

ВІДГУК

офіційного опонента Рассомахіна Сергія Геннадійовича на дисертаційну роботу Журавля Ігоря Михайловича «Інформаційна технологія автоматизованого аналізу металографічних та фрактографічних зображень», яку представлено на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 - інформаційні технології

Актуальність теми. У наш час успішність проєктів в будь-якій галузі народного господарства в значній мірі визначається рівнем використання сучасних досягнень науки та техніки. Існує велика кількість різноманітних комп'ютеризованих систем, які застосовуються в медицині, машинобудуванні, ядерній енергетиці тощо. Тенденції останніх десятиліть показали ефективність використання систем технічного зору при розв'язуванні багатьох прикладних задач. Постійний розвиток цифрових пристроїв сприяє модифікації та розробленню нових методів, інформаційних технологій та систем опрацювання та аналізу даних. Це визначило напрямок дисертаційного дослідження.

У дисертаційній роботі проведено аналіз сучасних методів опрацювання та аналізу зображень. Встановлено, що існуючий рівень інформаційних технологій не задовольняє потреб дослідників-матеріалознавців за рівнем автоматизації, точністю та швидкістю опрацювання металографічних зображень. Необхідність врахування особливостей предметної області, за яку у роботі вибрано аналіз металографічних та фрактографічних зображень, дало можливість визначити складність науково-прикладної проблеми дослідження. Вона пов'язана, насамперед, з відсутністю алгоритмів, моделей, методів та інформаційних технологій для вирішення різних проблемно-орієнтованих завдань автоматизованого аналізу металографічних та фрактографічних зображень. Особливості вирішення поставленої проблеми полягають у складній мікроструктурі вхідних зображень, труднощах її формального опису та різноманітні завдань, які виникають при аналізі цих даних, що вимагає автоматизації та комп'ютерної підтримки цього процесу.

Таким чином, актуальність теми даного дослідження полягає, насамперед у тому, щоб розробити інформаційні технології, які будуть ефективно використовуватись для аналізу металографічних та фрактографічних зображень та забезпечать необхідний рівень автоматизації, точності та швидкодії.

Слід зазначити, що робота проводилася у відповідності до наукових напрямів, які виконувалися в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України та у Національному університеті «Львівська політехніка».

Оцінка змісту дисертаційної роботи та її завершеності. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Вона складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 230 найменувань і додатків.

У вступі проведено обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання дослідження та наукову новизну.

Показаний зв'язок з науково-дослідними роботами, а також особистий внесок дисертанта.

У **першому** розділі роботи досліджено сучасний стан проблеми створення інформаційних технологій для вирішення завдань обробки та аналізу зображень у неруйнівному контролі та технічній діагностиці. В результаті проведеного аналізу встановлено, що використання систем аналізу зображень дає можливість автоматизувати процес аналізу дефектності виробів, що призводить до підвищення його швидкодії та ефективності в цілому. У роботі показано, що ефективність досліджуваних систем залежить від якості вхідних зображень, адекватності математичних моделей даних, повноти врахування особливостей предметних областей, методів аналізу зображень зі складною структурою тощо. На основі проведених досліджень виявлено та узагальнено основні недоліки, які притаманні більшості відомих комп'ютеризованих систем обробки, аналізу та розпізнавання металографічних зображень – низька інформативність вхідних даних, наявність суб'єктивного людського фактору при проведенні аналізу зображень, ручний вибір параметрів налаштувань тощо.

Визначені напрями досліджень стосовно створення інформаційної технології обробки, аналізу та розпізнавання металографічних і фрактографічних зображень. Таким чином, підвищення точності та швидкодії автоматизованого аналізу візуальних даних як нового інструмента сучасних інформаційних технологій опрацювання металографічних та фрактографічних зображень залишається не вирішеною науково-прикладною проблемою та свідчить про актуальність виконання дисертаційного дослідження та визначають тему і напрям дисертаційної роботи.

Другий розділ роботи присвячено побудові методів локалізації об'єктів на зображеннях, які характеризуються складною структурою з метою їх подальшого кількісного аналізу.

Розроблено імітаційну модель калібрування цифрових відеокамер, яка базується на перетворенні Хафа. Вона дає можливість усунути геометричні спотворення, найбільш поширеними серед яких є дисторсія, що проявляється при формуванні цифрових зображень через недосконалість оптичних систем. Її застосування автоматизує процес усунення геометричних спотворень, які спричинені недорогими оптичними системами та призводить до зменшення похибки при аналізі зображень, що особливо доцільно при проведенні метричних вимірювань. Розроблено метод бінаризації напівтонових зображень з використанням оптимального значення порогу, який обчислюється із застосуванням кореляційної функції та усуває суб'єктивний фактор у виборі порогу бінаризації, що надає нові можливості щодо аналізу зображень, зокрема, металографічних, отриманих, за різних умов освітлення. Побудовано адаптивний метод бінаризації, у якому порогове значення інтенсивності обчислюється на основі аналізу особливостей локальних околіїв, що дозволяє усунути блочну структуру на результуючому зображенні та адаптувати його стосовно різних класів зображень. Проведено модифікацію методу

