технологій кількісного аналізу зображень об'єктів в неруйнівному контролі, зокрема, в металографії.

Більшість матеріалів, зокрема метали, є непрозорими, тому дослідникам не видно їх просторової структури та не можна здійснити прямі геометричні вимірювання. Здебільшого вхідними даними для досліджень мікроструктури є цифрові зображення, які отримані за допомогою оптичного мікроскопу. Вони представляють собою двохвимірну структуру, отриману внаслідок перерізу дійсної тривимірної структури матеріалу. Важливим є питання – чи коректно результати аналізу, які отримані внаслідок досліджень двохвимірного січення мікроструктури, представляти як істинні параметри її просторової будови? Для прикладу, при отриманні двовимірного січення мікроструктури ймовірність перерізу зерен більшого діаметру є більшою, ніж зерен меншого діаметру. Тому при перенесенні результатів досліджень мікроструктури з її двохвимірного

представлення на дійсне просторове доцільно використовувати статистичні підходи.

Одним з параметрів, який найбільш часто використовують при аналізі металографічних та фактографічних зображень, є діаметр зерна матеріалу [26, 57, 71, 228, 229]. Зображення шліфа представляє собою масову сукупність більш-менш однорідних об'єктів, у даному випадку, зерен. Тому для оцінювання вимірювань діаметра зерен матеріалу, як говорилося про це вище, доцільно використовувати статистичні підходи.

При проведенні будь-яких вимірювань важливо знати їх достовірність, наскільки точно вони проведені, яка можлива похибка таких обчислень. У роботі розроблено декілька підходів до обчислення усередненого діаметра зерна матеріалу. Оцінимо точність таких вимірювань. Абсолютна похибка Δ може бути представлена наступним виразом:

$$\Delta = |d - \bar{d}|, \quad (5.21)$$

де d - дійсне значення діаметру деякого зерна;

\bar{d} - розмір зерна, отриманий в результаті проведених обчислень.

Зрозуміло, що дійсне значення діаметру зерна металу нам невідоме [137], тому для обчислення абсолютної похибки скористаємося виразом

$$\Delta = t \cdot \sigma(d), \quad (5.22)$$

де t - нормоване відхилення, яке може бути обчислене за виразом $t = \frac{d - \bar{d}}{\sigma}$;

σ - середньоквадратичне відхилення для заданої вибірки;

$\sigma(d)$ - середньоквадратичне відхилення середньоарифметичної вибірки.

Оцінимо точність вимірювань зерна матеріалу на прикладі п'яти фрактографічних зображень однієї і тієї ж ділянки сталі 15Х1МФ (рис. 5.33). На основі кожного із зображень на рис. 5.33 a - d проведено обчислення усередненого діаметру зерна \bar{d}_i , де $i = \overline{1, k}$ (у нашому випадку $k = 5$).

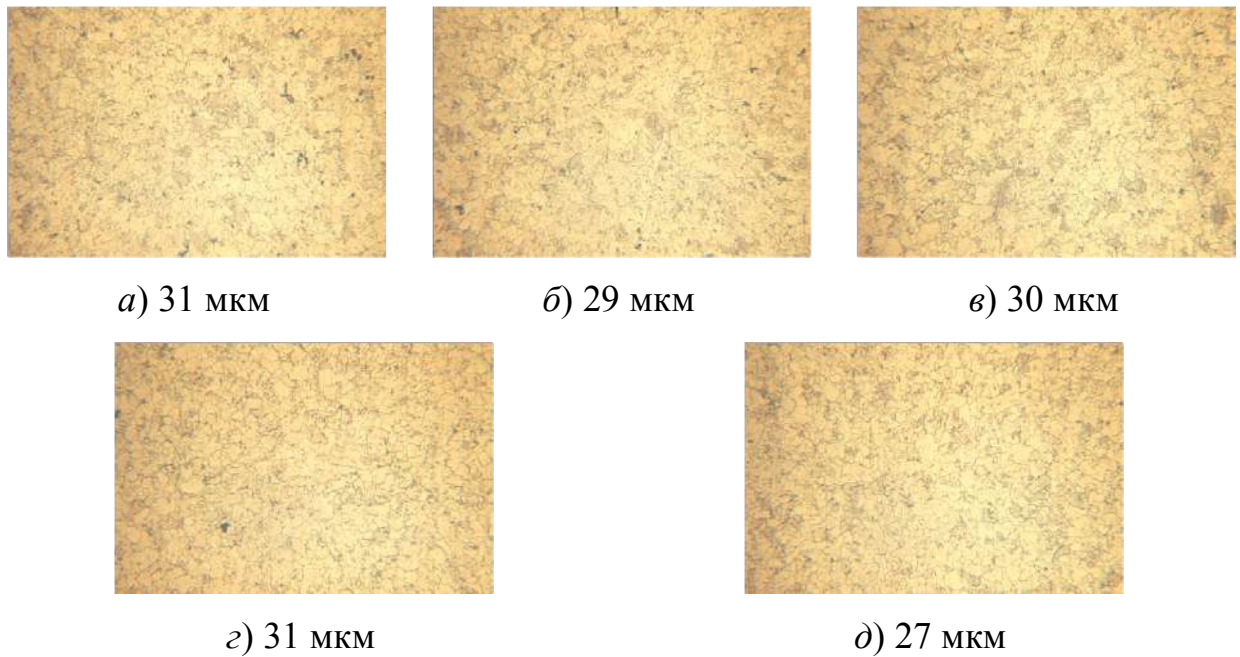


Рис. 5.33. Металографічне зображення однієї і тієї ж ділянки сталі 15X1МФ та обчислені за цими зображеннями значення усередненого діаметру зерна.

Далі обчислимо середньоквадратичне відхилення отриманого набору усереднених діаметрів $\{\bar{d}_i\}$ за виразом

$$\sigma(\bar{d}) = K \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_k^2}{k} - d_0^2}, \quad (5.23)$$

де $K = \sqrt{\frac{k}{k-1}}$ - коригуючий коефіцієнт, який залежить від кількості проведених незалежних вимірювань;

$d_0 = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_k}{k}$ - середньоарифметичне значення усіх проведених вимірювань \bar{d}_i .

Для нашого випадку

$$K = \sqrt{\frac{5}{5-1}} = 1,118, \quad (5.24)$$

$$d_0 = \frac{31 + 29 + 30 + 31 + 27}{5} = 29,6, \quad (5.25)$$

$$\sigma(\bar{d}) = 1,118 \sqrt{\frac{31^2 + 29^2 + 30^2 + 31^2 + 27^2}{5} - 29,6^2} = 1,6733. \quad (5.26)$$

Значення середньоквадратичного відхилення отриманого набору усереднених діаметрів $\{\bar{d}_i\}$ (5.26) буде використано у виразі (5.22) для обчислення абсолютної похибки вимірювань діаметру зерен Δ .

Другим параметр, який необхідний для обчислення абсолютної похибки Δ , є величина нормованого відхилення t . Нормоване відхилення t пов'язане з довірчою імовірністю p за допомогою виразу

$$p = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (5.27)$$

Довірча імовірність p виражається числом в межах від 0 до 1 та показує ймовірність того, що дійсне значення досліджуваної величини, в нашому випадку діаметр зерна матеріалу d , буде знаходитися в певному числовому діапазоні. Таким чином, абсолютна похибка може бути різною та залежатиме від довірчої імовірності p .

У таблиці 5.1 наведено результати обчислень абсолютної похибки вимірювань діаметру зерен Δ для випадку, коли довірча імовірність p знаходитиметься в інтервалі від 0,5 до 0,9, а нормоване відхилення t згідно виразу (5.27) в межах від 0,6745 до 1,6449.

Таблиця 5.1. Значення абсолютної похибки Δ вимірювань діаметру зерен при різних значеннях довірчої імовірності p .

p	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
t	0,67	0,84	1,04	1,28	1,65
Δ	1,13	1,41	1,73	2,15	2,75

Згідно проведених обчислень (таблиця 5.1) не менше, ніж в 50% випадків ($p = 0,5$) абсолютна похибка вимірювань діаметра зерна становитиме $\Delta = 1,13$.

Таким чином, дійсне значення діаметра зерна металу становитиме від $29,6 - 1,13 = 28,47$ мкм до $29,6 + 1,13 = 30,73$ мкм.

Зазначимо, що результати були обчислені при використанні п'яти ($k = 5$) фрактографічних зображень однієї і тієї ж ділянки сталі 15Х1МФ (рис. 5.33), тобто при п'яти незалежних повторних вимірюваннях однієї і цієї ж величини. Дослідимо вплив кількості незалежних вимірювань k на абсолютну похибку Δ . Для цього проведемо аналогічні обчислення для випадку використання двох ($k = 2$), восьми ($k = 8$) та десяти ($k = 10$) фрактографічних зображень однієї і тієї ж ділянки сталі 15Х1МФ. Результати обчислень приведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2. Значення абсолютної похибки Δ вимірювань діаметру зерен при різних значеннях довірчої імовірності p та різній кількості незалежних вимірювань k .

	p	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
	t	0,67	0,84	1,04	1,28	1,65
$k = 2$	Δ	0,95	1,19	1,47	1,81	2,33
$k = 8$	Δ	1,29	1,61	1,98	2,45	3,14
$k = 10$	Δ	1,45	1,81	2,23	2,76	3,54

Проведемо аналіз отриманих результатів. З таблиці 5.2 видно, що кількість незалежних вимірювань k суттєво не впливає (по відношенню до вимірювальної величини) на значення абсолютної похибки Δ вимірювань діаметру зерен при різних значеннях довірчої імовірності p . Тому при проведенні таких обчислень достатньо провести два-три незалежні вимірювання, що значно спрощує процес дослідження, навіть якщо він проводиться в автоматичному режимі.

Оцінімо вплив об'єму вибірки на значення абсолютної похибки Δ вимірювань діаметру зерен. Для цього дослідимо, яку кількість зерен потрібно

здіяяти при проведенні незалежних вимірювань для забезпечення потрібної абсолютної похибки Δ .

Середньоквадратичне відхилення діаметрів зерен представляється виразом

$$\sigma(d) = K \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2}{n} - d_0^2}, \quad (5.28)$$

де d_1, d_2, \dots, d_n - діаметри зерен з деякої вибірки; n - кількість елементів у вибірці; d_0 - усереднений діаметр зерен вибірки.

З виразу (5.28) слідує, що середньоквадратичне відхилення є обернено пропорційним до кореня квадратного з кількості елементів у вибірці - $\frac{1}{\sqrt{n}}$.

Таким чином, вираз (5.22) можна модифікувати наступним чином

$$\Delta = \alpha \frac{t}{\sqrt{n}}, \quad (5.29)$$

де α - деякий коефіцієнт пропорційності, який залежить від досліджуваної структури [137].

Вираз (5.29) дає можливість обчислити який об'єм досліджуваної вибірки n необхідний, щоб забезпечити задану точність вимірювань Δ

$$n = \left(\frac{\alpha \cdot t}{\Delta} \right)^2 \quad (5.30)$$

Отже, на основі описаних вище вимірювань усередненого діаметра зерна металу досліджено взаємозв'язок між абсолютною похибкою вимірювань та числом незалежних вимірювань. Наведено вираз (5.30), який дає досліднику можливість визначити таку кількість зерен у одному вимірюванні, яка необхідна для забезпечення необхідної абсолютної похибки.

Висновки до розділу 5

Металографічні та фрактографічні зображення представляють собою поєднання різноманітних структурних елементів. Серед цих елементів найбільш задіяними при непрямому оцінюванні фізико-механічних характеристик матеріалів є зерна металів та карбіди на їх межах. Для цього використовують методи метричного аналізу цих структур за їх зображеннями.

На основі аналізу металографічних зображень запропоновано метод контролю величини зерна. Метод побудовано на припущенні, що координати меж зерен є відомими. У порівнянні з відомими аналогічними підходами, він дає можливість обчислити не лише усереднений діаметр зерен, а й додатково будь-які інші показники, що характеризують геометрію зерна.

На прикладі аналізу металографічних зображень мікроструктури експлуатованої паропровідної сталі 12Х1МФ запропоновано метод автоматизованого визначення геометрії зерен, який відповідає вимогам нормативних документів, зокрема, ГОСТ 5639-82 (ASTM E 112). На відміну від відомих підходів, цей метод дає можливість аналізувати зображення з нечітко окресленими границями зерен, для чого на заключному етапі використовується інтерактивне оброблення зображення. Встановлено, що з наближенням до зовнішньої і внутрішньої поверхонь труби розмір зерна на прямій ділянці труби зростає, а в зоні розтягу гину - зменшується, що може бути зумовлено специфікою рекристалізаційних процесів у істотно деформованому металі. Також встановлено, що зміна твердості від розміру зерна поперек стінки труби в розтягнутій зоні гину не узгоджується з прогнозованою за законом Холла-Петча, що може бути проявом інтенсивної деградації металу гину в експлуатаційних умовах.

Проведено аналіз підходів до визначення величини зерна матеріалів згідно ГОСТ 5639-82 (ASTM E 112). Встановлено, що при обчисленні усередненого діаметра зерен металу згідно ГОСТ 5639-82 (ASTM E 112) необхідно

використовувати поправочний коефіцієнт, що дасть можливість мінімально в 1,3 разу підвищити точність проведених обчислень.

Встановлено, що якщо під час вирівнювання фону розмір локальної апертури перевищуватиме 30 % від розміру вхідного зображення, то визначена площа у методі кількісного аналізу карбідів практично не залежатиме від розмірів апертури, що є однією з необхідних передумов достовірності оцінювання цієї площі.

Розроблено метод визначення орієнтації та видовженості зерен на металографічних зображеннях за допомогою перетворень Хафа. Встановлено, що видовженість та орієнтація зерен тісно пов'язана з пластичними деформаціями, а орієнтація видовженості зерен збігається із напрямком прикладених напружень.

РОЗДІЛ 6

РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОСТРУКТУРИ МЕТАЛІВ, ОБРОБКИ ТА АНАЛІЗУ МЕТАЛОГРАФІЧНИХ І ФРАКТОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

6.1. Моделювання зеленної структури металографічних зображень за допомогою діаграм Вороного

Серед основних задач сучасних матеріалознавчих досліджень слід виокремити створення нових матеріалів із заданими фізико-механічними властивостями. Паралельним та взаємопов'язаним є завдання розвитку методів мікроструктурного аналізу. Вони забезпечують матеріалознавчі дослідження необхідним інструментарієм, який, зокрема, дає можливість пов'язати механічні, фізичні та хімічні властивості матеріалу з відповідними змінами у його зеренній структурі [75]. У більшості випадків об'єктом досліджень є металографічні та фрактографічні зображення зрізу чи зламу металу, які сформовані на оптичному чи електронному мікроскопі. Для пошуку та встановлення певних залежностей між фізико-механічними характеристиками та мікроструктурою необхідним є модельне представлення зеренної структури металу.

Серед найбільш вживаних підходів до моделювання зеренної мікроструктури слід виділити метод Монте-Карло [96]. Цей підхід до моделювання дає можливість врахувати початковий текстурний стан матеріалу, а також вплив локального зерномежового розорієнтування кристалічної ґратки на рухливість міжзеренної межі. Але через свою ненаочність цей підхід не є найкращим для вивчення метричних та орієнтаційних співвідношень, які характеризують зеренну структуру металу.

Останніми роками при металографічних дослідженнях активно використовують технології опрацювання зображень. Аналіз таких зображень переважно зводиться до обчислення метричних розмірів певних структурних

складових [220, 226]. 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. 6.1 представлені у вигляді зерен деякого матеріалу, які ростуть з постійною швидкістю у всіх напрямках. Припускаємо також, що ріст зерен кристалу продовжується доти, поки два чи більше зерен не зустрінуться. Згодом зерно, яке виросло, представляється коміркою діаграми Вороного [75]. В результаті буде отримана діаграма Вороного для множини точок p_i . Тому дослідимо застосування діаграм Вороного при моделюванні меж зерен на металографічному зображенні металу. Марка металу в цьому випадку не має принципового значення.

