УДК 620.179.17

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ШВИДКОСТІ ПОШИРЕННЯ ПРУЖНИХ ХВИЛЬ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ В ТВЕРДОМУ ТІЛІ

В.Р. Скальський, Р.І. Сулим

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, м. Львів, тел. 8-067-905-52-79

Описано методику оцінки швидкості поширення пружних хвиль акустичної емісії, яка полягає у створенні алгоритму її розрахунку за результатами вимірювань на реальних об'єктах контролю. Запропоновано відповідну схему розташування первинних перетворювачів пружних хвиль акустичної емісії, а також проведено зіставлення отриманих експериментально значень швидкості зі значеннями, які дають аналітичні залежності теорії пружності.

Описана методика оценки скорости распространения упругих волн акустической эмиссии, которая заключается в создании алгоритма ее расчета за результатами измерений на реальных объектах контроля. Предложена соответствующая схема расположения первичных преобразователей упругих волн акустической эмиссии, а также проведено сопоставление полученных экспериментально значений скорости со значениями, которые дают аналитические зависимости теории упругости.

The method for speed estimation of elastic acoustic emission wave propagation in solids is presented. This method is based on numerical calculations from the data collected during the elastic acoustic diagnostics of real objects. The optimal location of acoustic emission sensors is proposed and the speeds of the acoustic emission elastic waves calculated according to the proposed method are compared with the ones obtained from the known analytical relationships.

У більшості галузей промисловості України виробниче обладнання (резервуари, трубопроводи, мости, елементи кранів та транспортних механізмів тощо) вичерпало свій регламентований ресурс. Однак його заміна чи капітальний ремонт є надзвичайно кошторисними або ж узагалі неможливими. Така ситуація спонукає використовувати це виробниче обладнання в умовах близьких до граничних. Щоб продовжити термін безпечної роботи згаданих об'єктів тривалого експлуатування, необхідно застосовувати нові прогресивні методи та засоби технічного діагностування їх стану. Саме тому нормативно-технічними документами регламентовано проведення моніторингу об'єктів з використанням сучасних методів неруйнівного контролю (НК) [1].

В останні десятиліття, завдяки своїм перевагам та бурхливому розвитку технічної бази, широкого застосування набув метод акустичної емісії (АЕ). У 2003 р. Держспоживстандартом України введено в дію нормативний документ [1], який регламентує проведення АЕ-контролю об'єктів підвищеної небезпеки. Метод АЕ відзначається високою чутливістю, можливістю діагностування ОК в режимі експлуатації, незалежністю від форми та розмірів ОК, одержанням результатів в реальному часі, змогою відбирати інформацію про процес руйнування на відстаннях, що на порядки перевищують розміри дефектів, а також найвищим серед існуючих методів НК співвідношенням ефективність–ціна затрат на проведення діагностичних робіт [2].

Однак поряд із незаперечними успіхами АЕ-діагностування матеріалів і елементів конструкцій існує ціла низка методичних труднощів застосування явища. Це перш за все забезпечення достовірності АЕ-результатів та співставлення їх із аналогічними, отриманими у різних лабораторіях та дослідницьких центрах. Пояснити таку ситуацію можна відсутністю єдиних методичних вимог щодо АЕ-випробувань матеріалів із дефектами типу тріщин.

Одним з найпоширеніших аспектів застосування методу АЕ є визначення

координат джерел сигналів АЕ, що має велике практичне значення, оскільки дозволяє встановити місця руйнування матеріалу. Звичайно вважають, що поняття "координати джерела АЕ" і "координати дефекту" еквівалентні. Проте дефекти можуть мати певну просторову конфігурацію і характеризуватися деяким геометричним місцем точок. Тому поняття "координати дефекту" не має сенсу без пояснення того, яка характерна точка дефекту при цьому розглядається. Розрахунок координат джерела АЕ за допомогою відомих прийомів теоретично (без урахування похибок вимірювання і спрощень, що приймаються) дає точку в матеріалі конструкції, в малому околі якої в даний момент розвивається дефект [3]. Прийнявши ці координати за координати дефекту, можна говорити про еквівалентність вказаних двох понять. Ми розуміємо поняття "координати дефекту" саме в даному сенсі. Наприклад, під координатами тріщини розуміємо координати її вершини, що випромінює імпульси АЕ під час свого розвитку.

