

## ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Станкевич Олени Михайлівни**

*“Методологічні основи ідентифікування типів макроруїнування матеріалів за енергетичними параметрами акустичної емісії”*, подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності

05.02.10 – діагностика матеріалів і конструкцій

**Актуальність теми дослідження.** Ефективність методів і засобів діагностики та неруйнівного контролю характеризується здатністю систем аналізу отриманих сигналів точно виявляти, ідентифікувати та класифікувати прояви різних явищ взаємодії зондуючого сигналу з неоднорідностями матеріалу, що відповідають дефектам. Метод акустичної емісії (АЕ) є одним із найдієвіших неруйнівних методів аналізу стану конструкції, оскільки він у момент отримання сигналу в цифровому вигляді фіксує наявні неоднорідності або дефекти, їх стан.

У більшості випадків діагностики цей метод дає можливість зробити початкові припущення про стан об'єкта чи деякої конструкції та обґрунтувати необхідність застосування інших засобів дослідження. Автоматизація АЕ контролю, у свою чергу, вимагає створення систем інтерпретації одержаної інформації, що дає змогу суттєво зменшити час опрацювання результатів контрольних перевірок, уніфікувати їх результати.

Існуючі системи, які реалізують АЕ методи технічного діагностування та неруйнівного контролю, частково вирішують це завдання. Важливою проблемою залишається розроблення методологічних основ АЕ-діагностування з використанням нових підходів до опрацювання сигналів АЕ для ідентифікування типів руїнування та експериментальне їх підтвердження.

Перевагою в розробці такого роду методів була б можливість роботи із АЕ сигналами, отриманими в реальних польових умовах, та глибша інтерпретація наявної інформації. Досягнення цього виглядає можливим завдяки дослідженню та встановленню зв'язків і залежностей між характеристиками сигналів акустичного контролю і механізмами деформування та руїнування конструкційних матеріалів з урахуванням їх стохастичної природи.

Тому актуальною проблемою є вивчення динаміки і стадій розвитку дефектності структури матеріалів та оцінювання стану реальних об'єктів під час експлуатації за методом акустичної емісії (АЕ), який дає можливість реалізувати неруйнівний контроль технічного стану об'єкта з метою ідентифікації його поточного стану, а також є науковим підґрунтям фрактодіагностування.

Якраз подібна науково-технічна проблема досліджується в дисертаційній роботі О. М. Станкевич, що свідчить про її суттєву актуальність.

**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 2011

року і включно до 2018 року автор дисертаційної роботи була виконавцем низки держбюджетних та госпдоговірних наукових тем, які відповідають напряму дослідження.

Наукові та практичні результати виконаних досліджень використані в учбовому процесі на кафедрі ортопедичної стоматології і в стоматологічному медичному центрі ЛНМУ ім. Данила Галицького.

**Мета роботи** полягає у вирішенні науково-технічної проблеми – підвищення ефективності методів акустичного контролю на основі енергетичного критерію ідентифікування типів макроруйнування за параметрами вейвлет-перетворення сигналів акустичної емісії та розроблення нових методів макроруйнування матеріалів і конструкцій.

Аналіз результатів дисертаційних досліджень вказує на досягнення зазначеної мети роботи.

**Наукова новизна роботи** полягає в наступному:

- запропоновано узагальнений аналітичний розв'язок задачі поширення пружних хвиль, ініційованих зсувом протилежних поверхонь дископодібних тріщин відносно їх центру, у тришаровій композитній структурі, із використанням методу граничних інтегральних рівнянь. Здійснено чисельні розв'язки для трьох характерних часткових випадків багатошарових композитів (“шар+півпростір із тріщиною”, “шар+шар із тріщиною”, “шар+шар+півпростір із тріщиною”), що дозволило поглиблено оцінити динаміку хвильових процесів та теоретично виявити параметри пружних коливань на їх поверхні;

- встановлено основні закономірності розподілу полів переміщень на поверхні багатошарових композитів, описано їх залежність від пружних характеристик та геометричних розмірів їх компонент, частоти зміщення поверхонь тріщини, відстані від точки спостереження до епіцентру руйнування, глибини залягання тріщини в композиті. Ці залежності використано як підґрунтя встановлення механізмів та формулювання критерію руйнування матеріалів і конструкцій за даними АЕ-діагностування;

- на основі пропонованого критерію створено нову методику оцінювання механізмів руйнування металів, сплавів та їх зварних з'єднань, а також підхід фіксування старту тріщин низькотемпературної повзучості;

- запропоновано новий підхід до ідентифікування механізмів руйнування волокнистих композитних матеріалів за енергетичними параметрами неперервного та дискретного ВП, що дає змогу кількісного опису стадійності руйнування;

- запропоновано експрес-методику кількісного оцінювання якості стоматологічних полімерів та ортопедичних конструкцій за параметрами їх крихкого руйнування на основі енергетичного критерію неперервного ВП, що забезпечує обґрунтування їх вибору для клінічного використання;

- створено метод оцінювання локальної водневої деградації феромагнетних матеріалів за енергетичними та частотними параметрами ВП сигналів МАЕ, який забезпечує уточнення технічного стану об'єктів тривалої експлуатації.