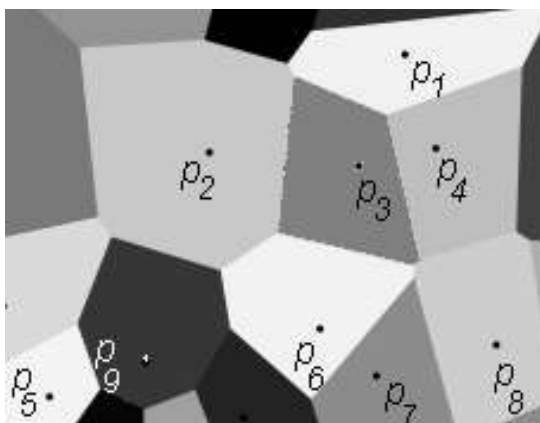
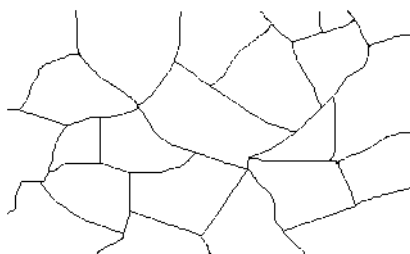


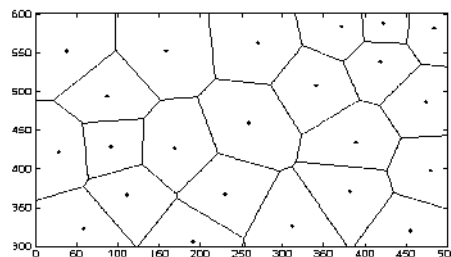
Рис. 6.1. Діаграма Вороного з вершинами p_i , де $i = 1 \div 9$.

Наведемо означення діаграм Вороного. У найпростішому випадку маємо множину точок площини p_i , які називають вершинами діаграми Вороного. Кожній вершині p_i належить комірка Вороного, утворена з усіх точок ближчих до p_i , ніж до будь-якої іншої вершини. Границі на діаграмі Вороного представляють собою всі точки на площині, які знаходяться на однаковій відстані від двох найближчих вершин. Вузли Вороного — це точки, рівновіддалені від трьох і більше вершин [21, 75].

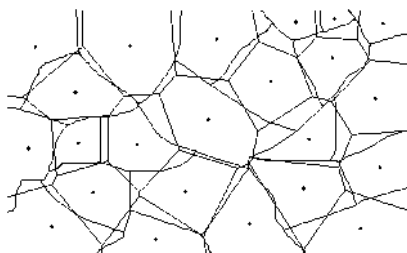
На рис. 6.2 наведені результати моделювання меж зерен металу з використанням діаграм Вороного. За вхідне використано зображення меж зерен деякого металу. Підходи до формування таких даних детально описані у роботі [75, 96].



а) зображення меж зерен деякого металу;



б) зображення меж зерен металу, яке змодельоване за допомогою діаграм Вороного;



в) зображення меж зерен матеріалу з накладеними на нього діаграмами Вороного.

Рис. 6.2. Моделювання меж зерен металу за допомогою діаграм Вороного [75].

З наведених на рис. 6.2 результатів видно, що діаграми Вороного не збігаються з межами зерен. Причина полягає у тому, що наші припущення про збіжність центрів кристалізації зерен p_i з центрами мас їх двовимірних зображень та про однаковий ріст зерен кристалу, є наближеними.

Для кількісного оцінювання відповідності між зображеннями меж зерен (рис. 6.3, а, в, г, е, ж, и, ї, к) та їх модельним поданням (рис. 6.3, б, г, д, є, з, і, й, л) за допомогою діаграм Вороного ми використовували фрактальну

розмірність. За вхідні було взято серію тестових зображень (рис. 6.3) меж зерен різного розміру з ГОСТ 5639-82 (ASTM E 112) [10, 104].


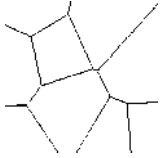
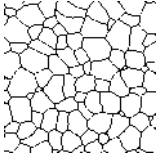
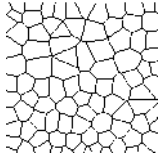
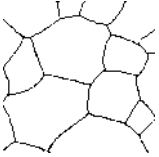
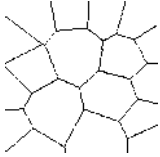
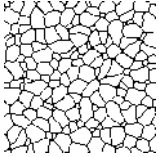
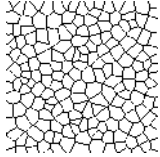
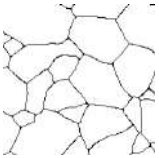
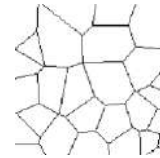
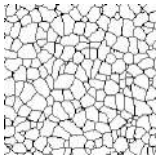
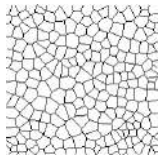
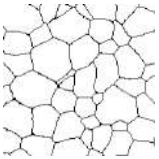
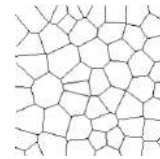
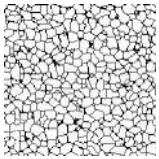
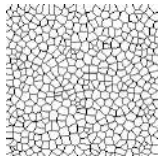
Тестові зображення та їх модельне представлення			
 1,4434 <i>a)</i>	 1,4371 <i>б)</i>	 1,8366 <i>ж)</i>	 1,8329 <i>з)</i>
 1,5645 <i>в)</i>	 1,5701 <i>г)</i>	 1,9126 <i>и)</i>	 1,9141 <i>і)</i>
 1,6425 <i>г)</i>	 1,6616 <i>д)</i>	 1,9261 <i>ї)</i>	 1,9279 <i>ї)</i>
 1,7458 <i>е)</i>	 1,7537 <i>є)</i>	 1,9815 <i>к)</i>	 1,9769 <i>л)</i>

Рис. 6.3. Тестові еталонні зображення (*a, в, г, е, ж, и, ї, к*) меж зерен різного розміру (ASTM E 112), відповідні їм модельні представлення (*б, г, д, є, з, і, й, л*), отримані за допомогою діаграм Вороного [75] та їх фрактальні розмірності .

Для кожного із цих зображень було змодельовано відповідне зображення меж зерен за допомогою діаграм Вороного (рис. 6.3).

Після цього для кожного зображення цієї серії були обчислені фрактальні розмірності. Враховуючи, що зображення меж зерен металу є бінарними, то при проведенні цих обчислень було використано клітинний метод [26]. Результати проведених обчислень показують, що максимальна відносна похибка фрактальної оцінки зображень меж зерен певного розміру та відповідних до них змодельованих зображень (рис. 6.3) становить 1,15%.

Проведено аналогічні дослідження з визначення усередненого діаметра зерен для тестових зображеннях (ГОСТ 5639-82(ASTM E 112)) та відповідних їм моделей, отриманих за допомогою діаграм Вороного (рис. 6.3). При обрахунках застосовували метод автоматизованого визначення геометрії зерен [226], в основу якого покладено ГОСТ 5639-82(ASTM E 112) [10, 57]. Результати проведених обчислень наведені на рис. 6.4.

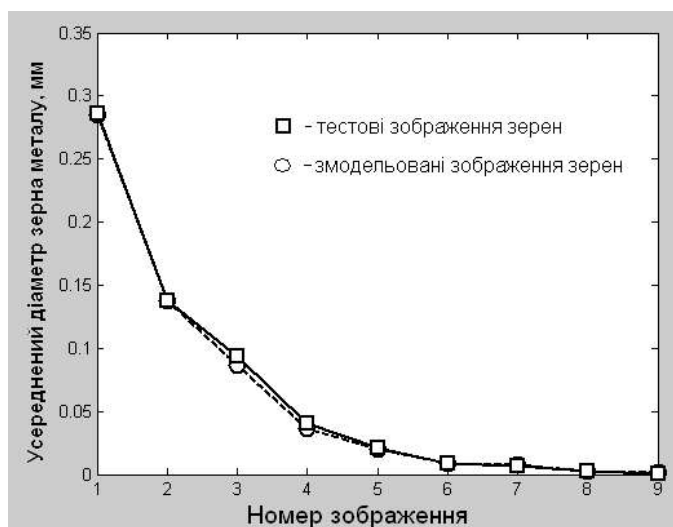


Рис. 6.4. Середні діаметри зерен металу, обчислені за тестовими зображеннями (ГОСТ 5639-82(ASTM E 112)) та відповідними їм модельним представленнями за допомогою діаграм Вороного.

З рис. 6.4 видно, що усереднені діаметри зерен металу на тестових зображеннях, які були взяті з ГОСТ 5639-82(ASTM E 112), та на зображеннях,

отриманих за допомогою діаграм Вороного, є приблизно однаковими. Максимальна відносна 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 Воронова надає нові можливості щодо аналізу зеренної структури металів [75]. Зокрема, таке подання зеренної структури дає змогу дослідити геометричні та статистичні співвідношення багатокутників на діаграмах Воронова, які тісно пов'язані з характеристиками зеренної мікроструктури та матеріалу [104]. Актуальними також є дослідження в напрямку підвищення точності моделювання зеренної структури. Для цього необхідно оптимізувати вибір вузлів на діаграмах Вороного, які є центрами кристалізації зерен металу.

6.2. Візуалізація графічних файлів великого об'єму

Одним з важливих чинників, які суттєво впливають на швидкість обробки та передачі інформації, є її об'єм. Проведемо дослідження способів візуалізації цифрових зображень, які є одним з найбільш зручних способів представлення інформації при неруйнівному контролі, медичній діагностиці та дистанційному зондуванні Землі [36].

Графічні файли таких зображень, в більшості випадків, потребують значних об'ємів пам'яті, що зумовлює певні незручності при обробці та передачі інформації. Тому актуальною є задача зменшення об'єму графічних файлів зображень при мінімальному погіршенні їх візуальної якості. Вирішення цього питання є також важливим у задачах сегментації кольорових зображень.

Усі зображення можна умовно розділити на чотири типи - бінарні, напівтонові, палітрові та повноколірні. Бінарні та напівтонові зображення представляють собою двохвимірні масиви чисел, які є еквівалентами інтенсивностей. Повноколірні зображення зберігаються у вигляді тривимірних

масивів. Для доступу до значень інтенсивностей складових кольору піксела зображення потрібно вказати рядок - k , стрічку l та номер складової: 1 - для R, 2 - для G та 3 - для B. Палітрові зображення зберігаються у вигляді двохвимірних масивів індексів. Для кожного палітрового зображення існує двовимірний масив палітри, в трьох стовбцях якого розміщені значення інтенсивностей R, G, B.

Кожний графічний файл складається із двох основних частин - заголовка та власне даних. Заголовок містить інформацію про структуру графічного файлу. Здебільшого після заголовку у файлі палітрового зображення міститься палітра кольорів. В даній роботі ми розглядатимемо палітрові повноколірні зображення з метою зменшення кількості кольорів при мінімізації втрати їх візуальної якості.

З аналізу структури графічного файлу випливає, що одним із шляхів зменшення його об'єму, є оптимізація палітри зображень. Розглянемо відомі підходи до вирішення цього питання [133].

Для більшості зображень, кількість кольорів, яка необхідна для їх відтворення, менша за 256. Забираючи невикористані кольори із палітри сприяємо зменшенню об'єму файлу зображення. Даний підхід неефективний для зображень, які містять велику кількість кольорів та відтінків.

Нами запропоновано інший підхід, який базується на тому, що палітра зображення вибирається фіксованою або оптимізується. У випадку фіксованої палітри кожному елементу зображення вибирається у відповідність найближчий за значенням колір. Основною вимогою до такої палітри є те, що вона повинна містити основні кольори, які присутні на зображенні. Виконання цієї вимоги буде в значній мірі впливати на якість відтворення зображення. В більшості випадків використовують так звану "безпечну палітру", яка містить набір часто використовуваних кольорів та їх відтінків. Оскільки розмір палітри є фіксований, а колірне наповнення зображень є найрізноманітнішим, то не завжди вдається провести перетворення палітри зображення із допустимою мінімальною візуальною похибкою. Тому доцільно оптимізувати палітру.

У випадку оптимізованої палітри, формується список усіх кольорів, які містяться на зображенні. Далі на підставі аналізу частоти появи цих кольорів будується палітра.

Розглянемо процес аналізу та вибору кольорів оптимізованої палітри детальніше.

Оптимізація палітри зображення

Одним з найбільш зручних видів представлення яскравісних характеристик зображення є його гістограма. У випадку кольорових (RGB) зображень гістограма представляється у вигляді куба (рис. 6.5), всередині якого розміщена інформація про частоту появи кольорів на зображенні.

Побудова тривимірної гістограми зображення є важливим елементом при формуванні оптимальної палітри. Далі на підставі аналізу будують нову палітру зображення. Розглянемо ряд методів визначення нової палітри зображення.

Один із підходів базується на тому, що формується нова палітра розмірності $n \times 3$, яка складається з найбільш вживаних на зображенні кольорів. Такий алгоритм ефективний для побудови нової палітри зображень, які не містять відтінків основних кольорів. Проте більшість зображень містить велику кількість відтінків.

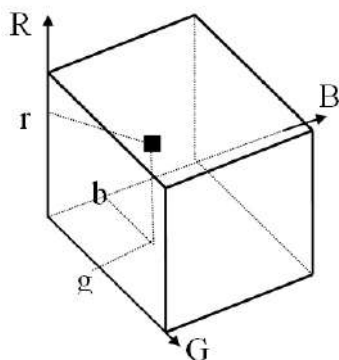
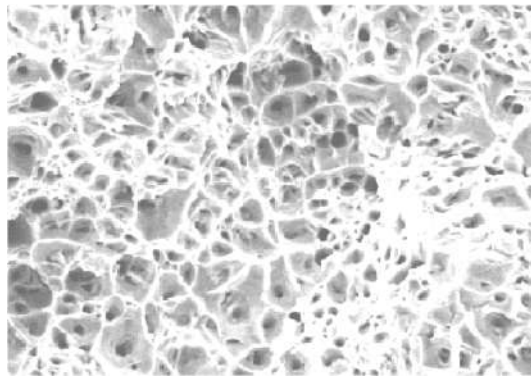
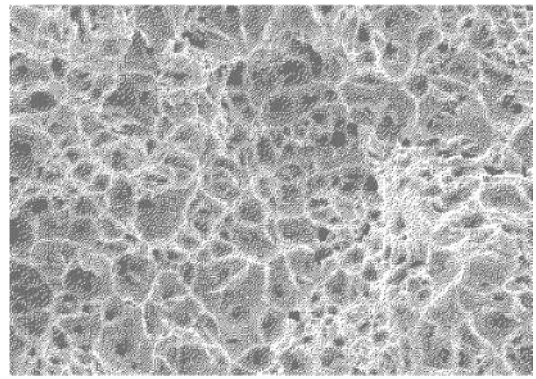


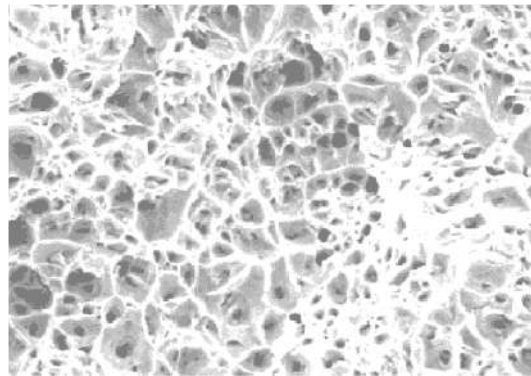
Рис. 6.5. Структура тривимірної гістограми зображення.



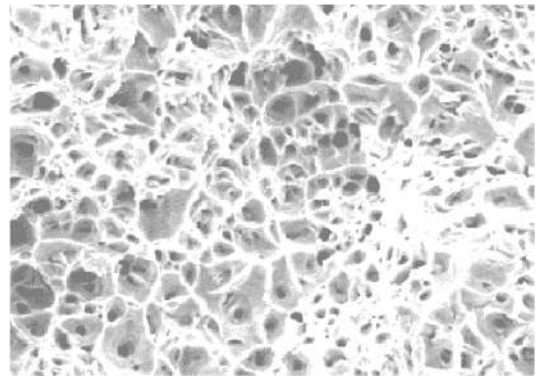
a)



б)



в)



г)

Рис. 6.6. Результат комп'ютерного моделювання зображення з оптимізованою палітрою : *a)* вхідне зображення (розмір графічного файлу зображення 1317624 байт); *б)* зображення *a)*, оброблене методом бінаризації з використанням алгоритму Флойда-Стейнберга (164703 байт); *в)* зображення *a)*, палітра якого зменшена до 8 кольорів (494109 байт); *г)* зображення *a)*, палітра якого зменшена до 8 кольорів та використано алгоритм Флойда-Стейнберга (494109 байт).