статистичної сегментації, який на відміну від відомих підходів, через використання відповідних розмірів локальних апертур забезпечує ресстрацію підвищеної детальності зображень об'єктів зацікавлення різних розмірів. Запропоновано модифікований метод Канні до виділення границь об'єктів, який за допомогою адаптивного вибору локальних околів дозволяє ефективно виділяти різнорозмірні об'єкти на зображенні, що актуально при аналізі металографічних зображень зі складною структурою. Запропонована модифікація методу багатомасштабної статистичної диференціації на основі використання адаптивного коефіцієнта підсилення детальності зображення для покращання слабконтрастних зашумлених зображень, що дає можливість підвищувати їх візуальну якість та ефективно використовується при опрацюванні рентгенографічних зображень неруйнівного контролю. Розроблені у цьому розділі роботи складові інформаційної технології дають можливість локалізувати об'єкт інтересу на зображенні для подальшого аналізу.

У **третьому розділі** розроблено методи аналізу з використанням фрактальних розмірностей, які є ефективним інструментарієм для опрацювання зображень зі складною структурою та забезпечують більшу чутливість до змін конфігурації текстури, чого не може врахувати цілочисельна евклідова геометрія. Розроблено метод обчислення фрактальної розмірності, який, на відміну від відомих підходів завдяки використанню поверхневого інтегралу, дає можливість аналізувати напівтонові зображення без необхідності їх бінарного представлення. Внаслідок проведених досліджень встановлено, що фрактальна розмірність володіє інваріантною ознакою при деяких видах афінних перетворень зображення, що робить її придатною для аналізу зображень однієї сцени, які сформовані при різних умовах освітлення, з різним коефіцієнтом масштабування та різним кутом повороту. Проведені у дисертаційній роботі експериментальні дослідження показали, що точність аналізу зображень з використанням фрактальних розмірностей суттєво залежить від локальної апертури, розмір якої має бути співмірним з розміром об'єктів обробки. Це особливо актуально при аналізі текстури з використанням поля фрактальних розмірностей. У цьому розділі автором розроблено нові інструменти аналізу складноструктурованих візуальних даних, прикладом яких можуть бути фрактографічні та металографічні зображення.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячено розробленню методів кількісного аналізу структурних елементів металографічних зображень з використанням фрактальних розмірностей, які досліджувалися у попередній частині роботи. На основі спектру узагальнених фрактальних розмірностей Реньї розроблено метод класифікації текстур фрактографічних зображень, який дає можливість класифікувати досліджувані зображення текстур за мінімальною відстанню Чебишева. Побудовано метод виділення об'єктів на зображенні з використанням фрактальних розмірностей, який через адаптацію розміру ковзної локальної апертури дає можливість одночасно локалізувати об'єкти різних розмірів. На основі фрактальних розмірностей розроблено

метод визначення усередненого розміру зерен металу за металографічними зображеннями, який забезпечує автоматизацію процесу обчислень та можливість проведення аналізу металографічних зображень з незамкнутими та розривними межами зерен без необхідності їх інтерактивного редагування. Побудовано метод визначення фрактальної розмірності на основі тривимірного представлення зображень неруйнівного контролю, який забезпечує підвищену, у порівнянні з відомими методами, чутливість до невеликих змін площі пошкоджених ділянок та використовується для моніторингу втомного пошкодження плакованих алюмінієвих сплавів.

У **п'ятому** розділі дисертаційної роботи розроблено методи визначення метричних характеристик структурних об'єктів на металографічних та фрактографічних зображеннях. Удосконалено методологію визначення геометрії зерен, яка забезпечує автоматизацію опрацювання зображень, відповідає вимогам нормативних документів, дає можливість аналізувати зображення з нечітко окресленими та розривними границями зерен, підвищує точність проведених обчислень. Розроблено метод визначення орієнтування та видовженості зерен на металографічних зображеннях за допомогою перетворень Хафа.

Шостий розділ дисертаційної роботи присвячено побудові методів моделювання і візуалізації структури металевих матеріалів за їх зображеннями та проведено інтегрування розроблених методів в єдину інформаційну технологію автоматизованого аналізу металографічних та фрактографічних зображень. Запропоновано метод моделювання меж зерен металу за допомогою діаграм Воронова, який надає нові можливості щодо аналізу зеренної структури металів, зокрема, у комп'ютеризованих системах прогнозування деградації металоконструкцій. Розроблено методи, які через модифікацію колірної палітри, забезпечують зменшення об'єму зображень та підвищення інформативності при їх візуальному аналізі. На основі побудованих у роботі методів та програмних засобів їх реалізації синтезовано складові інформаційної технології для розв'язування окремих задач обробки та аналізу 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.

