

## ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Івасенко Ірини Богданівни

*«Оцінювання неоднорідності та пошкодженості конструкційних матеріалів  
методами структурно-адаптивної обробки зображень»*,

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності  
05.02.10 - діагностика матеріалів і конструкцій

**Актуальність теми дослідження.** Оптико-цифрове діагностування є мультидисциплінарним підходом до кількісного аналізу механізмів накопичення пошкоджень та оцінювання процесів деформування і руйнування твердих тіл. За останні двадцять років в рамках цієї нової парадигми склалися принципово нові методи кількісного оцінювання зародження дефектів кристалічної структури, деградації поверхневих шарів, самоорганізації періодичного просторового розподілу нормальних розтягуючих напружень, особливостей розвитку деформаційних процесів в двовимірних і тривимірних підсистемах. Були запропоновані підходи нерівноважної термодинаміки до опису процесів, що розвиваються в ієрархії масштабних рівнів.

Одним з найновіших підходів у цьому напрямку є використання машинного навчання та штучного інтелекту для характеристики зламів матеріалів як способу класифікації та кількісної оцінки даних. Класифікація мікроструктур та аналіз фрактограм є можливими завдяки поєднанню методів аналізу текстури з нелінійним машинним навчанням класифікаторів (з використанням штучних нейронних мереж), для класифікування мікромеханізмів руйнування.

Закономірності пошкодження і руйнування матеріалів визначаються як зовнішніми чинниками, зокрема режимом навантажування, середовищем, так і внутрішніми (мікроструктура) характеристиками, які впливають на їх властивості. Отже, поверхня зламу містить фізично обґрунтовану інформацію щодо впливу зовнішніх факторів на механізми руйнування, й може бути оцінена й проаналізована за підходами фрактодіагностування.

Основними методами фрактодіагностування є аналіз зламів, топографічний аналіз поверхонь руйнування та систематизація одержаної інформації. Такий підхід забезпечує співставлення макрозаконірностей руйнування із мікроструктурою матеріалу, що виконується на основі кількісного аналізу деформаційних полів та їх співставленні з механізмами руйнування на певній ділянці фронту тріщини.

Автоматизація оптико-цифрового діагностування забезпечує кількісне вивчення механізмів пошкодженості та руйнування, простоту та надійність аналізу зображень, можливість співставлення результатів одержаних на різних масштабних рівнях, обробку великих масивів даних.

Тому, актуальність науково-технічної проблеми розроблення методологічних засад побудови методів структурно-адаптивної обробки, моделювання та аналізу зображень, отриманих різними фізичними методами та створення на їх основі

комп'ютеризованих засобів оцінювання стану матеріалів і елементів конструкцій не викликає сумнівів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у відповідності до науково-дослідних програм і тематичних планів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України. Починаючи з 2002 року і включно до 2016 року автор дисертаційної роботи була виконавцем, або відповідальним виконавцем 9 держбюджетних наукових тем, які відповідають напряму дослідження.

Мета роботи полягає у розробленні та підвищенні ефективності застосування методів і засобів структурно-адаптивної обробки зображень, отриманих різними фізичними методами, для діагностики технічного стану матеріалів і поверхонь.

**Наукова новизна роботи** полягає в наступному:

- розроблено новий структурно-адаптивний метод сегментації зварних швів за аналізом радіографічних зображень, що підвищило достовірність класифікації сферичних пор та шлаків.
- розширено набір інформативних ознак, що підвищило достовірність нейромережевої класифікації типу дефектів на основі запропонованої структурно-адаптивної сегментації;
- розроблено новий метод структурно-адаптивної сегментації корозійних пошкоджень за циліндричною колірною моделлю і одномасштабним ретинексом на зображеннях фарбованих поверхонь довільного кольору за нерівномірного освітлення;
- розроблено та апробовано 3D модель поверхневого шару матеріалу із зміцнюючими частинками, яка є основою порівняння експериментальних і змодельованих зображень частинок карбиду кремнію в поверхневому шарі алюмінієвого сплаву, що є основою для оптимізації його механічних властивостей;
- запропоновано метод структурно-адаптивної сегментації зон руйнування на фрактографічних зображеннях на основі матриці спільної появи, що забезпечило обчислення площ зон крихкого та в'язкого руйнування;
- створено новий метод фрактодіагностування з метою виділення контурів ямок, який базується на морфологічних операціях, що забезпечує точніше оцінювання міцності та тріщиностійкості матеріалів за орієнтацією та усередненим діаметром ямок.

