

До спеціалізованої вченої
ради Д 35.226.01 в Фізико-
механічному інституті
ім. Г. В. Карпенка
Національної академії
наук України

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **СТАНКЕВИЧ Олени Михайлівни** “**МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ІДЕНТИФІКУВАННЯ ТИПІВ МАКРОРУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ ЗА ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ**”, представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.10 – діагностика матеріалів і конструкцій.

Актуальність теми дисертації

Серед методів неруйнівного контролю особливий інтерес викликають дослідження параметрів акустичної емісії (АЕ), які отримуються від тріщин, що є найнебезпечнішими дефектами конструкцій з позицій забезпечення міцності об'єкта контролю. Значний доробок вітчизняних та закордонних вчених у цьому напрямку здебільшого стосувався однорідних матеріалів. Але останнім часом у багатьох галузях промисловості все більше використовують матеріали з багатошаровою або неоднорідною структурою. Тому теоретико-експериментальні дослідження, спрямовані на створення сучасних методик діагностування макроруйнування твердих тіл та оцінювання стану дефектності або ушкодженості конструкційних матеріалів та конструкцій шляхом побудови математичних моделей полів переміщень внаслідок накопичення та розвитку дефектів типу тріщин у структурно неоднорідних середовищах, надзвичайно актуальні.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність і новизна

Достовірність отриманих результатів експериментальних досліджень ґрунтується на використанні сучасних методик випробувань та математичних методів статистики, а теоретичні дослідження проведені з використанням науково-обґрунтованих розрахункових схем, сучасних математичних методів та обчислювальних засобів. Результати теоретичних та експериментальних досліджень, одержаних авторкою та іншими дослідниками, якісно та кількісно узгоджуються.

Наукові положення, висновки і рекомендації в достатній мірі обґрунтовані результатами аналізу великого обсягу експериментальних даних та комп'ютерного моделювання.

Значення результатів роботи для науки і практики

Наукова новизна роботи полягає у наступному:

1. Аналітично з використанням методу граничних інтегральних рівнянь розв'язано задачу поширення пружних хвиль, ініційованих зсувом протилежних поверхонь дископодібних тріщин відносно їх центру, у тришаровій композитній структурі. Чисельно задачу розв'язано для трьох характерних часткових випадків

багатошарових 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 на їх поверхні.

2. Встановлено 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. Урахування цих залежностей дає можливість визначати особливості руйнування в композиті та створити нові методики АЕ-діагностування реально діючих виробів та елементів конструкцій.

3. Побудовано новий енергетичний критерій кількісного оцінювання типів макроруйнування матеріалів за енергетичними параметрами вейвлет-перетворення (ВП) сигналів АЕ, за яким можна коректно ідентифікувати типи руйнування, що сприяє підвищенню ефективності АЕ-діагностування елементів конструкцій.

4. На основі побудованого критерію створено прикладну методику ідентифікування типів та джерел руйнування металів, сплавів та їх зварних з'єднань, а також 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 новий підхід до ідентифікування механізмів руйнування волоконних композитних матеріалів за енергетичними параметрами неперервного та дискретного ВП, що дає змогу розділяти розвиток різних стадій їх руйнування.

6. Побудовано експрес-методику якісного ранжування стоматологічних полімерів та ортопедичних конструкцій за параметрами їх крихкості на основі енергетичного критерію неперервного ВП, що забезпечує обґрунтування їх вибору для клінічного використання.

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

Практичне значення одержаних результатів.

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 ТД. Результати, отримані в дисертаційній роботі, використані під час АЕ-діагностування обладнання нафтопомпувальних станцій “Сколе”, “Броди” філії “Магістральні нафтопроводи “Дружба” ВАТ “Укртранс-нафта”, переходу газопроводу Долина-Ужгород-Держкордон-ІІ філії “Управління магістральних газопроводів ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ”.

Повнота опублікування результатів дослідження

За результатами виконаних у дисертації досліджень опубліковано 44 наукові праці, серед яких 2 монографії, 1 довідниковий посібник, 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.

Структура 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.

