

## **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 кандидата технічних наук зі спеціальності 05.02.10 – діагностика матеріалів та конструкцій

### **Актуальність теми дослідження**

До актуальних проблем сучасного технічного поступу належить оцінювання поточного стану промислових об'єктів, адже впродовж тривалого експлуатування характеристики їх конструкційних матеріалів змінюються. Завдання підвищення експлуатаційної надійності та довговічності деталей машин і механізмів неможливо вирішити без ефективної системи технічного діагностування (ТД) причин руйнування. Одним із найпоширеніших сучасних методів технічної діагностики та неруйнівного контролю є метод акустичної емісії (АЕ), за допомогою якого можна ефективно виявляти зародження та поширення тріщин. Ідентифікування типу руйнування за параметрами АЕ дає можливість не лише вивчати стадії руйнування конструкційних матеріалів, але й здійснювати загальне оцінювання стану об'єкта контролю й розраховувати його залишковий ресурс. Досягнення вищої ефективності методу можливе за умови подальшого вдосконалення методик опрацювання сигналів АЕ, зокрема, застосування вейвлет-перетворення (ВП).

Дисертаційна робота О. М. Станкевич є актуальною, оскільки присвячена вирішенню актуальної науково-технічної проблеми, яка 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.

Проведені дослідження відповідають завданням комплексної програми наукових досліджень НАН України “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин” розділу “Розробка методів і нових технічних засобів неруйнівного контролю та діагностики стану матеріалів та виробів тривалої експлуатації”, пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки України, що підтверджує їх актуальність.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційна робота виконана у відповідності до науково-дослідних програм та тематичних планів 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**

Чітке формулювання проблеми, шляхів її вирішення та комплексний підхід до її розв'язання на основі глибокого аналізу стану теоретичних та експериментальних досліджень за темою дисертації на час її підготовки, використання апробованих у літературі підходів теорії пружності та підтвердження ефективності застосування методу АЕ для ідентифікування типів руйнування матеріалів на основі параметрів вейвлет-перетворення сигналів АЕ за розробленою методикою для різних класів матеріалів, дають можливість зробити висновок про обґрунтованість та вірогідність наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі.

### **Достовірність та наукова новизна наукових положень та висновків дисертації**

В основі достовірності наукових положень та висновків дисертації лежать: строгість постановки задачі й використання фундаментальних положень теорії пружності; застосування теоретично обґрунтованих чисельних методів; порівняння результатів із відомими в літературі; коректна постановка експериментальних досліджень; застосування в дослідженнях сучасних засобів відбору та методів опрацювання сигналів АЕ.

### **Наукова новизна роботи**

Розроблено математичні підходи побудови аналітичного розв'язку задачі поширення пружних хвиль, ініційованих зсувом протилежних поверхонь дископодібних тріщин відносно їх центру, у тришаровій композитній структурі, із використанням методу граничних інтегральних рівнянь. Для трьох поширених часткових випадків багатошарових композитів (“шар+півпростір із тріщиною”, “шар+шар із тріщиною”, “шар+шар+півпростір із тріщиною”) задачу розв'язано числово. Отримані залежності дали можливість вивчити динаміку хвильових процесів та теоретично оцінити параметри пружних коливань на їх поверхні.

Установлено залежності поля переміщень на поверхні багатошарових композитів від пружних характеристик та геометричних розмірів їх компонент, частоти зміщення поверхонь тріщини, відстані від точки спостереження до епіцентру руйнування, глибини залягання тріщини в композиті. Врахування цих залежностей дає можливість визначати особливості руйнування в композиті та створити нові методики АЕ-діагностування реально діючих виробів та елементів конструкцій.

Застосувавши новий підхід до аналізу сигналів АЕ, побудовано енергетичний критерій кількісного оцінювання типів макроруйнування матеріалів за енергетичними параметрами ВП сигналів АЕ, який забезпечує коректне ідентифікування типів руйнування, а ,відтак, сприяє підвищенню ефективності

АЕ-діагностування елементів конструкцій.