Визначення координат дефектів за допомогою АЕ засноване на принципах пасивної радіолокації (лунолокації). Вони широко описані в спеціальній літературі, проте мало знайомі фахівцям з неруйнуючих випробувань матеріалів і виробів. Окрім того, локація дефектів за допомогою АЕ має деякі особливості, обумовлені природою сигналів АЕ. У зв'язку з цим зупинимося на цьому детальніше.

Дефект, що розвивається, випромінює в навколишній матеріал імпульси АЕ, вимірювання параметрів яких за допомогою декількох перетворювачів, що рознесли, дозволяє визначити місце розташування джерела. Інформація про це знаходиться в амплітуді прийнятих сигналів (чим ближче дефект до перетворювача, тим більша амплітуда сигналу) і у часі їх прийому. Амплітудна локація дефектів поки що слабо розроблена. Однією з причин цього є складний вплив структури конструкційних матеріалів і форми виробу на амплітуди пружних хвиль АЕ. Проте інформацію про амплітуди все ж таки використовують, але для вирішення допоміжних питань (селекції сигналів, грубої оцінки зони дефекту тощо). Найбільше застосування знайшли часові методи локації, в яких використовують залежність часу приходу сигналу на приймачі, які довільно розташовані навколо джерела.

Оскільки в переважній більшості конструкцій товщина використовуваних матеріалів значно менша від інших їхніх лінійних розмірів, а абсолютні похибки визначення координат дефектів за допомогою АЕ співмірні зі значеннями товщини, то звичайно у більшості випадків завдання локації ставлять як двовимірну задачу, тобто цікавляться координатами проекції джерела АЕ на серединну або зовнішню поверхню стінки конструкції. У праці [4] описані принципи просторової локації АЕ джерел, які виконуються за допомогою використання чотирьох первинних перетворювачів пружних хвиль АЕ.

Протягом тривалого періоду розвитку та впровадження методу АЕ над задачами визначення координат джерел пружних хвиль, що генерують АЕ, працювала і працює ціла низка дослідних центрів та інших наукових інституцій. Відомо, що в основу алгоритмів визначення координат джерел покладено математичний метод тріангуляції, який базується на вимірюванні різниць часів приходу сигналу АЕ на різні первинні перетворювачі (ПАЕ) [3]. Всі ці алгоритми вимагають високої точності вимірювань та достовірності вхідних даних АЕ-контролю.

Більшість опублікованих праць присвячені проблемам зменшення похибки визначення координат джерел АЕ за рахунок покращення математичного апарату обчислень, введення додаткових перевірок отриманих результатів тощо. Здебільшого у випадках обчислень координат джерел АЕ використовують табличні значення швидкості поширення пружних хвиль. Проте, беручи до уваги зношеність досліджуваних ОК, деградованість матеріалу, явища дифракції та рефракції можна з упевненістю стверджувати, що табличні значення швидкостей пружних хвиль у твердих тілах не завжди відповідають реальній швидкості їх проходження в об'єктах, що контролюються. З низки літературних джерел та інформації, розміщеної в глобальній мережі Internet [5-8], відомо, що в програмному забезпеченні найвідоміших на сьогоднішній день систем АЕ-моніторингу, серед яких варто відзначити програму VisualAE німецької фірми Vallen Systeme, а також програми AEWin та AEWinPost фірми PAC (США), для визначення координат джерел АЕ використовуються саме табличні значення швидкості поширення пружних хвиль АЕ.

Мета роботи – розробити та експериментально перевірити алгоритм визначення швидкості проходження пружних хвиль АЕ на реальному ОК, який дозволить підвищити точність знаходження координат

джерел АЕ під час проведення АЕ-діагностування.

Запропонований нами підхід щодо побудови алгоритму визначення швидкості пружних хвиль передбачає визначення швидкості поширення пружних хвиль безпосередньо на ОК перед проведенням АЕ-вимірювань. Експериментально встановлені значення швидкості дають змогу встановити реальну швидкість проходження пружних хвиль в матеріалі ОК, тобто точніше визначати координати джерел АЕ.

