

В І Д З И В

офіційного опонента доктора технічних наук, професора Бісікала Олега Володимировича на дисертаційну роботу Журавля Ігоря Михайловича «Інформаційна технологія автоматизованого аналізу металографічних та фрактографічних зображень», яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 - інформаційні технології.

Актуальність виконаної роботи.

На сьогодні інформаційні технології активно використовуються у всіх сферах життєдіяльності, але пріоритетним є їх розвиток в напрямку підвищення комфорту та безпеки людей. Важливою складовою цього напрямку є безпека різноманітних відповідальних об'єктів та металоконструкцій, які у своїй більшості вже відслужили встановлений термін експлуатації, або підходять до його завершення. Тому подальша безпечна експлуатація призводить до необхідності їх постійного моніторингу на предмет деградації металу. Первинним, звичайно, є візуальний контроль, але людина не може справитися з аналізом складної структури металу та забезпечити необхідну продуктивність її опрацювання, тому кількісний аналіз візуальних даних доцільно перекласти на обчислювальні системи. Існуючі комп'ютеризовані системи аналізу зображень мають, здебільшого, універсальний характер та можуть реалізовувати такі функції як формування бази даних зображень, коригування їх інтенсивностей, підсилення контрастності тощо, але не придатні для вирішення вузькоспеціалізованих задач. Це призводить до того, що аналіз зображень металу, які характеризуються складною структурою, покладається на людину-оператора. Відсутність автоматизації при опрацюванні візуальних даних та наявність людського фактору призводить до низької швидкодії, неоднозначностей та похибок при їх аналізі. Тому актуальною є розробка інформаційних технологій опрацювання та аналізу зображень складної текстури для певних предметних областей. У дисертаційній роботі за предметну область вибрано аналіз металографічних та фрактографічних зображень. Це дало можливість автору сформулювати чіткий перелік задач, які спрямовані на вирішення поставленої науково-прикладної проблеми. Разом із тим, більшість розроблених у дисертаційній роботі методів та моделей можуть застосовуватися до опрацювання інших класів зображень у інших прикладних галузях.

В дисертації проведено досить повний і змістовний аналіз сучасних комп'ютеризованих систем, методів та моделей аналізу зображень як загалом так і у даній предметній області, який підтвердив необхідність розробки нової інформаційної технології

аналізу металографічних та фрактографічних зображень.

Дисертація І.М.Журавля присвячена (*об'єкт дослідження*) вивченню процесів кількісного аналізу структурних складових металографічних та фрактографічних цифрових зображень.

Необхідність проведених досліджень визначається потребою розробки предметно-орієнтованих математичних моделей, методів та інформаційної технології аналізу зображень у металографії, які забезпечать підвищення рівня ефективності, а саме автоматизації, швидкодії та точності опрацювання візуальних даних.

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» Міністерства освіти і науки України, зокрема, “Створення математичних моделей фізичних явищ на базі теорії апроксимації, покращання зображень та розпізнавання образів” (2002–2004, Постанова Бюро відділення ФТПМ НАН України № 10 від 11.06.2002, р.н. 0102U002668); “Створення інтелектуальних інформаційних технологій розпізнавання дефектності об'єктів та аналізу їх геометричних параметрів при технічній діагностиці” (2005–2006, Постанова Бюро відділення ФТПМ НАН України № 9 від 24.05.2005, р.н. 0105U004306); “Розроблення автоматизованих методів кількісного оцінювання розподілу структурних складових та встановлення їх зв'язку з механічними властивостями для ошаднолегованих теплостійких сталей”(2007–2011, Постанова Бюро відділення ФТПМ НАН України № 19 від 26.12.2006 р., р.н. 0107U004067); “Розроблення комп'ютеризованих методів кількісного аналізу елементів зламів і структури трубних сталей, спричинених їх деградацією” (Постанова Бюро відділення ФТПМ НАН України № 13 від 04.10.2011 р., р.н. 0112U002779); “Розроблення компонентів для синтезу інтегрованих автоматизованих систем управління”, кафедральна науково-дослідна робота (державна реєстрація № 0114U001232).

