

ВІДГУК
офіційного опонента
на дисертаційну роботу **Станкевич Олени Михайлівни**
“Методологічні основи ідентифікування типів макроруйнування
матеріалів за енергетичними параметрами акустичної емісії”,
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності
05.02.10 – діагностика матеріалів та конструкцій

Актуальність теми дослідження.

Технічне діагностування та неруйнівний контроль різноманітних об’єктів і виробів займають важливе місце у розвитку багатьох галузей промисловості. У нашій країні проблема оцінювання залишкового ресурсу інженерних конструкцій постала особливо гостро. Через постійний брак коштів для оновлення основних фондів з кожним роком підвищується ймовірність виникнення відмов та аварій під час їх експлуатації. Однією з причин, що призводять до цього, є зміна характеристик конструкційних матеріалів, зокрема, металів та їх сплавів, під впливом різноманітних фізичних чинників. Це, у свою чергу, впливає на тип руйнування матеріалу. Так, зниження його в’язкості спричиняє зростання швидкості поширення тріщин, що значно скорочує термін працездатності та надійності експлуатації виробів та елементів конструкцій. Тому розроблення методологічних основ ідентифікування типів руйнування матеріалів на основі комплексного поєднання теоретичних та експериментальних підходів є актуальною науково-технічною проблемою, розв’язанню якої присвячена дисертаційна робота О. М. Станкевич. Для цього застосовано один із найефективніших методів неруйнівного контролю – метод акустичної емісії, а особливості параметрів сигналів акустичної емісії досліджено на основі їх вейвлет-перетворення, яке останнім часом набуло широкого застосування.

Про актуальність сформульованих у дисертації задач свідчить їх відповідність завданням комплексної програми наукових досліджень НАН України “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”, зокрема, розділу “Розробка методів і нових технічних засобів неруйнівного контролю та діагностики стану матеріалів та виробів тривалої експлуатації”.

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

За науковим спрямуванням дослідження за темою дисертації виконувались у рамках низки держбюджетних наукових та госпдоговірних тем відділу акустичних методів технічної діагностики Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України у 2011–2018 роках.

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

Обґрунтованість та вірогідність наукових положень забезпечується глибоким аналізом стану теоретичних та експериментальних розробок за темою дисертації на час її підготовки, використанням апробованих у літературі підходів теорії пружності, чітким формулюванням проблеми, шляхів її вирішення та комплексному підході до її розв’язання. Висновки та рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі, ґрунтуються на фізичній коректності отриманих

результатів, доброму узгодженні одержаних дисертантом експериментальних даних з відомими у літературі, а також на підтвердженні ефективності використання методу акустичної емісії за розробленою методикою ідентифікування типів руйнування матеріалів за параметрами вейвлет-перетворення сигналів під час дослідження матеріалів різних класів.

Достовірність та наукова новизна наукових положень та висновків дисертації.

Основою *достовірності* наукових положень та висновків дисертації є:

- строгість постановки задачі й використання фундаментальних положень теорії пружності;
- застосування теоретично обґрунтованих числових методів;
- порівняння результатів із відомими в літературі;
- коректна постановка експериментальних досліджень;
- застосування в експериментальних дослідженнях сучасних засобів відбору та методів опрацювання сигналів акустичної емісії.

Наукова новизна роботи полягає в наступному.

1. За допомогою методу крайових інтегральних рівнянь побудовано загальний аналітичний розв'язок задачі поширення пружних хвиль внаслідок зсуву протилежних поверхонь дископодібних тріщин відносно їх центру у тришаровому композиті. Знайдено числовий розв'язок для трьох характерних часткових випадків багат шарових композитів ("шар+півпростір із тріщиною", "шар+шар із тріщиною", "шар+шар+півпростір із тріщиною"), що дало змогу вивчити динаміку хвильових процесів та теоретично оцінити параметри пружних коливань точок поверхні.

2. Встановлено залежності поля переміщень на поверхні багат шарових композитів від пружних характеристик матеріалів та геометричних розмірів шарів, частоти зміщення поверхонь тріщини, відстані від точки спостереження до епіцентру руйнування, глибини залягання тріщини в композиті. Їх урахування дає можливість створити нові методики акустико-емісійного діагностування реальних елементів конструкцій.

