

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г.В. КАРПЕНКА**

На правах рукопису

ЛИСАК
Микола Васильович

**ОЦІНКА ДИНАМІКИ РОЗТРІСКУВАННЯ
КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ АКУСТИКО-
ЕМІСІЙНИМ МЕТОДОМ**

Спеціальність 05.02.07 - механіка деформівного твердого тіла

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів - 1996

4833.573
Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Фізико-механічному інституті
ім. Г.В. Карпенка НАН України.

Науковий консультант - член-кореспондент НАН України, доктор
технічних наук, професор АНДРЕЙКІВ О.Є.

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор
СТРІЖАЛО В.О.

– доктор фізико-математичних наук,
професор ПІДДУБНЯК О.П.

– доктор технічних наук ОСТАШ О.П.

Провідна установа - Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
НАН України

Захист відбудеться "23" жовтня 1996 р. о 14³⁰ годині на
засіданні вченої ради Д 04.01.03 при Фізико-механічному інституті
ім. Г.В.Карпенка НАН України (290601, м.Львів, МСП, вул.
Наукова, 5).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Фізико-
механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України.

Автореферат розісланий "16" вересня 1996 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради
доктор технічних наук, професор

НИКИФОРЧИН
Григорій Миколайович

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00759974 (+)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний стан вітчизняної промисловості характеризується наявністю значної кількості обладнання, яке вже вичерпало свій ресурс, але його заміна є або економічно не вигідною, або, в силу ряду причин, неможливою. Однак, це обладнання може ще безпечно експлуатуватися при наявності методів та засобів діагностики міцності і довговічності елементів конструкцій. Такі методи повинні розв'язувати дві проблеми. Перша з них – це визначення за допомогою неруйнівного контролю параметрів дефектів, друга – це діагностування міцності і довговічності обладнання за отриманими даними. Перспективним в цьому плані є метод акустичної емісії (АЕ), який, з одного боку, як метод неруйнівного контролю може розв'язувати проблему дефектометрії, а з другого, ґрунтуючись на підходах механіки руйнування, діагностувати міцність конструкцій.

Значний вклад в розвиток проблеми АЕ-діагностики внесли наукові колективи, які очолюють доктори наук, професори в Україні: Андрейців О.Є., Барьяхтар В.Г., Бойко В.С., Гарф Е.Ф., Голубець В.М., Гольцов В.А., Красовський А.Я., Кучеров І.Я., Лебедев А.А., Майстренко А.Л., Назарчук З.Т., Націк В.Д., Недосека А.Я., Никифорчин Г.М., Новіков М.В., Панасюк В.В., Патон Б.Є., Пашечко М.І., Перга В.М., Переверзев Є.С., Піддубняк О.П., Писаренко Г.С., Прокопенко Г.І., Романів О.М., Стрижало В.О., Тихонов Л.В., Трійцький В.О., Трошенко В.Т., Улітко А.Ф., Чаусов М.Г., Фомічов С.К., Ясній П.В. і інші; в Росії: Баранов В.М., Болотін Ю.І., Ботвіна Л.Р., Брагінський О.П., Волков Л.П., Дробот Ю.Б., Іванов В.І., Іванова В.С., Лексовський А.М., Маркочев В.М., Маслов Л.І., Маслов Л.О., Махутов М.А., Муравін Г.Б., Тріпалін О.С., Фінкель В.М., і інші; а також в інших країнах: Achenbach J., Dunegan H., Gerberich W.W., Jax P., Kishi T., Murthy S., Ono K., Polloc A., Rogers L., Roget J., Scruby C., Tschelisnig P., Wadley H., Waschkis E. і інші. Проте, незважаючи на наявність багатоканальних АЕ-систем, відносно розв'язаною задачею АЕ-контролю є локація дефектів (джерел випромінювання) та якісна оцінка процесів руйнування. Визначення ж параметрів дефектів та діагностика міцності і довговічності конструкцій перебуває у стадії розробки. Пояснюється це відсутністю достатньо обґрунтованої теорії акустичного випромінювання дефектами, що ростуть, та створеної на цій основі методології практичного застосування методу АЕ. Особливо це актуально для найбільш небезпечних для міцності конструкцій дефектів типу тріщин при дії корозійно-механічних факторів.



В зв'язку з цим дана робота присвячена вирішенню науково-технічної проблеми: розробці методів акустико-емісійної діагностики цілісності елементів конструкцій при дії на них корозійно-механічних факторів.

Мета роботи: створення теоретичних основ акустико-емісійної діагностики міцності тіл з тріщинами при дії корозійно-механічних факторів, а також розробка методології експериментальних досліджень механічних властивостей матеріалів з дефектами типу тріщин за даними АЕ.

У відповідності із поставленою метою розв'язано наступні комплексні науково-технічні задачі:

- розробка моделей випромінювання пружних хвиль підрастаючими тріщинами в твердих тілах при дії корозійно-механічних факторів;
- розробка методів для розв'язання динамічних задач теорії тріщин, сформульованих на основі запропонованих моделей;
- встановлення аналітичних залежностей між параметрами тріщин та параметрами сигналів АЕ;
- встановлення критеріїв АЕ-діагностування міцності тіл з тріщинами;
- розробка методик АЕ-визначення параметрів тріщиностійкості конструкційних матеріалів при дії на них корозійно-механічних факторів.

На захист виносяться наступні наукові положення:

1. Моделі утворення та докритичного росту тріщин як випромінювачів пружних хвиль в квазікрихких матеріалах при дії агресивного середовища та навантаження.
2. Методи для знаходження аналітичних залежностей між параметрами тріщин та параметрами сигналів АЕ.
3. Підхід для оцінки параметрів тріщин та діагностування міцності тіл з тріщинами за даними АЕ.
4. Методики експериментального АЕ-визначення параметрів тріщин в конструкційних матеріалах при дії на них механічного навантаження та агресивного середовища.
5. Методики АЕ-визначення водневої пошкодженості матеріалів реактора гідрокрекінгу нафти та труб теплоенергетичного обладнання.

Методи досліджень. В теоретичних дослідженнях були використані принципи і методи фізико-хімічної механіки руйнування: при створенні моделей докритичного росту тріщин; при розробці підходу для встановлення аналітичних залежностей між параметрами плоских і осесиметричних тріщин і параметрами сигналів АЕ, де

поєднується метод інтегральних перетворень і метод граничної інтерполяції; метод порівняння полів переміщень для розв'язання задач про стрибкоподібне поширення плоских тріщин в тривимірних тілах; метод граничної інтерполяції для розрахунку хвилеводів і побудови просторового розподілу амплітуд сигналів АЕ. В експериментальних дослідженнях використовувалися: методи механічних досліджень матеріалів і конструкцій у відповідності з існуючими стандартами; метод акустичної емісії; методи металографії, фрактографії, тензометрії, термофарбування, оптичної мікроскопії і ультразвукової дефектоскопії.

Наукова новизна. Розроблено теоретичні основи акустико-емісійної діагностики міцності тіл з тріщинами при дії на них механічного навантаження та агресивного середовища. Для цього сформульовано нові моделі утворення та докритичного росту тріщин як випроміщувачів пружних хвиль в квазікрихких матеріалах при дії на них корозійно-механічних факторів. Розроблено методи розв'язання в переміщеннях нестационарних динамічних задач для наскрізних і осесиметричних тріщин, а також для плоских тріщин довільної форми в тривимірних тілах. Встановлено нові аналітичні залежності між параметрами тріщин та параметрами сигналів АЕ при зростаючому статичному та циклічному навантаженні, корозії під напруженням. Запропоновано нові підходи для оцінки параметрів тріщин і міцності тіл з тріщинами за даними АЕ.

Розроблено нові експериментальні методики визначення параметрів докритичного росту тріщин та параметрів тріщиностійкості конструкційних матеріалів за допомогою методу АЕ. Встановлено критерії ідентифікації дефектів в сталях за даними АЕ. Проведено комплексні АЕ-дослідження водневої пошкодженості сталей та опору поширення в них тріщин, нижнього порогового значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) та параметрів докритичного росту тріщин і параметрів сигналів АЕ при одночасній дії механічного навантаження і агресивного середовища.

Практична цінність. Розроблені теоретичні основи діагностики міцності матеріалів і елементів конструкцій були науковою базою при розробці методик АЕ-контролю. Вони використані для створення методики оцінки параметрів новоутворених тріщин у виробак, методики визначення нижнього порогового значення КІН і параметрів зростаючих тріщин в матеріалах при дії агресивного середовища і навантаження, методики визначення водневого пошкодження та наявності тріщин методом АЕ в трубах теплоенергетичного обладнання та реакторах гідрокрекінгу нафти. Економічний ефект від впровадження результатів роботи у

виробництво складає: близько 100 тис. крб. на рік до 1984 р. і 78,92 млн. крб. до 1994 р.

Апробація роботи. Результати роботи доповідалися на 6 міжнародних, 14 всесоюзних, 7 республіканських і відомчих конференціях, нарадах і семінарах, а також на симпозиумах і семінарах: сесії наукової ради при Президії НАН України, ФМІ НАН України, ІПТММ НАН України, НВО ЦНИИТМАШ, НВО "Дальстандарт", ЦНДІ "Прометей", НВО ВНИИМЕТМАШ.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано в 70 працях, з них одна монографія, 3 препринти та 3 авторські свідоцтва.

Структура і обсяг роботи. Виклад результатів досліджень в дисертації проведено наступним чином. Спочатку розглянуто фізичну природу явища АЕ при утворенні і рості тріщин. На цій основі формуються відповідні математичні моделі, а далі – математичні задачі теорії тріщин. Для розв'язання цих задач розроблено математичні методи, ефективність яких ілюструється на нестационарних динамічних задачах теорії тріщин зі змішаними крайовими умовами. В результаті встановлено аналітичні залежності між параметрами тріщин та параметрами сигналів АЕ. Ці залежності лягли в основу розроблених критеріїв оцінки міцності матеріалів і конструкцій, методик визначення параметрів тріщин в конструкційних матеріалах за даними АЕ.

