

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНИХ ПРОБЛЕМ
МЕХАНІКИ І МАТЕМАТИКИ ім. Я.С.ПІДСТРИГАЧА

На правах рукопису

СЕРГІЄНКО
Олег Миколайович

**МОДЕЛЮВАННЯ УТВОРЕННЯ ТА ПОШИРЕННЯ ТРІЩИН У
ТРИВИМІРНИХ ДЕФОРМІВНИХ ТІЛАХ З ВИКОРИСТАННЯМ
МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ**

Спеціальність 01.02.04 - механіка деформівного твердого тіла

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Львів - 1996

№ 35. 909

Дисертацією є рукопис.
Робота виконана у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
М.В. Лисак
Науковий консультант: член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук,
професор О.Є. Андрейків.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор О.П. Піддубняк
кандидат фізико-математичних наук,
доцент В.П. Левицький

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

Захист відбудеться "25 листопада" 1996р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.04.17.01 в Інституті прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України (290601, м.Львів, МСП, вул. Наукова, 3-6).

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці ІППММ ім. Я.С.Підстригача НАН України (м. Львів, вул. Наукова 3-6).

Відгук на автореферат просимо надсилати за адресою: 290601 м.Львів, МСП вул. Наукова 3-6, ІППММ, вченому секретарю спеціалізованої ради Д.04.17.01.

Автореферат розіслано " 18 " листопада 1996 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради
кандидат фізико-математичних наук

П.Р.Шевчук

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00760545 (R)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. Аварії відповідального обладнання, такого, зокрема, як газо- чи нафтопроводи, посудини високого тиску в хімічній та ядерній промисловості, спричинені утворенням та поширенням тріщиноподібних дефектів, можуть призвести до катастрофічних наслідків. Тому важливим є забезпечення неруйнівного контролю роботоздатності такого обладнання. Широкого застосування з цією метою набуло явище акустичної емісії (АЕ), що ґрунтується на випромінюванні пружних хвиль внаслідок утворення та докритичного поширення тріщин у конструкціях та виробках. Реєстрація пружних переміщень, спричинених цими хвилями, перетворювачами АЕ (ПАЕ), розташованими на поверхні контрольованого об'єкту, дозволяє отримати інформацію про процеси поширення тріщин, встановити, зокрема, їх місцезнаходження та розміри, і в такий спосіб запобігти аварійним ситуаціям.

Проте, для успішного використання АЕ як методу неруйнівного контролю необхідно встановити відповідні взаємозв'язки між параметрами сигналів АЕ, такими як амплітуда, сумарний рахунок імпульсів, швидкість рахунку, частотна смуга, які використовуються у практиці акустико-емісійного контролю, та параметрами тріщин, що їх випромінюють, зокрема, місцезнаходження дефекту, його розміри та орієнтація. Основою для цього є розробка теоретичних моделей тріщин як джерел АЕ. Значний вклад в розвиток цієї проблеми внесли такі дослідники, як: Андрейків О.Є., Бойко В.С., Гарф Е.Ф., Баранов В.М., Болотин Ю.І., Брагінський О.П., Волков Л.П., Гольцов В.А., Дробот Ю.Б., Іванов В.І., Красовський А.Я., Кучеров І.Я., Лексовський А.М., Майстренко А.І., Маслов Л.І., Маслов Л.О., Махутов М.А., Муравін Г.Б., Назарчук З.Т., Нацик В.Д., Недосека А.Я., Панасюк В.В., Патон Б.Є., Переверзев Є.С., Піддубняк О.П., Писаренко Г.С., Прокопенко Г.І., Романів О.М., Стрижало В.О., Тихонов Л.В., Тріпалін О.С., Троїцький В.О., Трощенко В.Т., Улітко А.Ф., Фінкель В.М., Фомічов С.К., Ясній П.В., Achenbach J., Dunegan H., Harris J.G., Gerberich W.W., Jax P., Kishi T., Murthy C., Ono K., Polloc A., Rogers L., Scruby C., Shibata M., Wadley H., Waschkis E. і інші. Проте, відомі в літературі підходи стосовно побудови таких моделей, ґрунтуються у переважній більшості на розгляді плоских динамічних задач теорії тріщин або на основі дипольних наближень. В багатьох випадках кореляції між параметрами тріщин та сигналами АЕ встановлюються на основі емпіричних та напівемпіричних підходів.

Однак, такі процеси, як утворення чи докритичне, зокрема, локальне по фронту підростання внутрішніх тріщин, вплив границь тіла на параметри випромінюваних сигналів потребують розробки моделей тріщин як джерел АЕ у тривимірних тілах. Актуальність дисертаційної роботи визначається важливим значенням розробки

теоретичних підходів та оцінок сигналів акустичної емісії для визначення параметрів тріщин у тривимірних тілах та прогнозування надійності роботи інженерних конструкцій.

Метою дисертаційної роботи є: формулювання розрахункових моделей утворення та докритичного, зокрема локального по фронту, росту просторових тріщин у тривимірних деформівних тілах як джерел випромінювання АЕ; розробка, в рамках сформульованих моделей, теоретичних підходів для визначення пружних полів переміщень, що супроводжують процеси тріщиноутворення; побудова на цій основі способів визначення параметрів новоутворених тріщин за сигналами АЕ.

Наукова новизна. Вперше розв'язано нестационарні динамічні задачі про миттєве утворення в попередньо навантаженому пружному тілі дископодібної тріщини нормального відриву та кручення, а також двох дископодібних тріщин без урахування їх взаємодії. Проведено аналітичне дослідження поля пружних переміщень при утворенні цих дефектів в матеріалі внаслідок локальної втрати міцності під дією навантаження та агресивного середовища. Отримано апроксимаційні формули для визначення максимальних значень модуля вектора переміщень, на основі яких запропоновано спосіб визначення розмірів та орієнтації дископодібних тріщин за амплітудами сигналів АЕ.