Використання даного методу призводить до того, що палітра перетвореного зображення складатиметься здебільшого з відтінків одного кольору, який найчастіше зустрічається на вхідному зображенні. В результаті такого перетворення, візуальна різниця вхідного та перетвореного зображень є суттєвою, що зумовлює його низьку якість.

Наступним підходом до створення нової палітри, використання якої призвело б до зменшення об'єму графічного файлу зображення, є формування "умовно фіксованої палітри". Суть цього підходу полягає у тому, що нова палітра потрібного (довільного) розміру формується на основі використання

білого, чорного, *RGB*-кольорів та їх відтінків. Цей метод доцільно застосовувати щодо перетворення палітри зображень, які містять всі сім основних кольорів. Недоліком цього методу є те, що у ньому не проводиться аналіз кольорів зображення. Це призводить до того, що побудована палітра в більшості випадків не є оптимальною.

Як було зазначено вище, більшість зображень містить невелику кількість чистих кольорів та велику кількість їх відтінків. В результаті цього елементи тривимірної гистограми розподілені нерівномірно, а певними скупченнями (кластерами). Ця властивість лягла в основу запропонованого методу [36]. У цьому методі для аналізу гистограми зображення використовують один з методів кластеризації. Він полягає у тому, що всі елементи тривимірної гистограми розбиваються на k -кластерів таким чином, що мінімізується евклідова відстань між об'єктами всередині кластерів та максимізується евклідова відстань між ними. Вибираючи координати центра мас заданої кількості k найбільших кластерів, проводиться побудова оптимальної палітри із заданою розмірністю k .

Зменшення об'єму графічного файлу досягається через оптимізацію палітри призводить до погіршення візуальної якості сприйняття зображення. Для зменшення помітності похибки та створення враження, що на зображенні присутня більша кількість різноманітних кольорів, ніж є насправді, використовується дифузійне псевдозмішування кольорів.

Дифузійне псевдозмішування кольорів

Потрібний ефект зменшення помітності похибки досягається через групування в певній локальній області зображення елементів з кольорами, які представлені в палітрі, змішування яких дає близький до необхідного колір. Для цього використовується відомий алгоритм Флойда-Стейнберга [133]. В цьому алгоритмі елемент зображення замінює свій колір на найближчий в евклідовій метриці, який є у палітрі. Також обчислюється похибка колірності *Error_{RGB}* для кожної складової як різниця між значеннями величин

складових кольорів палітри $MAP_new(k,:)$ та вхідного зображення $L(i, j, :)$. У випадку RGB -складових, алгоритм представляється наступним чином:

$$Error_RGB(i, j, :) = L(i, j, :) - MAP_new(k, :). \quad (6.1)$$

Далі похибка розповсюджується на сусідні елементи зображення шляхом додавання деякої долі похибки до значень відповідних складових і відбувається так звана “дифузія похибки”.

$$L(i, j + 1, :) = L(i, j + 1, :) + \frac{3 \cdot Error_RGB(i, j, :)}{8}, \quad (6.2)$$

$$L(i + 1, j, :) = L(i + 1, j, :) + \frac{3 \cdot Error_RGB(i, j, :)}{8}, \quad (6.3)$$

$$L(i + 1, j + 1, :) = L(i + 1, j + 1, :) + \frac{Error_RGB(i, j, :)}{4}. \quad (6.4)$$

Алгоритм застосовується рекурсивно до всіх пікселів зображення. Використання псевдозмішування кольорів дозволяє покращати колірне сприйняття за рахунок погіршення роздільної здатності та підвищення рівня високочастотного шуму.

Запропонований у роботі метод побудови оптимальної палітри на основі кластерного аналізу гістограми зображення та використання дифузійного псевдозмішування кольорів дозволяє представляти будь-яке кольорове чи напівтонове зображення заданою кількістю кольорів з мінімальною візуальною похибкою. Похибка перетворення зображення обернено пропорційна кількості елементів оптимальної палітри.

Області застосування методу різноманітні. Важливе місце серед них займає передача потоків фото- чи відеоданих по каналах зв'язку, де об'єми графічних файлів повинні бути невеликі. Приклад ефективності запропонованого методу ілюструє рис. 6.6. Тут на рис. 6.6 *а* показано вхідне зображення з розмірами файлу у 1,3 Мб. На рис. 6.6 *б* наведено застосування класичної технології дифузійного псевдозмішування кольорів через бінаризацію і застосування алгоритму Флойда-Стейнберга [111, 133, 157]. На рис. 6.6 *в* показано вхідне зображення зі зменшеною до восьми кольорів

палітрою. Результуюче зображення на рис. 6.6 з отримане із вхідного шляхом оптимізації палітри та застосуванням алгоритму псевдозмішування кольорів Флойда-Стейнберга. За візуальною якістю воно практично не поступається вхідному зображенню, а об'єм його графічного файлу становить лише 483 кб, що майже у 2,7 рази менше, ніж у вхідного зображення. Вибором розміру оптимальної палітри шукається компроміс між об'ємом файлу та якістю перетворюваного зображення. При кількості кольорів оптимальної палітри більше ніж 16, втрати якості стають візуально непомітними, а вигащ у об'ємі залишиться ще значним. Наведені вище обчислення об'ємів зображень проводилися при відсутності стиску даних.

6.3. Підвищення інформативності напівтонових зображень мікроструктур через використання псевдокольорів

До цього моменту у роботі розглядалися автоматизовані та автоматичні підходи до обробки та аналізу зображень комп'ютерної металографії. Але у багатьох випадках, особливо в системах з автоматизованою обробкою, первинний аналіз зображень або аналіз результатів опрацювання здійснює людина-оператор. Особливістю зображень у комп'ютерній металографії є те, що вони напівтонові, здебільшого мають складну структуру, наявність великої кількості дрібних деталей, відсутність чітких меж, погану видимість об'єкту на фоні тощо. За цих обставин аналіз людиною-оператором таких зображень є утруднений. Відомо, що з психофізичної точки зору точки зору кольорове зображення деякого об'єкту сприймається краще, ніж його напівтонове представлення. З метою підвищення інформативності зображення та покращання аналізу людиною-оператором у деяких випадках напівтонові зображення комп'ютерної металографії доцільно представляти за допомогою псевдокольорів [66].

Представлення зображень у вигляді псевдокольорів надає нові можливості щодо структурного аналізу матеріалів. З'являється можливість ідентифікації

структурних складових на рівні відтінків кольору. Такі підходи реалізовані в багатьох системах аналізу зображень неруйнівного контролю [5, 189, 195].

Постановка задачі в такому плані подібна до сегментації зображень з використанням псевдокольорів [2].

Незважаючи на велику кількість методів, алгоритмів та програмних реалізацій, не існує універсальних методів сегментації об'єктів. Серед найбільш вживаних можна виділити методи сегментації на основі шаблонів, за рівнем інтенсивності, нарощування областей тощо. Ефективними є методи, які базуються на поєднанні декількох підходів та використанні глобальної і локальної інформації про об'єкти на зображенні [2].

Ще одним важливим аспектом при кольоровій чи псевдокольоровій сегментації є обґрунтований вибір колірної системи [153]. Зрозуміло, що будь-яка колірна модель служить лише для відображення колірного простору та не має прямої функціональної залежності із зоровою системою людини. Найбільш поширеною при проведенні експериментів є кольометрична система RGB. Вона, подібно до зорової системи людини, будується за трикомпонентним принципом та володіє властивістю адитивності. Колірну модель RGB зручно представляти на хроматичній діаграмі з довжинами хвиль кольорів (рис. 6.7).

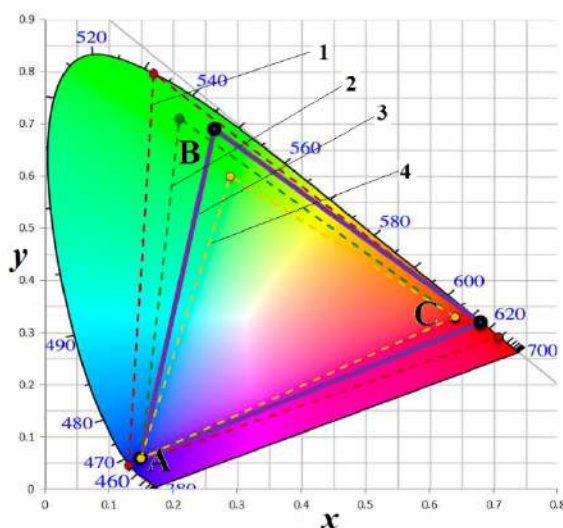


Рис. 6.7. Колірний простір.

Пристрої візуального відображення такі як дисплеї, монітори, принтери, телевізори мають свій колірний діапазон - профіль, що описує кольори, які здатний відобразити даний пристрій. Зрозуміло, що через фізичні обмеження колірний діапазон будь-якого пристрою є менший за площу хроматичної діаграми (видимий діапазон) і відображається у вигляді деякого багатокутника. Для прикладу, на рис. 6.7 представлені колірні профілі моніторів: 1 - Samsung SyncMaster XL20, 2 - абстрактний sRGB, 3 - Samsung SyncMaster 913N, 4 - ноутбук Asus M50S. Колірний профіль sRGB під номером 3 відображає абстрактний колірний діапазон, який був розроблений HP та Microsoft для використання з моніторами та принтерами середньостатистичних користувачів [162]. Цей колірний трикутник будемо використовувати при наших подальших розрахунках.

У тривимірному просторі будь-який колір може бути відображений трьома координатами (x, y, z) , які представляють собою нормовані величини і для яких виконується умова

$$x + y + z = 1. \quad (6.5)$$

Враховуючи співвідношення (6.5), будь-який колір у колірній системі sRGB можна представити двома координатами x та y . Розглянемо трикутник ABC на рис. 6.7. Координати його вершин представляються наборами – $A(0,14; 0,06)$, $B(0,21; 0,715)$ та $C(0,63; 0,33)$. Використовуючи рівняння прямої, яка проходить через дві точки, прямі, які проходять через відрізки AB , BC та AC , можна представити рівняннями

$$y_1 = 10,13x - 1,36, \quad (6.6)$$

$$y_2 = -0,92x + 0,91, \quad (6.7)$$

$$y_3 = 0,55x - 0,017. \quad (6.8)$$

Вирази (6.6-6.8) математично описують сторони трикутника ABC , який визначає колірний профіль деякого пристрою відображення. Інтенсивність пікселів напівтонового зображення $L(i, j)$ може змінюватися в межах від 0 до 255. Діапазон зміни кольору по координаті x змінюється, у нашому випадку, від

$x_{\min} = 0,14$ до $x_{\max} = 0,63$. Пронормуємо значення $L(i, j)$ до діапазону величини x за допомогою виразу

$$x = L(i, j) \cdot \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{R} + x_{\min}, \quad (6.9)$$

де R - діапазон інтенсивностей. Для восьмибітних зображень $R = 256$, тому

$$x = 0,002 \cdot L(i, j) + 0,14. \quad (6.10)$$

Використовуючи вирази (6.6)-(6.8) обчислимо діапазон зміни кольору по величині y

$$y = \begin{cases} y_3 \leq y \leq y_1, & \text{при } x < 0,21; \\ y_3 \leq y \leq y_2, & \text{при } x \geq 0,21. \end{cases} \quad (6.11)$$

З виразу (6.11) та рис. 6.8 видно, що оскільки колірний профіль пристрою відображення представляє собою трикутник ABC , то обчислення будуть проводитися за двома різними виразами у діапазонах значень $x < 0,21$ та $x \geq 0,21$. В першому випадку (при $x < 0,21$) вираз має забезпечувати значення у діапазоні $y_3 \leq y \leq y_1$, у другому випадку (при $x \geq 0,21$) – знаходитися у межах $y_3 \leq y \leq y_2$.

Координату z обчислюємо з виразу (6.5)

$$z = 1 - x - y. \quad (6.12)$$

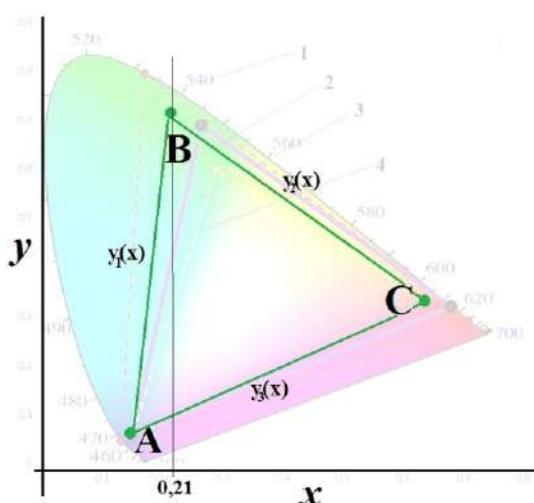


Рис. 6.8. Математичне обмеження колірного простору RGB функціями y_1 , y_2 та

y_3 .

Використовуючи вирази, які пов'язують колірні компоненти RGB та зміни кольору за координатами x , y та z , обчислимо

$$\begin{aligned}R &= 1,76x - 0,48y - 0,25z; \\G &= -0,54x + 1,5y + 0,02z; \\B &= 0,006x - 0,018y + 1,23z.\end{aligned}\tag{6.13}$$

Набір (R, G, B) представляє собою значення колірних компонент пікселя псевдо кольорового зображення з відповідними координатами (i, j) . Результати комп'ютерного моделювання описаного підходу представлені на рис. 6.9.

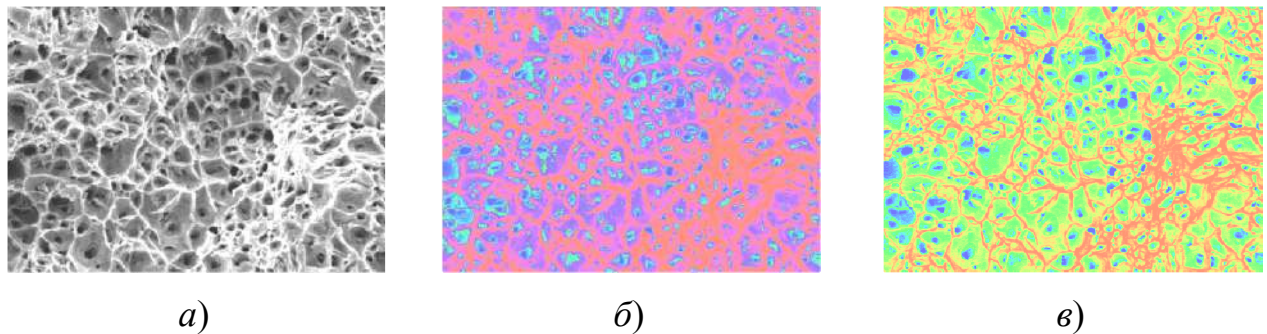


Рис. 6.9. Представлення вхідного зображення a за допомогою псевдоколірів $б$ та $в$.

Описаний метод представляє собою модифікацію відомого підходу до формування псевдокольорових зображень [66]. Модифікація полягає у тому, що метод пропонує дослідникам не один вираз обчислення координати зміни кольору y , а лише задає можливі межі її значень (6.6). Це дозволяє користувачу моделювати псевдозображення з використанням різних палітр кольорів (рис. 6.9 $б$ та $в$.) та в цілому призводить до підвищення інформативності таких зображень при візуальному аналізі. Даний метод ефективно працює із зображеннями, які містять низький рівень шумів, в іншому випадку їх необхідно попередньо обробляти з метою зменшення шумової складової [70, 165].

6.4. Аналіз розроблених інформаційних процесів

У першому розділі цієї роботи було проведено дослідження відомих систем обробки та аналізу зображень неруйнівного контролю і технічної діагностики. На цій основі було побудовано узагальнену послідовність основних кроків обробки та аналізу зображень (рис. 1.18). Проведений аналіз виявив ряд спільних типових недоліків комп'ютеризованих систем обробки та аналізу металографічних та фрактографічних зображень – низький рівень автоматизації і як наслідок низька швидкодія, інтерактивний режим вибору методів опрацювання, відсутність оптимізації при виборі параметрів налаштувань, потреба у візуальному оцінюванні результату, суб'єктивність аналізу з боку оператора, відсутність ознак об'єктів, інваріантних до процесу формування зображень тощо.