У **висновках** наведені основні наукові та практичні результати, а також викладені рекомендації для їх застосування при розробленні інформаційно-аналітичних систем автоматизованого аналізу металографічних та фрактографічних зображень.

У **додатках** наведено перелік публікацій автора та акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.

Основні наукові результати досліджень та наукова новизна дисертації. Розв'язана важлива науково-прикладна проблема - підвищення точності та швидкодії автоматизованого аналізу зображень шляхом розробки

системної концепції модельних підходів до опрацювання зображень з врахуванням особливостей предметної області, що є основою створення нової інформаційної технології.

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 напряму 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 перелади 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.

Обґрунтованість наукових положень. Усі наукові результати, що подані в роботі, достатньо обґрунтовані, про що свідчить аналіз змісту розділів роботи та використаний інструментарій досліджень. Отримані результати, висновки і рекомендації логічно і математично аргументовані. **Достовірність** отриманих у роботі результатів підтверджується відповідністю результатів, які отримані за допомогою моделювання розроблених методів та дослідниками-матеріалознавцями на практиці. Всі методи, які запропоновані в дисертаційній роботі, обґрунтовані чіткими математичними викладками і підтверджені результатами обчислювальних експериментів.

У докторській дисертації Журавля Ігоря Михайловича не використані результати його дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, що була присвячена локально-адаптивним методам підвищення контрастності зображень і захищена в 2001 році.

Найбільш вагомими новими науковими результатами, що отримано в дисертації, на мій погляд, є наступні.

Науковий результат 1 – у дисертаційній роботі вперше запропоновано парадигму та системну концепцію вирішення науково-прикладної проблеми побудови інформаційної технології, яка через створення нових способів кількісного аналізу зображень у прикладній галузі, за яку вибрано металографію, забезпечує підвищення рівня автоматизації, швидкодії та точності аналізу металографічних та фрактографічних зображень.

Науковий результат 2 – розроблено імітаційну модель калібрування цифрових зображень із застосування перетворення Хафа, яка використовується при оптичному формуванні зображень. Практична цінність результату полягає в автоматизації процесу усунення геометричних спотворень, які спричинені дисторсією недосконалих оптичних систем. У роботі показано, що при формуванні металографічних та фрактографічних зображень за допомогою оптичних мікроскопів, застосування розробленого методу забезпечує підвищення точності метричних вимірювань мінімально на 5%.

Науковий результат 3 – побудовано метод бінаризації напівтонових зображень з використанням оптимального щодо деталізації значення порогу. Практична цінність методу полягає в усуненні суб'єктивізму при виборі порогу бінаризації та з'являється можливість аналізу металографічних зображень, отриманих, зокрема, за різних умов освітлення.

Науковий результат 4 – розроблено та розвинуто методи обчислення фрактальних розмірностей. Метод обчислення фрактальної розмірності з використанням поверхневого інтегралу дає можливість опрацьовувати напівтонові зображення без необхідності їх бінарного представлення. Отримав подальший розвиток метод обчислення фрактальної розмірності на основі тривимірного представлення поверхні інтенсивностей зображення, який забезпечив підвищену чутливість до незначних змін площі структурних складових. Практична цінність методів полягає в зменшенні середньої похибки при локалізації об'єктів інтересу у порівнянні з відомими аналогами та зробило

можливим їх використання для моніторингу ознак утомних пошкоджень на поверхні матеріалу.

Науковий результат 5 – удосконалено методологію обчислення усередненого діаметра зерен металу за металографічними зображеннями, яка базується на основі використання технологій опрацювання зображень, обчислення фрактальних розмірностей та у відповідності до нормативних документів. Практична цінність полягає в можливості обчислення усередненого діаметру зерен в автоматизованому режимі, при якому за вхідні дані можуть використовуватися металографічні зображення з нечітко окресленими та розривними межами зерен, а застосування коригуючого коефіцієнта дає можливість зменшити похибку обчислень мінімум в 1,3 рази.

Науковий результат 6 – побудовано метод кількісної оцінки орієнтування та видовженості зерен на металографічних зображеннях за допомогою перетворень Хафа. Цей метод має практичне застосування при аналізі ознак пластичного деформування матеріалів та визначенні напрямку прикладених сил, які безпосередньо корелюють з видовженістю та орієнтуванням зерен.

Науковий результат 7 – розроблено модель зеренної структури металу за допомогою діаграм Вороного, який розширює можливості щодо теоретичних досліджень, спрямованих на прогнозування впливу різних чинників на мікроструктуру металів. Застосування розробленої моделі у комп'ютеризованих системах моделювання процесів поведінки різних металоконструкцій уможливить зменшення похибки аналізу завдяки врахуванню властивостей структури матеріалу.