**Практична цінність роботи** підтверджена можливістю оптико-цифрового оцінювання пошкодженості локальних ділянок елементів конструкцій і визначання зміни їх характеристик під час експлуатаційного напруження. Розроблені методи оцінювання деградації матеріалів і конструкцій використано в Угерській діагностичній дільниці Івано-Франківського територіального центру Науково-виробничого центру технічної діагностики «Техдіагаз», с. Угерсько Львівської обл. для аналізу дефектності зварних з'єднань за їх радіографічними зображеннями; у Державному підприємстві Інженерний центр "Львівантикор", м. Львів для оцінювання зображень кородованих поверхонь; у ТЗОВ Фірма «ДІАЛАБ» ЛТД, м.

Одеса при аналізі зображень кородованих поверхонь металоконструкцій порталних кранів; в ТзОВ «ПОРТТЕХЕКСПЕРТ», м. Ізмаїл для аналізу технічного стану металевих конструкцій причальних контейнерних перевантажувачів; в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, що підтверджено відповідними актами.

#### **Ступінь обґрунтованості наукових положень дисертації і їх достовірність та новизна.**

Обґрунтованість наведених в дисертації наукових положень та висновків базується на успішному визначенні перспективних напрямів вирішення сформульованої проблеми, виборі адекватних моделей досліджень, опрацюванні недоліків та переваг існуючих методів оптико-цифрового та фрактодіагностичного контролю, комплексним характером експериментів, сучасними математичними методами обробки їх результатів. Ефективність кількісного аналізу зображень структури і поверхонь металевих конструкційних матеріалів, отриманих різними фізичними методами: радіографічними, оптичними та методом електронної скануючої мікроскопії підтверджується відповідністю сучасним уявленням про природу дефектів, які діагностуються.

#### **Оцінка змісту дисертації.**

Робота складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел з 314 найменувань і додатків, викладена на 330 сторінках друкованого тексту, містить 287 сторінок основного тексту, 142 рисунки, 18 таблиць.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, визначено мету, об'єкт та предмет дослідження, перелічено задачі та методи дослідження, сформульовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача та наведено апробацію результатів дисертації та публікації.

У **першому розділі** досліджено сучасний стан науково-технічної проблеми створення методів цифрової обробки та аналізу зображень у неруйнівному контролі та технічній діагностиці. Проведено аналіз шляхів покращання цифрових радіографічних зображень, локалізації та класифікації виділених дефектів зварних швів, сегментації кольорових зображень в задачах діагностики.

У **другому розділі** Розроблено структурно адаптивний метод покращання зображень, на основі логарифмічної моделі представлення зображень. Використанні комбінації логарифмічних мультиплікативних операторів дозволяють окреслити низькоконтрастні границі фрагментів зображення. Запропоновано метод підвищення контрастності рентгенівських зображень, який базується на нелінійній модифікації деталізуючих коефіцієнтів вейвлет-розкладу. Він дає змогу підвищити узагальнений абсолютний контраст зображення порівняно з відомими вейвлет-методами. Розроблено алгоритм відновлення вхідного зображення з підвищенням роздільної здатності, який не потребує обернення надвеликих матриць. Розроблено алгоритм робастної фільтрації зображень на основі

локалізації імпульсних викидів, який використано для визначення параметрів моделі під час сегментації зображень та обчисленні інформативних ознак.

У **третьому розділі** розроблено алгоритм локалізації та сегментації зображень, який забезпечує виділення об'єктів різних розмірів на основі кусково-лінійній моделі функції яскравості зображення. Запропоновано і обґрунтовано підхід до сегментації радіографічних знімків, за обробки масками та морфологічними операторами та доведено ефективність його застосування для сегментації зони зварного шва, утяжин та непроварів.

Запропоновано, обґрунтовано та апробовано підхід до сегментації перекривних об'єктів на радіографічних зображеннях зварних швів та їх дефектів, зокрема пор, шлаків, утяжин та непроварів. Запропоновано і обґрунтовано та апробовано метод визначення геометричних розмірів непроварів за канавковим еталоном чутливості на радіографічних зображеннях зварних швів.

В **четвертому розділі** доведено придатність використання текстурних ознак на основі матриці спільної появи для сегментації фрактографічних зображень. Обґрунтовано адаптивний вибір розміру вікна обробки для виділення зон крихкого та в'язкого руйнування, що забезпечило уточнення оцінювання механізмів руйнування та їх кількісних ознак.

В **п'ятому розділі** розроблено експрес-метод визначення кількості та розмірів поверхневих дефектів в оксидокерамічних покриттях за оптичними фотографіями поверхні.

Розроблено новий метод аналізу зображень поверхневого шару алюмінієвого сплаву зміцненого частинками карбіду кремнію. Проведено 3D моделювання розподілу частинок карбіду кремнію різних розмірів та відсотків заповнення в поверхневому шарі алюмінієвого сплаву, що є основою порівняльного аналізу властивостей таких поверхонь.

У **шостому розділі** запропоновано низку методів сегментації зображень фарбованих покриттів конструкційних матеріалів з можливими корозійними пошкодженнями. В якості діагностичних ознак використано відношення площі пошкоджених ділянок до площі аналізованої поверхні.