Предметом досліджень дисертаційної роботи є методи, моделі та засоби інформаційної технології автоматизованого аналізу металографічних та фрактографічних зображень. При цьому вивчення змісту дисертації показало, що автор ретельно проаналізував сучасний інструментарій обробки, аналізу та розпізнавання зображень, провів глибокий аналіз найбільш відомих систем аналізу діагностичних зображень у вибраній предметній області та неруйнівному контролю загалом (230 джерел в списку літератури).

Аналіз рівня досягнутих результатів в області об'єкту і предмету досліджень (вступ і перший розділ) дозволив виявити недоліки існуючих методів та систем аналізу металографічних та фрактографічних зображень і сформулювати ряд задач, для розв'язання яких потрібні нові моделі та методи пошуку, локалізації та кількісного аналізу

інформативних мікроструктурних елементів на металографічних та фрактографічних зображеннях і створення на цій основі інформаційної технології, яка придатна для використання під час моніторингу стану металевих конструкцій. При вирішенні сформульованої науково-прикладної проблеми в роботі використано сучасні методи та технології аналізу зображень, методи імітаційного моделювання.

Таким чином, *актуальність* дисертаційної роботи *обумовлена необхідністю* 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.

Наукова новизна дисертаційних досліджень.

В дисертаційній роботі знайшли відображення наукові й практичні результати, що відносяться до наступних напрямків досліджень: розроблення інформаційних технологій для побудови автоматизованих систем технічного діагностування; моделювання предметних галузей інформаційних систем на підґрунті створення та застосування відповідних інформаційних технологій. Це дозволяє стверджувати, що тема і зміст дисертації повністю відповідають паспорту спеціальності 05.13.06 - інформаційні технології.

В роботі поставлені і вирішені задачі наукового дослідження, які умовно можна розділити на чотири групи:

Ефективність аналізу суттєво залежить від якості вхідних зображень та точності локалізації об'єктів інтересу. Тому *перша* група задач пов'язана із розробкою методів попередньої обробки та виділення об'єктів на зображеннях зі складною структурою. Серед методів цієї групи слід виділити наступні. З застосуванням перетворення Хафа побудовано метод калібрування цифрових зображень, який використовується в оптичній мікроскопії при формуванні металографічних та фрактографічних зображень. На відміну від відомих аналогів він дозволяє автоматизувати процес усунення геометричних спотворень, які спричинені дисторсією недосконалих оптичних систем, що забезпечує підвищення точності метричних вимірювань (п. п. 2.1 дисертації). Також розроблено 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 (п. п. 2.3 дисертації).

Друга група поєднує задачі визначення метричних характеристик структурних

складових на металографічних зображеннях із застосуванням технологій обробки, аналізу та розпізнавання візуальних даних. Для вирішення цих задач у дисертаційній роботі удосконалено методологію визначення усередненого діаметра зерен металу за металографічними зображеннями. В результаті розроблено методи, які ґрунтуються на технологіях опрацювання зображень та у відповідності до нормативних документів, якими регламентуються проведені дослідження. Вони забезпечують можливість обчислення усередненого діаметру зерен в автоматизованому режимі, при якому за вхідні дані можуть використовуватися металографічні зображення з нечітко окресленими та розривними межами зерен (п. п. 5.1, 5.2 дисертації). Розроблено метод обчислення усередненого діаметра зерен металу, який базується на вимогах нормативних документів та за допомогою застосування коригуючого коефіцієнта, забезпечує підвищену на 30% точність оцінки (п. п. 5.3 дисертації). Побудовано метод кількісного оцінювання орієнтування та видовженості зерен на металографічних зображеннях за допомогою перетворень Хафа. Це створює нові можливості щодо аналізу ознак пластичного деформування матеріалів та визначення напрямку прикладених сил, які безпосередньо корелюють з видовженістю та орієнтуванням зерен (п. п. 5.5 дисертації).