Сформульовано нову розрахункову модель докритичного локального по фронту підростання просторової тріщини як джерела АЕ. На основі цієї моделі встановлено залежності між площею локального підростання тріщини і амплітудами сигналів АЕ та між коефіцієнтом інтенсивності напружень і сумарним рахунком АЕ при монотонному навантаженні. Запропоновано методику наближеного визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень при статичному навантаженні матеріалів за сумарним рахунком АЕ.

Обґрунтованість отриманих результатів і зроблених наукових та прикладних висновків, що наведені у дисертаційній роботі, підтверджується строгістю постановки і методів розв'язування розглянутих задач та узгодженістю розв'язків з відомими в літературі результатами, отриманими у часткових та граничних випадках, та з експериментальними даними.

Практична цінність. Запропоновані в роботі моделі утворення та докритичного росту тріщин як джерел випромінювання АЕ, а також проведені розрахунки динамічних полів переміщень дозволяють оцінити розміри та орієнтацію тріщиноподібних дефектів, визначити амплітудно-частотні характеристики ПАЕ, вибрати їх оптимальну кількість та розташування. Отримані в дисертаційній роботі результати можуть бути використані для оцінки ресурсу роботи інженерних конструкцій та для розробки методик акустико-емісійної діагностики матеріалів і відповідального обладнання. Окремі наукові та прикладні результати даної роботи, такі зокрема, як оцінка водневої пошкодже-

ності матеріалів труб енергетичного обладнання методом АЕ та вибір технології наплавлення захисного шару корпусів реакторів гідрокрекінгу нафти, було використано при виконанні ряду госпдоговорів між ФМІ НАН України і Науково-дослідним інститутом теплоенергетики м. Горлівка, Інститутом електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України та об'єднанням "Прометей" м. Санкт-Петербург.

Основні положення, що виносяться на захист:

1. Математичні моделі для розрахунку динамічних полів переміщень, що виникають при утворенні та докритичному рості просторових тріщин у деформівному тілі та при утворенні тріщини у жорсткому включенні.

2. Розв'язки класу динамічних задач про миттєве утворення дископодібних тріщин у тривимірних пружних тілах при різних типах навантаження.

3. Способи визначення параметрів тріщин за сигналами АЕ на основі аналізу динамічних полів переміщень, що супроводжують процеси тріщиноутворення у тривимірних деформівних тілах.

Апробація роботи. Результати досліджень та основні положення роботи доповідались і обговорювались на I Всесоюзній конференції "Акустическая эмиссия материалов и конструкций" (Ростов-на-Дону, 1984); XII Конференції молодих вчених ФМІ АН України (Львів, 1985); 6-му Всесоюзному з'їзді по теоретичній і прикладній механіці (Ташкент, 1986); 2-й Республіканській конференції "Интегральные уравнения в прикладном моделировании" (Київ, 1986); I Всесоюзній конференції "Механика разрушения материалов" (Львів, 1987); II Всесоюзній конференції по акустичній емісії (Кишинів, 1987); I Всесоюзному симпозиумі "Механика и физика разрушения композиционных материалов и конструкций" (Ужгород, 1988); XII Всесоюзній науково-технічній конференції "Неразрушающие физические методы контроля" (Свердловск, 1990); Міжнародній конференції "Сварные конструкции" (Київ, 1990); III Всесоюзній конференції по акустичній емісії (Обнінськ, 1992); Міжнародній конференції "Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів" (Львів, 1994); Міжнародному симпозиумі "Risk and economic evaluation on failure and malfunction of systems" (Lisbon, 1995).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 11 наукових праць, отримано одне авторське свідоцтво.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти глав, підсумків, списку цитованої літератури та додатка. Загальний обсяг роботи – 206 сторінок машинописного тексту (основний зміст – 138 стор.) і включає 35 рисунків і 2 таблиці. Бібліографія дисертації містить 178 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі стисло викладено зміст дисертаційної роботи, обґрунтована актуальність теми досліджень, сформульовано мету роботи і запропоновано шляхи вирішення поставленої проблеми.

У першій главі розглядаються відомі в літературі теоретичні моделі утворення і росту тріщин як джерел АЕ, наводяться експериментальні залежності між параметрами АЕ та тріщин. Тут же висвітлено деякі положення теорії тріщин, критерії локального руйнування, співвідношення динамічної теорії пружності та інтегральних перетворень, що використовуються при розв'язуванні задач, розглянутих у наступних главах дисертаційної роботи.

У другій главі з метою оцінки сигналів АЕ, спричинених утворенням в контрольованому об'єкті внутрішніх тріщиноподібних дефектів розглянуто динамічну нестационарну задачу про миттєве утворення у пружному однорідному ізотропному середовищі дископодібної тріщини нормального відриву, площа якої дорівнює площі внутрішньої тріщини. Припускали, що утворення такої дископодібної тріщини відбувається, коли розтягуючі напруження у деякій області всередині матеріалу, внаслідок прикладених зовнішніх зусиль, досягають певної критичної величини σ_0 . Появу тріщини моделювали миттєвим падінням розтягуючих напружень на берегах дефекту від вихідного рівня σ_0 до нуля. Якщо представити на основі принципу суперпозиції напружено-деформований стан тіла з тріщиною як суму напружено-деформованих станів бездефектного тіла і тіла з тріщиною, до берегів якої раптово прикладені напруження $-\sigma_0$ то граничні умови задачі, з урахуванням симетрії поля напружень відносно площини розташування тріщини, у циліндричній системі координат $Orz\varphi$ матимуть вигляд:

$$\begin{aligned}\sigma_{zz}(r,0,t) &= -\sigma_0 H(t), & r \leq r_0; \\ u_z(r,0,t) &= 0, & r > r_0; \\ \tau_{rz}(r,0,t) &= 0, & 0 < r < \infty,\end{aligned}\quad (1)$$

де $H(t)$ – одинична функція Хевісайда, r_0 – радіус дископодібної тріщини. Початкові умови – нульові.