Мета дослідження. Встановити особливості зміни параметрів переміщень на поверхні шаруватого композита залежно від пружних характеристик матеріалів, глибини залягання тріщини та відстані до епіцентру руйнування і на цій основі побудувати енергетичний критерій ідентифікування типів макроруйнування за параметрами вейвлет-перетворення сигналів акустичної емісії та розробити нові методики діагностування макроруйнування матеріалів і елементів конструкцій та оцінювання стану локальної водневої деградації феромагнетних матеріалів.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, сформульовані мета і задачі досліджень, відображені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів. Визначено особистий внесок здобувача у публікаціях та рівень апробації результатів дисертації.

У першому розділі розглянуті типи руйнування матеріалів та їх характерні відмінності, проаналізовані та систематизовані дослідження спрямовані на виявлення мікро- та макроруйнування конструкційних матеріалів із застосуванням методів АЕ та магнетопружної АЕ (МАЕ), проаналізовані методи спектрального аналізу сигналів АЕ. Як відомо, існують різні підходи до класифікування типів руйнування, що розділяють на крихке та в'язке. Руйнування у багатьох випадках може бути змішане, тобто одночасно мати риси і крихкого, і в'язкого. Крихке руйнування є найнебезпечніше для міцності конструкції чи виробу, оскільки має спонтанний та швидкоплинний характер. Для вивчення процесів і стадій розвитку дефектності структури матеріалів та оцінювання стану реальних об'єктів під час їх ТД найбільш чутливим ефективним є метод АЕ. Встановлені залежності між параметрами полів переміщень, які виникають у тілі внаслідок поширення пружних хвиль АЕ від різних джерел, та параметрами самих джерел дають можливість під час діагностування реальних об'єктів виявляти не лише місце розташування дефекту, але й визначати його тип, розміри. Експериментальні методи дають можливість ідентифікувати типи чи механізми руйнування різного виду конструкційних матеріалів на основі аналізу параметрів сигналів АЕ. Таким чином, приймаючи до уваги значний науковий доробок, побудова удосконалених методик та алгоритмів опрацювання АЕ-інформації на основі нових інформативних параметрів, а також розроблення теоретичних основ ефективного методу

АЕ для багат шарових та неоднорідних структур є безумовно актуальною науково-технічною проблемою.

У другому розділі побудовано загальний аналітичний розв'язок задачі поширення пружних хвиль у тришаровій композитній структурі з диско-подібними тріщинами, ініційованих зсувом їх протилежних поверхонь відносно центру тріщин, та визначено поля переміщень поверхні шару для часткових випадків будови композита. У літературі для однорідних матеріалів встановлено залежності амплітуд переміщень від часу і частоти, діаграми спрямованості випромінювання різних типів хвиль у випадку утворення в тілі тріщини нормального відриву та скруту. Переміщення в тілі за цих механізмів утворення тріщин відрізняються, як амплітудами і частотами, так і діаграмами спрямованості випромінювання, тому авторка вивчала обидва випадки механізмів утворення та поширення тріщин у твердих тілах. Зазначено, що для тіл із багат шаровою структурою частково поля переміщень вивчали у межах визначення їх локального напружено-деформованого стану під навантаженням розтягу, а дослідження поля переміщень на поверхні твердих тіл із багат шаровою ізотропною структурою з тріщинами поздовжнього зсуву (скруту) практично відсутні. Кожний шар містить плоску дископодібну тріщину із нерухомим контуром. Тріщини паралельні до поверхонь шарів, а їх центри знаходяться на одній прямій. Потрібно за заданим зміщенням поверхонь тріщин визначити параметри хвильового поля переміщень на поверхні шару тіла. За вказаного способу розташування тріщин і типу зміщення їх поверхонь у композиті поширюватимуться лише горизонтально поляризовані поперечні хвилі. Тоді вертикальні переміщення й нормальні напруження відсутні. Задача зводиться до розв'язання диференціальних рівнянь відносно амплітудних значень вектора переміщень. Поставлена задача розв'язана методом граничних інтегральних рівнянь.