Для усунення виявлених недоліків розроблено комплекс методів опрацювання та аналізу металографічних і фрактографічних зображень і опису їх структурних складових (рис. 6.10). Вибір методів базувався на потребах дослідників-матеріалознавців у відповідних інструментах дослідження для вирішення поставлених задач. При побудові методів та інформаційних технологій враховано також застосування апаратних засобів таких як мікроскопи та пристрої фото- відеофіксації, які накладають свій відбиток на спосіб формування даних та їх обробку. Це проявляється, зокрема, у наявності геометричних спотворень на зображеннях, їх нерівномірним освітленням та низькою візуальною якістю.

У таблиці 6.1 наведено результати порівняння розроблених у роботі методів аналізу металографічних зображень та їх структурних складових з відомими аналогами.

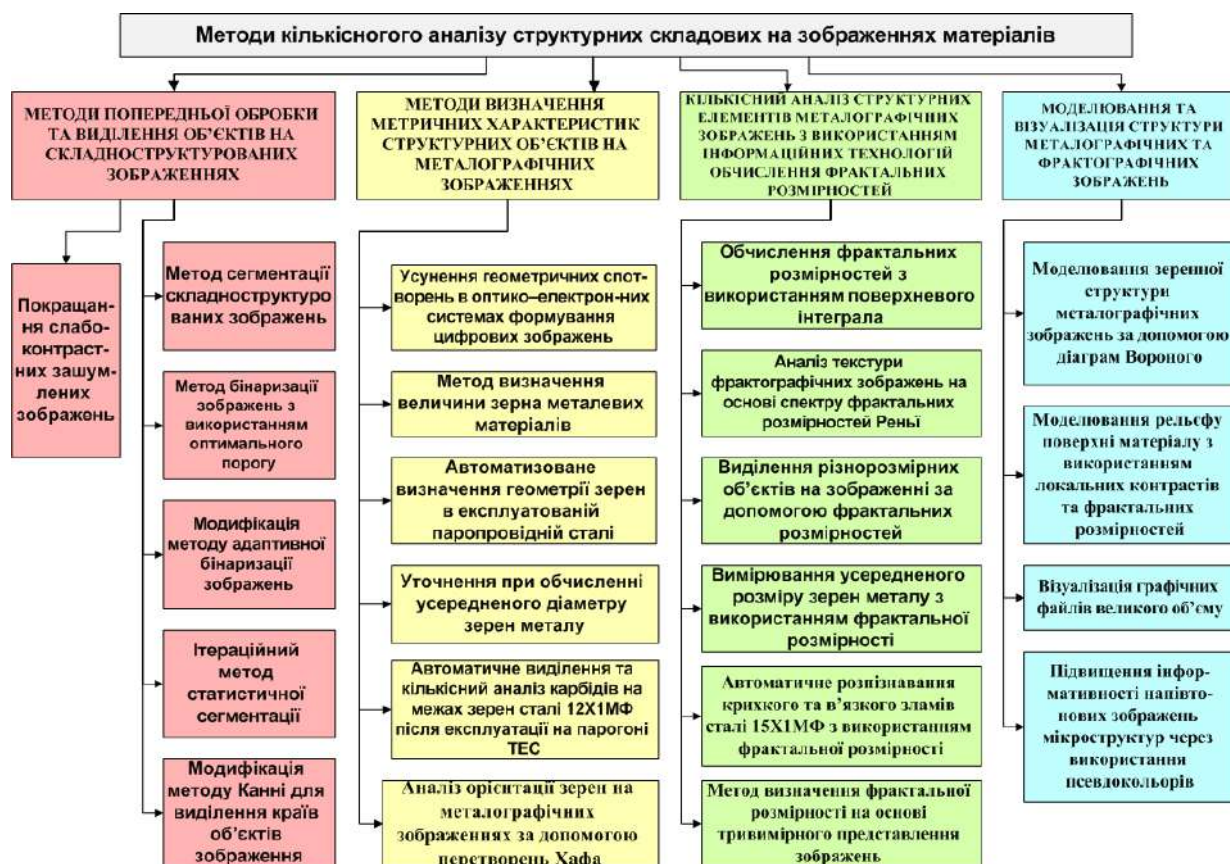


Рис. 6.10. Розроблений комплекс методів для опрацювання та аналізу металографічних і фрактографічних зображень і опису їх структурних складових.

Таблиця 6.1. Порівняння розроблених та відомих методів аналізу металографічних зображень та їх структурних складових.

<i>Розроблений метод</i>	<i>Відомий аналог</i>	<i>Переваги розробленого методу</i>
Калібрування цифрових відеокамер на основі перетворень Хафа [49]	Метод Могильного; метод Гельмана; метод Ян Хейкіла (Janne Heikkilä, Фінляндія); метод Муравського – Максименка-Сахарука;	Автоматизований режим усунення спотворень, спричинені недосконалістю оптичних систем; Не вимагає інтерактивного встановлення та використання опорних точок; Забезпечує підвищення

	Camera Calibration Toolbox (Matlab)	точності метричних вимірювань мінімально на 5%, залежно від використаних оптичних пристроїв.
Покращання слабоконтрастних зашумлених зображень [70]	Метод Уоллеса; Метод багатомасштабної статистичної диференціації;	Більш ефективне покращання, а саме - більше підсилення на слабоконтрастних ділянках зображення та мінімальне підсилення на ділянках зображення з високим рівнем контрастності.
Бінаризація зображень з використанням оптимального порогу [80]	Метод Оцу	Метод Оцу базується на мінімізації дисперсії кластера і максимізації міжкластерної дисперсії. Мною запропоновано простий та зрозумілий критерій вибору порогу бінаризації, який базується на кількісній оцінці подібності зображень.
Комп'ютеризований метод обчислення величини зерна металевих матеріалів [71]	Методи обчислення усередненого діаметру зерен металу згідно ГОСТ 5639-82 та ASTM E1382-97.	Можливість обчислення не лише розмірів зерен, а й додатково будь-яких інших показників, що характеризуватимуть геометрію зерна.
Визначення		Опрацьовує зображення з

<p>величини зерна матеріалів за їх зображеннями згідно ASTM E 112 [10, 226]</p>		<p>розривними та розмитими межами зерен. Автоматизація обчислень усередненого діаметра зерен.</p>
<p>Вимірювання усередненого розміру зерен металу сталі 12Х1МФ з використанням фрактальної розмірності [227]</p>		<p>Автоматизація обчислення усередненого діаметру зерен; Можливість опрацювання зображень з незамкнутими та розривними межами зерен без необхідності їх інтерактивного редагування; відповідність ASTM E 112. Похибка вимірювань за цим методом, у порівнянні з ручним, становить 6 %.</p>
<p>Залежність площі карбідів від розмірів локальної апертури у методі вирівнювання фону [220]</p>	<p>Метод усунення нерівномірності освітлення зображення</p>	<p>Повторювальність результатів кількісного аналізу зображень, отриманих за різних умов освітлення.</p>
<p>Уточнення при обчисленні усередненого діаметру зерен металу згідно ASTM E 112 [72].</p>	<p>Методи обчислення усередненого діаметру зерен металу згідно ASTM E 112</p>	<p>Підвищення, мінімально на 30%, точності проведених обчислень</p>
<p>Метод визначення орієнтації та</p>	<p>Метод на основі дифракційних</p>	<p>Визначення переважаючого напрямку орієнтації та</p>

<p>видовження зерен металу з використанням перетворення Хафа [78]</p>	<p>спектрів (складне обладнання); Методи Фур'є перетворення (відповідність гармоніки-об'єкти); Метод на основі градієнту інтенсивності (не обробляє бінарні зображення); Метод січних (не аналізує розривні межі зерен).</p>	<p>видовження зерен металу навіть у випадку розривних меж зерен</p>
<p>Обчислення фрактальних розмірностей з використанням поверхневого інтегралу [74]</p>	<p>Метод многокутників</p>	<p>Фрактальна розмірність володіє більшою чутливістю до виявлення дрібних об'єктів на зображенні. Забезпечує на 17% меншу середню похибку при локалізації об'єктів інтересу.</p>
<p>Аналіз текстури фрактографічних зображень на основі спектру фрактальних розмірностей Реньї [82]</p>	<p>Метод обчислення глобальної фрактальної розмірності</p>	<p>Підвищена ефективність класифікації зображень зламів металу</p>
<p>Обчислення фрактальної</p>	<p>Метод з використанням</p>	<p>Забезпечує потрібну чутливість до невеликих змін</p>

розмірності на основі тривимірного подання оптичного зображення [191]	параметру пошкодження D ; Метод обчислення фрактальної розмірності насиченості поверхні D_s ; Метод обчислення фрактальної розмірності контурів кластерів D_p .	площі пошкоджених ділянок
Моделювання зеренної структури металографічних зображень за допомогою діаграм Вороного [75]	Метод Монте-Карло; Метод фазових полів; Методи чисельного моделювання та прогнозування мікроструктури металу.	Простота моделювання зеренної структури, похибка моделювання до 5,7%

У таблиці 6.1 проведено порівняння розроблених методів аналізу з точки зору обробки зображень. Вибір саме цих методів обумовлений аналізом недоліків основних кроків на схемі рис. 1.18. Кожен із розроблених методів забезпечує покращання, яке оцінено не лише якісно, а й, де це було можливим, і кількісно.

Оскільки розроблені методи представляють собою сукупність процесів опрацювання інформації, то проаналізуємо їх вплив на інформаційну технологію аналізу металографічних зображень. При цьому основну увагу приділимо можливості їх автоматизації, необхідності проведення налаштувань та отриманій точності опрацювання (рис. 6.11).

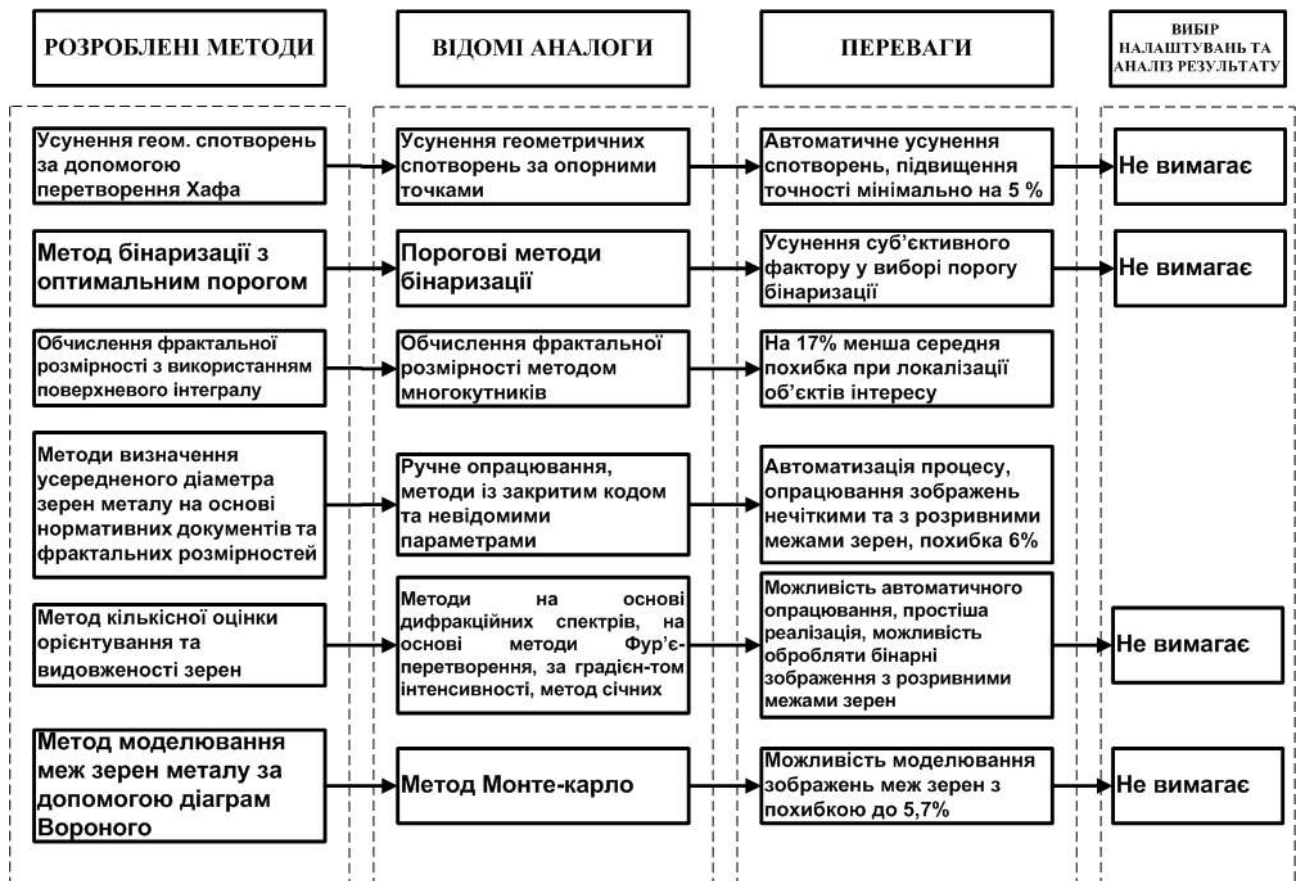


Рис. 6.11. Порівняльні характеристики розроблених методів.

Побудований метод усунення геометричних спотворень на основі перетворення Хафа [49], на відміну від відомого підходу з використанням опорних точок, забезпечує автоматичне коригування геометрії зображення та не вимагає постійного налаштування параметрів при опрацюванні зображень, які сформовані одним і тим же оптичним пристроєм. Таким чином на кроці 2 в узагальненій структурно-функціональній схемі інформаційної технології аналізу металографічних та фрактографічних зображень (рис. 1.18) зникає необхідність у постійному налаштуванні параметрів, візуальному контролю результату та забезпечується автоматизація опрацювання. Результатом усунення геометричних спотворень є підвищення точності метричних вимірювань мінімально на 5% залежно від використаних оптичних пристроїв.

Розроблений метод бінаризації з оптимальним порогом [80], який використовується на кроці 4 в узагальненій структурно-функціональній схемі (рис. 1.18) забезпечив автоматичний вибір порогу бінаризації без будь-який

додаткових налаштувань. Експериментально встановлено, що отримані в результаті такого опрацювання бінарні зображення володіють вищим рівнем деталізації, ніж при застосуванні інших відомих аналогів.

Метод обчислення фрактальної розмірності з використанням поверхневого інтегралу [74] є більш чутливим до невеликих змін інтенсивності зображення, володіє вищою, ніж у аналогів, деталізацією опрацювання та забезпечує на 17% меншу похибку при локалізації об'єктів інтересу на зображеннях. Він дозволяє проводити обчислення в автоматичному режимі та не вимагає постійних налаштувань параметрів.

У дисертаційній роботі розроблено метод обчислення усереднених діаметрів зерен матеріалів за їх металографічними зображеннями. Цей метод побудований з використанням фрактальних розмірностей [227] та дає можливість проводити обчислення в автоматичному режимі без необхідності додаткових налаштувань та інтерактивного редагування меж зерен (*крок 5*, рис. 1.18). При цьому відхилення отриманих результатів від ручного вимірювання складає 6%.

Метод кількісного оцінювання видовженості та орієнтування зерен металу на металографічному зображенні [78] у порівнянні з аналогами забезпечує можливість автоматичного опрацювання, простішу реалізацію та дозволяє обробляти бінарні зображення з розривними межами зерен. Окрім цього, даний метод не потребує додаткових налаштувань.

Метод моделювання меж зерен металу за допомогою діаграм Вороного [75] дає можливість проводити наочне моделювання зеренної структури матеріалу, при цьому точність моделювання порівняно з еталонними зображеннями складає 5,7%.

Вище наведені лише основні результати, які отримані у даній дисертаційній роботі. Спільним для них є те, що вони дають можливість проведення автоматизованого опрацювання металографічних та фрактографічних зображень з мінімальною кількістю налаштувань.

6.5. Синтез складових інформаційної технології аналізу металографічних та фрактографічних зображень

На основі розроблених у роботі методів та програмних засобів їх реалізації синтезовано складові інформаційної технології для розв'язування окремих задач обробки та аналізу металографічних та фрактографічних зображень (рис. 6.12). Синтез складових інформаційної технології поєднує задачі, які вирішуються при обробці та аналізі металографічних та фрактографічних зображень [86]. Кожна інформаційна технологія 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. Для прикладу, при виділенні об'єкта зацікавлення для одного типу зображень достатньо буде застосувати пороговий метод, який базується на аналізі інтенсивностей, для іншого типу, зі складною текстурою, доцільно застосовувати метод оцінки фрактальної розмірності.