Граничну задачу (1) розв'язували методом інтегральних перетворень: Ханкеля за координатою r і Лапласа за часом t . Це дозволило звести її до інтегрального рівняння Фредгольма другого роду:

$$\Lambda(q,s) - \int_0^1 \Lambda(u,s) K(u,q,s) du = q, \quad 0 \leq q \leq 1, \quad (2)$$

де $K(u,q,s)$ – ядро інтегрального рівняння, s – параметр інтегрального перетворення Лапласа.

Розв'язок інтегрального рівняння (2) шукали числово і апроксимували залежністю, запропонованою G.C. Sih, G.T. Embley, R.S. Ravera (Int. Journ. Solids and Struct., 1972, v 8, №7):

$$\Lambda(q, s) = \frac{b(q)m(q)}{\sqrt{m^2(q) + p^2}} \quad (3)$$

де $p = sr_0 / c_2$, c_2 – швидкість поперечної хвилі, $b(q)$ і $m(q)$ – параметри апроксимації, які знаходили методом найменших квадратів.

На підставі залежності (3) із застосуванням теореми Парсеваля для перетворення Ханкеля та теореми про згортку для перетворення Лапласа розв'язок поставленої задачі у переміщеннях було отримано у замкненому вигляді

$$u_i(\bar{r}, \bar{z}, T) = AB_i \int_0^1 b(q)m(q) \left[\int_{r-\xi}^{r+\xi} \sum_{j=1}^2 S_{ij}(\alpha, \bar{z}, \tau_j, q) H\left(\sqrt{T^2/\varepsilon_j^2 - \bar{z}^2} - \alpha\right) G_i(\alpha, \bar{r}, q) d\alpha \right] dq, \quad \bar{r} > 1, \quad (i = z, r) \quad (4)$$

де

$$A = \frac{\sigma_0 r_0}{\rho c_1^2 \varepsilon^2 \pi (1 - \varepsilon^2)}, \quad \bar{z} = z/r_0, \quad \bar{r} = r/r_0, \quad T = c_2 t/r_0, \quad \varepsilon = c_2/c_1,$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon, \quad \varepsilon_2 = 1, \quad \tau_j = T - \varepsilon_j \sqrt{\bar{z}^2 + \alpha^2}, \quad B_z = \bar{z} / (\pi \sqrt{\bar{r}}), \quad B_r = (\pi \sqrt{\bar{r}})^{-1},$$

$$G_z = \sqrt{\alpha} K(k), \quad G_r = \alpha \sqrt{\alpha} [2E(k) - K(k)], \quad k = \sqrt{q^2 - (a - \bar{r})^2} / (4\alpha \bar{r}),$$

$E(k)$ і $K(k)$ – повні еліптичні інтеграли першого і другого роду, відповідно, c_1 – швидкість поздовжньої хвилі, а $S_{ij}(\cdot)$ – відомі функції, вирази яких через громіздкість не наводяться.

Результати розрахунків безрозмірного модуля вектора переміщень $U = \sqrt{u_r^2 + u_z^2} / A$ в залежності від безрозмірного часу $T_1 = c_1 t / r_0$ для деяких кутів спостереження $\theta = \arctg(z/r)$ і віддалі $\bar{R} = \sqrt{\bar{r}^2 + \bar{z}^2}$ при значенні коефіцієнта Пуассона $\nu = 0.32$ і $\varepsilon = 0.535$ зображено на рис. 1. На основі проведених досліджень залежностей величин перших максимумів модуля вектора переміщень для поздовжньої і поперечної хвиль від кута спостереження θ , що змінювався у діапазоні від 0 до $\pi/2$, було запропоновано наступні формули, вірні при $\bar{R} > 28$:

для поздовжньої хвилі

$$\Phi(\theta) = \frac{1 - 2\varepsilon^2 \cos^2 \theta}{\sqrt{1 + \rho_1 \cos^2 \theta}} \quad (5)$$

і для поперечної

$$\Phi(\theta) = \frac{|\sin 2\theta|}{\sqrt{1 + \rho_2 \cos^2 \theta}} \quad (6)$$

де $\rho_1=0.68$, $\rho_2=2.69$, що визначають кутовий розподіл випромінювання з похибкою не більшою 4%. З урахуванням співвідношень (5) і (6) для оцінки максимальних значень модуля вектора переміщень запропоновано такі апроксимаційні формули:

$$U_{\max c_i} = \alpha_i \frac{\sigma_0 \Phi_i(\theta) r_0^2}{\rho c_i^2 R}, \quad (i=1,2) \quad (7)$$

де $i=1$ відповідає поздовжній, а $i=2$ – поперечній хвилі, $\alpha_1=0.452$, $\alpha_2=0.832$.

Залежності модуля вектора переміщень від частоти знаходили за допомогою методу швидкого перетворення Фур'є. На рис. 2 наведено, зокрема, зміну безрозмірної величини $\tilde{U} = |U(\Omega)/U(\Omega)_{\max}|$ з безрозмірною частотою $\Omega = \omega r_0 / c_i$ (ω – кругова частота) для модуля вектора переміщень, часову поведінку якого зображено на рис. 1. Крок дискретизації за безрозмірним часом T_i вибирали рівним 0.5, а кількість точок дискретизації $N=512$.

На підставі залежностей (7) можна визначити розміри і орієнтацію дископодібної тріщини за амплі-

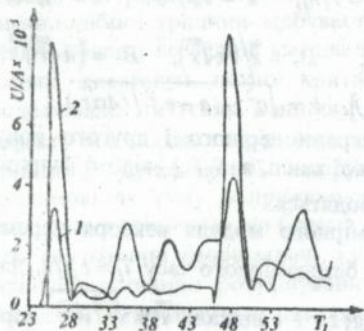


Рис. 1. Залежність безрозмірної величини U/A від безрозмірного часу T_i при $R=50$, $\theta=15^\circ$ (крива 1) і $\theta=75^\circ$ (крива 2).