Створений алгоритм передбачає два варіанти розташування ПАЕ на ОК: два ПАЕ в лінію або чотири – на площині. Детальніше зупинимось на другому варіанті, оскільки він дає можливість використовувати для обчислень більшу кількість ПАЕ, а відтак підвищувати достовірність одержаних результатів. Імітатор АЕ може бути встановлений в довільній точці прямокутної області між ПАЕ.

Початком виконання алгоритму вважається момент імітації сигналу АЕ на ОК. Після реєстрації сигналу усіма ПАЕ здійснюється визначення різниць часів приходу сигналу на кожен ПАЕ. Ці дані, а також відомі дослідникам координати встановлення ПАЕ та імітатора сигналу АЕ на ОК дозволяють обчислити реальну швидкість проходження пружних хвиль АЕ в матеріалі ОК. Структурна схема алгоритму показана на рис. 1. Для усереднення результатів вимірювань імітування сигналів АЕ повторюються не менше 5 разів.

Експериментальне визначення швидкості поширення пружних хвиль АЕ за запропонованим алгоритмом проводили на дюралюмінієвій плиті розмірами 0,5×0,2×0,01 м. ПАЕ були встановленні на площині в точках з координатами $П_1$ (0,05м; 0,05м); $П_2$ (0,05м; 0,15м); $П_3$ (0,45м; 0,05м); $П_4$ (0,45м; 0,15м). Імітатор джерела АЕ розташували на цій же площині в точці з координатами I (0,20м; 0,12м).

Отримане усереднене значення швидкості поширення пружних хвиль АЕ, визначене за запропонованим алгоритмом, становило c_0=3,03·10³ м/с. Хвильове відображення сигналів АЕ, одержаних кожним з чотирьох ПАЕ, показано на рис. 2.

З метою перевірки правильності одержаних результатів їх порівнювали з результатами аналітичних обчислень, які були отримані за наступними залежностями [9,10]:

$$c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\upsilon}{\rho}}, \qquad (1)$$

$$c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \qquad (2)$$

$$c_R = \frac{0,8 + 1,12\upsilon}{1+\upsilon}\sqrt{\frac{G}{\rho}}, \qquad (3)$$

$$\lambda = \frac{\upsilon E}{(1+\upsilon)(1-2\upsilon)},\ \mu = \frac{E}{2(1+\upsilon)}, \qquad (4)$$

де c_1 – швидкість поздовжніх хвиль АЕ, c_2 – поперечних, c_R – хвиль Релея; λ, μ – постійні Ляме; υ – коефіцієнт Пуасона; ρ – густина матеріалу; G – модуль поперечного зсуву матеріалів; E – модуль Юнга.