Робота складається із вступу, 7-ми розділів, висновків, списку літератури і додатку. Основна частина роботи викладена на 335 сторінках машинописного тексту і включає 9 таблиць і 85 ілюстрацій. Бібліографічний список має 418 найменувань літературних джерел.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі показано актуальність теми досліджень, сформульовано мету роботи і запропоновано шляхи вирішення поставленої проблеми.

РОЗДІЛ I. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЛОКАЛЬНОГО РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ, ЩО СУПРОВОДЖУЄТЬСЯ АКУСТИЧНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ

Проведено аналіз і синтез відомих в літературі теоретичних і експериментальних результатів близьких до теми дисертації. Показано необхідність створення, в першу чергу, теорії акустичного ви-

промінювання зростаючими тріщинами, а також методик АЕ-контролю конструкційних матеріалів.

Побудова основ теорії АЕ-дефектометрії вимагає уміння розв'язування прямих та обернених задач. Для дефектів типу тріщин прямі задачі виключають в себе розробку моделей утворення тріщин і їх докритичного росту і встановлення на цій основі динамічних полів переміщень, що при цьому виникають. Обернені задачі – це визначення параметрів тріщин за даними АЕ. В загальному випадку обернені задачі (знаходження за параметрами електричних сигналів АЕ динамічних переміщень на тріщині) є некоректними і математичний апарат їх розв'язання є недостатньо розробленим. Щоб уникнути цього пропонується підхід, за яким спочатку знаходяться розв'язки прямих задач, на основі чого встановлюються аналітичні залежності між окремими параметрами тріщин і параметрами сигналів АЕ. Із цих залежностей досить просто розв'язуються обернені задачі, які вже є, як правило, коректними.

Першим і, отже, одним із найбільш важливих етапів розв'язування прямих задач є розробка моделей утворення і росту тріщин як випромінювачів пружних хвиль. Для цього коротко розглянемо фізичні процеси, що передують та супроводжують утворення чи стрибок корозійної тріщини коли переважаючим є механізм водневого окрихнення. Для водню на метал характеризується наявністю зон локальної його концентрації і зниженням опору поширення тріщини. При наявності прикладених зовнішніх чи внутрішніх зусиль в цих зонах утворюються мікротріщини або проходить зростання існуючих макротріщин.

Під час утворення і росту тріщини на новоутвореній її поверхні відбувається падіння напруження від початкового (до руйнування) рівня до нуля, що призводить до випромінювання пружних хвиль. Час розвантаження поверхні тріщини залежить від механічних властивостей матеріалу і зменшується при збільшенні його крихкості. Для крихких і квазикрихких матеріалів він малий. Тому можна прийняти, що для цих матеріалів розвантаження проходить миттєво.

Розглянуті процеси описуються наступною моделлю утворення і докритичного зростання тріщини як випромінювача пружних хвиль у квазикрихких матеріалах при дії агресивного середовища і навантаження, коли переважаючим є механізм водневого окрихнення:

1. Локальне руйнування починається в місці дії максимальних деформацій, напружень чи концентрації водню в залежності від міцнісних властивостей матеріалу і системи матеріал-середовище.

2. В момент, що передує утворенню чи стрибку тріщини в площині майбутнього розриву твердого тіла діє постійне напруження σ_0 , що є інтегральною характеристикою міцності матеріалу на відрив у даному агресивному середовищі.

3. В момент утворення чи стрибка тріщини на її новоутвореній поверхні проходить миттєве падіння напруження від вихідного рівня σ_0 до нуля, що призводить до випромінювання пружних хвиль.

4. Напружено-деформований стан у тілі під час такого локального руйнування визначається методами лінійної теорії пружності.

Розглянемо тепер математичне формулювання запропонованої моделі. Для цього запишемо крайові умови задач про акустичне випромінювання тріщинами, що ростуть, а також встановимо аналітичні залежності між параметрами тріщини і параметрами АЕ.

Спочатку проведемо аналіз динамічного поля переміщень при утворенні наскрізної скінченної тріщини. Оскільки величина новоутвореної тріщини набагато менша від лінійних розмірів тіла, то припустимо, що утворення тріщини відбулося в необмеженому тілі. Згідно четвертої гіпотези моделі, задача є лінійною. Це дає змогу застосувати принцип суперпозиції напружено-деформованого стану і розбити поставлену задачу на дві: статичну і динамічну. Так як перетворювачі АЕ фіксують лише динамічну складову поля переміщень, то розглянемо тільки динамічну задачу. Згідно третьої гіпотези моделі це буде задача про миттєве прикладання постійного напруження на поверхні тріщини. Крайові умови для поставленої плоскої задачі про утворення скінченної наскрізної тріщини нормального відриву для півпростору $y \geq 0$ запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} \sigma_y(x, 0, t) &= -\sigma_0 H(t), & |x| < l; \\ v(x, 0, t) &= 0, & |x| > l; \\ \tau_{xy}(x, 0, t) &= 0, & 0 < |x| < \infty, \end{aligned} \quad (1)$$

де $H(t)$ — одинична функція Хевісайда; t — час; $2l$ — довжина наскрізної тріщини; u і v — переміщення вздовж осей Ox і Oy ; σ_y і τ_{xy} — нормальне і дотичне напруження відносно площини xOy ; σ_0 — інтегральна характеристика міцності на відрив системи матеріал-середовище.

Для тріщини поперечного і поздовжнього зсуву у крайових умовах типу (1) на поверхні тріщини задаються відповідні зсувні напруження. Для задач про стрибок тріщини в обидві сторони на величину $\Delta l = l - l_0$ праву частину першого рівняння (1) треба

помножити на $H(|x| - l_0)$, де l_0 і l – відповідно півдовжина тріщини до і після її стрибка.

Під інтегральною характеристикою міцності на відрив σ_0 системи матеріал-середовище розумітимемо усереднене постійне значення напруження σ_y , яке діє у всій зоні майбутньої новоутвореної поверхні тріщини перед локальним руйнуванням. Величину σ_0 можна визначити, використавши істинну діаграму одновісного розтягу циліндричного зразка в середовищі. Тоді постійна величина σ_0 вибирається таким чином, щоб робота напружень σ_y на переміщеннях новоутвореної поверхні тріщини, дорівнювала сумарній роботі дійсних напружень на цих же переміщеннях в реальному матеріалі.

Зв'язок величини стрибка Δl наскрізної тріщини з КІН K_I визначається на основі першої гіпотези запропонованої моделі і відомих розв'язків задач (McMeeking R. J. Mech. Phys. Solids, 1978, N 5; Андрейків А.Е., Панасюк В.В., Харин В.С. ФХММ, 1978, N 3). З цих робіт випливає, що відстані, де досягаються максимальна концентрація водню, максимальна деформація і напруження будуть залежати від розкриття тріщини в її вершині δ і знаходиться в межах від δ до 2δ від вершини тріщини. Узагальнивши ці три випадки, можна записати, що одиничний стрибок тріщини Δl при корозійному розтріскуванні буде

$$\Delta l = aK_I^2, \quad (2)$$

де a – константа, яка залежить від системи матеріал-середовище. Ця константа може знаходитися експериментально або теоретично із розв'язку задачі про напружено-деформований стан біля вершини тріщини для конкретної системи матеріал-середовище. Коли середовищем є повітря, а матеріал ідеально пружно-пластичний, то $a = a_1 = 0,6 / \sigma_{1E}$ (σ_1 – границя текучості, E – модуль Юнга), або $a = 2a_1$ в залежності від того, чи буде руйнування починатися в місці дії максимальних деформацій чи максимальних напружень. Для реальних матеріалів, як правило, притаманні змішані механізми руйнування. Тому величина Δl буде знаходитися в межах від δ до 2δ .

Частіше на практиці зустрічається випадок поширення плоскої тріщини в тривимірному тілі. В загальному випадку така тріщина і її стрибок мають довільну форму. Напружено-деформований стан біля вершини тріщини для пружно-пластичного тіла в даний час є недосліджений. Тому застосуємо наближений підхід. Замінімо тріщину довільної форми на дископодібну такої ж площі. Для неї

введемо еквівалентне значення КІН K_{leq} як усереднене значення K_1 вздовж контура тріщини. Представимо одиничний стрибок, що відбувся біля напівбезмежної тріщини, у вигляді півдиску. Радіус диску r_{eq} , згідно з (2), дорівнює aK_{leq}^2 . Тоді площа одиничного стрибка Δs є:

$$\Delta s = a_s K_{leq}^4, \quad (3)$$

де $a_s = \pi a^2$.

На основі запропонованої моделі і розв'язків задач, крайові умови яких тут сформульовані, встановлюються аналітичні залежності між параметрами тріщини і параметрами сигналів АЕ.

РОЗДІЛ II. ПІДХІД ДЛЯ ВСТАНОВЛЕННЯ АНАЛІТИЧНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МІЖ ПАРАМЕТРАМИ НОВОУТВОРЕНИХ ТРІЩИН І ПАРАМЕТРАМИ СИГНАЛІВ АЕ

Даний підхід можна застосувати для розв'язання в переміщеннях нестационарних динамічних задач акустичного випромінювання наскрізними і осесиметричними тріщинами. Підхід ґрунтується на методи інтегральних перетворень і методи граничної інтерполяції. Його апробовано на задачах про утворення і стрибкоподібний ріст наскрізної та дископодібної тріщини за різними механізмами. Підхід реалізується наступним чином. Застосовуємо до хвильових рівнянь інтегральні перетворення Лапласа за часом t і перетворення Фур'є за координатою x . Для осесиметричних задач за координатою r застосовується перетворення Ганкеля. Врахувавши крайові умови типу (1), отримуємо звичайні диференціальні рівняння, розв'язки яких є відомі. Використавши підхід, розроблений Sih G., Embley G., Ravera R. (Int. J. Solids Struct., 1972, N 7), приходимо до парних інтегральних рівнянь, а потім до інтегрального рівняння Фредгольма другого роду. Для розв'язання цього інтегрального рівняння застосовано метод квадратурних формул. Знайдений на дійсній осі у просторі зображень інтегрального перетворення Лапласа числовий розв'язок апроксимовано аналітичною функцією, оригінал якої є відомий.