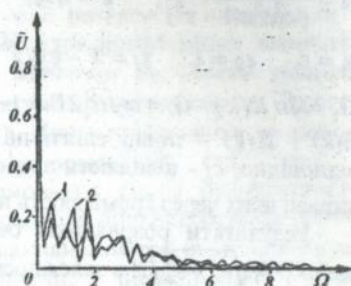


Рис. 2. Залежність безрозмірної величини \tilde{U} від безрозмірної частоти Ω при $R=50$, $\theta=15^\circ$ (крива 1) і $\theta=75^\circ$ (крива 2).

тудними значеннями сигналів АЕ, зареєстрованих ПАЕ. Для цього, спочатку методом просторової локації за допомогою чотирьох ПАЕ, необхідно встановити місце розташування даного дефекту. Тоді визначення орієнтації тріщини зводиться до знаходження мінімуму функції

$$F(\theta_0, \phi_0) = \sum_{j=1}^4 [\Gamma_j - \Phi_j(\alpha_j) / \Phi_j(\alpha_j)]^2. \quad (8)$$

де $\Gamma_k = \frac{A_k R_k}{A_l R_l}$, A_k ($k = \overline{1,4}$) – амплітуда сигналу АЕ, зареєстрована k -

тим ПАЕ, яку вважаємо пропорційною до максимуму модуля вектора переміщень, що визначається за формулою (7), R_k – віддаль від центра тріщини до k -того ПАЕ, кути θ_0 і ϕ_0 задають у сферичній системі координат $OR\theta\phi$, центр якої співпадає з центром тріщини, напрямом одиничної нормалі до неї, функції $\Phi_i(\alpha_k)$ визначаються за формулами (5) і (6), відповідно для поздовжньої ($i=1$) і поперечної ($i=2$) хвилі, $\alpha_k = \pi/2 - \theta_k$. Змінюючи θ_0 в діапазоні $[0, \pi/2]$, а ϕ_0 – від 0 до 2π при відомих з експерименту Γ_k та розрахованих, згідно (5) або (6), відповідно, для поздовжньої та поперечної хвилі, значеннях функцій $\Phi_i(\alpha_k)$, можна знайти мінімум $F(\theta_0, \phi_0)$ і відповісти кути θ_0^* і ϕ_0^* , які і визначають шукану орієнтацію даного дефекту, а на підставі залежностей (7) при відомих R_k , A_k , σ_0 та орієнтації тріщини, – і її радіус. Для числової перевірки стійкості запропонованого способу визначення орієнтації дефекту за сигналами АЕ на величини Γ_k (які, взагалі кажучи, визначаються експериментально), при розгляді конкретних прикладів взаємного розташування тріщини та системи ПАЕ, накладали відхилення у діапазоні $\pm 20\%$ порівняно з їх точними значеннями, знайденими згідно з (7). В результаті розрахунків, проведених за формулою (8), було встановлено, що похибка у визначенні кутів орієнтації θ_0^* і ϕ_0^* не перевищувала 7%.

У цій же главі розглянуто динамічну задачу про миттєве утворення у пружному однорідному ізотропному середовищі дископодібної тріщини кручення. Граничні умови задачі при $z \geq 0$ мають вигляд:

$$\begin{aligned} \tau_{zr}(r, 0, t) &= -\tau_0(r/r_0)H(t), & r \leq r_0; \\ u_\theta(r, 0, t) &= 0, & r > r_0. \end{aligned} \quad (9)$$

Початкові умови – нульові. Розв'язок цієї задачі шукали аналогічно до попереднього. У просторі зображень Лапласа–Ханкеля вона зводилася до інтегрального рівняння Фредгольма другого роду, аналогічного до (2), з правою частиною, що дорівнює q^2 . Його числовий розв'язок апроксимували залежністю (3), що дозволило знайти поле переміщень у замкненій формі. На основі проведених розрахунків запропоновано наближену формулу для визначення максимальних значень модуля вектора переміщень, аналогічну до (7) при $i=2$ і $\alpha=0.138$, за якою можна визначити орієнтацію і радіус такої тріщини у такий самий спосіб, як і для дископодібної тріщини нормального відриву.

На підставі принципу суперпозиції напружено-деформованих станів, спричинених утворенням двох незалежних джерел випромінювання, визначено поле переміщень, на віддаль, що значно

перевищують розміри дефектів, при утворенні двох дископодібних тріщин нормального відриву. При розв'язуванні цієї задачі припускали, що вони розташовані на достатньо великій відстані d одна від одної (такій, що у статичному випадку можна знехтувати їх взаємодією). Отриманий у такий спосіб розв'язок буде збігатися із розв'язком аналогічної задачі, в якій враховується взаємовплив тріщин, до того моменту часу, коли у точку спостереження не прийде поздовжня хвиля, випромінена більш віддаленим дефектом і відбита дефектом, що розташований ближче до точки спостереження.

Третя глава присвячена розгляду випромінювання пружних хвиль, спричинених докритичним поширенням внутрішньої тріщини у матеріалі, зокрема у локальних областях біля її фронту. Такий характер руйнування зумовлюється як особливостями напружено-деформованого стану в околі фронту тріщини, так і впливом корозійно-механічних факторів та мікроструктури.