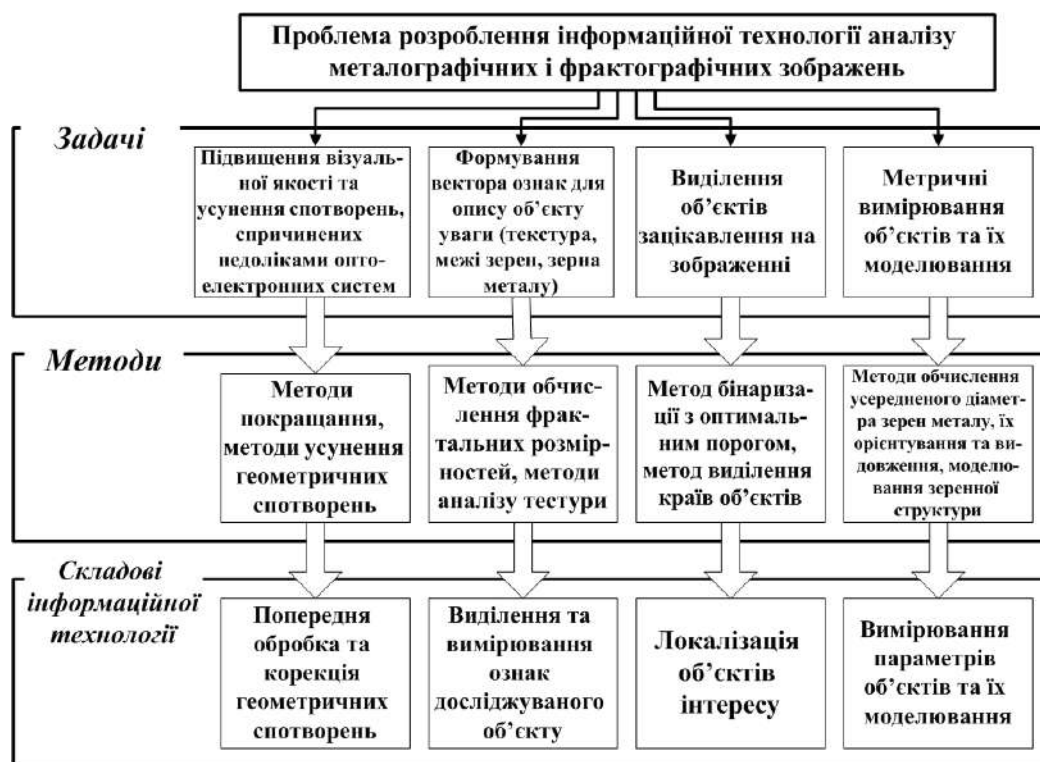


Рис. 6.12. Модель синтезу складових інформаційної технології для аналізу металографічних та фрактографічних зображень.

Складові інформаційної технології, які розроблені для окремих задач (рис. 6.12), інтегровані в єдину інформаційну технологію аналізу металографічних та фрактографічних зображень (рис. 6.13) [86].



Рис. 6.13. Інформаційна технологія аналізу металографічних та фрактографічних зображень.

Відмінною рисою побудованої інформаційної технології (рис. 6.13) є те, що її основу становлять розроблені у роботі методи, які забезпечують автоматизований, а деякі автоматичний режим опрацювання зображень, не вимагають постійних налаштувань параметрів та забезпечують вищу точність обробки у порівнянні з аналогами. Як наслідок, розроблена інформаційна технологія не потребує постійного візуального аналізу на кожному кроці опрацювання, що сприяє підвищенню швидкодії опрацювання зображень.

Таким чином, результатом проведених у дисертаційній роботі досліджень є побудова нової інформаційної технології, складові методи якої характеризуються підвищеним рівнем автоматизації, швидкодії та точності аналізу металографічних та фрактографічних зображень, що досягнуто шляхом

розроблення нових способів кількісного оцінювання геометрії та розподілу елементів їх мікроструктури.

6.6. Програмно-апаратні засоби інформаційної системи обробки та аналізу металографічних та фрактографічних зображень

Під інформаційною системою будемо розуміти сукупність технічних засобів для формування металографічних та фрактографічних зображень, їх аналізу та представлення обробленої інформації. Структура інформаційної системи включає апаратне та програмне забезпечення (рис. 6.14).

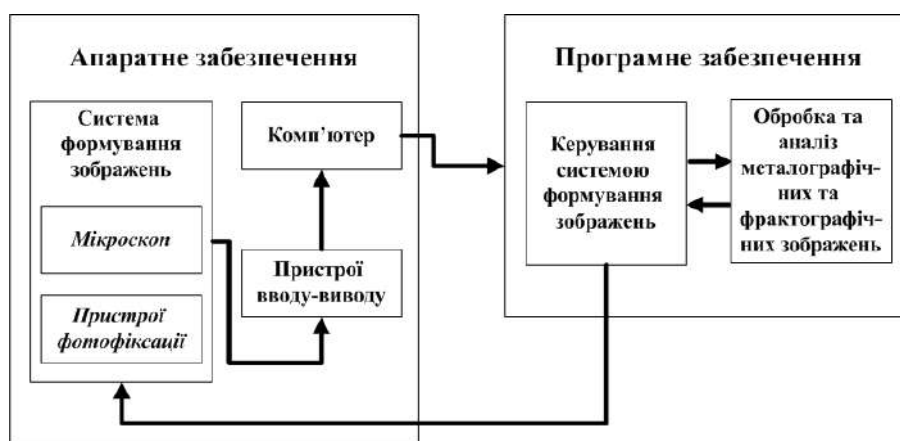


Рис. 6.14. Структура інформаційної системи.

Основними компонентами апаратного забезпечення інформаційної системи є система формування зображень, безпосередньо комп'ютер та пристрої вводу-виводу. Система формування зображень складається із металографічного мікроскопу та пристроїв фотофіксації. Металографічні мікроскопи є стаціонарними та портативними, які використовуються у польових умовах, коли з цих чи інших причин неможливо зробити вирізку зразка. Керування мікроскопом та пристроями фотофіксації може здійснюватися як спеціалізованим програмним забезпеченням, так і стандартними комунікаційними засобами. Вимоги щодо конфігурації комп'ютера визначаються вимогами програмного забезпечення, на базі якого розроблена інформаційна система. Здебільшого ці показники відповідають усередненим параметрам сучасного комп'ютера для роботи та навчання.

Пристрої апаратної частини опрацьовують інформацію за допомогою спеціальних програм. Для забезпечення роботи апаратної частини та виконання поставлених завдань потрібна сукупність програм, яка складає програмне забезпечення. Програмне забезпечення складається з системного та прикладного. Основну частину системного забезпечення складає операційна система, яка організовує процеси переробки інформації в комп'ютері. У роботі основна увага приділена прикладному програмному забезпеченню, яке призначене для вирішення функціональних завдань та роботи користувачів. Обмежень щодо вибору мови програмування не існує. Моделювання алгоритмів найбільш доцільно проводити у середовищі Matlab. Для забезпечення меншого часу опрацювання, використання існуючих утиліт взаємодії різноманітних апаратних засобів доцільно використовувати одну із мов об'єктно-орієнтованого програмування, наприклад, C#.

6.7. Аналіз ефективності сформованої інформаційної технології обробки та аналізу металографічних та фрактографічних зображень

Проведемо аналіз розробленої інформаційної технології обробки та аналізу металографічних і фрактографічних зображень з точки зору її впливу на ефективність застосування при матеріалознавчих дослідженнях [86].

Успішність проведення матеріалознавчих досліджень у сучасних умовах в значній мірі залежить від інформаційної складової. Наявність ефективної комп'ютеризованої системи, яка побудована на сучасних інформаційних технологіях, є однією з необхідних передумов отримання нових знань, закономірностей, результатів. Для використання нових інформаційних систем необхідними є знання інформаційних технологій. Їх застосування в автоматизації матеріалознавчих досліджень висуває підвищені вимоги щодо кваліфікації дослідників-матеріалознавців в комп'ютерних науках та інформаційних технологіях.

Для аналізу розробленої інформаційної технології обробки та аналізу металографічних та фрактографічних зображень необхідно сформулювати критерії, згідно яких буде оцінюватися її ефективність. За такі критерії вибрано автоматизований режим роботи, точність обчислень та швидкодія методів опрацювання та аналізу зображень (рис. 6.15). Проаналізуємо їх більш детально.



Рис. 6.15. Критерії оцінювання розробленої інформаційної технології.

Автоматизація. При розв’язуванні конкретної задачі обробки та аналізу металографічних та фрактографічних зображень може використовуватися один або декілька методів різного рівня складності, кожен з яких має деяку кількість налаштувань – розмір локальної апертури, коефіцієнти підсилення та інші параметри. Ці налаштування здебільшого суттєво впливають на результат досліджень, тому їх вибір вимагає знань та досвіду не лише в предметній галузі, у нашому випадку, це у матеріалознавстві, але й в галузі інформаційних технологій. Загалом це викликає певні труднощі, тому розвиток методів опрацювання та аналізу має відбуватися не лише у напрямку розширення їх можливостей, але й у напрямку автоматизованої чи автоматичної роботи, що позитивно впливатиме на зручність їх використання. Для прикладу, розроблений метод бінаризації з оптимальним порогом у порівнянні з відомими аналогами не потребує налаштувань та забезпечує автоматичний вибір порогу інтенсивності. Автоматизація методів обробки та аналізу металографічних та фрактографічних зображень робить можливим їх зручне використання дослідниками-матеріалознавцями, які не знайомі зі всіма тонкощами інформаційних технологій. Окрім цього, через це, що зникає необхідність у виборі параметрів налаштувань, зменшується час опрацювання.

Точність обчислень. Однією з передумов коректного аналізу металографічних та фрактографічних зображень та прийнятих цій основі рішень є точність обчислень, які проводяться окремими методами. Під точністю будемо розуміти ступінь наближення результату вимірювання до прийнятого опорного значення. При оцінюванні точності вимірювань деяких методів за опорні використано зображення об'єктів з відомими параметрами. Порівнюючи відомі параметри з обчисленими роблять висновки щодо точності вимірювань. При цьому до уваги не приймають методичну похибку, похибку квантування та ін., тому точність вимірювання в даному випадку є суто якісною характеристикою. Для прикладу, у методі усунення геометричних спотворень з використанням перетворень Хафа для оцінювання точності обчислень використано еталонну ґратку з комітками відомих розмірів; у методі обчислення усереднених діаметрів за опорні використано еталонні зображення меж зерен.

Швидкодія. Природно, що час роботи методів опрацювання та аналізу даних є їх важливою характеристикою. Він залежить від багатьох факторів, серед яких слід виділити – оптимальна побудова алгоритму, об'єм даних та потужність використовуваних програмних засобів. Стосовно методів обробки та дослідження металографічних та фрактографічних зображень доцільним є їх реалізація в прийнятному масштабі реального часу. Тому під підвищенням швидкодії стосовно досліджень у металографії будемо розуміти суттєве, у декілька разів, зменшення часу опрацювання, необхідного для отримання одного і цього ж результату. Для прикладу, для ручного обчислення усередненого діаметра зерен металу за їх металографічним зображенням необхідний час, який вимірюється годинами. Вирішення цієї ж задач за допомогою розроблених у роботі методів займає до хвилини часу. В даному випадку, очевидним є факт підвищення швидкодії опрацювання та аналізу досліджуваних зображень. Досягнути підвищення швидкодії можна також через удосконалення самого методу. Для прикладу, у методі обчислення усередненого діаметру зерен металу, який ґрунтується на вимогах нормативних

документів, одним із етапів його реалізації є ітеративне коригування меж зерен. Це вимагає достатньо багато часу – десятки хвилин. Розроблений метод обчислення усередненого діаметра зерен через використання фрактальних розмірностей не вимагає проведення ітеративного етапу коригування меж зерен, в результаті чого час роботи методу скоротився в десятки разів, до однієї хвилини.

Наведемо результати аналізу розробленої інформаційної технології обробки та аналізу металографічних і фрактографічних зображень згідно розроблених вище критеріїв – автоматизації, точності та швидкодії (рис. 6.16).

Складові інформаційної технології		Автоматизація	Точність	Швидкодія
Попередня обробка та корекція геометричних спотворень	Усування 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 виводження зерен металу	✓		✓
	Моделювання меж зерен	✓		✓
	Уточнення при обчисленні усередненого діаметра		✓	

Рис. 6.16. Основні характеристики інформаційної технології обробки та аналізу металографічних і 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 металографічних та фрактографічних зображень, що досягнуто шляхом розроблення нових способів кількісного оцінювання геометрії та розподілу елементів їх мікроструктури [86].

Висновки до розділу 6

Запропоновано метод моделювання меж зерен металу за допомогою діаграм Воронова, який надає нові можливості щодо аналізу зеренної структури металів. Одним із застосувань є дослідження геометричних та статистичних співвідношень багатокутників на діаграмах Воронова, які тісно пов'язані з характеристиками зеренної мікроструктури та матеріалу.

На основі технології дифузійного псевдозмішування кольорів і застосування алгоритму Флойда-Стейнберга запропоновано алгоритм оптимізації палітри, який дозволяє без стиску суттєво зменшити об'єм металографічних зображень.

Через модифікацію функції перетворення координат колірною простору в колірні компоненти, запропоновано модифікований підхід до формування псевдокольорових зображень, який забезпечує підвищення інформативності напівтонових металографічних та фрактографічних зображень при їх візуальному аналізі.

Проведено аналіз розроблених у дисертаційній роботі методів. Встановлено їх переваги з точки зору інформаційних процесів обробки та аналізу зображень у металографії.

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. Синтез складових інформаційної технології поєднує задачі, які вирішуються при обробці та аналізі металографічних і фрактографічних зображень.

Розроблено інформаційну технологію, яка через створення нових способів кількісного аналізу мікроструктур у металографії, забезпечує підвищення рівня автоматизації, швидкодії та точності аналізу металографічних і фрактографічних зображень.

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, за входні 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абду И. Количественный расчет детекторов контуров, основанных на подчеркивании перепадов яркости с последующим пороговым ограничением
Текст. /И: Абду, У. Прэнт // ТИИЭР,.1979. -№5. С.59-70.
2. Абламейко С.В. Сегментация трехмерных изображений компьютерной томографии на основе глобально-локальной информации / С.В.Абламейко, А.М.Недзьведь, А.М.Белоцерковский // Вестник БГУ.- сер.1.- 2009.- Минск.- с.58-64.
3. Аверкин А.Н. Формирование и визуализация 3D-изображений микрообъектов по серии видеок кадров с изменяемой фокусировкой / А.Н.Аверкин, А.С.Потапов, А.С.Рожков // Фотоника и оптоинформатика – 2011. - №6(76), с.12-17.
4. Аверченков В.И. Метод Компьютерной реконструкции рельефа поверхности интерпретацией сфокусированности изображений / В.И.Аверченков, Д.В.Чмыхов // Вестник Брянского государственного технического ун-та. - 2008. - № 2(18), - с. 111-116.
5. Автоматизированный металлографический анализ // SIAMS. - 2005. - Режим доступа до ресурсу: <http://siams.com>.
6. Алиев М.В. Выделение контуров на малоконтрастных и размытых изображениях с помощью фрактальной фильтрации / М.В.Алиев, А.Х.Панеш, М.С.Каспарьян // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. - 2011, - №3.
7. Анализатор изображений микроструктуры металлов и сплавов Thixomet // ТНIXOMET - 2017. - Режим доступа до ресурсу: <http://www.thixomet.com>.
8. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / А.Анго – М: Наукаю.- 1967. – 779 с.
9. Антикайн П.А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов / П.А.Антикайн – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.