На основі побудованого критерію створено низку прикладних методик, зокрема, для ідентифікування типів та джерел руйнування металів, сплавів та їх зварних з'єднань. Запропонований підхід визначення моменту старту тріщин низькотемпературної повзучості забезпечує достовірне визначення нижнього порогового значення коефіцієнта інтенсивності напружень, необхідного для побудови першої ділянки діаграми низькотемпературної повзучості.

Розроблено нову методику ідентифікування механізмів руйнування волоконних композитних матеріалів за енергетичними параметрами неперервного та дискретного ВП, що дає змогу розділяти розвиток різних стадій їх руйнування.

За параметрами крихкості руйнування на основі енергетичного критерію неперервного ВП побудовано експрес-методику якісного ранжування стоматологічних полімерів та ортопедичних конструкцій, яка забезпечує обґрунтування їх вибору для клінічного використання.

Створено методику оцінювання стану локальної водневої деградації феромагнетних матеріалів за енергетичними та частотними параметрами ВП сигналів магнетопружної АЕ (МАЕ), яка дає можливість оперативно приймати рішення під час ТД відповідних об'єктів.

### **Практичне значення одержаних результатів**

Математичні моделі та методика розв'язування динамічних задач теорії пружності для тришарової структури за допомогою методу граничних інтегральних рівнянь, сформульовані у дисертаційній роботі, мають фундаментальний характер. Вони дають можливість подальшого розвитку теоретичних основ методу АЕ для багатошарових структур, що під час діагностування промислових виробів та елементів конструкцій сприятиме кращому розумінню розвитку стадій руйнування в таких композитах.

Розроблені у дисертаційній роботі методики діагностування стану об'єктів контролю на основі енергетичного критерію оцінювання типів макроруйнування конструкційних матеріалів дають можливість коректно та оперативно опрацьовувати діагностичну інформацію, що сприяє підвищенню ефективності ТД.

Результати дисертаційної роботи використано на практиці під час АЕ-діагностування обладнання нафтопомпувальних станцій “Сколе”, “Броди” філії “Магістральні нафтопроводи “Дружба” ВАТ “Укртрансгаз”, переходу газопроводу Долина-Ужгород-Держжордон-ІІ філії “Управління магістральних газопроводів ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ”. Вони 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 і конструкцій впроваджені на кафедрі ортопедичної стоматології і в стоматологічному медичному центрі ЛНМУ ім. Данила Галицького та включені в учбовий процес підготовки студентів та інтернів стоматологів.

### **Оцінка змісту дисертації.**

Дисертаційна робота Станкевич О. М. включає: анотацію, вступ, 6 розділів, висновки, список використаних джерел (526 найменувань), 3 додатки. Обсяг основного тексту дисертації займає 319 сторінок, а повний обсяг – 404 сторінки. Робота містить 160 рисунків і 23 таблиці.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету, основні задачі, об'єкт, предмет та методи досліджень, їх 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* за аналізом літературних джерел охарактеризовано типи руйнування матеріалів, розкрито стан досліджень виявлення мікро- та макроруйнування конструкційних матеріалів методами АЕ та МАЕ, систематизовано підходи до аналізу сигналів АЕ на основі ВП, оцінювання дефектності матеріалів за параметрами МАЕ. *Другий розділ* присвячений дослідженню полів переміщень у тришаровій композитній структурі з дископодібними тріщинами. Побудовано загальний аналітичний розв'язок задачі поширення пружних хвиль у такій структурі, ініційованих зсувом їх протилежних поверхонь відносно центру тріщин, та визначено залежності поля переміщень від низки параметрів для часткових випадків багатошарової 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* описано побудову критерію ідентифікування за енергетичними параметрами ВП сигналів АЕ та його верифікацію на прикладі руйнування різних класів конструкційних матеріалів. Показано, що новий критерій має більшу чутливість та забезпечує коректність ідентифікування типів руйнування матеріалів порівняно з раніше запропонованим к-критерієм. У *четвертому розділі* представлено методику ідентифікування механізмів руйнування волоконних композитів за енергетичним критерієм ідентифікування типів руйнування та дискретним ВП. *П'ятий розділ* присвячений побудові методики ранжування стоматологічних матеріалів та ортопедичних конструкцій на основі застосування енергетичного критерію. У *шостому розділі* представлено методику аналізу сигналів МАЕ за енергетичними та частотними параметрами для вивчення процесів перебудови доменної структури під час перемагнення феромагнетика та діагностування стану водневого деградування матеріалів, які тривало контактують із