Визначено, що на поверхні шару, розташованому на півпросторі з тріщиною, із віддаленням точки спостереження від епіцентру руйнування максимумами амплітуд переміщень зменшуються. За зростання жорсткості матеріалу шару на незначних відстанях від епіцентру руйнування максимумами амплітуд переміщень спадають, а на значних – спостерігається інший ефект. За зростання жорсткості матеріалу півпростору на значних відстанях від епіцентру руйнування максимумами переміщень зростають, що може бути пов'язано з появою в тілі поверхневої хвилі Лява, яка поширюючись на великі відстані взаємодіє з іншими хвилями. За фіксованої частоти зміщення поверхонь тріщини амплітуди переміщень на поверхні досягають максимуму на відстані від епіцентру руйнування, що дорівнює товщині шару, за подальшого віддалення від епіцентру вони, поступово зменшуючись, зникають. Зростання жорсткості матеріалів шару та півпростору супроводжується зменшенням амплітуд переміщень. Також визначено, що зі збільшенням глибини залягання тріщини у півпросторі амплітуди переміщень монотонно спадають незалежно від співвідношення жорсткостей матеріалів шарів композита.

Визначено поле нормованих переміщень на поверхнях біматеріалу з диско-подібною тріщиною в одному із його шарів. Розглянуто два випадки розташування точки спостереження: на шарі з дефектом та на бездефектному шарі. Встановлено, що незалежно від того, на поверхні якого шару біматеріалу

розташована точка спостереження, якщо більшу жорсткість має матеріал шару без дефекту, то зі зростанням його жорсткості виникають значні осциляції.

Розглянуто особливості поля переміщень на поверхні трикомпонентного композита з дископодібною тріщиною в півпросторі. Визначено нормовані амплітуди переміщень залежно від хвильового числа і співвідношення жорсткостей матеріалів компонент композита, глибини залягання тріщини у півпросторі. Встановили, що зі зростанням жорсткості матеріалу прошарку амплітуди переміщень на поверхні композита зменшуються, водночас чітко виділяються їх локальні максимуми. Із віддаленням точки спостереження від епіцентру руйнування амплітуди переміщень спочатку зростають, а потім спадають. За фіксованої частоти зміщення поверхонь тріщини амплітуди переміщень на поверхні композита досягають максимумів на відстані точки спостереження від епіцентру руйнування, що дорівнює подвійній товщині верхнього шару. Визначено, що у композитах із багат шаровою структурою переміщення на поверхні тіла суттєво залежать від пружних характеристик його складових, частоти зміщення поверхонь тріщин, віддалі від точки спостереження до епіцентру руйнування, глибини залягання тріщини в композиті та геометричних розмірів його компонент.

У третьому розділі описано побудову критерію ідентифікування за енергетичними параметрами ВП сигналів АЕ та його верифікацію на прикладі руйнування алюмінію, алюмінієвого сплаву та його зварних з'єднань, поширення тріщин низькотемпературної повзучості та руйнування неметалевих матеріалів у порівнянні з відомими методиками ідентифікування типів макроруйнування за енергією сигналів АЕ. Відомі з літературних джерел методики побудовані для окремих видів конструкційних матеріалів, зокрема, сталей, бетонів та різних композитів. Метою цих досліджень було створення уніфікованих критеріїв ідентифікування типів макроруйнування матеріалів із застосуванням сигналів АЕ.

Активність АЕ супроводжується швидким вивільненням енергії в матеріалі, а енергія сигналу АЕ вважається прямо пропорційною до площі під хвильовим відображенням. Важливою характеристикою електричного сигналу (імпульсу) є його ефективна тривалість, оскільки енергія розподіляється в часі нерівномірно. Вважають, що найсуттєвіший внесок дає та частина енергії, що обмежена часом, протягом якого амплітуда перевищує 50% максимуму. У виконаних дослідженнях обчислювали значення енергії локального імпульсу на часовому інтервалі, який визначали з проекції на площину “вейвлет-коефіцієнт WT – час t ” у момент досягнення максимального значення вейвлет-коефіцієнта $WT_{\max}$. Тривалість імпульсу встановлювали за рівнем $0,5WT_{\max}$. Проекції на площині “ $WT-t$ ” цих елементарних подій можуть накладатися. Щоб встановити тривалість кожного елементарного імпульсу за їх часткового накладання, скористалися відповідною методикою. У програмному середовищі AGU-Vallen Wavelet, яке використовували в дослідженнях НВП сигналів АЕ, коефіцієнти вейвлет-перетворення WT нормовані та безрозмірні величини. Тоді й параметр E_{WT} буде безрозмірною величиною. Для побудови критерію ідентифікування типів макроруйнування виконали низку досліджень особливостей руйнування різного виду конструкційних матеріалів. Досліджували розтягом гладкі циліндричні зразки з конструкційної сталі 45 у стані поставання та гартованої, сталі 38ХНЗМФА. Крихкі матеріали навантажували різними схемами: триточкового згину – циліндричні зразки з