**Практична цінність роботи** підтверджується її загальною спрямованістю на розробку методів акустичного контролю, отриманих у реальних умовах, які відображають конкретні матеріалознавчі проблеми. Розроблені на основі нового енергетичного критерію оцінювання типів макроруйнування конструкційних матеріалів за енергетичними параметрами ВП сигналів АЕ методики діагностування стану об'єктів контролю забезпечують коректність та оперативність опрацювання діагностичної інформації, що сприяє підвищенню ефективності технічного діагностування. Результати дисертаційної роботи використано під час АЕ-діагностування обладнання нафтопомпувальних станцій “Сколе”, “Броди” філії “Магістральні нафтопроводи “Дружба” ВАТ “Укртранснафта”, переходу газопроводу Долина-Ужгород-Держкордон-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, що підтверджено актами впровадженнь.

#### **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 акустичного контролю, комплексним характером експериментів, сучасними математичними методами обробки їх результатів. Адекватність розглянутих у дисертації моделей підтверджується в ряді випадків відповідністю отриманих з їх допомогою результатів для тестових зразків фрактографічних зображень або за їх порівнянням із відомими моделями. Достовірність результатів дослідження підтверджується і їх відповідністю сучасним уявленням про природу дефектів, які діагностуються.

#### **Оцінка змісту дисертації.**

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. Таким чином, автор структурував та систематизував наукову проблему, сформульовану в дисертації, що дозволило її успішно вирішити.

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

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану використання методів АЕ для діагностики технічного стану об'єктів. Встановлено, що метод АЕ на сьогодні є найефективнішим для вивчення процесів і стадій розвитку дефектності структури матеріалів та оцінювання стану реальних об'єктів під час їх технічного діагностування. Обґрунтовано, що поєднання аналітично-числових підходів до моделювання та експериментальних до ідентифікування джерел пружних хвиль АЕ дає можливість встановити залежності між окремими параметрами дефектів матеріалів та параметрами сигналів АЕ, які під час ТД та НК можна використовувати для розв'язання оберненої задачі – визначення параметрів дефекту за сигналами АЕ. За аналізом літературних джерел застосування ВП сигналів АЕ доведено, що ефективним засобом ідентифікування етапів та механізмів руйнування, оцінювання ступеня деградації під впливом різних чинників різноманітних за природою та структурою конструкційних матеріалів. Сформульовано основні завдання роботи.

У **другому розділі** отримано загальний аналітичний розв'язок задачі поширення пружних хвиль, ініційованих зсувом протилежних поверхонь дископодібних тріщин відносно їх центру, у тришаровій композитній структурі. На підставі числового розв'язання часткових випадків розглянутої задачі (дво- та трикомпонентних структур) встановлено, що поля переміщень на поверхні багатшарових композитів суттєво залежать від пружних характеристик їх складових, частоти зміщення поверхонь тріщини, відстані від точки спостереження до епіцентру руйнування, глибини залягання тріщини в композиті. На прикладах доведено, що запропоновані розв'язки дають змогу отримати більш точні кількісні характеристики пошкоджень ніж відомі аналоги.

У **третьому розділі** запропоновано новий енергетичний критерій кількісного оцінювання типів руйнування конструкційних матеріалів за енергетичними параметрами неперервного вейвлет-перетворення сигналів акустичної емісії. На його основі створено прикладні методики ідентифікування типів та джерел руйнування металів та їх зварних з'єднань, визначення моменту старту тріщин низькотемпературної повзучості, ідентифікування різних стадій руйнування матеріалів;

У **четвертому розділі** автором дисертації розроблено метод ідентифікування механізмів та стадійності руйнування волоконних композитів (КМ) за енергетичним критерієм визначено типи руйнування та дискретним ВП (ДВП). Застосовано два підходи: за допомогою критеріального параметра  $E_{WT}$ , обчисленого за НВП сигналу АЕ, встановлено тип руйнування композита, а за енергетичним розподілом ДВП – кореляцію механізмів руйнування композита та спектральних характеристик сигналів АЕ. У результаті виконаних досліджень встановили типові ознаки локальних імпульсів сигналів АЕ (тривалість випромінювання, ширина смуги частот, діапазон домінуючих частот та тип руйнування).

**П'ятий розділ** роботи присвячено застосуванню енергетичного критерію для вивчення особливостей руйнування стоматологічних матеріалів та ортопедичних конструкцій. Застосування цього критерію під час розтягу акрилових полімерів забезпечило встановлення чергування різних типів руйнування. Доведено, що ранжування полімерів за часткою крихкого руйнування співпадає з результатами ранжування за комплексним показником, а також за параметрами міцності та АЕ-активності за статичного розтягу.