10. ASTM E 112-96. Стандартный метод испытаний по определению среднего размера зерна. – 39 с.
11. Бабілунга О.Ю. Оцінка стану ріжучої частини інструменту за 3d моделями в системах технічного зору / О.Ю.Бабілунга, О.Г.Дерев'янченко, А.С.Яремчук, П.В.Гоцонога // Електротехн. и компьют. системы. - 2014. - № 13. - С. 77-83.
12. Бакут П.А. Сегментация изображений: методы пороговой обработки / П.А.Бакут, Г.С.Колмогоров, И.Э.Ворновицкий // Зарубежная радиэлектроника.- 1987.- №10.- с. 6-24.
13. Белан С.Н. Специализированные клеточные структуры для контурного анализа изображений / С.Н.Белан // Кибернетика и систем. анализ. - 2011. - 47, № 5. - С. 33-44.
14. 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 науково-технічна конференція і виставка “Неруйнівний контроль та технічна діагностика” Київ, 10-14 квітня 2006, ст.248-250.
15. 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 // Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Конструкційна міцність матеріалів і ресурс обладнання АЕС», Київ, 19-21 вересня 2006, ст.20-21.
16. 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, Вип. 10. –2005, С. 185 - 188.
17. 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, Вип. 11. –2006, С. 195 - 200.
18. Берегуляк О.Р. Методи покращання цифрових рентгенографічних зображень / О.Р.Берегуляк, Р.А.Воробель, Н.В.Опир, І.М.Журавель // Матеріали ІІІ конференції з міжнародною участю “Інформаційні технології в охороні здоров’я та практичній медицині”, 21–23 травня 2003 р., м. Київ, стор. 17–19.
 19. Берегуляк О.Р. Система обробки цифрових зображень в задачах неруйнівного контролю якості матеріалів / О.Р.Берегуляк, Р.А.Воробель, І.М.Журавель, І.Б.Івасенко, Н.В.Опир, К.В.Сущик // 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.
 20. Березина Т. Г. Структурный метод определения остаточного ресурса длительно работающих паропроводов. / Т. Г.Березина // Теплоэнергетик. – 1986. – № 3. – С. 53–56.
 21. Березовський К.А. Дослідження паралельного алгоритму побудови діаграми Вороного на площині / К.А.Березовський // Пробл. програмув. — 2009. — № 1. — С.28-35.
 22. Березький О.М. Адаптивний метод сегментації зображень на основі метрик /О.М.Березький, О.Й.Піщун // Науковий вісник НЛТУ України.- 2018.- т. 28.- № 3.- С. 122–126.
 23. Битюцкий О.И. Оптико-электронная система бесконтактного контроля геометрических параметров полых цилиндров / О.И.Битюцкий, В.В.Вертопрахов, В.И.Ладыгин, А.И.Пастушенко, С.В.Плотников, Ю.В.Чугуй, С.П.Юношев // Автометрия. – 1995.– №6. – С.69-74.
 24. Бобир Н.Я. Фотограмметрия / Н.Я.Бобир, А.Н.Лобанов, Г.Д.Федорук.- М.: Недра, 1974. – 472 с.

25. Большаков В.И. Композиция топологических и фрактальных инвариантов при идентификации структуры / В.И.Большаков, В.Н.Волчук, Ю.И.Дубров // Металознавство та термічна обробка металів.- 2017 - № 3. – с. 10-15.
26. Большаков В.И., Волчук В.Н., Дубров Ю.И. Фракталы в материаловедении: Учебник для студентов высших технических учебных заведений – 1-е издание / Под редакцией д.т.н., проф. В. И. Большакова. – ПГАСА: 2005 г. – 253 с.
27. Бутаков Е.А. Обработка изображений на ЭВМ / Е.А.Бутаков, В.И.Островский, И.Л.Фадеев.- М.: Связь, 1987.-240с.
28. Вахитов А.Т., Гуревич Л.С., Павленко Д.В. Обзор алгоритмов стереозрения. Стохастическая оптимизация в информатике / Под ред. О.Н.Граничина – СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2008.- Вып. 4 – 299 с.
29. Волчук В.М. Розробка і дослідження методу визначення якісних характеристик металу на основі аналізу фрактальної розмірності його мікроструктури. Дис. канд. техн. наук: 05.02.01. –Дніпропетровськ, 2003.
30. Воробель Р.А. Кількісний аналіз структури матеріалів на основі теорії фракталів / Р.А.Воробель, І.М.Журавель // 13-міжнародна конференція з автоматичного управління “Автоматика-2006”, Вінниця, 25-28 вересня, 2006, С. 383.
31. Воробель Р.А. Количественная оценка качества изображений / Р.А.Воробель, І.М.Журавель // Труды. IV Среднеевропейская конференция “Компьютерные методы и системы в автоматике и электротехнике”. Часть 1. Ченстохова (Польша - 17 - 18 сентября 2001).- 2001.- с. 105-107.
32. Воробель Р. А. Метод підсилення контрасту зображення з використанням нелінійних перетворень компонент гістограми / Р.А.Воробель // Відбір і обробка інформації. – 2000. – Вип. 14(90). – С. 105–110.
33. Воробель Р.А. Модифікація методу статистичної сегментації / Р.А.Воробель, І.М.Журавель // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів, Вип. 10. –2005, С. 189 - 192.

34. Воробель Р.А. Метод калібрування цифрових відеокамер / Р.А.Воробель, І.М.Журавель // Праці 12-ї міжнародної конференції по автоматичному управлінню “Автоматика - 2005”, Харків, 30 травня – 3 червня 2005 р., с.23-24.
35. Воробель Р.А. Деякі підходи до визначення якості цифрових зображень / Р.А.Воробель, І.М.Журавель, Н.В.Опир // Міжнародна конференція з індуктивного моделювання, Львів, 20-25 травня 2002: Праці в 4-х томах. - Т. 1, Ч. 2. - Львів: Державний НДІ інформаційної інфраструктури, 2002. - 325 с.
36. 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, 8 –12 жовтня 2002 р. УкрОБРАЗ’2002. К.: 2002, С. 155 – 157.
37. Воробель Р.А. Підвищення контрасту зображень з використанням модифікованого методу кускового розтягу / Р.А.Воробель, І.М.Журавель // Відбір і обробка інформації, 2000. - Вип. 14(90), С. 116 – 121.
38. Воробель Р.А. Система “ОБРАЗ–ДЗ” автоматизованого оброблення та аналізу зображень, що формуються при неруйнівному контролі якості виробів / Р.А.Воробель, Г.І.Бавда, О.Р.Берегуляк, І.М.Журавель, І.Б.Івасенко, Т.С.Мандзій, Н.В.Опир, К.В.Сущик // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів, Вип. 12. –2007, С. 243-247.
39. 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, 3–6 грудня 2002 р. С. 55 – 57.
40. Воробель Р.А. Покращання зображень через перетворення їх локальних контрастів / Р.А.Воробель, І.М.Журавель // Відбір і обробка інформації, 2002. - Вип. 16(92), С. 78 – 82.

41. 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, стор. 69-72.
42. Воробель Р.А. Застосування контрасту з нелінійними симетричними властивостями для підвищення візуальної якості зображень / Р.А.Воробель, І.М.Журавель // Вісник державного ун-ту "Львівська політехніка". – 1998. – №324. – С. 120 – 125.
43. 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.
44. Воробель І.М. Покращання візуальної якості зображень з використанням функції простягання гістограми / Р.А.Воробель, І.М.Журавель // ДНДІ П. 3б. Наук. праць "Автоматика-2000", Т. 1. Львів: 2000, С. 109 – 115.
45. Воробель Р.А. Покращання візуальної якості зображення з використанням функції простягання гістограми / Р.А.Воробель, І.М.Журавель // ДНДІ П. 3б. наук. праць "Автоматика-2000", Т. 1. Львів: 2000, С. 109 – 115.
46. Воробель Р.А. Технологія покращання зображень, що базується на визначенні локальних контрастів / Р.А.Воробель, Н.В.Опир, І.М.Журавель // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів, Вип. 5. – 2000, С. 121 – 126.
47. Воробель Р.А. Лінійний опис контрасту елементів зображення / Р.А.Воробель // Доповіді НАН України. – 1998. – № 1. – С.127–131.
48. Воробель Р.А. Використання локального контрасту при виділенні ліній на багатоградаційному 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.

49. Воробель Р.А., Журавель І.М. 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.
50. Встовский Г.В. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов / Г.В.Встовский , А.Г.Колмаков, И.Ж.Бунин. – Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика».- 2001. – 116 с.
51. Вяткин С.И. Коррекция дисторсии в компьютерных системах визуализации / С.И.Вяткин, Б.С.Домовесов, С.Е.Чижик // Автометрия. – 2001. – № 6. – С. 46 – 50.
52. Гельман Р.Н. Опыт использования и калибровки цифровых камер при совместной аэрофотосъемке с АФА / Р.Н.Гельман, А.Л.Никитин, А.Л.Дунц // Геодезия и картография. – 2001. – № 6. С. 25 – 31.
53. Гибкие системы технического зрения [Электронный ресурс] // Компания "Техноимпекс". - 2017. - Режим доступа до ресурсу: <http://www.omron.com.ua/catalog/sistemy-kontrolia-kachestva/gibkie-sistemy-tehnicheskogo-zreniya>.
54. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс, пер. с англ. П. А. Чочиа. – М.: Техносфера. 2005. – 1072 с.
55. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р.Гонсалес , Р.Вудс , С.Эддинс – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
56. ГОСТ–23349–84. Контроль неразрушающий. Дефектоскопы капиллярные. Общие технические требования и методика испытаний. – М.:1984.
57. ГОСТ 5639–82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. Изд–во стандартов, 1983.
58. ГОСТ 5639-82. Методы выявления и определения величины зерна. Эталоны микроструктур. – Издательство стандартов. – 21 с.
59. ГОСТ 21073.0-75. Металлы цветные. Определение величины зерна. – 8 с.

60. ГОСТ 21073.1-75. Металлы цветные. Определение величины зерна методом сравнения со шкалой микроструктур. – 6 с.
61. ГОСТ 21073.2-75. Металлы цветные. Определение величины зерна методом подсчета зерен. – 3 с.
62. ГОСТ 21073.3-75. Металлы цветные. Определение величины зерна методом подсчета пересечений зерен. – 2 с.
63. ГОСТ 21073.4-75. Металлы цветные. Определение величины зерна планиметрическим методом. – 3 с.
64. Гостев И.М. Метод статистической сегментации /И.М.Гостев, И.В.Попенко // 5-я Международная научно-техническая конференция и выставка "Цифровая обработка сигналов и её применение" DSPA-2003, (12-14 марта 2003 г., Москва).- Москва.-2003.- С. 1-5.
65. Гостев И.М. Программный комплекс по обработке изображений и распознаванию образов /И.М.Гостев // Тр. 3-й Междунар. Конф. "Цифровая обработка сигналов и ее применение". V2.- М.: Издательское предприятие редакции журнала "Радиотехника".- 2000.- с.53-56.
66. Грязнов А.Ю. Методика получения псевдоцветных рентгеновских изображений в двухэнергетичной рентгенографии / А.Ю.Грязнов, К.К.Жамова, В.Б.Бессонов, А.О.Лившиц, Е.С.Кунашик// Биотехносфера.- № 3(33).- 2014.- с. 17–20.
67. Гудков А.И. Внешние нагрузки и прочность летательных аппаратов / А.И.Гудков, П.С.Лешаков. – М.: Машиностроение, 1968. – 469 с.
68. Деклараційний патент на корисну модель № 3470. Спосіб визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій за станом деформаційного рельєфу поверхні плакуючого шару / Ігнатович С.Р., Карускевич М.В., Карускевич О.М. – Опубл. 15.11.2004, Бюл. № 11.
69. Дубиновский В.Б. Калибровка снимков / В.Б.Дубиновский.- М.: Недра, 1982. – 224 с.

70. Журавель І.М. Про один підхід до покращання слабоконтрастних зашумлених рентгенівських зображень / І.М.Журавель // Міжвузівський збірник “Наукові нотатки”.- випуск 42.- 2013 р.- с. 101-105.
71. 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. КМН – 2007.- Львів.- с. 238-241.
72. Журавель І.М. До питання обчислення усередненого діаметру зерен металу / І.М.Журавель // II науково-технічна конференція ”Обчислювальні методи і системи перетворення інформації”, Львів 4 - 5 жовтня 2012 р.- с. 169-172.
73. 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.
74. 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.
75. 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.
76. 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.
77. Журавель І.М. Модифікація методу Канні для виділення країв об’єктів / І.М.Журавель // XVI Відкрита науково–технічна конференція молодих науковців та спеціалістів Фізико–механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України. – 2005. - С. 352-355.
78. 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.
79. 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.
80. Журавель І.М. Метод бінаризації металографічних зображень з оптимальним порогом / І.М.Журавель // Штучний інтелект.- №4.-2012.- с. 142-147.
81. 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”, 7-8 жовтня 2010 р., Львів, С. 176-178.
82. Журавель І.М. Аналіз текстури фрактографічних зображень на основі спектру фрактальних розмірностей Реньї / І.М.Журавель // «Штучний інтелект» № '2013, с. 204-208.
83. Журавель І.М. Підвищення візуальної якості зображень з використанням нелінійного розтягу локальних контрастів / І.М.Журавель // XV Відкрита науково-технічна конференція молодих науковців та спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України. КМН - 2000. 23 - 25 травня, 2000 р., Львів, ФМІ, стор. 108 - 109.
84. 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. (8 – 10 жовтня, 2003 р., Львів).- Львів.- 2003. С. 228 – 230.
85. Журавель І.М. Локально-адаптивні методи підвищення контрастності зображень / І.М.Журавель // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. - Львів. - 2001.
86. 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.

87. 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.
88. 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.
89. Застосування підходів механіки руйнування до оцінки водневої деградації сталей нафто- та паропроводів / Панасюк В.В., Никифорчин Г.М., Студент О.З., Слободян З.В. // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій / За заг. ред. Андрейківа О.Є., Лучка Й.Й., Божидарника В.В. – Львів: Каменяр, 2002. – С. 537-546.
90. Золотаревський В.С. Механические свойства металлов / В.С.Золотаревський.- М.- Металлургия.- 1983. – 352 с.
91. Иванов В.К. Использование теории фракталов для анализа радиолокационных изображений поверхности Земли /В.К.Иванов, Р.Э.Пащенко, А.М.Стадник и др.// Успехи современной радиоэлектроники. – 2006. – № 5. – С. 17–45.
92. Ильинский Н.Д. Предвычисление погрешностей построения пространственной фототриангуляции / Н.Д.Ильинский.- М.: Недра, 1978.
93. Ильюшин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории/ А.А. Ильюшин. -Москва: Изд. АН СССР. -1963. -272 с.
94. 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.
95. 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.

96. Івасишин О.М. Трехмерное компьютерное моделирование методом Монте-Карло эволюции текстуры и роста зерен при отжиге / Івасишин О.М., Шевченко С.В., Васил'єв Н.Л., Семятін С.Л. // Металлофизика и новейшие технологии. - 2001. - 23, № 12. - С. 1569-1587.
97. Каневский И.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. пособие / И.Н.Каневский, Е.Н.Сальникова.- Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007 – 243 с.
98. 173 Карускевич О.М. Влияние уровня напряжений на развитие деформационного рельефа. / О.М.Карускевич // Вестник двигателестроения. – 2005. – № 2. – С. 79 – 82.
99. Карускевич М.В. Мониторинг деградации прочности авиационных конструкций с помощью монокристаллических индикаторов / М.В.Карускевич, О.М.Карускевич // Проблемы системного подхода в экономике. – Киев. КМУГА. – 2000. – № 4 – С. 96 –101.
100. Карускевич М.В. Структурна пошкоджувальність і руйнування зразків-свідків втомного пошкодження / М.В.Карускевич, Е.Ю.Корчук, Т.П.Маслак та ін. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 9 (56). – С. 110 –114.
101. Карускевич О.М. Диагностика усталости плакированных алюминиевых сплавов / О.М.Карускевич, С.Р.Игнатович, М.В.Карускевич и др.// Вестник НГТУ КПИ. Машиностроение. – 2002. – № 43. – С. 53 – 55.
102. Карускевич О.М. Эволюция поврежденности сплава Д16АТ у концентратора на стадии до зарождения усталостной трещины / О.М.Карускевич, С.Р.Игнатович, М.В.Карускевич // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 4 (12). – С. 29 – 32.
103. Карускевич М.В. Оценка накопленного усталостного повреждения по насыщенности и фрактальной размерности деформационного рельефа / М.В.Карускевич, Е.Ю.Корчук, Т.П.Маслак и др.// Пробл. прочности – 2008. – № 6. – С.128 – 135.