Для побудови відповідної моделі випромінювання сигналів АЕ при локальному по фронті підростанні тріщини розглядали пружне тіло, послаблене плоскою макротріщиною нормального відриву, що обмежена гладким контуром L . Під дією прикладених до тіла зовнішніх зусиль в деякий момент часу, прийнятий за початковий, у локальній області біля контуру такої тріщини, там, де розтягуючі напруження досягають критичної величини, утворюється тріщиноподібний мікродекфект. В результаті розвантаження його берегів від вихідного рівня до нуля випромінюються пружні хвилі, що можуть бути зареєстровані ПАЕ. Для спрощення задачі, замість мікродекфекту, розглядали утворення біля фронту макротріщини дископодібної тріщини нормального відриву, рівної йому за площею, і припускали, що її радіус набагато менший за радіус кривини плоскої макротріщини. Таке припущення дозволило, замість вихідної, розглянути задачу про визначення поля переміщень при раптовому утворенні дископодібної тріщини нормального відриву біля фронту півбезмежної тріщини.

Наближений розв'язок такої задачі у сферичній системі координат $OR\theta\varphi$, центр якої співпадав з центром дископодібної тріщини, шукали у вигляді добутку компонент вектора переміщень, визначених із розв'язання задачі про утворення дископодібної тріщини, розглянутої у другій главі, на функції $C_i(\alpha)$, що визначають, згідно з (Achenbach J.D., Harris J.G. ASME J. Ap. l. Mech., 1979, 46, N1), вплив вільної поверхні півбезмежної тріщини на кутовий розподіл випромінювання і мають вигляд:

$$C_i(\alpha) = \frac{(1 + c_i/c_l \cos \alpha)^{1/2}}{(1 + c_R/c_l \cos \alpha K_-(\cos \alpha/c))} \quad (10)$$

де c_R — швидкість хвилі Релея, $K_-(\cdot)$ — відомі функції,

$$\cos \alpha = \frac{\cos \theta \sin \varphi + \delta}{[(\cos \theta \sin \varphi + \delta)^2 + \sin^2 \theta]^{1/2}}, \quad \delta = \Delta / R,$$

Δ – віддаль між центром дископодібної тріщини та краєм півбезмежної тріщини

На підставі залежностей (10) визначення орієнтації та розмірів дископодібної тріщини, що утворилась біля фронту півбезмежної тріщини, можна провести аналогічно до того, як це було зроблено у попередній главі, врахувавши співвідношення (10). Слід зауважити, що у випадку поперечної хвилі кутова залежність випромінювання, через наявність головної хвилі в області кутів α , близьких до $\arccos(c_2/c_1)$, має різкий максимум, що суттєво ускладнює визначення орієнтації

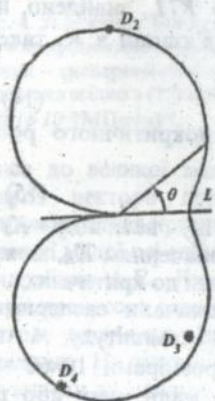


Рис. 3. Кутовий розподіл максимуму модуля вектора переміщень для поздовжньої хвилі (точки - експериментальні дані).

дефекту. Тому перевагу при проведенні АЕ-досліджень потрібно надавати реєстрації коливань, спричинених поздовжньою хвилею, яка використовується також і для визначення місця розташування джерела АЕ методом триангуляції. Аналіз результатів розрахунків полів переміщень показав, що максимальні значення модуля вектора переміщень пропорційні площі S новоутвореного дефекту, що підтверджують результатами експериментів. (Несмашний Е.В., Кузнецов Б.А., Маслов Б.Я. и др. Тез. докл. 1-й Всес. конф. по акустич. эмиссии, Ч1, Ростов н/Д, 1984). Кутовий розподіл випромінювання, зокрема для поздовжньої хвилі у площині $\varphi=0$, зображено на рис. 3, де точками позначено експериментальні дані (Scruby С.В., Wadley H.N.G., Rusbridge K.L. Mater. Sci. and Eng., 1983, 59, N2). На цій підставі було встановлено, що амплітуди сигналів АЕ А, викликаних утворенням мікрodefекту біля фронту макротріщини, можна визначити за такою залежністю:

$$A = \frac{\lambda S}{R} \Phi_1^d(\theta) \mathcal{C}_1(\alpha), \quad (11)$$

де $\Phi_1^d(\theta)$ визначається співвідношенням (5), а λ – коефіцієнт пропорційності між електричним сигналом на виході ПАЕ та максимальним значенням модуля вектора переміщень на фронті поздовжньої хвилі.

Якщо при докритичному рості тріщини утворилось M мікротріщин то сумарна площа підростання $\Delta S = \sum_{k=1}^M s_k$ буде

$$\Delta S = \sum_{k=1}^M a_k A_k, \quad (12)$$

де $a_k = R_k / \left[\lambda \Phi_I^d(\theta_k) C_I(\alpha_k) \right]$. У випадку наскрізної тріщини з прямолінійним фронтом, коли кількість дефектів, які утворились, є такою, що вони перетинають все поперечене січення зразка (товщина якого рівна h), її довжину підростання можна визначити наближено за формулою:

$$\Delta l = a/h \sum_{k=1}^M A_k. \quad (13)$$

У припущенні, що кількість мікрodefektів n , що виникають біля фронту макротріщини, є пропорційною до об'єму зони передруйнування V , який у свою чергу пропорційний до $K_I^4 L$, знайдено, що сумарний рахунок АЕ N (N пропорційне n) пов'язаний з K_I такою залежністю:

$$N = b_0 K_I^4 L, \quad (14)$$

де b_0 – множник пропорційності. У випадку докритичного росту наскрізної тріщини ($L=h$)

$$N = b K_I^4, \quad (15)$$

де $b = b_0 h$. Оцінюючи за співвідношенням (14) величину K_I і порівнюючи її із відомим для даного матеріалу значенням K_{Ic} , можна встановити, в якій мірі розміри дефекту є близькими до критичних.