3. Створено нову методику аналізу сигналів акустичної емісії та побудовано енергетичний критерій кількісного оцінювання типів макроруйнування матеріалів за енергетичними параметрами вейвлет-перетворення сигналів.

4. На основі побудованого критерію створено прикладні методики ідентифікування типів та джерел руйнування металів, сплавів та їх зварних з'єднань і запропоновано підхід до визначення моменту старту тріщин низькотемпературної повзучості, який забезпечує достовірне визначення нижнього порогового значення коефіцієнта інтенсивності напружень, необхідного для побудови першої ділянки діаграми низькотемпературної повзучості.

5. Розроблено нову методику ідентифікування механізмів руйнування волоконних композитів за енергетичними параметрами неперервного та дискретного вейвлет-перетворення, що дає змогу диференціювати розвиток різних стадій руйнування.

6. За параметрами крихкості на основі енергетичного критерію неперервного вейвлет-перетворення побудовано експрес-методику ранжування стомато-

логічних полімерів та ортопедичних конструкцій, що забезпечує обґрунтування їх добору для клінічного використання.

7. За енергетичними та частотними параметрами вейвлет-перетворення сигналів магнетопружної акустичної емісії розроблено методику оцінювання стану локальної водневої деградації феромагнетних матеріалів, яка дає можливість оперативно приймати рішення під час технічного діагностування об'єктів.

Практичне значення одержаних результатів.

Сформульовані математичні моделі та методика розв'язування динамічних задач теорії пружності для тришарової структури за допомогою методу граничних інтегральних рівнянь мають фундаментальний характер. Їх можна ефективно використати як для подальшого розвитку теоретичних основ методу акустичної емісії для багатошарових структур, так і для практичного застосування щодо встановлення особливостей руйнування таких композитів під час діагностування промислових виробів та елементів конструкцій. Розроблені на основі нового енергетичного критерію оцінювання типів макроруйнування конструкційних матеріалів за енергетичними параметрами вейвлет-перетворення сигналів акустичної емісії методики діагностування стану об'єктів контролю забезпечують коректність та оперативність опрацювання діагностичної інформації, що сприяє підвищенню ефективності технічної діагностики.

Результати дисертаційної роботи використано під час акустико-емісійного діагностування обладнання нафтопомпувальних станцій “Сколе”, “Броди” філії “Магістральні нафтопроводи “Дружба” ВАТ “Укртранснафта”, переходу газопроводу Долина-Ужгород-Держжордон-ІІ філії “Управління магістральних газопроводів ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ”. Отримані наукові результати досліджень увійшли в стандарт організації України (СОУ 49.5-31570412-027:2015) у вигляді критерію ідентифікування типів руйнування матеріалів та класифікації небезпеки розвитку дефектів (додаток Ж, п. Ж.5.3). Результати досліджень стоматологічних полімерів та ортопедичних конструкцій впроваджені на кафедрі ортопедичної стоматології і в стоматологічному медичному центрі ЛНМУ ім. Данила Галицького та включені у навчальний процес.

Результати досліджень можна використати для подальшого розвитку методів розв'язування динамічних задач теорії пружності для багатошарових тіл із тріщинами; удосконалення та оптимізації сучасних методик технічного акустико-емісійного діагностування стану об'єктів контролю; узагальнення окремих положень селекції сигналів акустичної емісії.

Оцінка змісту дисертації.

Мета роботи у формулюванні автора полягає у встановленні особливостей зміни параметрів переміщень на поверхні шаруватого композита залежно від пружних характеристик матеріалів, глибини залягання тріщини та відстані до епіцентру руйнування і на цій основі побудові енергетичного критерію ідентифікування типів макроруйнування за параметрами вейвлет-перетворення сигналів акустичної емісії та розробленні нових методик діагностування макроруйнування матеріалів і елементів конструкцій і оцінювання стану локальної водневої деградації феромагнетних матеріалів. Аналіз результатів дисертацій-

них досліджень вказує на досягнення зазначеної мети роботи.