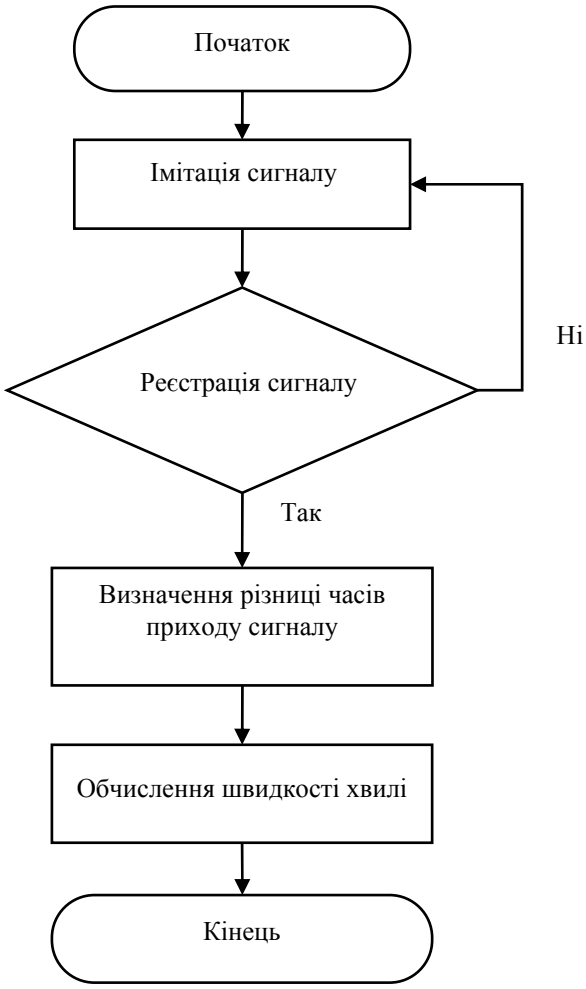


Рисунок 1 – Структурна схема алгоритму

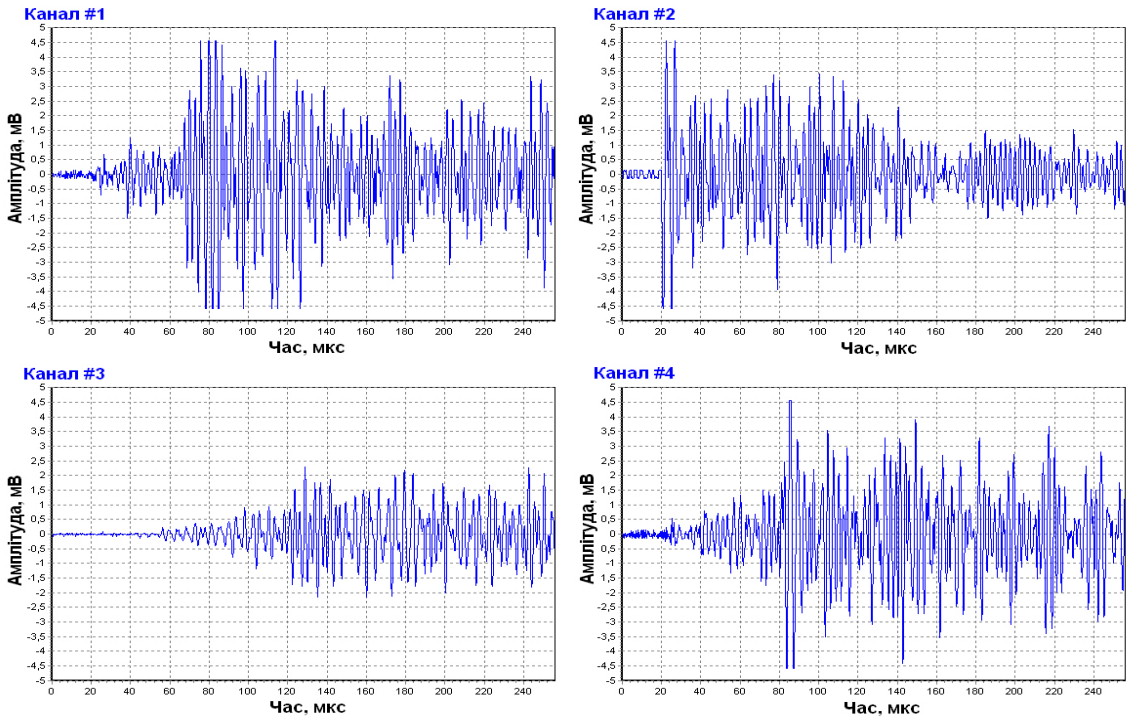
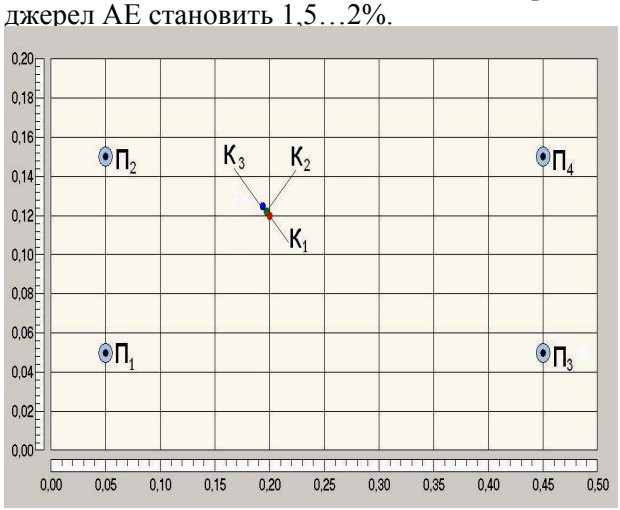


Рисунок 2 – Хвильове відображення сигналів АЕ, збуджених одним джерелом, зареєстровані вимірювальними каналами

Для вибраної дюралюмінієвої плити за аналітичними залежностями (1)-(3) були отримані такі значення швидкостей поширення об'ємних і поверхневої хвиль: c_1 = 6,3·10³ м/с; c_2 = 3,1·10³ м/с; c_R = 2,9·10³ м/с.