Невідомий множник пропорційності b визначали експериментально, реєструючи сумарний рахунок АЕ N і амплітуду A при монотонному розтязі пластинчастих зразків з розмірами 10×60 мм, виготовлених з титанового сплаву Ti3Al. Вони мали один або два бокові концентратори і відповідали вимогам ГОСТ 25.506-85. Для відокремлення сигналів АЕ, викликаних підростанням тріщини від АЕ, зумовленої пластичними деформаціями та механічними шумами, використовували той факт, що моменту старту тріщини відповідає різка якісна зміна параметрів АЕ. Було встановлено, що в цей момент амплітуда АЕ зростала (для досліджуваних матеріалів) приблизно на порядок. Розрахувавши за відомими величинами навантаження і довжини тріщини значення K_I , будували залежність між N і K_I , зображену на рис. 4 для зразка з одним боковим надрізом, з якої і визначали множник пропорційності b .

В цій же главі, як приклад джерела АЕ, що може знаходитись у зоні передруйнування конструкційних вуглецевих сталей, що мають гетерогенну структуру, наприклад, пластинчастого перліту, розглянуто задачу про випромінювання пружних хвиль при руйнуванні крихких цементитних пластинок, розташованих у феритній матриці

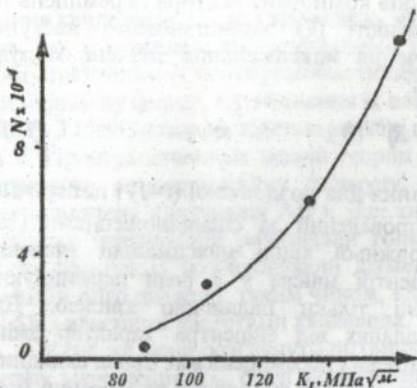


Рис. 4. Залежність між сумарним рахунком АЕ ΣN та коефіцієнтом інтенсивності напружень K_I (точки – експериментальні дані; суцільна лінія отримана згідно з (15) при $b=0.18 \cdot 10^{-7} (\text{МПа}\sqrt{\text{м}})^4$).

еліпса до великої значно менше за одиницю. Максимальні значення модуля вектора переміщень на фронті поздовжньої хвилі, що випромінюється при утворенні у включенні тріщини, довжина якої рівна довжині малої осі еліпса, визначали за формулами, отриманими в роботі (Андрейків А.Е., Лысак Н.В. Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения, Киев, Наукова думка, 1989) для задачі про раптове утворення у пружному просторі наскрізної тріщини нормального відриву. На підставі отриманих залежностей між амплітудами АЕ, розтягуючими зусиллями та розмірами еліпса було отримано формули, що дозволяють встановити орієнтацію мікротріщини і розміри цементитної пластинки за сигналами АЕ, зареєстрованими системою трьох ПАЕ.

Четверта глава присвячена дослідженню впливу вільної поверхні на сигнали АЕ, спричинені утворенням у пружному тілі дископодібної тріщини. Поверхневі переміщення шукали у вигляді добутку переміщень, встановлених при розв'язанні задачі про миттєве утворення у пружному просторі дископодібної тріщини нормального відриву на коефіцієнти відбивання, визначені в роботі (Harris J.G., Pott J. Trans.ASME: J. Appl. Mech, 1984, 51, N1) з наближеного розв'язу задачі про ріст дископодібної тріщини у пружному півпросторі, який було отримано в рамках променевої теорії поширення хвиль. Знайдені у такий спосіб поверхневі переміщення будуть співпадати із точним розв'язком, для ближньої від епіцентру області, за умови, що радіус тріщини є значно меншим за віддаль від її центру до границі

Пластинку моделювали сильно витягнутим еліптичним включенням, велика вісь якого співпадала з віссю Ox декартової системи координат Oxy з початком – у центрі включення. Припускали, що, коли розтягуючі напруження всередині нього досягають критичної величини, на осі $x=0$ утворюється мікротріщина і, внаслідок цього, випромінюються пружні хвилі. Розподіл статичних напружень всередині включення знаходили використовувши результати роботи (Труш І.І. Автореф. дис. ...канд. физ.-мат. наук, Львов, 1973) та врахувавши, що відношення довжини малої осі

півпростору. На основі розрахунків компонент вектора переміщень на границі півпростору та залежності (7) запропоновано наступні наближені формули для визначення максимальних значень модуля вектора поверхневих переміщень:

$$U_{\max c_i}^{(k)} = \frac{\alpha_i \Phi_i(\theta) \lambda_0^2}{\rho c_i^2 R} R_i^{(k)}(\theta), \quad k = x, y, \quad (16)$$

де $R_i^{(k)}(\theta)$ – коефіцієнти відбивання для поздовжньої ($i=1$) і поперечної ($i=2$) хвилі. Числовий аналіз, проведений за співвідношеннями (16), показав, що у випадку поздовжньої хвилі максимальні значення поверхневих переміщень в епіцентрі майже у 2 рази перевищують відповідні значення, спричинені тільки падаючою хвилею. Для поперечної хвилі на малих віддальх від епіцентра характер зміни максимуму модуля вектора поверхневих переміщень має більш складний, у порівнянні з поздовжньою, характер. Це зумовлено як формою його кутової залежності при утворенні дископодібної тріщини у пружному просторі, так і наявністю критично відбитої хвилі, що поширюється вздовж границі півпростору. Залежності (16) при $i=1$ використовували для визначення розмірів і орієнтації дископодібної тріщини за сигналами АЕ, зареєстрованими системою трьох ПАЕ, що розташовані у площині симетрії на границі півпростору.