корунду; стиску – плитку з натрій-кальцій-силікатного скла; розтягу пластинчастих і позацентрового розтягу компактних зразків віконного скла. Аналізували НВП сигналів АЕ за енергетичним параметром локальних максимумів E_{WT} та порівнювали отримані значення з величиною параметра к-критерію.

Узагальнивши отримані результати, встановили новий енергетичний критерій ідентифікування типів макроруйнування конструкційних матеріалів за значеннями енергетичного параметра локальних імпульсів сигналів АЕ: $E_{WT} < 0,01$ – в'язке руйнування (пластична деформація); $0,01 \leq E_{WT} < 0,1$ – в'язкокрихке (мікротріщиноутворення); $E_{WT} \geq 0,1$ – крихке руйнування (зародження і ріст макротріщини). Отримали, що в крихких матеріалах найбільша частка енергії припадає на в'язкокрихке та крихке (скло, корунд, гартована сталь 45), а у в'язких сталях – на в'язке та в'язко-крихке руйнування, що узгоджується з відомими у літературі результатами. Згідно з літературними даними з теорії прийняття технічних рішень розширення числових меж нового критеріального показника E_{WT} для визначення в'язко-крихкого руйнування порівняно з к-критерієм, побудованим раніше, підвищує достовірність встановлення типів руйнування.

За результатами аналізу сигналів АЕ під час руйнування алюмінію (99,36%) встановили, що домінує в'язке та в'язко-крихке руйнування. Причому в алюмінії після відпалу частка в'язкого руйнування майже вдвічі більша, ніж в алюмінії в стані постачання, що свідчить про зростання його пластичності після відпалу. Отримані результати ідентифікування типів руйнування підтверджуються аналізом АЕ активності під час розтягу зразків, а також дослідженнями їх зламів та відомими у літературі даними. Аналізували сигнали АЕ під час втомного руйнування алюмінієвого сплаву 1201-Т. За енергетичним критерієм ідентифікування типів руйнування встановили, що переважає крихке руйнування твердого розчину міді та марганцю в алюмінії та розтріскування інтерметалідних включень, зосереджених на межах зерен, що підтверджують металографічні та фрактографічні дослідження.

Також авторка випробовувала зразки зварних з'єднань плит алюмінієвого сплаву, виконаних наскрізним електронно-променевим зварюванням без присадного металу, з ініційованою втомною тріщиною: I тип – в основному металі; II – у зоні термічного впливу (ЗТВ), III – у зоні сплавлення та IV – у металі шва. Застосування енергетичного критерію дало змогу виокремити сигнали АЕ, які супроводжували в'язке руйнування твердого розчину міді та марганцю в алюмінію під час дослідження основного металу та ЗТВ, чого не вдалось зробити раніше за к-критерієм. За ідентифікування типів руйнування під час росту тріщин низькотемпературної повзучості переважали механізми в'язкого та в'язкокрихкого руйнування (разом 85% зареєстрованих сигналів АЕ). Слід зазначити, що виокремити сигнали АЕ, які супроводжували в'язке руйнування, з використанням к-критерія не вдавалось. Таким чином, новий запропонований у роботі енергетичний критерій дає змогу з великою роздільною здатністю визначати момент старту тріщини під час низькотемпературної повзучості в елементах конструкцій.

Енергетичний критерій ідентифікування типів руйнування за параметрами НВП сигналів АЕ дав змогу також встановити особливості руйнування

неметалевих матеріалів, зокрема, ебоніту під час розтягу. Відомо, що наявність у структурі матеріалу наповнювачів сприяє утворенню мікропорожнин навколо наночастинок, руйнування яких під навантаженням розтягу генерує сигнали АЕ невеликої амплітуди, а відтак і енергії, які ідентифікували за допомогою енергетичного критерію. Отримані результати свідчать те, що E_{IT} -критерій чутливіший та має більшу роздільну здатність, ніж k -критерій.