Для перевірки точності апроксимації інтегрального рівняння обчислювалися переміщення на тріщині з використанням апроксимаційного представлення і числового обернення перетворення Лапласа, що здійснене методом Папуліса. Крім цього максимум переміщення порівнювався із знайденим методом скінченних елементів (Маслов Л.А. ПМТФ, 1976, N 2). Обчислені таким чином максимальні переміщення центральної точки тріщини ідрізнялися між собою на 5%.

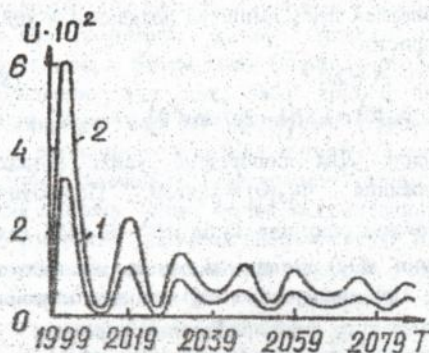


Рис. 1. Форма пружної хвилі при утворенні тріщини для $\tau=2000$ і $\theta=15^\circ$ (крива 1) та $\theta=60^\circ$ (крива 2).

було складено програми на алгоритмічній мові FORTRAN, які враховували специфіку обчислень інтегралів як від осцилюючих функцій, так і функцій з особливостями. На рис. 1 зображено форму пружної хвилі при утворенні наскрізної тріщини нормального відриву в безрозмірних змінних $U = 2\pi r c_1^2 (u^2 + v^2)^{1/2} / \sigma_0$ і $T = c_1 t / a$ в різних точках полярної системи координат $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$, $\theta = \arctg(y/x)$. Тут ρ – густина матеріалу, c_1 – швидкість поздовжньої хвилі. Відзначимо, що для $r \geq 40$ форма хвилі не змінюється із віддаллю.

На основі отриманих результатів для обчислень перших амплітуд сигналів АЕ у всій площині при r більшому деякої величини r_* , пропонується така інтерполяційна формула

$$U_m = GF(F)_{r=r_*} \left[(F(F)_{r=r_*})^m + (G(F)_{r=r_*})^m - (GF)^m \right]^{1/m}, \quad (4)$$

де $r_* = 6$; $m = 2, 18$; $G = G(\theta)$ – функція кута орієнтації тріщини при $r = r_*$, $F = F(r, \theta) = 1,34 \Phi(\theta) / \sqrt{r}$ – значення U_m для великих r . Функції $G(\theta)$ і $\Phi(\theta)$ апроксимувалися степеневими рядами. Тут припускалося (Грещников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия для испытанных материалов и изделий. М.: Изд-во стандартов, 1976, 276 с.), що максимум вектора переміщень U_m і амплітуда сигналу АЕ A є пропорційні, тобто $A = \alpha U_m$, де α – множник пропорційності.

Із застосуванням теореми про згортку спочатку для перетворення Фур'є (теореми Парсевяля для перетворення Ганкеля), а потім для перетворення Лапласа, отримано в замкненому вигляді розв'язки в переміщеннях поставлених задач. Знайдені таким чином компоненти вектора переміщень обчислено на ЕОМ для металічних матеріалів. Для цього

В дальній зоні випромінювання зміну амплітуд поздовжньої хвилі можна представити більш просто

$$A = bl^{3/2}, \quad (5)$$

де $b = \alpha \sigma_0 \Phi_{II}(\theta) / \pi r c_1^2 \sqrt{g}$, $\Phi_{II}(\theta) = 1,57(1 - 2\varepsilon^2 \cos^2 \theta)$, $\varepsilon = c_2/c_1, c_2$ - швидкість поперечної хвилі. Для поперечної хвилі функція напрямленості випромінювання $\Phi_{II}(\theta) = 2 \sin 2\theta$. Порівняння функцій $\Phi_{II}(\theta)$ і $\Phi_{II2}(\theta)$ показує, що для кутів $10^\circ < \theta < 65^\circ$ (для першого квадранта площини xOy) поперечна хвиля має більшу амплітуду, ніж поздовжня. При цьому максимум випромінювання буде у напрямку, г.з. відповідає куту, який приблизно дорівнює 45° .

Вплив механізму утворення тріщини на формування акустичного поля досліджено з аналізу розв'язків задач про утворення тріщини поздовжнього і поперечного зсуву. Для таких тріщин побудовано інтерполяційну формулу аналогічну до (4). Показано, що для тріщини поперечного зсуву залежність (5) зберігається, але потрібно взяти функцію напрямленості для поздовжньої хвилі $\Phi_{III}(\theta) = 0,62 \sin 2\theta$, а для поперечної хвилі $\Phi_{III2}(\theta) = 2,25 \cos 2\theta$.

У випадку утворення тріщини поздовжнього зсуву (антиплоска задача) в необмеженому пружному тілі буде випромінюватися лише одна поперечна хвиля, амплітуду якої в дальній зоні можна обчислити за формулою (5), поклавши $\Phi_{III2}(\theta) = 6,95 \sin \theta$. Порівняння функцій $\Phi_{km}(\theta)$ ($k=I, II, III; m=1, 2$) показує, що кожному механізму утворення тріщини відповідає своя, притаманна тільки йому, діаграма напрямленості акустичного випромінювання.

Цікавим є порівняння акустичних полів при утворенні наскрізної тріщини і при утворенні внутрішньої дископодібної тріщини за одним і тим же механізмом. Для дископодібної тріщини нормального відриву просторовий розподіл амплітуд сигналів АЕ описується залежністю

$$A = \alpha \sigma_0 S \Phi_{II}(\eta) / \pi r c_1^2 R, \quad (6)$$

де

$$\Phi_{II}(\eta) = 2(1 - 0,68 \cos^2 \eta), \quad R = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}, \quad \eta = \arctg(z/r), \quad S = \pi R_0^2, \quad R_0 - \text{радіус тріщини.}$$

Порівняння полів переміщень для наскрізної і дископодібної тріщини нормального відриву показує, що із зростанням віддалі до точки спостереження зникання амплітуд сигналів АЕ для дископодібної тріщини буде проходити швидше, ніж для наскрізної. Накинем буде і зв'язок між амплітудою сигналу АЕ і розміром

тріщини: для дископодібної вона є пропорційною до площі дефекту, а для наскрізної – довжині тріщини в степені 1.5, що пов'язано, очевидно, з типом хвилі (відповідно сферичною та циліндричною). Спільною для цих двох тріщин буде залежність від кута випромінювання (кута розміщення тріщини), якщо вести відлік кута від площини розміщення тріщини. З літератури відомо, що така ж кутова залежність буде для дислокаційного нормального розриву і для диполів. Таким чином, із приведених залежностей видно, що на формування діаграми напрямленості акустичного випромінювання переважаючий вплив має механізм утворення тріщини. Це можна використати для його ідентифікації і оптимального вибору місця розміщення перетворювача АЕ.

З метою спрощення математичного апарату для розв'язання задач, утворення тріщини моделювалося також миттєвим прикладанням статичного переміщення на її поверхні. Обчислення проведено для двох видів навантаження: 1) пластина розтягується зосередженими силами, симетричними відносно тріщини; 2) пластина розтягується рівномірно розподіленим навантаженням. Порівняння полів переміщень показало, що якісна картина для цих двох моделей, в цілому, одна і та ж. Кількісно ж максимальні значення вектора переміщень відрізняються між собою.

Проведено дослідження впливу систем тріщин на акустичне поле. Для цього на основі принципу суперпозиції напружено-деформованого стану в тілі від дії двох незалежних джерел знайдено дальнє поле переміщень при утворенні в пластині систем двох окремих паралельних і колінарних тріщин нормального відриву. В якості інформативного параметра сигналів АЕ вибрано першу амплітуду сигналу. Запропоновано інтерполяційні формули, що описують просторовий розподіл перших амплітуд сигналів АЕ.

Поверхня контрольованого тіла часто вносить додаткові зміни в параметри сигналів АЕ, що породжені тріщиною. Тому в даному розділі досліджено амплітуди сигналів АЕ при утворенні зовнішньої кільцевої тріщини в циліндричному тілі, яке піддане розтягу чи крученню. Показано, що у випадку дрібної тріщини переміщення поверхні циліндра знаходяться із поля переміщень у необмеженому тілі, яке виникає при утворенні за відповідними механізмами центрально-симетричної наскрізної тріщини. Знайдено залежності між амплітудами сигналів АЕ та глибиною утвореної тріщини.

Особливістю ресстрації сигналів АЕ на великогабаритних об'єктах є те, що крім поздовжніх і поперечних хвиль, у них виникають також хвилі Релея. В залежності від розміщення перетворювача відносно епіцентра джерела, домінуватимуть хвилі певного типу. Тому

спочатку потрібно встановити віддалі домінування хвиль, а потім – рівняння для обчислення компонент вектора переміщень.

Для порівняння амплітуд хвиль Релея з амплітудами інших хвиль розглянуто задачу про утворення внутрішнього джерела у півпросторі. Обчислено переміщення поверхні півпростору і встановлено залежність для оцінки віддалі, де хвиля Релея буде співмірною із поздовжньою та поперечною хвилями:

$$\operatorname{tg}\varphi \geq [2/(c_{2R} - 1)]^{1/2}, \quad (7)$$

де $\varphi = \arctg(r/h_0)$, r – віддаль від епіцентра до точки реєстрації, h_0 – віддаль від джерела до поверхні півпростору, $c_{2R} = c_2/c_R$, c_R – швидкість хвилі Релея. Наприклад, для металічних матеріалів при $\nu=0,3$ хвиля Релея спостерігається на віддальх $r \geq 5h_0$.

Переміщення поверхні півпростору при рості внутрішньої тріщини знайдено на основі розв'язку Harris J., Pott J. (J. Appl. Mech., 1984, N1) і розв'язку задачі про стрибок плоскої тріщини довільної форми, що отримані вище. Для цього випадку встановлено аналітичні залежності між параметрами тріщини та параметрами сигналів АЕ.