У цій же главі розглянуто задачу про миттєве виникнення у пружному півпросторі центру всестороннього розширення (чим моделювали утворення пори). В циліндричній системі координат $Orz\phi$ з центром O на границі півпростору $z=0$, джерело знаходилось у точці $z=z_0$, його скалярний потенціал

$$\varphi_0(r, z, t) = F_0 \delta(r) / (2\pi r) \delta(z - z_0) H(t),$$

де $F_0(\cdot)$ – інтенсивність дії джерела, $\delta(\cdot)$ – функція Дірака, а граничні умови на поверхні відносно напружень та початкові умови вибирались нульовими. Цю задачу розв'язували методом інтегральних перетворень: Ханкеля за координатою r і Лапласа за часом t . Оригінал трансформанти нормальної до границі півпростору компоненти вектора переміщень при $z=0$ знаходили методом Кан'яра. В результаті числових розрахунків її залежності від часу встановлено, що максимальні значення поверхневих коливань, спричинених приходом у точку спостереження хвилі Релея, досягаються на віддалі від епіцентра

$r^* = z_0 \left(\frac{2c_R}{c_2 - c_R} \right)^{1/2}$. Якщо покласти, що $c_2/c_1 = 0.535$, то $r^* \approx 5z_0$.

П'ята глава присвячена розробці методик акустико-емісійного контролю при випробуваннях матеріалів у водневомістких середовищах. Проведення відповідних експериментальних досліджень вимагає застосу-

вання хвильоводів АЕ, що зумовлено, як наявністю агресивного середовища, так і, можливо, екстремальними температурами. Важливим питанням, пов'язаним із застосуванням таких хвильоводів, які переважно мають циліндричну форму, є узгодження їх власних частот із частотною смугою ПАЕ. З цією метою на підставі методу граничної інтерполяції (Андрейкив А.Е. Пространственные задачи теории трещин. Киев: Наук. думка, 198.) отримано апроксимаційну формулу для визначення власних частот циліндричних хвильоводів АЕ в залежності від їх розмірів. Як граничні випадки інтерполяції розглядали тонкий диск та довгий стержень. За цією формулою розраховували діаметр циліндричного хвильовода при заданій його довжині, таким чином, щоб узгодити смугу робочих частот ПАЕ з власними частотами хвильовода.

У цій же главі розглянуто питання розробки експериментальних методик визначення K_{Isc} сталі у середовищі газоподібного водню та водневої пошкодженості котельних труб теплоелектростанцій засобами АЕ. На основі результатів, отриманих у другій– четвертій главах, дано рекомендації, щодо етапів проведення експериментів, розташування ПАЕ, смуги їх робочих частот, чутливості вимірювального тракту. Геометричні розміри хвильоводів розраховано за апроксимаційною формулою. Проведені експерименти по визначенню K_{Isc} сталі 9ХФ показали, що метод АЕ дозволяє визначити момент старту тріщини навіть у випадках, коли вона поширюється тунелуванням, не виходячи на бокову поверхню контролюваного об'єкта. При дослідженні водневої пошкодженості сталі 20 було встановлено, зокрема, що на початковій стадії навантаження триточковим згином призматичних зразків амплітуди АЕ приблизно на 30%, а сумарний рахунок - на 25% більші у випадку наводнених, ніж ненаводнених матеріалів. Результати цих досліджень впроваджено в Інституті теплоенергетики МінЕнерго України.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І КОРОТКІ ВИСНОВКИ

1. Розв'язано нестационарні динамічні задачі про миттєве утворення в попередньо навантаженому пружному тілі дископодібної тріщини нормального відриву та кручення, а також двох дископодібних тріщин нормального відриву без врахування їх взаємодії. Побудовано апроксимаційні формули для знаходження максимальних значень модуля вектора переміщень як для поздовжньої, так і для поперечної хвилі, справедливі для віддалей більших за 28 радіусів дефекту. На основі цих формул розроблено спосіб визначення розмірів та орієнтації новоутвореної дископодібної тріщини за відомими амплітудами сигналів АЕ.

2. Встановлено, що при утворенні дископодібної тріщини амплітудні значення модуля вектора переміщень залежать від кута спостереження. Для поздовжньої хвилі найбільше значення модуля вектора переміщень досягається у напрямку, перпен-

дикулярному до площини тріщини, а найменше – у площині її розташування; для поперечної хвилі максимум спостерігається для кутів $\approx 55^\circ$. Ширина першого максимуму зростає із зменшенням кута спостереження

3. Сформульовано модель докритичного локального по фронту підростання внутрішньої просторової тріщини у конструкційних матеріалах. На підставі цієї моделі встановлено, що амплітуда сигналів АЕ, спричинених локальним підростанням тріщини, пропорційна площі такого підростання, а сумарний рахунок АЕ пропорційний коефіцієнту інтенсивності напружень в четвертій степені.

4. Наближено визначено компоненти вектора переміщень на границі півпростору при утворенні в ньому дископодібної тріщини нормального відриву. Встановлено, що модуль вектора переміщень є максимальним в епіцентрі, що розташований на границі півпростору над центром тріщини. Відношення модуля вектора сумарного поверхневого переміщення, зумовленого падаючою та відбитою хвилями до модуля вектора переміщень, спричиненого тільки падаючою хвилею, є найбільшим в епіцентрі, де воно може досягати двох і поступово зменшується при віддаленні від епіцентра. У випадку поздовжньої хвилі це відношення близьке до одиниці на віддалі семи, а для поперечної хвилі – чотирьох глибин залягання тріщини.

5. Розв'язано динамічну задачу про миттєве утворення у півпросторі центру всестороннього розширення. Встановлено, що нормальна до поверхні компонента вектора переміщень, зумовлена поширенням хвилі Релея, досягає максимуму на віддалі біля п'яти глибин залягання дефекту і при подальшому зростанні віддалі згасає повільніше, ніж амплітуди об'ємних хвиль.