У четвертому розроблено методику ідентифікування механізмів руйнування волоконних композитів (КМ) за енергетичним критерієм ідентифікування типів руйнування та дискретним ВП (ДВП). Методика поєднує два підходи: за допомогою критеріального параметра E_{IT} , обчисленого за НВП сигналу АЕ, можна встановити тип руйнування, що відбувається в даний момент у композиті, а за енергетичним розподілом ДВП – кореляцію механізмів руйнування композита та спектральних характеристик сигналів АЕ.

У роботі виконані дослідження процесу руйнування скловолоконного КМ ручного формування під час квазістатичного розтягу. Структурно скловолоконний композит складався з послідовності декількох шарів зі склотканини, яку покривали шаром смоли зі затверджувачем. Встановили, що 90% сигналів АЕ, які генерувались під час розтягу скловолоконного композита, супроводжували відшарування склотканини від матриці. Одночасно з відшаруванням у композиті відбувається розтріскування матриці. У другій половині випробовування реєстрували сигнали АЕ з декількома локальними максимумами НВП на різних частотах, що може свідчити про майже одночасний розвиток різних механізмів руйнування композита. У результаті виконаних досліджень встановили характерні ознаки локальних імпульсів сигналів АЕ (тривалість випромінювання, ширина смуги частот, діапазон домінуючих частот та тип руйнування), які супроводжують різні механізми руйнування скловолоконного композита.

Дослідження полімерних КМ з арамідними волокнами виконано у співпраці з науковцями Інституту інтерактивних матеріалів, ім. Лейбніца. Композит структурно складався з одиничного p -арамідного волокна (діаметр 10 мкм) у двокомпонентній епоксидній матриці. В експериментах використовували чотири види КМ: композит з арамідним волокном без обробки (контрольний); з арамідним волокном, обробленим силіконовою олією; з арамідним волокном, обробленим у середовищі низькотемпературної високочастотної плазми та в поліетиленімілі з додаванням 10 % наночастинок полістиренметакрилату; з арамідним волокном, обробленим у середовищі низькотемпературної високочастотної плазми та в поліетиленімілі з додаванням 100 % наночастинок полістиренметакрилату. Із розподілу різних типів руйнування, ідентифікованих за енергетичним критерієм, встановили, що кількість сигналів АЕ, які відповідають крихкому руйнуванню, зменшується, а в'язко-крихкому – зростає, порівняно з контрольним зразком, що пояснює отримані результати з діаграм розтягу. Визначено, що енергетичний критерій ідентифікування типів руйнування дає змогу розрізняти розвиток різних стадій руйнування волоконних композитів за встановленими характерними ознаками сигналів АЕ.

У п'ятому розділі представлено результати застосування енергетичного критерію для вивчення особливостей руйнування стоматологічних матеріалів та ортопедичних конструкцій. Зазначено, що під час вибору відповідного матеріалу

для стоматологічних ортопедичних конструкцій необхідно мати повноцінну інформацію про характеристики його міцності, яка з часом може змінюватись під впливом різних чинників. Дослідження виконувались у співпраці з науковцями Львівського національного медичного університету ім. Данила Галицького. На першому етапі досліджували полімерні матеріали ProtentTM 4 (3M ESPE, США), Akrodent (АО СТОМА, Україна), Structur 2SC (VOCO, Німеччина), Tempron 1-1PKG (GC, Японія), Ceramill PMMA (AmannGirrbach, Австрія). Застосування енергетичного критерію ідентифікування типів руйнування до сигналів АЕ під час розтягу акрилових полімерів, по-перше, дало змогу встановити чергування різних типів руйнування, хоча макродоломи усіх зразків були крихкими. По-друге, результат ранжування полімерів за часткою крихкого руйнування співпав з результатами ранжування за комплексним показником, а також за параметрами міцності та АЕ-активності під час розтягу. На підставі цього запропоновано нову експрес-методику ранжування стоматологічних полімерів, яка передбачає проведення лише експериментів на розтяг до повного руйнування зразків матеріалів зі синхронним записом акустограм. Визначивши показники міцності матеріалів, АЕ-активності та встановивши частку крихкого руйнування за енергетичним критерієм ідентифікування його типів, можна у 4,5 рази скоротити кількість фізичних параметрів для ранжування, одночасно забезпечивши відповідність отриманих результатів комплексному показнику за відомими методиками.