РОЗДІЛ III. ПРОЦЕСИ АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ ДОКРИТИЧНОМУ РОСТІ ТРИЩИНИ

Проблему дослідження акустичного випромінювання при докритичному рості тріщини розіб'ємо умовно на дві: дослідження тонкої структури сигналу АЕ від одиничного стрибка тріщини і встановлення аналітичних залежностей, що описують кінетику розвитку тріщини і параметрів сигналів АЕ.

Дослідження параметрів пружних хвиль, що випромінюються зростаючою тріщиною, проведено на основі підходу, викладеного у розділі II. При цьому для розв'язання інтегрального рівняння Фредгольма другого роду застосовано метод визначників Фредгольма у припущенні, що $\Delta l \ll 1$. В результаті знайдено залежність між величиною стрибка тріщини Δl і амплітудою сигналу АЕ А:

$$\Delta l = bA^{2/3}, \quad (8)$$

де b – множник пропорційності, який залежить від міцнісних властивостей матеріалу, довжини тріщини, розмішеня перетворювача АЕ відносно тріщини і режимі роботи приладу АЕ.

Співвідношення типу (8) було отримано також Болотніним Ю.І., Масловим Л.А., Полуніним В.І. (Дефектоскопия, 1975, N4) на основі енергетичного підходу. Проте спосіб визначення множника b ними

не вказувався. На основі запропонованої моделі він знаходиться за формулою $b = aK_1^2 A^{-2/3}$ за відомою амплітудою сигналу АЕ А і КІН K_1 або із залежності $b = \sigma_0 \Phi(\theta) / \alpha r c_1^2 \sqrt{r}$, де $\Phi(\theta)$ – функція напрямленості акустичного випромінювання, яка задана поліномом.

Встановимо кінетичні рівняння докритичного поширення наскрізної тріщини і зв'язаного із ним акустичного випромінювання.

Якщо в процесі докритичного росту тріщини зафіксовано К стрибків, то, просумувавши їх, із (8) отримуємо

$$\Delta l_n = \sum_{k=1}^K \Delta l_k = \sum_{k=1}^K A_k^{2/3}, \quad (9)$$

де Δl_n – сумарний приріст довжини тріщини після К-го стрибка, Δl_k і A_k – відповідно величина к-го стрибка тріщини і амплітуда сигналу АЕ, що при цьому виникає. Після підстановки у праву частину рівняння (9) формули Черепанова Г.П. (Механіка разрушения. М:Наука, 1974, 640 с.), що зв'яже Δl_n із K_1 , отримано взаємозв'язок між амплітудами сигналів АЕ і КІН.

Використавши співвідношення (2), формулу Черепанова, а також припустивши, що кожному стрибку тріщини відповідає в середньому однакова кількість імпульсів АЕ, отримали залежність

$$N = -\beta_{1z} f(K_{10}, K_1, K_c), \quad (10)$$

де

$$f(K_{10}, K_1, K_c) = 2g(K_{10}, K_1, K_c) / a(K_1^2 + K_{10}^2), \quad (11)$$

$$g(K_{10}, K_1, K_c) = (K_1^2 - K_{10}^2) / K_c^2 + \ln[(K_c^2 - K_1^2) / (K_c^2 - K_{10}^2)] \quad (12)$$

В залежностях (10)-(12) під N слід розуміти підсумковий рахунок сигналів АЕ; K_{10} і K_c – відповідно початкове і критичне значення K_1 ,

$\beta_{1z} = \alpha_1 \gamma E K_c^2 / 2\sigma_T$; α_1 – безрозмірний множник, що залежить від E , σ_T і коефіцієнта Пуассона ν ; γ – множник пропорційності між N і кількістю стрибків тріщини K. Якщо N дорівнює кількості стрибків (тобто якщо під N розуміти кількість подій АЕ), то $\gamma = 1$.

Експериментальні результати показують, що співвідношення (2) справедливе і для циклічного навантаження. Тому з аналогічних міркувань отримано залежності між максимальним КІН за цикл навантаження і швидкістю підсумкового рахунку АЕ при зростанні наскрізної втомної тріщини і між повним приростом тріщини, КІН і підсумковим рахунком АЕ при корозійному розтріскуванні під дією постійного навантаження.

Для оцінки параметрів сигналів АЕ при одиничному стрибку плоскої тріщини довільної форми в тривимірному тілі запропоновано метод порівняння полів переміщень. При цьому моделюється, що стрибок тріщини має форму півдиска, який утворився біля напівбезмежної тріщини. Із порівняння полів переміщень знайдено, що виникаючі при цьому пружні хвилі мають параметри, які дорівнюють добутку відповідних параметрів при утворенні дископодібної тріщини і стрибку наскрізної тріщини та розділені на параметри хвиль при утворенні наскрізної тріщини. В результаті встановлено, що просторово-часовий розподіл переміщень при стрибку тріщини у вигляді півдиску описується залежністю

$$u_i(R, \eta, \theta, t) = 1,3b_0\sigma_0\Delta s\Phi_i(\eta, \theta)T_i(t)/\pi rc_1^2R, \quad (13)$$

де $T_i(t)$ – задана часова функція, Δs – площа стрибка тріщини, $\Phi_i(\eta, \theta)$ – функція кута орієнтації тріщини при її стрибку, яка відрізняється від аналогічної функції при утворенні дископодібної тріщини тим, що враховує вплив вільної поверхні тріщини. Для продовжньої хвилі ця функція, наприклад, є:

$$\Phi_i(\eta, \theta) = (1 - 2\epsilon^2 \cos^2 \eta) \left[(1 + \cos \eta_1) / \left[(1 + (c_R/c_1) \cos \eta_1) D(-\cos \eta_1) \right] \right], \quad (14)$$

де $\cos \eta_1 = \cos \eta \left[\cos^2 \eta + \sin^2 \eta / \sin^2 \theta \right]^{-1}$, $D(-\cos \eta_1)$ – інтеграл, який знаходиться числово.

Отримано також, що ширина смуги частот сигналу АЕ Δf при стрибку тріщини обернено пропорційна квадрату КІН:

$$\Delta f = \beta_f K_{\text{leq}}^{-2}, \quad (15)$$

де $\beta_f = 0,25\beta_\tau c_2/\pi a$, β_τ – множник пропорційності між шириною спектра частот при утворенні і стрибку тріщини.

Із (13), зокрема, випливає, що площа стрибка тріщини є пропорційною амплітуді сигналу АЕ

$$\Delta s = dA, \quad (16)$$

де $d = \pi a r c_1^2 R / 2\sigma_0 \Phi_i(\eta)$.

Просумувавши площі всіх стрибків тріщини в процесі її докритичного росту, отримуємо залежність між повним приростом площі тріщини і сумою амплітуд сигналів АЕ

$$\Delta s_n = d_k \sum_{k=1}^n A_k. \quad (17)$$

Із аналізу розмірностей встановлено аналітичну залежність між приростом площі Δs_n тріщини і усередненим значенням КІН K_{leq} вздовж контура тріщини при зростаючому статичному навантаженні

$$\Delta s_n = -\alpha_{ss} F_s(K_{10}, K_{leq}, K_c), \quad (18)$$

де

$$F_s(K_{10}, K_{leq}, K_c) = (K_{leq}^4 - K_{10}^4) / 2K_c^4 + g(K_{10}, K_{leq}, K_c), \quad (19)$$

функція $g(\dots)$ обчислюється із рівняння (12); $\alpha_{ss} = \alpha_2 EK_c^4 / 2\sigma_T^2$; α_2 – безрозмірний множник, що залежить від E , σ_T і ν ; K_{10} і K_c – відповідно значення K_{leq} , які відповідають старту тріщини і його критичному значенню.

Тоді, врахувавши (3), підсумковий рахунок сигналів АЕ N можна виразити через K_{leq} наступним чином

$$N = -\beta_{ss} G_s(K_{10}, K_{leq}, K_c), \quad (20)$$

де

$$G_s(K_{10}, K_{leq}, K_c) = 4F(K_{10}, K_{leq}, K_c) / \pi a_s (K_{leq}^4 + K_{10}^4), \quad (21)$$

$\beta_{ss} = \alpha_{ss} \gamma$; γ – множник пропорційності між N та K .

Аналогічні кінетичні рівняння, що зв'язують зміну площі тріщини, суму імпульсів сигналів АЕ за цикл навантаження і КІН отримано при малоцикловому навантаженні.

Таким чином, встановлено ряд нових, в багатьох випадках більш універсальних (у порівнянні з існуючими) аналітичних залежностей між параметрами тріщин і параметрами сигналів АЕ при різних видах навантаження.

РОЗДІЛ IV. ТЕОРІЯ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНОЇ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ТРІЩИН ТА ДІАГНОСТУВАННЯ МІЦНОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ ТІЛ З ТРІЩИНАМИ

Отримані вище аналітичні залежності між параметрами тріщин та параметрами сигналів АЕ покладено в основу нових методів визначення геометричних параметрів тріщин, а також механізмів їх утворення та росту за даними АЕ. При цьому припускалося, що віддалі від тріщини до перетворювачів АЕ відомі, так як методи АЕ локації джерел випромінювання є достатньо розроблені, наприклад, триангуляційний метод.

Визначення довжини $2l$ та орієнтації θ центрально-симетричної новоутвореної тріщини за відомими в трьох довільних точках пластини амплітудами сигналів АЕ і відомими координатами тріщини здійснюється наступним чином. На основі формули (4) складається система восьми пар рівнянь відносно l і θ . З допомогою ЕСМ знаходиться розв'язок кожної із систем. Які із знайдених значень l і θ відповідають дійсним, перевіряємо за формулою (4). При цьому

підставляємо замість r , θ і A їх значення для деякої з трьох точок. В результаті співвідношення (4) перейде у наближену рівність лише для тих значень l і θ , які відповідають дійсним.

У випадку реєстрації сигналів АЕ у дальній зоні випромінювання рівняння для визначення l і θ спрощуються ще більше. Аналогічні рівняння отримуються і у випадку стрибка вже існуючої тріщини. Із залежності (5) випливає, що величина стрибка однозначно визначається за відомою амплітудою сигналу АЕ

$$l = \left(\text{Arсг}_1^2 \sqrt{\gamma} / \alpha \sigma_0 \Phi_{\text{km}}(\theta) \right)^{2/3}, \quad (22)$$

де припускалося, що A і θ є відомими.