Оскільки фрактальна розмірність є більш чутливою до змін конфігурації структури, чого не може врахувати цілочисельна евклідова геометрія, тому *третья* група задач пов'язана з кількісним аналізом структурних елементів металографічних зображень на основі технологій обчислення фрактальних розмірностей. Для вирішення цієї групи задач удосконалено метод обчислення фрактальної розмірності з використанням поверхневого інтегралу, який дає можливість опрацювати напівтонові зображення без необхідності їх бінарного представлення та забезпечує меншу середню похибку при локалізації об'єктів інтересу у порівнянні з відомими аналогами (п. п. 3.2 дисертації). 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 (п. п. 4.5 дисертації). Побудовано метод визначення усередненого розміру зерен металу за металографічними зображеннями, який дозволяє автоматизувати процес обчислення та аналізувати металографічні зображення з незамкнутими та розмитими межами зерен без необхідності їх інтерактивного редагування (п. п. 4.3 дисертації).

Четверта група охоплює задачі розроблення інформаційної технології моделювання мікроструктури металів, обробки та аналізу металографічних і фрактографічних зображень.

Для виконання поставлених задач розроблено модель зеренної структури металу за допомогою діаграм Вороного, яка розширює можливості щодо теоретичних досліджень, спрямованих на прогнозування впливу різних чинників на мікроструктуру металів та дає можливість виявлення певних залежностей між фізико-механічними властивостями матеріалу та його мікроструктурою. На основі проведених у дисертаційній роботі досліджень побудовано нову інформаційну технологію аналізу металографічних та фрактографічних зображень. Це досягається через розроблення нових способів кількісного оцінювання геометрії та розподілу їх структурних елементів. Відмінною рисою побудованої інформаційної технології є те, що її основу становлять розроблені у роботі методи, які забезпечують автоматизований, а деякі автоматичний режим опрацювання зображень, не вимагають постійних переналаштувань параметрів та забезпечують вищу точність обробки у порівнянні з відомими аналогами. Як наслідок, розроблена інформаційна технологія не потребує постійного візуального аналізу з боку оператора на кожному кроці опрацювання, що сприяє підвищенню швидкодії обробки зображень. Слід також зазначити універсальність і практичну спрямованість отриманих результатів, більшість із яких можуть застосовуватися для аналізу зображень інших класів і з іншої прикладної галузі.

Достовірність наукових положень і результатів.

При проведенні досліджень у дисертаційній роботі використано методи комп'ютерного моделювання. Реалізовані моделі цілком коректні, що підтверджується співставленням з результатами інших авторів і експериментальною перевіркою на точність і адекватність. Моделювання проводилося з використанням сучасних програмних пакетів, призначених для розв'язання задач обробки, аналізу і розпізнавання зображень та розроблених автором програмних засобів. Застосовані у роботі методи дослідження загально визнані і забезпечують достатню точність і відтворюваність результатів. Правильність висновків і рекомендацій по застосуванню запропонованих методів та алгоритмів перевірена чисельними експериментами та імітаційним моделюванням.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації.

Грунтовний аналіз основних методів обробки, аналізу та розпізнавання металографічних та фрактографічних зображень дозволив дисертантові запропонувати інформаційну технологію, яка базується на нових методах кількісного оцінювання геометрії та розподілу елементів їх мікроструктури і забезпечує підвищений рівень автоматизації, точності та швидкодії аналізу металографічних та фрактографічних зображень. Серед цих результатів слід виділити метод калібрування цифрових зображень, метод бінаризації

зображень з оптимальним порогом, методологію обчислення усередненого діаметра зерна за металографічним зображенням, метод обчислення фрактальної розмірності на основі поверхневого інтеграла, імітаційну модель зеренної структури металу з використанням діаграм Вороного та інші, які слугували основою для побудови нової інформаційної технології, яка обумовлює отримання нових ефективних рішень для розв'язування завдань аналізу металографічних та фрактографічних зображень.

Отримані результати, висновки і рекомендації логічно і математично аргументовані. Достовірність забезпечується коректною постановкою задач аналізу діагностичних зображень. Всі методи, які запропоновані в дисертаційній роботі, обґрунтовані чіткими математичними викладками і підтверджені результатами чисельних експериментів.

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

Повнота освітлення результатів дисертації.