На другому етапі досліджувала матеріали для незнімних протезів та конструкції “зуб-ендокоронка” за навантаження стиску з метою визначення найстійкішої до руйнування конструкції. Зразки розділили на групи: А – невідновлені зуби (контрольні); ВЕ – зуби, відновлені ендокоронкою з діоксиду цирконію; СЕ – із прескераміки; ДЕ – із металокераміки; ЕЕ – із композита. Застосувавши енергетичний критерій до сигналів АЕ та встановивши частку різних типів руйнування, виявили домінуванням крихкого типу для всіх матеріалів та конструкцій, окрім, металокераміки (група D), що очевидно пов’язано з конструкційною особливістю такого матеріалу, зокрема, наявністю металеві підкладки. За аналізом енергетичних, частотних та часових параметрів сигналів АЕ та зруйнованих зразків встановлено, що руйнування ортопедичних конструкцій “зуб-ендокоронка” зароджується в зубі, а, відтак, їх міцність залежить від міцності основи (зуба). Отже, встановлення частки крихкого руйнування за енергетичним критерієм ідентифікування типів руйнування під час дослідження стоматологічних матеріалів суттєво оптимізує методики їх ранжування, а відтак забезпечує ефективний 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 тривалоексплуатованих трубних сталей. Зазначено, що важливою проблемою неруйнівного контролю є розроблення методик діагностування водневої пошкодженості феромагнетиків. Досліджували конструкційні сталі (Ст 3 та сталь 15) у вигляді призматичних зразків. Для аналізу сигналів МАЕ використали енергетичний критерій ідентифікування типів руйнування. У термінах амплітуди для оцінювання енергії сигналу МАЕ вибрали відому залежність.

Спочатку за ДПВП визначали домінуючі частотні діапазони сигналів МАЕ для різної індукції магнетного поля, відтак, за НВП – енергетичні та амплітудно-частотні параметри локальних імпульсів сигналів МАЕ. Після перемагнечування зразки наводнювали в камері у середовищі газоподібного водню за підвищеної температури. Після наводнювання їх випробовували у соленоїді повторно. Будували та аналізували залежності загальної енергії сигналів МАЕ від індукції магнетного поля. Авторка встановила, що зі зростанням індукції магнетного поля енергія сигналів МАЕ зростає для всіх типів зразків та марок сталей. Присутність водню у структурі сталі (наводнений зразок) також веде до збільшення енергії сигналів МАЕ, порівнюючи з матеріалом у стані постачання. Таким чином, за енергією сигналів МАЕ можна оцінити рівень пошкодженості феромагнетних матеріалів.

За описаною методикою проаналізували також локальні особливості сигналів МАЕ для індукції магнетного поля 1,03 Тл для двох марок сталей. Встановили, що зі зменшенням домінуючої частоти енергія локальних імпульсів та тривалість їх випромінювання збільшуються, а ширина смуги частот – зменшується. Аналогічні закономірності спостерігали раніше під час дослідження пружних хвиль внаслідок збільшення розмірів дефекту в конструкційному матеріалі. Отже, можна гіпотетично припустити, що звуження ширини смуги частот МАЕ свідчить про збільшення кількості (розмірів) локальних ділянок однонапрямлених доменів.

Апробація методики досліджень проводилась на зразках тривалоексплуатованих трубних сталей. Досліджували матеріали труб магістрального нафтогону (термін експлуатації 1971–2009 рр.), магістрального газогону (1973–2012 рр.), та труби живильної води (ТЖ) енергоблоку надвисокого тиску (НВТ) Вуглегірської ТЕС, яка наблизилась до вичерпання проектного ресурсу. Провівши експерименти з вимірювання МАЕ під час перемагнечування зразків встановили, що як для сталі труби нафтогону, так і газогону, найбільшу енергію мали сигнали МАЕ внутрішнього шару стінки труби, а найменшу – зовнішнього. За побудованою методикою це свідчить про те, що метал внутрішнього шару стінки труби внаслідок тривалого контакту з агресивним середовищем нафти та газу значно деградував, а водень, який розташувався у порах та дефектах кристалічної ґратки матеріалу полегшує стрибки доменних стінок. У результаті визначено, що оскільки зовнішній шар стінки труби піддається меншому впливу агресивного середовища, то й енергія МАЕ в ньому порівняно з іншими шарами має бути меншою. Для ТЖ енергоблоку НВТ найбільшу енергію мають сигнали МАЕ, які генерувались під час перемагнечення зразків зі серединного шару стінки труби, а найменшу – із внутрішнього. Встановили, що найбільшу міру об'ємної пошкодженості мав серединний шар стінки труби, за ним зовнішній та внутрішній шари.