Зіставлення отриманого за запропонованим алгоритмом експериментального значення швидкості пружних хвиль АЕ, які реєстрували на модельній установці, з отриманими за аналітичними залежностями даними дозволило зробити висновок, що розкид значень швидкостей поперечної хвилі, на яку реагували наші ПАЕ, лежить у межах 0,23…0,3%. Це свідчить про високу достовірність отриманих за запропонованим алгоритмом експериментальних результатів. Окрім того, аналітична перевірка алгоритму дала підтвердження того, на який тип пружних хвиль зреагували ПАЕ на вибраному ОК.

Під час визначення координат джерел АЕ з урахуванням експериментально визначеного значення швидкості пружних хвиль АЕ c_0 отримали координати джерела (0,198м; 0,118м), а за визначення координат з урахуванням значення швидкості c_2, отриманого за аналітичними залежностями, координати джерела АЕ становили (0,194м; 0,115м) (рис. 3). Таким чином, похибка визначення координат джерел АЕ становить 1,5…2%.



$П_1$…$П_4$ – первинні перетворювачі; $К_1$ – реальні координати імітування джерела АЕ; $К_2$ – координати джерела АЕ, отримані з урахуванням визначеного експериментально значення швидкості пружної хвилі АЕ; $К_3$ – координати джерела АЕ, отримані з урахуванням значення швидкості поширення пружних хвиль АЕ за залежностями (1)-(3)

Рисунок 3 – Схематичне розташування ПАЕ та імітатора джерела АЕ на ОК

ВИСНОВКИ

Для покращення достовірності оцінки координат джерел АЕ необхідно застосовувати алгоритми визначення реальної швидкості поширення пружних хвиль АЕ, які визначаються типом первинних перетворювачів, що використовуються дослідниками. Це дає змогу підвищити точність знаходження координат джерел АЕ під час проведення технічного АЕ-діагностування ОК.

Запропонований алгоритм реалізований в програмному забезпеченні портативної восьмиканальної вимірювальної АЕ-системи SKOP-8, що широко використовується для моніторингу відповідальних об'єктів тривалого експлуатування [11] і дає похибку визначення координат джерела АЕ в межах 1,5…2%.

Література

1. ДСТУ 4227-2003. Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки. – К.: Держспоживстандарт України, 2003. – 26 с.

2. Скальський В.Р., Коваль П.М. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. Методологічні аспекти відбору та обробки інформації. – Львів: Сполом, 2005. – 396 с.

3. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. – М.: Издательство стандартов, 1976. – 272 с.

4. Андрейків О.Є., Скальський В.Р., Сулим Г.Т. Теоретичні основи методу акустичної емісії в механіці руйнування. – Львів: Сполом, 2007. – 480 с.

5. Деякі аспекти програмного забезпечення приладів акустичної емісії / В.Р. Скальський, Б.О. Оліярник, Р.І. Сулим, Р.М. Плахтій // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" Вимірювальна техніка та метрологія. – 2006. – №66. – С. 99 – 107.

6. http://vallen.de/software/index.html

7. http://www.pacndt.com/index.aspx?go=products&focus=Software.htm

8. http://www.diapac.ru/Software.php.

9. В.Т. Гринченко, В.В. Мелешко. Гармонические колебания и волны в упругих телах. – К.: Наук. думка, 1981. – 284 с.

10. Catier E. L'émission acoustique : un stéthoscope pour l'industrie // Electronique industrielle. – 1982. – №27. – P. 63 – 69.

11. Portable multi-channel device for acoustic emission monitoring of structures and products / Skalsky V., Serhiyenko O., Pochapsky Ye., Plakhtiy R., Sulym R. // Diagnostyka. – 2008. – Nr.3 (48). – P. 43 – 45.

Рекомендована до друку Оргкомітетом 5-ої Міжнародної н/т конференції „Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання", яка відбулася в ІФНТУНГ 02–05.12.2008р.