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, шести розділів, які містять 160 рисунків і 23 таблиці, висновків, а також списку літератури, що включає 526 найменувань, додатків. Обсяг основного тексту дисертації займає 319 сторінок, а повний обсяг роботи – 404 сторінки.

У **вступі** обґрунтовано доцільність проведення досліджень та актуальність теми дисертації, визначено мету та сформульовано необхідні для її досягнення задачі, показано зв'язок із науковими програмами та темами, висвітлено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Визначено особистий внесок здобувача у публікаціях та рівень апробації результатів дисертації.

У **першому розділі** проаналізовано типи руйнування матеріалів та їх характерні відмінності, систематизовано стан досліджень виявлення мікро- та макроруйнування конструкційних матеріалів із застосуванням методів акустичної емісії та магнето-акустичної емісії, охарактеризовано методи спектрального аналізу сигналів, узагальнено підходи до використання вейвлет-перетворення для аналізу сигналів акустичної емісії під час руйнування матеріалів і композитів, оцінювання дефектності матеріалів за параметрами магнето-акустичної емісії.

У **другому розділі** побудовано загальний аналітичний розв'язок задачі поширення пружних хвиль у тришаровій композитній структурі з дископодібними тріщинами, ініційованих зсувом їх протилежних поверхонь відносно центру тріщин. Визначено залежності поля переміщень від пружних характеристик та геометричних розмірів компонент, частоти зміщення поверхонь тріщини, відстані від точки спостереження до епіцентру руйнування, глибини залягання тріщини в композиті для часткових випадків багат шарової структури (на поверхні шару, розташованому на півпросторі з тріщиною; на поверхнях біматеріалу з тріщиною в одному з шарів та на поверхні трикомпонентного композита з тріщиною у півпросторі).

У **третьому розділі** охарактеризовано відомі методики ідентифікування типів макроруйнування за енергією сигналів акустичної емісії, описано побудову критерію ідентифікування за енергетичними параметрами вейвлет-перетворення сигналів акустичної емісії та його верифікацію на прикладі руйнування алюмінію, алюмінієвого сплаву та його зварних з'єднань, поширення тріщин низькотемпературної повзучості та руйнування неметалевих матеріалів. Показано, що новий критерій має більшу чутливість та забезпечує достовірність ідентифікування типів руйнування матеріалів порівняно з раніше запропонованим к-критерієм.

У **четвертому розділі** розроблено методику ідентифікування механізмів руйнування волоконних композитів за енергетичним критерієм ідентифікування типів руйнування та дискретним вейвлет-перетворенням. Методика поєднує два підходи: за допомогою критеріального параметра E_{IT} , обчисленого за неперервним вейвлет-перетворенням сигналу акустичної емісії, можна встановити тип руйнування, що відбувається в даний момент у композиті, а за енергетичним розподілом дискретного вейвлет-перетворення – кореляцію механізмів руйнування композиту та спектральних характеристик сигналів акустичної емісії.

Енергетичний критерій ідентифікування типів руйнування дає змогу розрізняти розвиток різних стадій руйнування скловолоконних та армованих ара-

мідними волокнами композитів за встановленими характерними ознаками сигналів акустичної емісії.

У **п'ятому розділі** представлено результати застосування енергетичного критерію для вивчення особливостей руйнування стоматологічних матеріалів та ортопедичних конструкцій. Встановлення частки крихкого руйнування за енергетичним критерієм ідентифікування типів руйнування під час дослідження стоматологічних матеріалів оптимізує методики їх ранжування, забезпечує ефективний добір матеріалів та конструкцій для застосування в стоматологічній практиці.

У **шостому розділі** запропоновано методику аналізу сигналів магнето-акустичної емісії за енергетичними та частотними параметрами, яка дає змогу отримати інформацію про процеси перебудови доменної структури під час перемагнення феромагнетика та діагностувати стан водневого деградування матеріалів, які тривало контактують із воденьвмісним середовищем.