За змістом дисертаційної роботи можна висловити такі зауваження:

1. Головна задача неруйнівного контролю це прогнозування (передбачення) руйнування, зокрема, як граничного стану тіла з тріщиною, а не супроводження цього процесу або констатування його постфактум. В усіх розділах наведені результати про дослідження АЕ при деформуванні різних матеріалів «in processus», але для їх використання у якості неруйнівного контролю потрібні

оцінки «а priori», тобто до початку критичного розповсюдження тріщин. Такі моменти в роботі присутні, але бажано було б узагальнити їх в самостійний метод.

2. На стор. 4 зазначено: “...Побудовано новий енергетичний критерій...”. У цьому випадку необхідно навести порівняння його з існуючими критеріями та переваги.

3. Яке значення у цій роботі розділу 2 про розповсюдження пружних хвиль у багатошарових системах?

4. Чому на рис. 2.8 та 2.9 (стор. 113) і надалі при $1 < G < 100$ із збільшенням G спостерігається зменшення нормованих переміщень $|u_\phi|/h_c$, а в діапазоні $1/100 < G < 1/2$ зі збільшення G – навпаки, їх збільшення?

5. На рис. 3.38 (стор. 185) точкою позначено початок макроруйнування на лінійній частині діаграми? Початок руйнування, як правило, супроводжується «рор-ін» або нелінійністю.

6. Чому береться спектр частот в межах 1 МГц. Може треба було розглядати діапазон в межах 1 ГГц?

7. На стор. 201 у табл. 4.1 домінуючі механізми руйнування визначені на рівні гіпотези.

8. На стор. 205 авторка визначає механізм руйнування поширенням тріщин поперек волокон? Це неможливо, тому що відомо, що при наближенні тріщини зі середовища з меншим пружним модулем до волокна з більшим модулем пружності інтенсивність напружень у вершини тріщини суттєво знижується й тому тріщина не перетинає волокно, а повертає вздовж волокна, тобто спостерігається його відшарування.

9. На стор. 210 у табл. 4.2 для зразка № 4 напруження початку його руйнування більші за напруження повного руйнування зразка. Чому?

10. На стор. 256 зазначено: “...Під час руйнування матеріалу Akrodent сигнали АЕ генеруються внаслідок його значної пористості...” Визначення механізму руйнування відсутнє?

11. Все ж таки, за яким параметром слід ранжувати стоматологічні полімери (стор. 257)?

Загальні висновки стосовно дисертації.

У результаті досліджень виконаних авторкою розв’язано актуальну 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. Вважаю, що дисертаційна робота **СТАНКЕВИЧ Олени Михайлівни** «Методологічні основи ідентифікування типів макроруйнування матеріалів за енергетичними параметрами акустичної емісії», за обсягом експериментальних даних і теоретичних узагальнень, актуальністю та науковою новизною, практичною цінністю та достовірністю отриманих результатів відповідає вимогам паспорту вказаної спеціальності та пп. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України (КМУ) від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 656 від 19.08.2015р, № 1159 від 30.12.2015 р. та № 567 від 27.07.2016 р.), а її авторка – **СТАНКЕВИЧ Олена**

Михайлівна заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.10 – діагностика матеріалів і конструкцій.

Офіційний опонент,
завідувач відділу “Комп’ютерного
моделювання та механіки
композиційних матеріалів”
Інституту надтвердих матеріалів
ім. В. М. Бакуля НАН України,
чл.-кор. НАН України, д.т.н., проф.



А. Л. Майстренко

Підпис чл.- кор. НАН України, д.т.н., проф. А. Л.Майстренка засвідчую:

Вчений секретар Інституту
надтвердих матеріалів
ім. В. М. Бакуля НАН України,
к. т. н.



В. В.Смоквина