Результати роботи висвітлені 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 i Web of Science*. Серед них статті в авторитетних журналах «Materials Science», «Штучний інтелект», «Відбір і обробка інформації», «Проблеми програмування» та інші. Це свідчить про визнання наукових результатів і високої кваліфікації автора. Кількість і зміст цих робіт дозволяють зробити висновок про те, що результати дисертаційної роботи опубліковані в достатньому обсязі, пройшли апробацію на 24 вітчизняних та міжнародних науково-технічних конференціях.

Авгореферат повною мірою відображає зміст дисертації.

Практична цінність результатів роботи.

Результати дисертаційної роботи впроваджено 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. (Додаток А, сторінки 312-315 дисертації).

Зауваження щодо змісту й оформленню дисертації.

За змістом дисертації І.М. Журавля можна висловити наступні зауваження:

1. У методі бінаризації зображень з оптимальним порогом при проведенні порівняльного аналізу з відомими аналогами було б доцільно провести порівняння з точки зору обчислювальної складності.
2. Для методів обчислення усередненого діаметру зерен металу, яких у роботі розроблено декілька, слід було дати рекомендації – який саме метод для яких категорій зображень слід використовувати.
3. При обчисленні фрактальної розмірності за методом з використанням поверхневого інтегралу не досліджено вплив розміру ковзної апертури на фрактальну розмірність.
4. Розроблення низки методів обчислення усередненого діаметру зерен металу мотивоване низькою візуальною якістю та наявністю розривів на межах зерен. Для повноти дослідження цих методів вартувало б навести результати їх застосування для аналізу високоякісних металографічних зображень без наявності розривів.
5. Автор значну увагу приділив аналізу зображень з використанням технологій фрактальних розмірностей. Бажано було б більш чітко зазначити передумови та обмеження їх використання.
6. При побудові моделі зеренної структури металу за допомогою діаграм Вороного не вказано для дослідження яких марок металу її можна застосовувати, а перевірку точності та роботоздатності моделі слід було провести з використанням не лише синтезованих, але й реальних металографічних зображень.
7. Третій розділ роботи дещо переобтяжений викладенням засад теорії фрактальних розмірностей. Цей матеріал сприймався б краще за умови глибшої інтерпретації переваг цього підходу з точки зору аналізу металографічних та фрактографічних зображень.
8. У роботі відсутні порівняння запропонованих методів аналізу зображень з популярними сьогодні технологіями обробки зображень на основі методів машинного навчання.
9. У роботі не акцентовано увагу на впливі формату зображень, їх роздільної здатності та розрядності на ефективність розроблених автором методів.

Наведені зауваження не знижують в цілому наукову і практичну цінність дисертації.

Зміст дисертації І.М. Журавля викладено послідовно і логічно. Текст, ілюстрації та формули оформлені відповідно до встановлених вимог.

Загальна оцінка дисертаційної роботи.

На основі вивчення змісту дисертаційної роботи, автореферату і публікацій можна стверджувати наступне. Дисертація І.М. Журавля є завершеним науковим дослідженням, де

виявлена і вирішена **науково-прикладна проблема** побудови інформаційної технології, яка забезпечує підвищення рівня автоматизації, швидкодії та точності аналізу цифрових металографічних та фрактографічних зображень шляхом розробки нових методів опрацювання елементів їх мікроструктури.

У роботі отримані нові результати, що мають наукове і практичне значення. Наведені у роботі наукові положення, технічні рішення і узагальнюючі висновки повністю висвітлені у фахових наукових виданнях, пройшли відповідну апробації та були схвалені на наукових конференціях.

За змістом, обсягом та структурою дисертаційна робота «Інформаційна технологія автоматизованого аналізу металографічних та фрактографічних зображень» повністю відповідає вимогам п.п. 9, 10 і 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 року, а її автор Журавель Ігор Михайлович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 - інформаційні технології.

Офіційний опонент

декан факультету комп'ютерних систем і автоматики
Вінницького національного технічного університету,
доктор технічних наук, професор



Бісікало О.В.

Підпис *Бісікало О.В.*
ПОСВІДЧУЮ
Зав. канцелярією