У **висновках** сформульовано основні наукові результати дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота є завершеною науковою роботою, за структурою, мовою і стилем написання відповідає вимогам МОН України, які ставляться до докторських дисертацій.

**Висновок про повноту опублікування основних положень дисертації, аналіз автореферату.**

Основні положення та результати дисертаційного дослідження викладено у 44 наукових працях, серед них 31 стаття у наукових фахових виданнях України та наукових періодичних виданнях інших держав (із них 4 статі у наукових періодичних виданнях, що включені до баз даних Scopus та WEB of Science) та 13 у збірниках праць та тезах вітчизняних та міжнародних науково-технічних

конференцій. Наукові положення і висновки, які представлені в дисертації та авторефераті є ідентичними. Автореферат повністю відображає актуальність роботи, зміст і суть одержаних наукових результатів, їх практичне значення, детально виокремлює особистий внесок здобувача та демонструє апробацію результатів. Запозичень та плагіату у дисертації немає.

**Проте, є низка зауважень по дисертації та автореферату, зокрема:**

1. В першому розділі розглянуто та дуже вдало систематизовано рентгенівські зображення зварного шва з дефектами різних типів. Разом з тим, частина дефектів зварних швів можуть мати складну просторову морфологію, яку важко оцінити на двовимірних рентгенограмах, що може спричинити неточності оцінювання їх геометрії та помилки класифікування. Бажано було б уточнити наскільки 2-D зображення є інформативними для такого аналізу? Частково, уникнути помилок дозволяє наявність вибірки зображень експертно оцінених фахівцями з неруйнівного контролю тому слід уточнити якою була база зображень використаних авторами.
2. В другому розділі розроблено методи покращення контрасту рентгенівських зображень з використанням вейвлет-перетворень, проте відомо, що у зварному шві є кілька типових зон, структура матеріалу в яких (розміри зерен, включень і т.д.), зазвичай відрізняються. Чи не спричинить покращення контрастності до потенційного завищення дефектності окремих ділянок шва? Як оцінювали точність визначення кількості та геометрії локальних дефектів шва?
3. На рентгенограмах аналізованих в розділах 2,3 немає масштабних міток. З точки зору аналізу зображень, це не є недоліком, проте, з точки зору технічного діагностування їх відсутність не дозволяє оцінити небезпеку дефекту, а також віднести його до певного масштабного рівня.
4. Відкритим залишається питання практичного застосування запропонованих підходів для вирішення задач діагностики. У п. 3.9 вказано, що "... розроблено методи та програмне забезпечення 'ОБРАЗ-ДЗ'", але не описано ні області їх застосування, ні технічні характеристики.
5. В розділі 4.2. запропоновано текстурну сегментацію зображень на основі матриці спільної появи. Проаналізовано зображення поверхонь руйнування за великих ( $\times 1000$ ) збільшень, за яких візуально механізми крихкого та в'язкого руйнування відрізняються. Яким чином, у практичній фрактодіагностиці, вибрати масштабний рівень за якого буде дієвим пропонуванний підхід? Чи можливе його застосування за змішаного в'язко-крихкого руйнування, коли частки цих мікромеханізмів руйнування будуть співмірними?
6. На рис. 4.17 подано результати обчислення гістограми розподілів кутів орієнтації дімплів від  $-90$  до  $90$  та їх усередненого діаметру. Яким чином було визначено усереднений діаметр ямок?
7. Не приведено порівняльних характеристик точності різних методів виявлення об'єктів на зображенні, під час застосування описаних методик, похибок розпізнавання об'єктів, обмеження на використання розроблених підходів.

### Загальні висновки

Загалом, дисертаційна робота Івасенко Ірини Богданівни «Оцінювання неоднорідності та пошкодженості конструкційних матеріалів методами структурно-адаптивної обробки зображень», яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.10 - діагностика матеріалів і конструкцій, є завершеною науковою працею, в якій вирішено важливу науково-технічну проблему, яка полягає у розробленні методологічних засад побудови методів структурно-адаптивної обробки, моделювання та аналізу зображень, отриманих різними фізичними методами та створення на їх основі комп'ютеризованих засобів оцінювання стану матеріалів та елементів конструкцій.

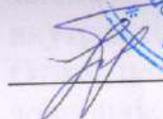
Робота відповідає вимогам паспорту вказаної спеціальності, а також чинним вимогам до докторських дисертацій, а здобувачка заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.10 - діагностика матеріалів і конструкцій.

Офіційний опонент:

Проректор з наукової роботи  
Тернопільського національного  
технічного університету імені Івана Пулюя,  
доктор технічних наук, професор

 П.О. Марушак

Підпис д.т.н., проф. Марушака П.О. засвідчую  
Вчений секретар Тернопільського національного  
технічного університету імені Івана Пулюя,

  
Т.М. Крамар