воденьвмісним середовищем.

### **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 повною мірою розкриває зміст основних положень дисертації. У докторській роботі не використовуються результати кандидатської дисертації.

### **Мова та стиль дисертації**

Дисертаційну роботу написано класичною державною мовою, виділення певних розділів обґрунтоване, поданий автором матеріал легко сприймається. Тема та зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.02.10 – діагностика матеріалів і конструкцій.

### **Зауваження до дисертаційної роботи**

1. У розділі 2 дисертаційної роботи представлено дослідження часткового випадку тріщин, розташованих паралельно до інтерфейсних поверхонь композита. Чи придатні запропоновані математичні підходи для випадку довільного розташування тріщин та інших типів їх розкриття?
2. У дисертації розглянуто хвильове поле переміщень, породжене заданим зміщенням поверхонь тріщин. Коректнішим було б розв'язування задачі в такій послідовності: 1) дослідження дифракції пружної хвилі на тріщині та визначення зміщення її поверхонь; 2) визначення хвильового поля переміщень, ініційованого цим зміщенням.
3. На стор. 153 (рис. 3.9) показано схеми визначення тривалості випромінювання локальних імпульсів за рівнем  $0,5WT_{\max}$ . Чи визначали, яка частка параметра  $E_{WT}$  втрачається від загальної величини?
4. У розділі 5 на с. 241, 242 наведено базову формулу (5.2) для визначення КІН  $K_I$ , точність якої перевіряли відомою формулою Сроулі – Гросса (5.3) і там же було сказано, що «...результати розрахунків збіглися із точністю до 1%». Одночасно, із аналізу цих формул видно, що вони різняться між собою множителем  $1,5\sqrt{\lambda}$ , який залежить від параметра глибини тріщини і тому

результати (за певних значень  $\lambda$ ) можуть відрізнятися більше ніж на 1%. Крім цього, при записі емпіричних формул обов'язково необхідно вказувати межі зміни їх параметрів.

5. У розділі 5 є підрозділи, де досліджується водопоглинання та усадка полімерів, які є виключно технологічними параметрами та, можливо, не стосуються тематики досліджень.

6. Запропонована методика аналізу сигналів МАЕ за параметрами вейвлет-перетворення передбачає якісне оцінювання водневої пошкодженості сталей, але для практики важливо пов'язати ці параметри з концентрацією водню в матеріалах?

7. У роботі трапляються деякі філологічні та термінологічні неточності. Наприклад, на с. 233,234 діаграми напружень за розтягу та стиску на рис.5.2-5.4 підписані як діаграми розтягу або стиску, відповідно. Вважаємо, що останнє є термінологічною та змістовною неточністю.

### Висновок

Дисертаційна робота Станкевич О. М. з урахуванням актуальності вирішених у роботі завдань, наукової новизни отриманих результатів і можливості їх практичного використання є закінченим науковим дослідженням, що містить раніше не захищені наукові положення та практичні результати у галузі діагностики матеріалів і конструкцій, які в сукупності розв'язують науково-технічну проблему розроблення 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 та 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 ставлять до докторської дисертації, а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.10 – діагностика матеріалів і конструкцій.

Професор кафедри прикладної математики та механіки Луцького національного технічного університету, доктор технічних наук, професор



В. І. Шваб'юк