Коли орієнтація тріщини є незвідома, потрібно мати три амплітуди сигналів АЕ, зафіксовані в різних точках плоского елемента конструкції. Тоді, на основі (22), складається рівняння відносно θ :

$$A_2 \sqrt{\gamma_1} \Phi_{\text{km}}(\theta) - A_1 \sqrt{\gamma_2} \Phi_{\text{km}}(\theta + \theta_0) = 0, \quad (23)$$

де θ_0 – кут між прямими, що з'єднують точки розміщення перетворювачів АЕ та центр тріщини.

Виходячи із залежності (6), розроблено і реалізовано алгоритм визначення площі і орієнтації дископодібної тріщини. Для цього в (6) підставляються відомі значення амплітуд в трьох точках спостереження і віддалі від них до тріщини. В результаті отримуються три рівняння відносно трьох напрямних косинусів нормалі до поверхні тріщини та радіуса тріщини. Додаткове четверте рівняння отримано з умови, що сума квадратів напрямних косинусів рівна одиниці. Після розв'язання системи таких рівнянь отримано рівняння четвертої степені відносно величини, що обернено пропорційна площі тріщини. Єдиною правильною з чотирьох можливих орієнтацій тріщини, що знайдена таким чином, встановлюємо за допомогою залежності (6), складеної для четвертій точки реєстрації.

Отримані результати дозволяють за амплітудами сигналів АЕ визначати механізм утворення наскрізної тріщини. Утворення тріщини поздовжнього зсуву можна констатувати на основі якісного аналізу сигналів АЕ в деякій точці реєстрації, так як в цьому в. ладку випромінюється лише поперечна хвиля, тоді як для двох інших – поздовжня і поперечна. Про утворення тріщини нормального відриву свідчитиме виконання залежностей (5). Для цього в трьох точках пластини фіксуються амплітуди сигналів АЕ і з рівнянь, складених згідно із залежністю (5), визначається довжина і орієнтація тріщини. Якщо це є дійсно тріщина нормального відриву, то розв'язки будуть існувати і узгоджуватимуться для всіх трьох точок. В іншому разі це є тріщина поперечного зсуву.

Подібно визначається механізм руйнування кулеподібного пружного включення в пластичній матриці. В результаті руйнування може утворитися сферична порожнина або дископодібна тріщина нормального відриву чи зсуву. Якщо добуток амплітуди поздовжньої хвилі на віддаль для всіх точок ресстрації є постійною величиною, то новоутворений дефект є порожниною. При утворенні тріщини нормального відриву амплітуди сигналів АЕ, що при цьому виникають, мають задовольняти рівняння (6). В протилежному випадку робиться висновок, що включення було зруйноване за механізмом зсуву.

Встановлені аналітичні залежності склали основу критеріальних рівнянь для визначення міцності і довговічності елементів конструкцій за даними АЕ. Такі рівняння запропоновано для зростаючого статичного і малоциклового навантаження, а також корозії під напруженням. Використати для цього можна амплітуди сигналів АЕ, їх спектральні характеристики і підсумковий рахунок АЕ. Наприклад, із залежності (15) встановлено, що експлуатація елемента конструкції з внутрішньою тріщиною є безпечною, якщо ширина смуги частот сигналу АЕ не менша величини $\Delta f_c = \beta_f / 0,49K_c^2$. При цьому умовою безпечної роботи вважалось виконання нерівності $K_1 < 0,7K_c$.

РОЗДІЛ V. РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ АЕ-ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Загальний підхід до проведення АЕ-досліджень параметрів тріщиностійкості матеріалів регламентує методи селекції сигналів АЕ від тріщин серед сигналів від інших джерел, підбір найбільш ефективних параметрів сигналів АЕ для контролю за тріщинами, вибір робочої частоти перетворювача АЕ та місця його розташування. Відповіді на більшість з цих питань містять результати теоретичних досліджень, що приведені вище. Їх потрібно було підтвердити експериментально. Для вибору інформативних параметрів сигналів АЕ і для ідентифікації їх від різних джерел випромінювання необхідно було провести додаткові експериментальні дослідження.

Перш за все було запропоновано критерій для ідентифікації сигналів АЕ від росту тріщини і інших джерел випромінювання, що є в матеріалі. Згідно з цим критерієм за старт тріщини приймався стрибкоподібна зміна параметрів сигналів АЕ під час зростаючого статичного навантаження. Встановлено, що для крихких матеріалів в момент старту тріщини фіксується різке зростання амплітуд і підсумкового рахунку сигналів АЕ. Для пластичних матеріалів старт

тріщини породжує зростання лише підсумкового рахунку сигналів АЕ. Така зміна вказаних вище параметрів (або принаймні одного з них) властива для всіх досліджуваних матеріалів, різних розмірів зразків та широкого діапазону робочих параметрів приладів АЕ. Цю властивість взято за критерій ідентифікації сигналів АЕ, що породжені тріщиною. З метою підтвердження старту тріщини після якісної зміни параметрів сигналів АЕ, зразки розвантажували і піддавали термофарбуванню або циклічному навантаженню. Це дало змогу відігнати початкову втомну тріщину від докритичного її подорожання під час статичного навантаження.

В розділах II та III проведено теоретичні дослідження тонкої структури сигналів АЕ, що породжені зростаючими тріщинами. Експериментальні дослідження тонкої структури сигналів АЕ, включаючи спектр сигналів АЕ, для різних стадій і механізмів розвитку тріщини при навантаженні розтягом компактних зразків з алюмінієвого сплаву 1201-Т здійснено за допомогою вимірювального комп-

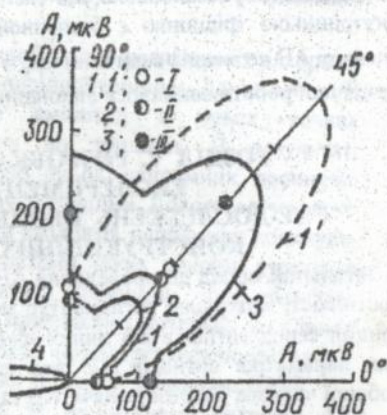
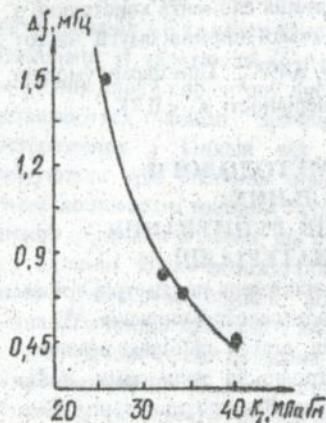


Рис. 2. Залежність ширини смуги частот сигналів АЕ Δf від КІН K_I .

Рис. 3. Направленість акустичного випромінювання при рості тріщини нормального відриву для різних величин навантаження (сушільні криві 1-3) та при рості пластичної зони (пунктирна лінія 1'), 4 - контур тріщини.

лексу, який складається з EOM MERA, системи КАМАК, швидкодіючого процесора та аналогово-цифрового перетворювача. Під час докритичного росту тріщини отримано звуження ширини смуги частот в діапазоні до 600 кГц, яке добре описується теоретичною залежністю (15) (рис.2). Таке звуження відбувалося до переходу тріщини у закритичну стадію розвитку, де знову спостерігалось

розширення смуги частот. Це викликано, перш за все, переходом механізму росту тріщини від нормального відриву до змішаного (нормальний відрив – зсув). Тому рекомендовано використовувати при АЕ-контролі за докритичним ростом тріщин перетворювачі АЕ, що мають робочу смугу частот в діапазоні від 100 до 600 кГц. Обмеження смуги частот знизу викликано високим рівнем фонових завод на низьких частотах.

З метою підвищення ефективності АЕ-контролю необхідно враховувати діаграму напрямленості акустичного випромінювання при зростанні тріщини. Це зумовлено тим, що з одного боку з нею потрібно узгоджувати діаграму напрямленості приймального перетворювача АЕ, а з другого – за нею можна визначати механізм локального руйнування, відслідкувати сигнали АЕ від завод. Методика експериментальних досліджень є наступною. Навантажували розтягнуті компактні або дискові зразки, на які під різними кутами відносно площини тріщини встановлювали три п'єзоперетворювачі АЕ. З них трьома паралельними каналами реєстрували амплітуди сигналів АЕ. З метою прискорення зникання відбитих сигналів бокові поверхні зразків були обклеєні шаром гуми. Результати випробувань і теоретичних розрахунків за формулою (14) приведено на рис.3.

Для підвищення вірогідності результатів вимірювання за рахунок виключення сигналів АЕ від механічних, електричних і електромагнітних завод запропоновано такий метод АЕ-контролю. Спочатку виявляються зони зразка і навантажувального пристрою, в яких очікуються найбільші значення параметрів сигналів АЕ від тріщини та від завод і в яких різниця між часами приходу сигналів АЕ від завод менша від часу тривалості події АЕ. В цих зонах встановлюють перетворювачі АЕ. Параметри сигналів АЕ від росту тріщини отримуємо шляхом відкидання подій АЕ, що зареєстровані одночасно всіма перетворювачами АЕ. Приведені вище результати покладено в основу загальних методичних рекомендацій для проведення АЕ-досліджень за процесами росту тріщин в конструкційних матеріалах.

РОЗДІЛ VI. МЕТОДИКИ АЕ-ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДОКРИТИЧНОГО РОСТУ ТРІЩИНИ В КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ ПРИ ДІЇ СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТА АГРЕСИВНОГО СЕРЕДОВИЩА

Величина нижнього порогового значення КІН K_{Ic} , що характеризує зус початок докритичного розвитку тріщини, має важливе значення

як при інженерних розрахунках, так і АЕ-контролі елементів конструкцій. Спочатку було визначено що величину для ряду конструкційних матеріалів (сталі, чавуни, титанові сплави, бетон), що навантажувалися на повітрі. Для цього застосовували АЕ-критерій визначення старту тріщини, що викладений вище.