Частку крихкого руйнування використано як інформаційну ознаку під час дослідження стоматологічних матеріалів, що забезпечило оптимізацію їх ранжування та обґрунтовує вибір матеріалів та конструкцій для застосування в стоматологічній практиці.

У **шостому розділі** запропоновано методику оцінювання водневої пошкодженості конструкційних матеріалів за параметрами ВП сигналів МАЕ та її апробацію на зразках тривало експлуатованих трубних сталей.

Встановлено, що водень у структурі матеріалу спричиняє зростання енергії сигналів МАЕ та сприяє зростанню частки енергії їх домінуючих частот, визначених до наводнювання феромагнетика. Так, за індукції магнетного поля 1,03 Тл енергія сигналів МАЕ більша у внутрішньому шарі труби нафтопроводу на 13% і газопроводу на 21%, ніж у зовнішньому шарі. Для труби живильної води енергоблоку НВТ ТЕС енергія сигналів МАЕ більша в серединному шарі стінки на 25%, ніж у внутрішньому. Частка енергії домінуючих частот сигналів МАЕ у внутрішньому шарі стінки труби більша, ніж у зовнішньому, для труби нафтопроводу на 7%, газопроводу на 8,5%, а в серединному шарі стінки труби живильної води НВТ ТЕС більша на 10%, ніж у її внутрішньому шарі.

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 результати дисертаційної роботи в достатній мірі опубліковано в 44 наукові праці, 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 цитовані наукометричними базами Scopus та Web of Science); 16 у збірниках праць та тезах міжнародних і вітчизняних конференцій; одержано 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.

**Використання у докторській дисертації результатів, які виносились на захист кандидатської дисертації.**

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.

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

1. Автором запропоновано новий енергетичний критерій ідентифікування типів макроруйнування, ф-ла 1.9. Було б бажано записати умови його застосування та обмеження. Крім того, відомі підходи фрактодіагностування передбачають дослідження на різних масштабних рівнях мікро-, мезо-, макроруйнування? Чи не заперечує пропонований підхід цю концепцію?
2. Не зрозуміло, з яких міркувань встановлювали межі ділянок двопараметричного оцінювання, рис. 3.8, 3.11б, 3.14 притаманні певним механізмам руйнування? Можливо слід було виписати певний алгоритм їх визначення, а фізико-механічні передумови цих меж описати аналітично?
3. Не зрозуміло, чи враховує новий підхід АЕ контролю типів руйнування наявність змішаних механізмів руйнування. Чи є пропонований метод структурно чутливим? Чи є зв'язок між параметрами структурних елементів (розмірами зерен) та структурою сигналу?
4. Із роботи не зрозуміло на скільки ефективними є пропонований критерій для оцінювання механізмів руйнування за повзучості, адже в околі вершини тріщини виникає пластична зона, в якій відбувається пластичне деформування, а поблизу вершини тріщини - виникнення та злиття пор. Яким чином такий складний механізм руйнування може бути інтегрально описаний? Чи є повторюваність таких оцінок? Чи контролювали правильність оцінювання механізмів руйнування пропонованим автором методом порівнянням з іншими відомими методами, зокрема за фрактографічним аналізом поверхонь руйнування.
5. У 5-му розділі дисертації автором досліджено широку групу стоматологічних матеріалів. Проте, відомо, що основною причиною руйнування зубів (та коронок, що емітують зуб) є накопичення втомних дефектів, зокрема, внаслідок циклічного навантажування та контактної втоми. Було б бажано обґрунтувати вибрану автором схему випробувань. На скільки вона є інформативною і чи враховує фізіологічну функцію зубів.
6. На рис. 6.11, 6.16 подано залежності енергії сигналів МАЕ від індукції магнетного поля для матеріалів з урахуванням наводнювання. Було б бажано уточнити, якою була дисперсія аналізованого параметра.

**Загальні висновки.**

Загалом, дисертаційна робота **Станкевич Олени Михайлівни** на тему:  
*“Методологічні основи ідентифікування типів макроруйнування матеріалів за*

*енергетичними параметрами акустичної емісії”*, яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.10.02 – діагностика матеріалів і конструкцій, є завершеною науковою працею, в якій вирішено наукову проблему розроблення нових методологічних засад діагностування руйнування твердих тіл та оцінювання стану конструкційних матеріалів за енергетичними параметрами пружних хвиль акустичної емісії.

Робота відповідає вимогам паспорту вказаної спеціальності, а також чинним вимогам пп. 9, 10, 12, 13 “Порядку присудження наукових ступенів”, а здобувач заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.10 – діагностика матеріалів і конструкцій.

Офіційний опонент:

завідувач кафедри автоматизації  
технологічних процесів і виробництв  
Тернопільського національного  
технічного університету імені Івана Пулюя,  
доктор технічних наук, професор



**П.О. Марущак**

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



**Г.М. Крамар**