Викладення матеріалу послідовне й логічне, висновки до розділів і до дисертації ґрунтуються на результатах теоретичних та експериментальних досліджень і всебічному їх аналізі. У цілому, робота виконана на високому науковому рівні, методично збалансована: вміщує результати, отримані як з використанням аналітичних і числових методів розрахунку, так і експерименту, написана літературною технічною мовою, у формі, зручній для сприйняття.

Повнота викладу результатів в опублікованих працях.

Основні положення та результати виконаних у дисертації досліджень всебічно висвітлено в 44 наукових працях, серед яких 2 монографії, 1 довідниковий посібник, 1 стандарт організації України, 22 статті у наукових фахових виданнях України та у наукових періодичних виданнях інших держав (із них 14 у виданнях, що входять до наукометричних баз даних Scopus та WEB of Science, у тому числі 6 праць у закордонних профільних журналах); 16 у збірниках праць та тезах міжнародних і вітчизняних конференцій; 2 патенти України на винахід.

Основні наукові положення і висновки, які представлені в дисертації та авторефераті, ідентичні між собою. Автореферат повністю відображає актуальність роботи, зміст і суть одержаних наукових результатів, їх практичне значення, детально виокремлює особистий внесок здобувача та демонструє апробацію результатів.

Наукові положення і результати, які були захищені в кандидатській дисертаційній роботі не використовуються як наукові результати докторської дисертації здобувача і не виносяться на її захист.

Зауваження до дисертації.

1. У *розділі 2* дисертації аналізується хвильове поле переміщень, ініційоване внутрішніми тріщинами скруту. Водночас відомо, що шаруваті структури переважно руйнуються внаслідок утворення міжфазних тріщин.

2. Задачу про поширення пружних хвиль розв'язано для усталеного режиму навантаження багатошарового композита з тріщинами, але не досліджується можливість виникнення резонансних ефектів.

3. Побудований у розділі 3 енергетичний критерій ідентифікування типів руйнування має в своїй основі енергетичний параметр $E_{вт}$, який по суті є геометричним показником проекції неперервного перетворення локального імпульсу сигналу акустичної емісії. За результатами математичного моделювання отримано залежності амплітуд переміщень від низки чинників. Не зрозуміло, яким чином враховані у побудованому співвідношенні для визначення енергетичного параметра амплітудні характеристики сигналів акустичної емісії.

4. У розділі 5 представлено результати досліджень провізорних стоматологічних полімерів для їх ранжування, зокрема, визначення параметрів їх тріщиностійкості, проте методику ініціювання початкової тріщини на зразках у роботі не наведено (с. 236).

5. Розділі 6 присвячений розробленню методики діагностування стану водневого деградування матеріалів за параметрами магнето-акустичної емісії. Водночас варто було б описати основні принципи магнето-акустичної емісії.

Зазначені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки та значення дисертаційної роботи й рівня достовірності її основних результатів.

Висновок.

Дисертація Станкевич Олени Михайлівни “Методологічні основи ідентифікування типів макроруйнування матеріалів за енергетичними параметрами акустичної емісії” є завершеною науковою працею, в якій розв’язано важливу науково-технічну проблему, що полягає у розробленні на основі теоретико-експериментальних досліджень методологічних засад діагностування руйнування твердих тіл та оцінювання стану конструкційних матеріалів за енергетичними параметрами пружних хвиль акустичної емісії.

Зміст автореферату і опублікованих наукових праць повністю розкривають суть роботи, а висновки і рекомендації є важливими для науки та інженерної практики. Дисертаційна робота Станкевич О. М. за актуальністю проблеми і науковим рівнем вирішення основних завдань відповідає чинним вимогам, які ставляться до докторських дисертацій, а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.10 – діагностика матеріалів і конструкцій.

Офіційний опонент:
завідувач кафедри опору матеріалів
та будівельної механіки
Національного університету
“Львівська політехніка”,
доктор технічних наук, професор

 С. В. Харченко

Підпис д.т.н., проф. Харченка С. В. засвідчено
Вчений секретар
Національного університету
“Львівська політехніка”
кандидат технічних наук, доцент





Р. Б. Брилинський