Ще більш важливою і трудосмкою задачею є визначення величини K_{Isc} – нижнього порогового значення КІН при корозійному розтріскуванні матеріалу. Для її розв'язання було запропоновано дві методики, які відповідно значно прискорюють випробування та спрощують дослідження за зростанням тріщини. Перша з них ґрунтується на сформульованій у розділі I моделі, згідно з якою встановлено, що для КІН K_m близьких до K_{Isc} справедлива залежність

$$t_m = v_0^{-1} a K_m^2, \quad (24)$$

де v_0 – вибрана порогова (базова) швидкість; a – постійна системи матеріал-середовище, t_m – час від моменту прикладання навантаження до першого стрибка тріщини.

Експрес-методика реалізується в наступній послідовності. Спочатку експериментально при великих швидкостях росту тріщини визначається величина підростання тріщини Δl_n при зміні КІН від K_{I1} до K_{I2} , а потім за формулою $a = 2\Delta l_n / K(K_{I1}^2 + K_{I2}^2)$ обчислюється константа a . Далі вибирається величина порогового значення швидкості росту тріщини v_0 і за рівнянням (24) будується теоретична крива. Потім будується експериментальна крива, яка відображає зміну часу від моменту прикладання навантаження до стрибка тріщини від КІН. Для цього навантажується зразок у середовищі до початку росту тріщини, що визначається методом АЕ. Ступінчато знижується величина навантаження з фіксацією часу t_p від моменту прикладання постійного навантаження до першого стрибка тріщини. Пониження навантаження продовжується до того часу, поки t_p не стане приблизно дорівнювати t_m , тобто до наближення експериментальної кривої до теоретичної. За перетином теоретичної кривої з екстраполяційною, що описує експериментальні дані, знаходиться величина K_{Isc} . Її можна також визначити аналітично за формулою $K_{Isc} = m+2 \sqrt{Av_0/a}$, де A і m – константи кінетичного рівняння $t_p = AK_I^{-m}$, що отримане апроксимацією експериментальних даних.

Методику апробовано на призматичних зразках із сталі 9ХФ, що навантажувалися згином в 0,5 нормальному розчині NaCl у дистильованій воді та на компактних зразках при навантаженні клином у середовищі газоподібного водню. В останньому випадку для передачі сигналів АЕ використовувався циліндричний хвилевід, так як встановити п'езоперетворювач АЕ безпосередньо на зразок було неможливо. Для обчислення власних частот такого хвилевода довільної довжини та діаметра запропоновано інтерполяційну формулу, яка точно враховує граничні випадки інтерполяції (диск і довгий стержень), а параметр інтерполяції знаходиться в деяких проміжних точках. Проведено вибір геометричних розмірів циліндричного хвилевода, власні частоти якого узгоджено з резонансною смугою частот перетворювачів АЕ. Зникання сигналів АЕ в хвилеводі, який знаходиться в камері, досліджено експериментально. Результати випробувань для визначення величини K_{Isc} показано на рис.4. Загальний час проведення експериментальних досліджень скоротився за новою методикою в кілька разів у порівнянні із традиційними.

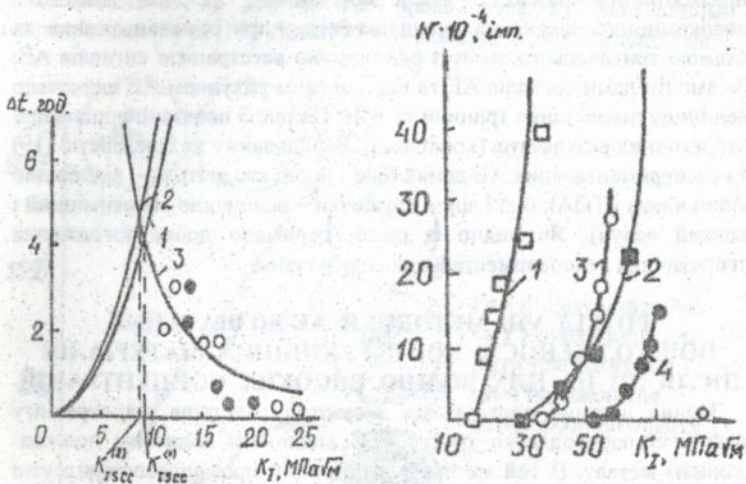


Рис. 4. Визначення величин $K_{Isc}^{(1)}$ та $K_{Isc}^{(2)}$ відповідно при корозійному та водневому розтріскуванні: 1 і 2 - теоретичні криві при $v_0 = 10^{-9}$ м/с, 3 - спільна експериментальна крива.

Рис. 5. Залежність N від K_I .

Для реалізації другої методики експериментально визначалися максимальні значення параметрів сигналів АЕ при поширенні пластичної зони і при взаємодії водню зі сталлю. Величина навантаження вибиралася таким чином, щоб теоретично встановлений радіус пластичної зони у зразку з концентратором був не менший, ніж у зразку із тріщиною при визначенні K_{Isc} . Перевершення дискретними сигналами АЕ встановленого таким чином максимального їх значення, свідчить про ріст тріщини. Потім зразки з попередньо виведеною втомною тріщиною навантажували до початку росту тріщини. Ступінчато знижували навантаження до припинення росту тріщин, що фіксувалося методом АЕ. За допомогою цієї методики визначено величину K_{Isc} для сталі 9ХФ в середовищі газоподібного водню при тиску 0,1 МПа.

Розроблено нові методики АЕ-оцінки інших параметрів докритичного росту тріщини: довжини та площі підростання тріщини, КІН. При цьому використано запропонований вище АЕ-критерій для визначення старту тріщини і теоретично встановлені аналітичні залежності, зокрема (9)-(13), (16)-(21). Методики апробовано на призматичних зразках із сталі 38ХНЗМФА, сірого, ковкого і високоміцного чавунів та золошлакобетону при їх навантаженні за схемою триточкового згину з одночасною ресстрацією сигналів АЕ. За амплітудами сигналів АЕ та підсумковим рахунком АЕ визначено величину підростання тріщини та КІН. На рис.5 показано порівняння теоретичних результатів (криві лінії), побудованих за залежністю (19) та експериментальних АЕ-даних (білі і чорні квадратики – відповідно сірий чавун і ТіЗА), білі і чорні кружочки – відповідно високоміцний і ковкий чавун). Як видно із рис.5, отримано добре узгодження теоретичних і експериментальних результатів.

РОЗДІЛ VII. МЕТОДИКИ АЕ-ВИЗНАЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПІСЛЯ ДІЇ НА НИХ ВОДНЮ ВИСОКИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ

Значна частина пошкоджень елементів реакторів гідрокрекінгу нафти та пароводяного тракту ТЕС викликана водневим пошкодженням металу. В той же час у вітчизняній промисловості відсутні надійні методи і засоби діагностування таких пошкоджень. Для вирішення цієї проблеми розроблено дві методики, що передбачають застосування методу АЕ. Перша з них застосовується для дослідження динаміки розтріскування матеріалів у процесі охолодження матеріалів відразу після їх наводнення. Другу методику

можна застосовувати для інтегральної оцінки величини пошкодженості матеріалів, яке відбулося раніше під дією водню.

Перша методика, яка подібна до методики запропонованої Гольцовим В.А., Іщенко Н.А. (ДАН СССР, 1981, N5), застосовується для АЕ-досліджень процесів сповільненого крихкого руйнування конструкційних матеріалів після дії на них водню високих концентрацій. Вона реалізується в наступній послідовності: 1) наводнення зразків матеріалів в середовищі газоподібного водню при температурі і тиску, що створюють високу концентрацію водню; 2) охолодження з різними швидкостями зразків матеріалів до кімнатної температури з наступним АЕ-контролем; 3) УЗ- та металографічний контроль. Ця методика використана для підбору оптимальної, з точки зору стійкості до подовженого розтріскування, технології наплавлення корпусів реакторів гідрокрекінгу нафти. За допомогою методу АЕ встановлено, що атака газоподібного водню при параметрах, які відповідають робочим параметрам реактора, призводить до утворення мікро- і макротріщин на межі між основним металом і нержавіючим наплавленим шаром. При цьому оцінка площі відслонень за даними АЕ проводилася за аналітичними залежностями (6) та (17). Дослідження показали, що зразки наплавле-

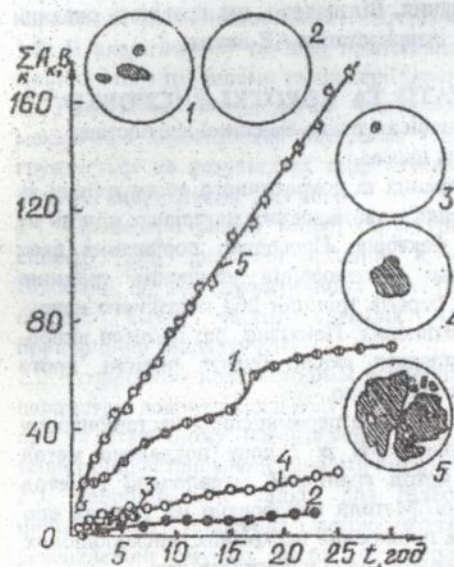


Рис. 6. Результати АЕ- та УЗ-досліджень для п'яти технологічних схем наплавлення антикорозійних шарів.

ні за новими технологічними схемами (ІЕЗ ім.С.О.Пагона НАН України), чинять більший опір руйнуванню, ніж наплавлені за

традиційною технологією (рис.6). Крім вибору технології наплавлення було досліджено також вплив швидкості охолодження матеріалів, після їх попереднього наводнення, на процеси тріщиноутворення. В результаті досліджень рекомендовано швидкості охолодження, які не призводять до утворення тріщин.

Цю методику застосовано також для контролю за утворенням заданої системи фрагментацій в матеріалах спецвиробів після дії на них водню високих концентрацій. Відмінність від вище згаданих досліджень полягала у зміні концентрації водню під час наводнення металу та швидкостей його охолодження шляхом зміни середовища, в якому воно проводилося (вода, мастило). За цією методикою на прикладі сталі У8 показано, що виникнення тріщин обумовлене, головним чином, впливом газоподібного водню. Збільшення концентрації водню і швидкості охолодження підсилює тріщиноутворення.