104. Кириченко В.Г. Фактори розподілу та росту зерен в полікристалічних 3D та 2D структурах / В.Г.Кириченко, О.В.Коваленко, В.Н.Леонов //Journal of Kharkiv University, №991, 2012, с. 75-79.
105. Кольцов П. П. Использование метрик при сравнительном исследовании качества работы алгоритмов сегментации изображений / П.П.Кольцов // Информатика и её применение. – 2011. – Т. 5, Вып. 3. – С. 53–63.
106. Кормановський С.І. Структурно-зв'язностна модель зображення : виділення контуру та формування ознак / С.І.Кормановський, Я.Г.Скорюкова, О.П.Мельник // Наукові праці ВНТУ.- 2010.- № 1.- С. 1-7.
107. Кормановський С.І. Око-процесорна обробка та розпізнавання образної інформації за геометричними ознаками. Монографія / С.І.Кормановський, В.П.Кожем'яко – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 160 с.
108. Короленко П.В. Новационные методы анализа стохастических процессов и структур в оптике. Фратальные и мультифрактальные методы, вейвлет-преобразования. Учебное пособие / П.В.Короленко, М.С.Маганова, А.В.Меснянкин. – М.: Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Научно–исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.Скобельцына.- 2004. – 82с.
109. Косаревич Р.Я. Розроблення методів аналізу оптичних зображень неоднорідностей на поверхні матеріалу для моніторингу технічного стану об'єктів [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.10; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка. - Львів, 2016. - 40 с.
110. Кошовий В.В. Експериментальні дослідження акустичних та структурних характеристик матеріалу для зразків з різною термообробкою /В.В.Кошовий, Є.В.Кривін, Д.М.Завербний, А.М.Муравйов, І.М.Романишин// Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів (серія).- вип. 9: Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів: Зб. наук. праць. – Львів, ФМІ ім. Г.В.Карпенка НАН України. – 204. стор. 33-37.

111. Красильников Н.И. Цифровая обработка изображений / Н.И.Красильников.- М.- “Вузовская книга”.- 2001.
112. Кречковська Г. В. Структурні зміни в експлуатованій на головному парогоні ТЕС сталі 15Х1М1Ф, пов’язані з зупинками технологічного процесу / Г. В.Кречковська // Металлофізика и новейшие технологии. – 2008 – 30, Спецвип. – С. 701–711.
113. Кречковська Г.В. Структурні зміни в металі парогону ТЕС зі сталі 15Х1М1Ф внаслідок експлуатації / Г.В.Кречковська, О.З.Студент, А.Д.Марков // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». – Луцьк: ЛДТУ, 2007. – Вип. 20. – С. 213-217.
114. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории / Р.М.Кроновер. – М.- Постмаркет.- 2000. – 352 с.
115. Крутасова Е.И. Надежность металла энергетического оборудования / Е.И.Крутасова – Москва: Энергоиздат. – 1981. – 240 с.
116. Лалыко Л.Б. Сравнительная оценка различных цифровых методов оконтуривания изображений / Л.Б.Лалыко, Н.Н.Порфирьева // Оптико-механическая промышленность. – 1985. – № 4. – С. 12–14.
117. Левашкина А.О. Исследование супервизорных критериев оценки качества сегментации изображений / А.О. Левашкина, С.В. Поршнев // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313, №5. – С. 28-33.
118. Лобанов А.Н. Аналитическая постространственная фототриангуляция / А.Н.Лобанов, В.Б.Дубиновский, М.М.Машимов, Р.П.Овсянников. – М.: Недра, 1991. – 225 с.
119. Маслак Т.П. Фрактальні моделі деформаційного рельєфу / Т.П.Маслак, І.М.Журавель // Матеріали Х Міжнародної науково-технічної конференції “АВІА - 2011”, том 2, Київ, 19-21 квітня 2011 р., С. 16-19.
120. Меденников П.А. Выделение границ на полутоновых изображениях с помощью метода мультиапертурной оценки градиента / П.А.Меденников // Оптический журнал. – 2002. – Т. 69. – № 1. – С. 40–44.

121. Мелехов Р.К. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання / Р.К.Мелехов, В.І.Похмурський. – Київ: Наук. думка, 2003. – 383 с.
122. Могильный С.Г. Фотограмметрия / С.Г.Могильный, И.Л.Беликов, Л.И.Анохина и др. – Киев; Донецк: Вища шк., 1985. – 278 с.
123. Нахалов В. А. Надежность гибов труб теплоэнергетических установок / В. А.Нахалов . – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 184 с.
124. Новейшие методы обработки изображений. / Под ред. А. А. Потапова. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 496 с.
125. Олексів М. Математична модель зображень сцени, що містить літаки / М.Олексів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2010. – № 672 . – С. 151-158.
126. Осташ О.П. Оцінювання деградації сталей парогонів за їх структурними, механічними та електрохімічними характеристиками / Осташ О.П., Вольдемаров О.В., Гладиш П.В., Іванишин А.Д. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – 46, № 4. – С. 5–12.
127. Палеева С.Я. Контроль величины зерна металлических материалов [Электронный ресурс] // Учебное электронное текстовое издание. - 2017. - Режим доступа до ресурсу: <http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/682/28682/11895>.
128. Пат. 51439А України, G06K9/00. Спосіб визначення фрактальної розмірності зображень / В. І. Большаков, Ю. І. Дубров, Ф. В. Криулін, В. М. Волчук. Зареєстр. 02.02.02.
129. *Потапов А.А.* Интегральные операторы, фракталы и скейлинг в обработке медицинских рентгеновских изображений / А.А.Потапов, В.А.Герман, В.А.Пахомов // IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» - ИРЗ РАН. - 2010. - С. 321-325.
130. Прэтт У. Цифровая обработка изображений / У.Прэтт .– М.: Мир, 1982. – 790 с.

131. *Путятин Е.П. Обработка изображений в робототехнике / Е.П. Путятин, С.И. Аверин.- М. : Машиностроение, 1990. 319 с.*
132. *Рогов А.А. Применение спектра фрактальных размерностей Реньи как инварианта графического изображения / А.А.Рогов, К.Н.Спиридонов // Вестник Санкт–Петербургского университета.- 2008.- Сер. 10.- Вып. 2.- С. 30–43.*
133. *Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики / Д.Роджерс - М.- Мир.- 1989.*
134. *Роземберг В.М. Ползучесть металлов / В.М.Роземберг – М.: Металлургия, 1967. 276 с.*
135. *Романів О.М. Вплив експлуатаційної пошкодженості паропровідної сталі 12Х1МФ на характеристики її тріщиностійкості / О.М. Романів, О.М. Никифорчин Г.М., Студент О.З., І.Р. Дзіюба, Б.П. Лонюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1998. – № 1. – С. 101-104.*
136. *Русин Б. П. Структурно-лінгвістичні методи розпізнавання зображень в реальному часі / Русин Б. П. – К.: Наукова думка, 1986. – 126 с.*
137. *Салтыков С.А. Стереометрическая металлография / С.А.Салтыков.- М., Металургія.- 1976.*
138. *Самохвалов А.В. Контурное кодирование полутонового изображения: выделение контурной информации на изображении // Приволжский научный вестник, по. 7 (23), 2013, с. 53-61.*
139. *Секерин А.М. Автоматизированный метод сравнительной оценки чувствительности наборов дефектоскопических материалов / А.М.Секерин, А.П.Корнев, И.В.Стойчева // Дефектоскопия. –1994. – №6. – С.78-86.*
140. *Секерин А.М. Метод сегментации изображений контролируемой поверхности при автоматической регистрации результатов капиллярного контроля / А.М.Секерин // Дефектоскопия. –2001. – №1. – С.84-91.*
141. *Семин М. С. Обзор решения прикладных задач с помощью систем технического зрения [Электронный ресурс] // ООО "ВИДЕОСКАН". - 2017. - Режим доступ удо ресурсу: <http://www.videoscan.ru/page/718#01>.*

142. Сергеева Е.Л. Инвариантные интегральные характеристики мультиспектральных космических изображений / Е.Л. Сергеева // Збірник наукових праць НГУ. – Д.: Національний гірничий університет. – 2010. – №35. – Т.2. – С. 118-122.
143. Сергиенко О.Ю. Система технического зрения для навигации транспортных средств / О.Ю.Сергиенко // Автомобильный транспорт, вып. 12, 2012, с. 75-82.
144. Симинеев А.А. Определение элементов внутреннего ориентирования снимка из условия коллинеарности векторов в неявном виде / А.А.Симинеев, Л.Д.Власова // Геодезия и картография. – 2000. – № 12. – С. 24 – 27.
145. Система технического зрения для автоматического слежения за стыком при дуговой сварке [Электронный ресурс] // НТК «ИЭС им. Е.О. Патона». - 2017. - Режим доступа до ресурсу: <https://stc-paton.com/rus/equipment/tdnk07>.
146. Скоморохов А.О. Автоматизированный анализ результатов радиографического контроля сварных соединений на АЗС / А.О.Скоморохов, А.Б.Нахабов, П.А.Белоусов // Известия вузов-Ядерная энергетика. - 2009. - №3. - С. 29-36.
147. Слободян С.М. Влияние погрешности фокусировки на оценку фрактальной размерности изображения / С.М.Слободян // Известия Томского политехнического университета.- 2004.- Т. 307.- № 1.- с. 43-48.
148. Сторожилова М.В. Многомасштабная ранговая статистическая дифференциация: улучшение слабоконтрастных зашумленных изображений / М.В.Сторожилова, Д.В.Юрин // Труды научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления-2011». - 2011. - С.104-109.
149. Студент О. З. Вплив водню на механічні властивості реакторної сталі 15Х2МФА / О. З.Студент // Машинознавство. – 1999. – № 4. – С. 23–29.
150. Фарбер В.М. Оценка прочности малоуглеродистых низколегированных сталей по структурным данным / В.М.Фарбер, Б.З.Біленький, Б.И.Гольдштейн // Фізика металлов и металловедение. – 1975. – 3, вып. 2. – С. 403-409.

151. Федер Е. Фракталы (пер. с англ. Ю. А. Данилова, А. Шкурова) / Е.Федер – М.: Мир, 1991. – 261 с.
152. Харалик Р.М. Статистический и структурный подходы к описанию текстур / Р.М. Харалик // ТИИЭР. - 1979. - Т. 67, № 5. – С. 98-120.
153. Хорунжий М.Д. Метод количественной оценки цветов различий при восприятии цифровых изображений / М.Д.Хорунжий // Вестник НГУ, Серия: Информационные технологии.- Том 06.- 2008.- с. 80-88.
154. Цапаев А.П. Методы сегментации изображений в задачах обнаружения дефектов поверхности / А.П.Цапаев, О.В.Кретинин// Компьютерная оптика.- 2012.- том 36.- №3.- с. 448-452.
155. Шапиро Л. Компьютерное зрение: Пер. с англ. / Л. Шапиро, Дж. Стокман – М.:Бином. Лаборатория знаний. – 2006. – 752 с.
156. Шатохин А.Л. Исследование методов калибровки цифровой камеры [Электронный ресурс] // ДНТУ. - 2003. - Режим доступа до ресурсу: <http://www.masters.donntu.edu.ua/2003/ggeo/shatokhin/diss>.
157. Шлихт Г.Ю. Цифровая обработка изображений / Г.Ю.Шлихт - М.- Эком.- 1997.
158. Юрченко В.И. Исследование моделей учета систематических искажений неметрических снимков с самокалибровкой / В.И.Юрченко // Геодезия и картография. – 2002. – № 8. – С. 32 – 37.
159. Ярославский Л.П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии. Введение в цифровую оптику / Л.П.Ярославский - М.: Радио и связь, 1987. - 296 с.
160. Ahn, H.-K., Knauer, C., Scherfenberg, M., et al. (2016). Computing the discrete Fréchet distance with imprecise impute. International Journal of Computational Geometry, 22, 27–44.
161. Alman-Flores M. Automatic Lens Distortion Correction Using One-Parameter Division Models / M.Aleman-Flores, L.Alvarez, L.Gomez, D.santana-Cedres // Image Processing On Line. - 2014. - Vol. 4. - P. 327-343.

162. A Standard Default Color Space for the Internet: sRGB, Version 1.10, November 5, 1996. ICC
163. Annadhasan A. Fractal Geometry in Image Processing / A. Annadhasan // IRACST- International Journal of Research in Management & Technology (IJRMT), ISSN: 2249-9563 Vol. 2, No. 1, 2012, pp. 110-114.
164. Atiquzzaman M. Multiresolution Hough transform – inefficient method of detecting patterns in images / M.Atiquzzaman // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1992. – V. 14 (11). – P. 1090 – 1095.
165. Ajay Kumar Boyat, Brijendra Kumar Joshi, „A Review Paper: Noise Models In Digital Image Processing“, SIPIJ, Vol.6, No.2, April 2015.
166. Bellon O.R.P. New improvements to range image segmentation by edge detection / O.R.P.Bellon, L.Silva // IEEE Signal processing letters. – 2002. – Vol. 9, № 2. – P. 43–45.
167. 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 2005, Częstochowa, Poland, pp. 26-27.
168. 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-2005, Minsk, Belarus, P. 188-192.
169. Bišš V. A. Microstructural changes in 1Cr–0.5Mo steel after 20 years of service /V. A.Bišš, T.Wada // Metallurgical and Materials Transactions A. – 1985. – 16, № 1. – P. 109–114.
170. Burt P.J. Segmentation and Estimation of Image Region Properties Through Cooperative Hierarchical Computation / P.J.Burt, T.H.Hong, A.Rosenfeld //IEEE Tran. On SMC.- 1981.- Vol. 11.- N.12.- pp. 802-809.
171. Canny J.A. Computational Approach to Edge Detection / J.A. Canny // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.- Vol. 8.- №6.- 1986, pp. 679-698.

172. Chemin P. Modern engineering achievements in field of automatic fluorescent penetrant inspection process lines / P.Chemin, A.Ardox // Proc. 12-th World Conf. on Non-Destructive Testing.-Amsterdam, 1989, p.424-426.
173. Dash L. Adaptive contrast enhancement and deenhancement / L.Dash, B.N.Chatterji // Pattern Recognition. – 1991. Vol. 24. – N. 4. – P. 289–302.
174. Dhawan A.P. Enhancement of mammographic features by optimal adaptive neighbourhood image processing / A.P.Dhawan, G.Buelloni, R.Gordon // IEEE Trans. Med. Imaging. - 1986. - v.5. - P.8-15.
175. Dippel S. Multiscale Contrast Enhancement for Radiographies: Laplacian pyramid versus fast wavelet transform / S.Dippel, M.Stahl, R.Wiemker, T.Blaffert // IEEE Transaction on Medical imaging. –2002. – N. 4. – P. 343–353.
176. Divya, S., Jayanthi, K. B. (2015). Analysis of contour evolution methods for segmentation of medical images. 2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems, (pp. 1–4) (ICIIECS).
177. Dobrzański J. Methodology of classification of internal damage the steels during creep service /J.Dobrzański , M.Sroka , A.Zieliński // J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2006. – 18, № 1-2. – P. 263–266.
178. Dobrzański J. Development of the precipitation processes in low-alloy Cr–Mo type steel for evolution of the material state after exceeding the assessed lifetime /J.Dobrzański , H.Krztoń , A.Zieliński // Ibid. – 2007. – 23, № 2. – P. 19–22.
179. Erdt M. Regmentation: A New View of Image Segmentation and Registration / M.Erdt, S. Steger, G. Sakas // Journal of Radiation Oncology Informatics. - 2012. - vol. 4. -№1. - pp. 1-23.
180. Fu K. A survey on image segmentation / K.Fu, J.Mui // Pattern Recognition.- 1981.-№13.- pp. 3-16.
181. Garofalo F. Substructure Formation in Iron during Creep at 600°C / F.Garofalo, L.Zwell, A.S.Keh, S.Weissmann - Acta Metall. – 1961. – 9. – P. 721.
182. Gonzalez R.C. Digital Image Processing / R.C.Gonzalez, P.Wintz. – Addison–Wesley. Reading. Massachusetts. – 1987. – 505 p.