6. Методом граничної інтерполяції отримано апроксимативну формулу для розрахунку власних частот циліндричних хвилеводів АЕ в залежності від їх довжини та радіусу. Використовуючи цю формулу, визначено радіус хвилевода при заданій його довжині так, щоб забезпечити узгодження його власних частот із частотною смугєю ПАЕ. Хвилеводи таких розмірів використовували при визначенні величини нижнього порогового значення коефіцієнта інтенсивності напружень сталі 9ХФ у середовищі газоподібного водню та при дослідженні водневої пошкодженості котельних труб засобами АЕ.

7. Запропоновано методику наближеного визначення коефіцієнта інтенсивності напружень при статичному навантаженні матеріалів за сумарним рахунком АЕ.

Публікації за матеріалами дисертаційної роботи:

1. Панасюк В.В., Сергиенко О.Н., Микитишин С.И. Акустическая эмиссия при разрушении материалов // Физ.- хим. механика материалов. - 1983. - №6. - С.50-53.
2. Сергиенко О.Н. Использование амплитуд сигналов акустической эмиссии для определения размеров цементных включений в сталях // Матер. 12-й конф. мол. учен. Физ.-мех. ин-та АН УССР, Секц. физ.-хим. Механика материалов, Львов, 23-25 окт. 1985. Тез. докл. - Ч.2. - Львов, 1985. - С.66-68. - Деп. в ВИНТИ 18.04.86. №2833 - В.
3. Теоретические концепции метода акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В., Сергиенко О.Н., Скальський В.Р. (Препринт №137 ФМИ АН України) 1987. - 49 с.
4. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В., Сергиенко О.Н., Скальський В.Р. Акустико- эмиссионний контроль за ростом трещин в материалах //Тез. докл. II Всес. конф. по акустической эмиссии. - Кишинев, 1987. - С.143.
5. Лысак М.В., Скальський В.Р., Іваницький Я.Л., Ковчик С.Є., Сергієнко О.М. Застосування акустичної емісії для дослідження утворення тріщин під захисною наплавкою корпусів реакторів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. - 1989. - №2. - С.79-81.
6. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В., Сергиенко О.Н. Моделирование процессов локального разрушения, сопровождающегося акустической эмиссией, в материалах и изделиях (сообщ.1) // Технич. диагн. и неразруш. контроль. - 1990. - №3. - С.9-21.
7. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В., Скальський В.Р., Сергиенко О.Н. Методика определения значения $K_{I,III}$ стали в среде водорода с помощью метода акустической эмиссии // Технич. диагн. и неразруш. контроль. - 1992 - №1. - С.18-26.
8. Методические аспекты применения метода акустической эмиссии при определении статической трещиностойкости материалов. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В., Скальський В.Р., Сергиенко О.Н. (Препринт №165 ФМИ АН України) 1990. - 34с.
9. Лысак М.В., Скальський В.Р., Сергієнко О.М. Дослідження впливу хвилеводу на зміну параметрів сигналів акустичної емісії //Фіз.-хім. механіка матеріалів. - 1994. - №3. - С.64-71.
10. Андрейкив О.Є., Сергієнко О.М., Лысак М.В., Скальський В.Р. Дослідження вкладу хвиль Релея в акустичне поле, що виникає при розвитку внутрішнього дефекту //Фіз.-хім. механіка матеріалів. - 1993. - №2. - С.12-19.
11. Андрейкив О.Є., Лысак М.В., Сергієнко О.М., Скальський В.Р. Докритичний ріст просторових тріщин і акустична емісія //Тез. докл. Первой украинской конф. по неразруш. методам контроля. - Днепропетровск, 1994. - С.53-54.

Аннотация Сергиенко О. Н. Моделирование образования и распространения трещин в трехмерных деформируемых телах с использованием метода акустической эмиссии.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 - механика деформируемого твердого тела. Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины, Львов, 1996.

Сформулированы новые расчетные модели образования и докритического локального по фронту подрастания трещин в трехмерных упругих телах. В рамках предложенных моделей методом интегральных преобразований решен ряд нестационарных динамических задач в перемещениях о мгновенном образовании в предварительно нагруженном упругом теле дискообразных трещин, приближенно определены компоненты вектора перемещений на границе упругого полупространства при образовании в нем таких дефектов, а также при образовании микротрещины вблизи фронта макротрещины.

Предложены способы определения размеров и ориентации новообразованного дефекта по сигналам акустической эмиссии, установлены зависимости между параметрами сигналов акустической эмиссии и характеристиками трещин, в частности, между площадью ее докритического подрастания и амплитудой акустической эмиссии, между коэффициентом интенсивности напряжений и суммарным счетом.

Abstract Serhiyenko O. M. Modelling of formation and propagation of cracks in three-dimensional deformable bodies using acoustic emission method.

The theses presented for Degree of Candidate of Sciences (physics and mathematics); speciality: 01.02.04. - mechanics of deformable bodies, Karpenko Physico-Mechanical Institute. National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, 1996.

New calculation models for crack formation and its localized subcritical propagation in three-dimensional body are formulated. In the frame of proposed models using integral transforms method series of non-stationary dynamic problems of a penny-shaped crack sudden formation in previously loaded elastic body are solved. The displacement vector components on elastic half-space boundary caused by a penny-shaped crack formation as well as formation a microcrack near a macrocrack front are determined approximately.

The methods for determination of defect size and orientation by means of acoustic emission are proposed. The relationships between acoustic emission parameters and crack characteristics are established. In particular there are obtained the relationships between the subcritical crack growth area and acoustic emission amplitude as well as the stress intensity factor and cumulative count.

Ключові слова: руйнування, агресивне середовище, тріщина, коефіцієнт інтенсивності напружень, орієнтація дефекту, акустична емісія, амплітуда сигналу, сумарний рахунок, хвилевід.

Ав. 32. 802

Підп. до друку
Умовн. друк. арк.

Формат 60x84/16
Обл. вид. арк.

Папір *др. к.*
Зам. № 327

Друк офсетний
Тираж 100

Віддруковано у виробничо-поліграфічному відділі Льв. ЦНТЕІ

439621