В основу другої методики покладено відмінність АЕ-випромінювання при механічному навантаженні наводнених і ненаводнених металів. Показано, що при статичному навантаженні поява сигналів АЕ у наводнених металах реєструється на більш ранніх етапах навантаження, ніж у ненаводнених. Цю особливість використано для виявлення водневого пошкодження сталей труб теплоенергетичного обладнання. Відзначено, що наявність окалини на поверхні труб ускладнює інтерпретацію АЕ-даних.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА КОРОТКІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено теоретичні основи акустико-емісійної діагностики міцності тіл з тріщинами. Для цього:

1.1. Розроблено моделі утворення та докритичного росту тріщин як випромінювачів пружних хвиль в квазікрихких матеріалах при дії на них корозійно-механічних факторів. Проведено порівняння двох запропонованих підходів до моделювання утворення тріщини: миттєвим прикладанням до берегів тріщини або постійного напруження, або статичного переміщення. Показано, що процеси випромінювання у цих двох випадках якісно будуть подібні, проте кількісно вони відрізняються між собою.

1.2. Розроблено методи розв'язання в переміщеннях нестационарних динамічних задач теорії тріщин. В їх основу покладено метод інтегральних перетворень, метод граничної інтерполяції і метод порівняння полів переміщень. Методи апробовано на задачах про утворення та стрибкоподібне поширення наскрізних, дископодібних та плоских тріщин довільної конфігурації у пружному тілі.

1.3. Проведено комплексне дослідження параметрів пружних хвиль, що випромінюються тріщиною на всіх етапах їх поширення: зародженні, поширенні всередині твердого тіла і відбитті від його бокової поверхні, а також при проходженні у хвилеводі.

1.4. Встановлено нові, в багатьох випадках більш універсальні, у порівнянні з існуючими, аналітичні залежності між параметрами тріщин та параметрами сигналів АЕ в металічних матеріалах при корозії під напруженням, монотонному та циклічному навантаженні.

1.5. Показано, що просторово-часовий розподіл динамічного поля перемішень, що виникає при рості тріщини, в загальному випадку залежить від величини і орієнтації тріщини, її форми та механізму локального руйнування.

1.6. Показано, що при зростанні тріщини випромінювання є напрямленим, і на формування діаграми напрямленості вирішальний вплив має механізм локального руйнування. При цьому встановлено, що максимум випромінювання досягається для поздовжньої хвилі у напрямку 90° , а для поперечної – біля кута 45° відносно площини розміщення тріщини.

1.7. Теоретично обґрунтовано методи визначення за даними АЕ параметрів тріщин, механізмів їх утворення чи розвитку, а також характеристик тріщиноустійкості матеріалів.

1.8. В аналітичному вигляді представлено критерії для АЕ-оцінки міцності тіл з тріщинами та критерії ідентифікації в них джерел АЕ.

2. Розроблено методологію експериментального АЕ-визначення механічних властивостей матеріалів з дефектами типу тріщин, яка ґрунтується на результатах теоретичних досліджень і експериментальних випробувань. Для чого:

2.1. Проведено аналіз тонкої структури сигналів АЕ, зокрема їх спектру, при зростанні тріщини в конструкційних матеріалах. Показано, що при докритичному рості тріщини нормального відриву ширина смуги частот сигналів АЕ зменшується обернено пропорційно квадрату КІН.

2.2. Розроблено нові методики експериментального АЕ-визначення параметрів докритичного росту тріщини в конструкційних матеріалах при їх статичному навантаженні на повітрі, які ґрунтуються на теоретично встановлених аналітичних залежностях.

2.3. Запропоновано підхід для підбору геометричних розмірів циліндричного хвилевода з метою узгодження його власних частот із резонансною смугою частот п'єзоперетворювача АЕ. Проведено теоретико-експериментальне дослідження зміни параметрів сигналів АЕ у підбраному таким чином хвилеводі, який використовується при АЕ-випробуваннях матеріалів в агресивних середовищах.

2.4. Розроблено дві оригінальні методики АЕ-визначення нижнього порогового значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Iacc} у високоміцних матеріалах при корозійному розтріскуванні, які відповідно дають можливість значно скоротити час знаходження K_{Iacc} і спростити процес досліджень. В основу першої методики покладено теоретичну залежність, що зв'язує величину K_{Iacc} і час, який пройшов від моменту прикладання навантаження до першого стрибка тріщини. Для реалізації другої методики за критерій росту тріщини приймалося перевершення параметрами сигналів АЕ певного, встановленого на зразках з концентратором, граничного рівня. Методики апробовано на сталі 9ХФ, що знаходилася у різних середовищах.

2.5. Запропоновано методики АЕ-визначення водневої пошкодженої конструкційних матеріалів. Перша з них ґрунтується на аналізі параметрів сигналів АЕ в процесі охолодження сталей після дії на них водню високих концентрацій. Цю методику використано для підбору найбільш тріщинотримкої технології наплавлення реакторів гідрокрекінгу нафти та для створення у спецвиробах певної густини фрагментації. Показано, що визначальний вплив на процес тріщиноутворення має водень у порівнянні із температурним фактором. Друга методика базується на експериментально встановленому факті появи сигналів АЕ у наводнених матеріалах на більш ранніх етапах статичного навантаження, ніж у ненаводнених. Методику апробовано при неруйнівному визначенні методом АЕ водневого пошкодження сталей труб теплоенергетичного обладнання.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ

1. *Андрейків А.Е., Лысак Н.В.* Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. - Киев: Наукова думка, 1989. - 176 с.
2. *Андрейків А.Е., Лысак Н.В., Сергиенко О.Н., Скальський В.Р.* Теоретические концепции метода акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения//Препринт N 137 ФМИ им. Г.В.Карпенко АН УССР. - 1987. - 49 с.
3. *Андрейків А.Е., Лысак Н.В., Скальський В.Р., Сергиенко О.Н.* Методические аспекты акустической эмиссии при определении статической трещиностойкости материалов//Препринт N 165 ФМИ им. Г.В.Карпенко АН УССР. - 1990. - 34 с.
4. *Скальський В.Р., Андрейків О.С., Лысак М.В. і інші.* Електронні засоби для проведення досліджень тріщиностійкості матеріалів по

сигналах акустичної емісії//Препринт N 195 ФМІ ім. Г.В.Карпенка НАН України. - 1995. - 38 с.

5. Лысак Н.В., Кулык З.С. Исследование поля перемещений в упругой плоскости при мгновенном образовании трещины//ФХММ* . - 1982. - N 2. - С. 98-102.

6. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В. Определение параметров трещиностойкости материалов с помощью характеристик акустических сигналов//Докл. АН УССР, сер.А. - 1983. - N7. - С.25-27.

7. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В. Использование акустической эмиссии для оценки трещиностойкости материалов при монотонном нагружении//ФХММ. - 1983. - N 4. - С. 110-114.

8. Лысак Н.В., Скальский В.Р. Исследование субкритического роста трещины с помощью акустической эмиссии//ФХММ. - 1986. - N 4. - С. 113-114.

9. Ткач А.Н., Лысак Н.В., Юськив Т.Я. и др. Методические особенности определения статической трещиностойкости чугунов//ФХММ. - 1988. - N 1. - С. 68-73.

10. Лысак М.В., Скальский В.Р., Іваніцький Я.Л. і інші. Застосування методу акустичної емісії для дослідження утворення тріщин під захисною наплавкою корпусів реакторів//ФХММ. - 1989. -N 2. - С. 79-81.

11. Лысак Н.В., Скальский В.Р., Сергиенко О.Н. Использование метода акустической эмиссии для исследования разрушения чугунов//ТДиНК** . - 1989. - N 3. - С. 3.-45.

12. Лысак Н.В., Скальский В.Р., Лучко И.И. Акустическая эмиссия и разрушение бетона при статическом нагружении//Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. - 1989. - N 12. - С. 48-51.

13. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В. Зависимость параметров сигналов акустической эмиссии от геометрических характеристик сквозной трещины//ТДиНК. - 1990. - N 1. - С. 9-17.

14. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В., Сергиенко О.Н. Моделирование процессов локального разрушения, сопровождающегося акустической эмиссией в материалах и изделиях. (Сообщение 1)//ТДиНК. - 1990. - N 3. - С. 9-20.

15. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В., Каленский В.Р. и др. Диагностика развития трещины по границе сплавления в наводороженных образцах//ТДиНК. - 1990. - N 3. - С. 32-36.

* ФХММ - Физико - химическая механика материалов.

** ТДиНК - Техническая диагностика и неразрушающий контроль.

16. *Андрейків О.Є., Лисак М.В., Сергієнко О.М., Скальський В.Р.* Застосування методу акустичної емісії при дослідженні матеріалів у водневому та корозійному середовищах//ФХММ. - 1990. - N 5. - С. 26-36.
17. Повышение стойкости нержавеющей металла, наплавленного на сталь 10Х2ГНМА, против отслоения при эксплуатации в среде водорода/*Каленский В.К., Николенко Т.Ю., Козин А.Н., Иванецкий Я.Л., Лысак Н.В., Скальский В.Р.*//Автоматическая сварка. - 1990. - N 12. - С. 27-33.
18. *Андрейків А.Е., Лысак Н.В., Сергиенко О.Н.* Моделирование локального разрушения, сопровождающегося акустической эмиссией в материалах и изделиях. (Сообщение 2)//ГДНПК. - 1991. - N 1. - С. 59-65.
19. *Лысак Н.В., Скальський В.Р., Сергиенко О.Н.* О методологии АЕ-диагностирования трещинообразования//ГДНПК. - 1991. - N3. - С. 9-14.
20. *Лысак Н.В.* Об акустико-эмиссионной оценке прочности материалов при малоцикловом нагружении//ГДНПК. - 1992. - N 3. - С. 18-25.
21. *Лысак Н.В.* Теория акустико-эмиссионной дефектотрии в телах с трещиной//Доклады и тезисы III Всес. научн.-производств. конференции по акустической эмиссии. - Обнинск, 1992. - С. 71-80.
22. *Лысак Н.В.* Теоретические аспекты определения параметров плоских трехмерных трещин методом акустической эмиссии//Там же. - С. 89-91.
23. *Андрейків А.Е., Лысак Н.В., Скальський В.Р., Сергиенко О.Н.* Методика определения $K_{I\text{вс}}$ стали в среде водорода с помощью метода акустической эмиссии//ГДНПК. - 1992. - N 1. - С. 18-26.
24. *Андрейків О.Є., Лисак М.В., Скальський В.Р. і інші.* Водневе розтріскування металів і сплавів та його акустико-емісійний контроль//ФХММ. - 1992. - N 4. - С. 63-68.
25. *Lysak M.V.* Theoretical fundamentals of acoustic emission approach in diagnostic of metals fracture//Collection of Abstracts 8 International Conference on Fracture, Fracture Mechanics: successes and problems. Part II. - Kiev, 1993. - P. 626.
26. *Андрейків А.Е., Лысак Н.В., Скальський В.Р. и др.* Спектральный анализ акустической эмиссии растущей трещины//ГДНПК. - 1993. - N 1. - С. 75-84.
27. *Лысак Н.В., Скальський В.Р.* О направленности акустико-эмиссионного излучения при разрушении материалов и ее практическое применение//ГДНПК. - N 3. - С. 22-32.