183. Gonzalez R., Woods R. (2002). Digital image processing (2nd ed.). NJ:Prentice Hall.
184. Gostev I. M. About variability of using of methods of the shape identification based on geometrical correlation / I.M.Gostev // Advanced Materials Research. - 2014.- Vol. 837 - P. 381-386
185. Gudmundsson, J., Smid, M. (2015). Fast algorithms for approximate Fréchet matching queries in geometric trees. Computational Geometry, 48, 479–494.
186. Haralick R., Shapiro L. (1985). Image segmentation techniques, Computer Vision, Graphics and Image Processing (CVGIP), 29, 100-132.
187. Hebert M. 3D Measurements from Imaging Laser Radars / M.Hebert, E.Krotkov // Image and Vision Computing, April. -1992. - Vol. 10, № 3. - P. 170-178.
188. Horn B.K.P. Robot Vision / B.K.P.Horn . – NY: The MIT Press.- 1986. – 487 p.
189. Internet Microscope Technolog // iMicroТес, Inc. - 2018. - Режим доступа до pecyпcy: <http://www.videotest.ru>.
190. Kallitsis E. Combination of range profile alignment technique with autofocusing postprocessing algorithm for ISAR image optimization /E. Kallitsis, A. Karakasiliotis, P. Frangos// Proc. of CEMA11, Sofia, (Bulgaria, 6-8 October 2011).- 2011.- P.1-7.
191. 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.
192. Kosarevych R.Ya. Computer analysis of characteristic elements of fractographic images / O.Z. Student, L.M. Svirs'ka, B.P. Rusyn, H.M. Nykyforchyn // Fiz.-Khim. Mekh. Mater., 48, No. 4, 53–60 (2012); English translation: Mater. Sci., 48, No. 4, 474–481 (2013).
193. Lucchese L., Mitra S. (2001). Color Image Segmentation: A State-of-the-Art Survey, Image Processing, Vision, and Pattern

- Recognition. Proc. of the Indian National Science Academy (INSA-A), New Delhi, India. 2001, 207-221.
194. Masood, S., Sharif, M., Masood, A., Yasmin, M., & Raza, M. (2015). A Survey on Medical Image Segmentation. *Current Medical Imaging Reviews*, 11, 3–14.
195. Metallographic Equipment and Consumables // PACE Technologies. – 2007. - Режим доступа до ресурсу: <http://www.metallographic.com>
196. Metallography // Microvision. – 2017. - Режим доступа до ресурсу: http://www.microvision.fr/produits/grain/grain_uk.htm.
197. Newman T.S. A Survey of Automated Visual Inspection / T.S.Newman // *Computer Vision and Image Understanding*, 1995, 61, N 2, p. 231-262.
198. Norouzi, A. (2014). Medical Image Segmentation Methods, Algorithms, and Applications. *IEEE Technical Review*, 31, 199–213.
199. Nykyforchyn H.M. Evaluation of the influence of shutdowns of a technological process on changes in the in-service state of the metal of main steam pipelines of thermal power plants / H.M. Nykyforchyn, O.Z. Student, H.V. Krechkovs'ka, A.D. Markov // *Materials Science*. – 2010. – 46, № 2. – P. 177-189.
200. Nykyforchyn H. M. Effect of ageing of steam pipeline steel on its fatigue crack growth resistance / H. M. Nykyforchyn, O. Z. Student, B. P. Loniuk and I. R. Dzioba // *Proc. Eighth Int. Conf. Mechanical Behaviour of Materials – ICM8: Progress in Mechanical Behaviour of Materials*, Victoria, Canada, 1999. / Eds. F. Ellyin and J. W. Provan. – Victoria: Fleming Printing Ltd., 1999. – Vol.1: Fatigue and Fracture. – P. 398–403.
201. Ostash O.P. Structural microdamageability of steels of the steam pipelines of thermal power plants / O.P. Ostash, A. I. Kondyr, O.V. Vol'demarov, P.V. Hladysh, M.V. Kucherenko // *Materials Science*. – 2009. – 45, № 3. – P. 340-349.
202. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms / N.Otsu // *IEEE Trans. Sys., Man., Cyber.* -1979.- vol.9.- p. 62-66.
203. 213 Pentland A.P. Depth of Scene from Depth of Field / A.P.Pentland // *Proc. Image Understanding Workshop.*- 1982 – P. 253-259.

204. Pratt W.K. Digital Image Processing: PIKS Scientific inside (4th ed.) Wiley-Interscience, John Wiley&Sons, Inc., Los Altos, California, 2007, 782 p.
205. Roberts L. (1965). Machine perception of three dimensional solids, in J. Tippett et al. Optical and electro-optical information processing, 159-197.
206. Pal N. A survey on image segmentation techniques /N. Pal, S.Pal // Pattern Recognition.-1993.-№26, pp. 1277-1294.
207. Prewitt J. Object enhancement and extraction / J.Prewitt -In: Picture Processing and Psychopictories (B.Lipkin and A.Rosenfeld, Eds). – New York: Academic Press.- 1970. – P. 75–149.
208. Rebordao J.V. Lookup table loadings for image processing with controlled knots /J.V. Rebordao // Computer vision, graphics and image processing. – 1989. – Vol. 47, № 2. – P. 189 – 202.
209. Rosenfeld A. (1981) Image pattern recognition, Proceedings of IEEE, 69(5), 596-605.
210. Schlesinger, M. I., Vodolazskiy, E. V., Yakovenko, V. M. (2016). Frechet Similarity of Closed Polygonal Curves. International Journal of Computational Geometry, 26, 53–66.
211. Sergiyenko O.Yu. Optoelectronic System for Mobile Robot Navigation / O.Yu. Sergiyenko // Springer-Allerton Press, Inc., Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, October. - 2010. -Vol. 46, № 5. - P. 414-428.
212. Shahinian P. Influence of Grain Size on High Temperature Properties of Monel / P.Shahinian, J.R.Lane //. – Trans. ASM. – 1953. – 45. - 177.
213. Shanmugavadivu P. Fractal Dimension Based Texture Analysis of Digital Images / P.Shanmugavadivu, V.Sivakumar. // International Conference on Modeling, Optimization and Computing, Procedia Engineering 38 (2012), pp. 2981 – 2986.
214. Skarbek W., Koschan A. (1994). Color Image Segmentation - A Survey, Technischer Bericht, Technical University of Berlin, 94-32.
215. Standart Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis. ASTM E 1382-97.

216. Student O. Z. Accelerated method for hydrogen degradation of structural steel /O. Z.Student // Material Science. – 1998. – 34, № 4. – P. 497–507.
217. Talab A. Detection crack in image using Otsu method and multiple filtering in image processing techniques / A.Talab, Z.Huang, F.Xi, L.HaiMing // Optik - International Journal for Light and Electron Optics.-Vol. 127.- Issue 3.- 2016.- Pages 1030-1033.
218. Titov D.V. Correction Device of Distortion / D.V.Titov, T.A.Shirabakina // „Information and Telecommunication Technologies in Intelligent Systems“. Proc. 5th Int. Conf. Spain.-2007.- p. 122—124.
219. Vincent L. Watersheds in Digital Space: An Efficient Algorithms based on Immersion Simulation / L.Vincent , P.Soille // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.– 1991. – 13, No.6, – P.583-598.
220. 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. Svir's'ka, O. Z. Student // Materials Science, 2011, Volume 47, Issue 3, pp. 393–400. (Scopus, Web of Science)
221. Vorobel R.A. Computer system for measurement parameters of thread on gas–and–oil assortment pipes / R.A.Vorobel, N.V.Опур, I.M.Zhuravel, K.V.Sushchuk. // Праці V Середньоевропейської конференції “Комп’ютерні методи і системи в автоматичі та електротехніці”. Частина 1. Ченстохова, Польща - 16 - 17 сентября, 2003.- p.171-173.
222. Wojnar L. Praktyka analzy obrazu / L.Wojnar, K.Kurzydowski, J.Szala. – Krakow, 2002. – 454 s.
223. Yeo, S. Y., Xie, X., Sazanov, I., & Nithiarasu, P. (2014). Segmentation of biomedical images using active contour model with robust image feature and shape prior. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 30(2), 232–248.

224. Yun Liu. Richer Convolutional Features for Edge Detection / Ming-Ming Cheng, Xiaowei Hu, Kai Wang, Xiang Bai // The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017, pp. 3000-3009.
225. Zhang Y. (2006). Advances in Image And Video Segmentation. USA: IRM Press
226. 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. (Scopus, Web of Science)
227. 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. (Scopus, Web of Science)
228. 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', H.M.Nykyforchyn // Materials Science.- Volume 45.- Number 3.- p. 350-357.
229. 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.- Volume 46.- Number 3.- p. 418-420.
230. Zieliński A. Estimation of the residual life of L17HMF cast steel elements after long-term service / A.Zieliński , J.Dobrzański , G.Golański // Ibid. – 2009. – 34, № 2. – P. 137–144.

Акціонерне товариство
«Укртрансгаз»
Філія «Будівельно-монтажна
фірма "Укргазпромбуд"»



Ukrtransgaz
Joint Stock Company
Branch "Construction Division
Ukrgazprombud"

Будівельно-монтажне
управління №8



ISO 50001
ISO 9001
ISO 14001
OHSAS 18001

Construction
subdivision №8

а/с 61, Україна, 82400, с. Угерсько
Львівська обл., Стрийський р-н
вул. Вокзальна, 3
тел.: +38 (03245)5-84-91,
e-mail: b-office-smu8@utg.ua

s/b 61, 3, Vokzalna St., Ugersko,
Lviv area 82400, Ukraine
tel.: +38 (03245)5-84-91,
e-mail: b-office-smu8@utg.ua

02.08.2018 № 348

На № _____

АКТ

про використання результатів дисертаційного дослідження
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Журавля Ігоря Михайловича

З метою вдосконалення методики неруйнівного контролю об'єктів транспортування і розподілу природного газу було використано ряд наукових положень досліджень Журавля І.М., які викладені у дисертаційній роботі на тему «Інформаційна технологія автоматизованого аналізу металографічних та фрактографічних зображень», зокрема:

- метод обчислення фрактальної розмірності з використанням поверхневого інтегралу, який, на відміну від відомих підходів, дав можливість точніше опрацювати напівтонові зображення об'єктів контролю без необхідності їх бінарного представлення.

- метод обчислення фрактальної розмірності на основі тривимірного представлення поверхні, сформованої інтенсивностями пікселів деякої ділянки цифрового зображення. Він забезпечив підвищену чутливість до незначних змін площі поверхонь ділянок з пошкодженнями, що зробило можливим його використання для моніторингу ознак пошкодження на поверхні матеріалу.

Застосування запропонованих у дисертаційному дослідженні методів аналізу зображень неруйнівного контролю дало можливість підвищити ефективність оцінювання технічного стану об'єктів газотранспортної інфраструктури.

Даний акт не є підставою для проведення фінансових розрахунків.

Начальник БМУ-8

В.М.Гетманчук

ПРИВАТНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ГАЗ ДІМ»

р/р2600301638746, ПАТ
«КРЕДОБАНК», МФО 325365,
ЄДРПОУ 35327608, ПІН 353276013039,
Св. пл. ПДВ №100063417.
E-mail: gaz_dim@ukr.net

79040, м. Львів, вул. Городоцька, 297/4
тел: 245-05-86

Ліцензія серія АД №072244 від 12.08.2012, дозвіл №0355.16.46 від 17.06.2016р.

АКТ

про використання результатів дисертаційного дослідження

Журавля Ігоря Михайловича

**«Інформаційна технологія автоматизованого аналізу металографічних та
фрактографічних зображень»,**

представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології

Даним актом засвідчується, що теоретичні та практичні результати, отримані Журавлем І.М. в дисертаційній роботі «Інформаційна технологія автоматизованого аналізу металографічних та фрактографічних зображень», представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, використовуються у діяльності ПП «ГАЗ ДІМ».

Зокрема, під час проведення моніторингу технічного стану об'єктів газопровідних систем застосовуються розроблені Журавлем І.М. методи, а саме:

- метод бінаризації напівтонових зображень з використанням оптимального щодо деталізації значення порогу. Даний метод дав можливість ефективно локалізувати структурні складові, дефекти та обчислювати їх геометричні розміри;

- метод калібрування цифрових відеокамер із застосуванням перетворення Хафа. На відміну від відомих підходів він дав можливість автоматизувати процес усунення геометричних спотворень на зображеннях, які спричинені дисторсією оптичних систем, що забезпечило підвищену точність метричних вимірювань загалом.

Зазначені підходи дали можливість підвищити ефективність виявлення небезпечних чинників при експлуатації об'єктів газотранспортної системи. Таким чином, можна стверджувати, що результати дисертаційного дослідження Журавля Ігоря Михайловича мають практичне значення.

Директор ПП «ГАЗ ДІМ»



Чопик Д.І.

Товариство з обмеженою відповідальністю
з транспортного будівництва у західному регіоні фірма

“ЗАХІДТРАНСБУД”

ТзОВ “ЗАХІДТРАНСБУД”

LTD “ZAHIDTRANSBUD”

Україна, 79044, м. Львів
вул. Мельника, 8
Тел. +38 (032) 237 - 24 - 14
Тел. +38 (032) 237 - 23 - 88
Тел. /факс/ +38 (032) 237 - 24 - 16
E-mail: planovuy0@gmail.com



Ukraine, 79044, Lviv
Melnik str., 8
Tel. +38 (032) 237 - 24 - 14
Tel. +38 (032) 237 - 23 - 88
Tel./Fax +38 (032) 237-24-16
E-mail: planovuy0@gmail.com

Р/р 26005010044139 у ПАТ АБ «Наддніпрявський» МФО 328209, ЄДРПОУ 30478068

ЗОВ «Лесина» 20/8 р. № 16

А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи «Інформаційна технологія автоматизованого аналізу металографічних та фрактографічних зображень»

Журавля Ігоря Михайловича

Цей акт підтверджує, що наукові та практичні результати дисертаційної роботи Журавля І.М. за темою «Інформаційна технологія автоматизованого аналізу металографічних та фрактографічних зображень», представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, застосовані у ВАТ «Західтрансбуд», яке займається будівництвом та реконструкцією автомобільних шляхів.

Зокрема, 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 використовувалися:

- метод обчислення фрактальної розмірності на основі тривимірного представлення поверхні, сформованої інтенсивностями пікселів деякої ділянки зображення, для моніторингу ознак пошкоджень на поверхні металу;
- методи кількісного оцінювання усередненого розміру, орієнтування та видовженості зерен металу за їх зображеннями для аналізу рівня деградації матеріалу металокопункцій.

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційного дослідження Журавля І.М. мають вагомим практичне значення, зокрема, при вирішенні задач неруйнівного контролю відповідальних металокопункцій.

Генеральний директор ТзОВ «Західтрансбуд» _____ Діц З.І.



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ



ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО -
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ІНСТИТУТ
З ПРОЄКТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ
ДОРОЖНЬОГО ГОСПОДАРСТВА

УКРДІПРОДОР

ЛЬВІВСЬКА ФІЛІЯ

“ЗАХІДДІПРОШЛЯХ”



79053, м. Львів, вул. Володимира Великого 54,
тел. : (0322) 63-12-55, 63-21-55
тел. /факс : (0322) 63-12-55

25.07.08 N 28

На № _____ від _____

А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи **Журавля Ігоря Михайловича** на тему «Інформаційна технологія автоматизованого аналізу металографічних та фрактографічних зображень» на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології

Цей акт складений про те, що під час робіт у ЛФ «Західдіпрошлях» ДП «Укрдіпрошлях» були застосовані запропоновані Журавлем І.М. методи, які викладені у дисертаційному дослідженні.

При обстеженні проїжджої частини автомобільних шляхів та сталезалізобетонних мостів застосовувався метод бінаризації з використанням оптимального порогу та методи локалізації об'єктів з використанням фрактальних розмірностей, що дало можливість виділити тріщин та оцінити їх метричні характеристики.

Для зеренного складу асфальтобетонів застосовано підходи, які базуються на методах кількісного оцінювання усередненого розміру зерен металу, які дали можливість проаналізувати процентний вміст наповнювачів асфальтобетонів без необхідності випалювання зв'язувальної суміші.

Таким чином, методи, які розроблені у дисертаційному дослідженні Журавля І.М. є перспективними при проведенні контролю якості робіт з асфальтування, а також визначенні фізико-механічних властивостей асфальтобетонів.

Директор ЛФ «Західдіпрошлях»



В.П.Яропуд

Додатки Б. Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати 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.

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.

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.

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.

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.

7. Журавель І.М. Метод бінаризації металографічних зображень з оптимальним порогом / І.М.Журавель // «Штучний інтелект». - 2012. - № 4. - С. 142-147.

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.

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.
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.
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.
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.
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.

19. Воробель Р.А. Використання локального контрасту при виділенні ліній на багатоградаційному 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.

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.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

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 15X1МФ 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.Opyr, 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. Czestochowa, 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.