В сукупності наукові результати є реалізацією системної концепції до 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.

В роботі наведені приклади програмних реалізацій запропонованих методів та моделей і проведено порівняння з відомими аналогами, що підтверджує їх адекватність та ефективність. Новизна перелічених наукових положень підтверджується проведенням дисертантом аналізом літературних джерел, апробацією основних наукових положень та отриманих результатів в статтях, тезах науково-технічних конференцій та семінарах.

Практична цінність результатів роботи полягає у тому, що на основі розроблених теоретичних засад, імітаційних моделей і методів створено нові алгоритми та програмні засоби. Вони дають можливість підвищити точність аналізу геометричних параметрів об'єктів за їх зображеннями, збільшити швидкодію через автоматизацію опрацювання, розширити можливість аналізу металографічних зображень низької візуальної якості, моделювати структуру матеріалу тощо. Усі розроблені методи реалізовано як комплекс програм для досліджень актуальних практичних задач аналізу металографічних та фрактографічних зображень. Практичні результати дисертаційних досліджень

впроваджено у філії будівельно-монтажної фірми «Укргазпромбуд» ПАТ «Укртрансгаз», ПП «ГАЗ ДІМ», ТзОВ «Західтрансбуд» та ЛФ «Західдіпрошлях» ДП «Укрдіпрошлях». Впровадження результатів дослідження підтверджено відповідними актами.

Повнота викладення основних результатів та висновків в опублікованих працях. Основні наукові результати дисертації достатньо повно відображені 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.

Відповідність дисертаційної роботи спеціальності. Дисертація Журавля І.М. за змістом, обсягом та оформленням повністю відповідає спеціальності 05.13.06 - «Інформаційні технології», за якою вона представлена до захисту.

Оформлення дисертації та автореферату. Дисертація і автореферат викладені логічно, послідовно, грамотно, математично коректно, оформлені згідно з вимогами чинних законодавчих актів України. Матеріал дисертації достатньо проілюстрований схемами, рисунками, графіками та таблицями.

Автореферат містить всю необхідну для оцінки роботи інформацію, зокрема: основні положення, висновки та рекомендації тощо. Зміст автореферату повністю відповідає дисертації.

Недоліки і зауваження по роботі:

1. Розв'язок поставленої автором задачі по розробленню інформаційної технології, яка забезпечить автоматизацію, підвищення точності та швидкодії аналізу зображень у заданій прикладній галузі – складне і актуальне завдання. Доцільно було б акцентувати увагу та тому, чи мають розроблені у роботі моделі та методи вузький проблемно-орієнтований характер чи їх можна застосувати у інших прикладних галузях стосовно іншого класу зображень.

2. При побудові методів не зазначено чи впливатиме роздільна здатність зображень на точність аналізу та його обчислювальну складність.

3. У багатьох локальних методах аналізу зображень не акцентовано увагу на виборі розміру ковзної апертури.

4. В другому розділі дисертації при розробленні методу усунення геометричних спотворень не досліджено вплив кривизни поверхні досліджуваного зразка металу на точність метричних вимірювань його мікроструктури.

5. У четвертому розділі при розробленні методу оцінювання усередненого діаметра зерен металу з використанням фрактальних розмірностей не зазначено чи отримана залежність (рис. 4.5) усередненого діаметра зерна від фрактальної розмірності мікроструктури сталі є універсальною характеристикою чи залежить від марки сталі.

6. У комп'ютеризованому методі контролю величини зерна (п'ятий розділ) не зазначено принципи розміщення початкових точок (рис. 5.2).

7. У тексті дисертаційної роботи зустрічаються граматично-стилістичні неточності ("обробка" зображень чи "опрацювання", "піксель" чи "піксел" тощо).

Перелічені зауваження не впливають на загальний високий науковий рівень і практичну цінність дисертаційної роботи.

Висновки.

1. Дисертаційна робота Журавля І.М. «Інформаційна технологія автоматизованого аналізу металографічних та фрактографічних зображень» є завершеною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують актуальну наукову проблему підвищення точності та швидкодії автоматизованого аналізу зображень шляхом розробки системної концепції модельних підходів до опрацювання зображень з врахуванням особливостей предметної області, що є основою створення нової інформаційної технології

2. Робота має достатнє практичне впровадження, як за актуальністю, і перспективами розширення. Робота повністю задовольняє вимогам, які висуваються до робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за п.п. 9, 10, 12 "Порядку присудження наукових ступенів", а її автор, Журавель Ігор Михайлович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 - «Інформаційні технології».

Офіційний опонент:

Завідувач кафедри
безпеки інформаційних систем і технологій
Харківського національного університету
імені В.Н. Каразіна, д. т. н., доцент



С.Г. Рассомахін