28. Лысак Н.В., Скальський В.Р., Вайнман А.Б., Сергиенко О.Н. Определение водородной повреждаемости сталей котельных труб импульсным прозвучиванием/ТДиНК. - 1993. - N 3. - С. 58-65.
29. Андрейків О.Є., Сергієнко О.М., Лисак М.В., Скальський В.Р. Дослідження вкладу хвиль Релея в акустичне поле, що виникає при розвитку внутрішнього дефекту//ФХММ. -1993. - N 2. - С. 12-19.
30. Лисак М.В., Скальський В.Р. Вплив швидкості охолодження матеріалів реактора гідрокрекінгу нафти на тріщиноутворення// ФХММ. - 1993. - N 6. - С. 105-107.
31. Lysak M.V. Acoustic emission during jumps in subcritical growth of crack in three-dimensional bodies//Engineering Fracture Mechanics. - 1994. - V. 47, N 6. - P. 873-879.
32. Лисак М.В. Знаходження оберненого розв'язку задачі при визначенні параметрів тріщин за даними акустичної емісії//Тез. докл. конф. "Техн. діагностика и неразр. контроль в Україні". - Днепропетровск, 1994. - С. 51-52.
33. Лисак М.В., Скальський В.Р., Сергієнко О.М. Дослідження впливу хвилеводу на зміну параметрів сигналів акустичної емісії//ФХММ - 1994. - N 2. - С. 64-70.
34. Скальський В.Р., Лисак М.В., Вайнман А.Б. Акустико-емісійний метод виявлення водневого пошкодження сталей котлів високого тиску ТЕС статичним випробуванням//ФХММ. - 1994. - N4. - С.90-96.
35. Panasyuk V.V., Andreykiv O.Ye., Lysak M.V. et al. Decrease of elements risk by acoustic-emission control of stress corrosion cracking//Proceedings Preprints Symposium "Risk and Economic Evaluation on Failure and Malfunction of Systems". - Lisbon, 1995. - P. 395-404.
36. Лисак М.В. Акустична емісія під час поширення втомної плоскої тріщини довільної форми в пружному тілі//ФХММ. - 1995. - N 6. - С. 112-115.
37. Andreykiv O.Ye., Lysak M.V., Skalsky V.R. Method of accelerated evaluation of $K_{I,acc}$ under stress corrosion cracking //Engineering Fracture Mechanics. - 1996. - V. 54, № 3. - P. 387 - 394.
38. А.с. 1755121 СССР, G 01 N 17/00. Способ определения порогового коэффициента интенсивности напряжений/Андрейків А.Е., Скальський В.Р., Лысак Н.В. - Опубл. 15.08.92. Бюл. N 30.
39. А.с. 1758545 СССР, G 01 N 29/04. Способ контроля роста трещин в образцах материалов/Андрейків А.Е., Скальський В.Р., Лысак Н.В. - Опубл. 30.08.92. Бюл. N 32.
40. А.с. 1769086 СССР, G 01 N29/04. Способ определения нижнего порогового значения коэффициента интенсивности напряжений/ Андрейків А.Е., Лысак Н.В., Скальський В.Р., Сергиенко О.Н. - Опубл. 15.10.92. Бюл. N 38.

АННОТАЦІЯ

Лысак Н.В. Оцінка динаміки растрескивання конструкційних матеріалів акустико-емісійним методом. Дисертація на соискание ученої ступені доктора технічних наук по спеціальності 05.02.07 - механіка деформованого твердого тіла. Фізико-механічний інститут ім.Г.В.Карпенко НАН України.

В дисертаційній роботі розроблено моделі утворення і докритичного росту тріщини в квазіхрупких матеріалах як джерела еластичних хвиль при впливі на них корозійно-механічних факторів. Розроблено методи встановлення аналітичних залежностей між параметрами тріщини і параметрами сигналів АЕ при зростаючому статичному і циклічному навантаженні, корозії під напруженням. На їх основі розроблено експериментальні методики АЕ-визначення параметрів докритичного росту тріщини, АЕ-діагностування водородної пошкоджуваності матеріалів при діянні на них механічного навантаження і агресивної середовища.

ABSTRACT

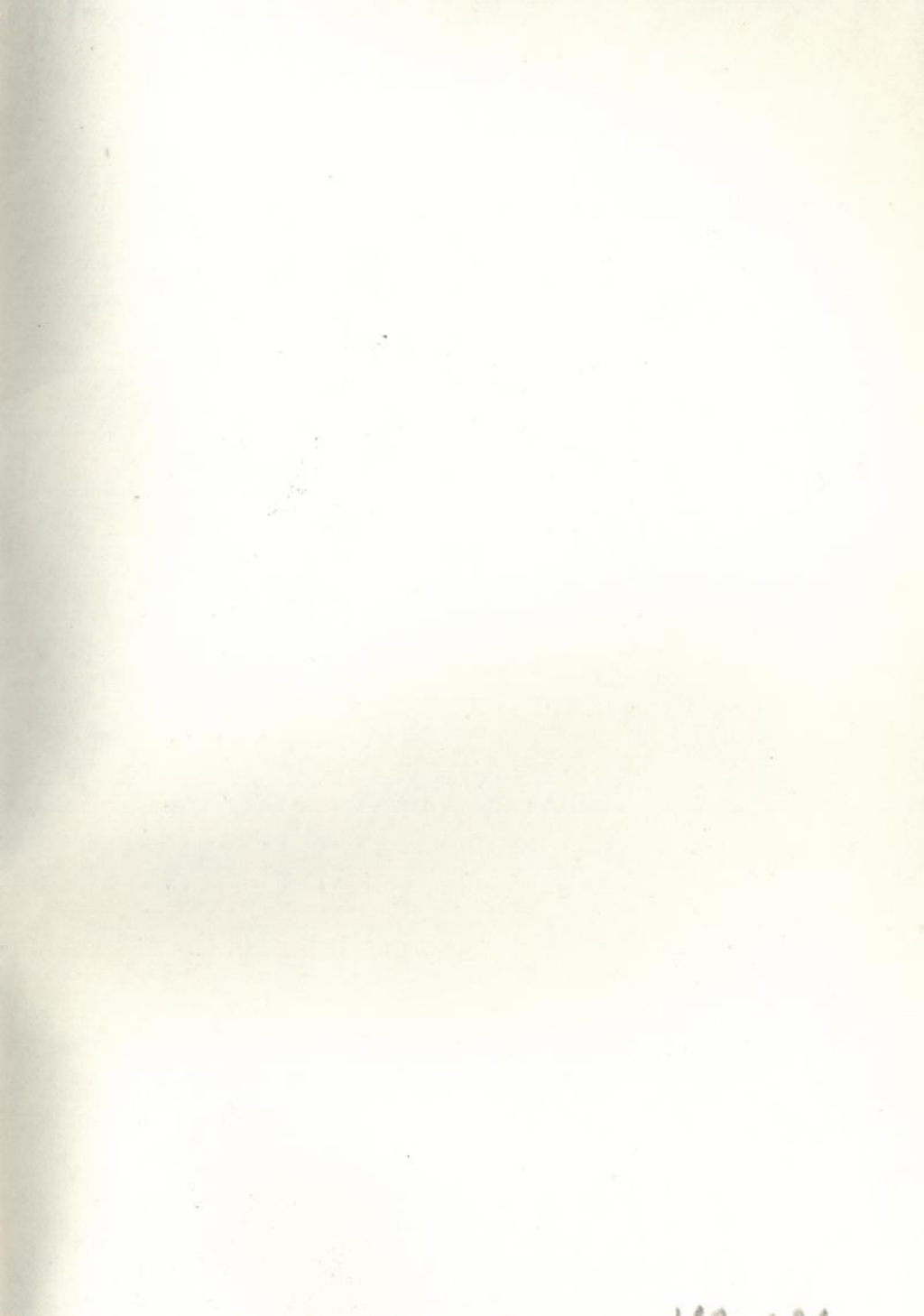
Lysak M.V The dissertation presented for a doctor's degree (technical); speciality 05.02.07 - mechanics of deformable bodies, Karpenko Physico-Mechanical Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, 1995.

The models of crack initiation and its subcritical growth in quasibrittle bodies as the source of elastic wave radiation under effect of corrosion-mechanical factors are presented in the thesis. The methods of establishment of analytical dependencies between the crack and AE signal parameters under the effect of increasing static and cyclic loading, stress corrosion have been developed. On their basis the experimental methods for AE determination of the subcritical crack growth parameters, AE-diagnostics of hydrogen damageability of materials under corrosion-mechanical factors effect have been developed.

Ключові слова: крихке руйнування, водневе розтріскування, моделі тріщини, акустична емісія, оцінка руйнування, параметри тріщини, параметри сигналів АЕ, методики АЕ-контролю, корозійно-механічні фактори.

Післ. до друку 6.08.96 Формат 60×24/16 Папір 80г/м² Друк офсетний
Умовн. друк арк. Обл. вид. арк. Зам. № 340 Тираж 100

Віддруковано у виробничо-поліграфічному відділі Льв ЦНТЕІ



AB 35.515

AB 35.515