

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РУЙНУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

О.М. Станкевич

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Україна

Abstract. The continuous wavelet transform is applied to the analysis of acoustic emission signals collected during static loading of different structural materials specimens. Estimation's criteria of fracture mechanisms of the plastic deformation and the brittle mechanism were established.

Значний обсяг інформації про фізичні процеси, а також про механізми, енергію руйнування, швидкість деформації тощо, містить акустична емісія (АЕ), яка супроводжує процеси динамічної локальної перебудови структури матеріалу.

Відомо велику кількість праць, присвячених аналізу не лише потоку сигналів АЕ під час випробувань матеріалів, але й окремих взятих з метою їх детального розшифрування та ідентифікування. Однак складність параметричного опису поширення пружних хвиль в обмеженому, дефектному, анізотропному середовищі наразі не дає змоги розробити єдину теорію ідентифікування сигналів, а відтак і джерел АЕ. Розрізняють різні типи руйнування залежно від стадій його розвитку та особливостей структури матеріалу [1]. В основу відомих методик АЕ-ідентифікування покладено аналіз параметрів сигналів АЕ: амплітуди [2, 3], частотного спектру [4–10], енергії [11–13] тощо.

Останнім часом серед різноманітних методів цифрової обробки сигналів набув розвитку вейвлет-аналіз, який є ефективним засобом локалізації й класифікації особливих точок нестационарних сигналів і дозволяє здійснювати аналіз одночасно в частотній та часовій областях.

Метою досліджень є проведення аналізу особливостей руйнування конструкційних матеріалів за енергетичними характеристиками неперервного вейвлет-перетворення (НВП) сигналів АЕ для ідентифікування типів і механізмів їх руйнування.

Методика досліджень. Відомо, що на формування сигналу АЕ впливають такі параметри джерела як енергія, що виділяється під час деформації чи руйнування, та величина деформації. Своєю чергою, величина, швидкість та механізми деформації пов'язані з частотою і енергією пружної акустичної хвилі, яка виникає під час деформації (руйнування).

У попередніх дослідженнях [1] для ідентифікування типів руйнування конструкційних матеріалів запропоновано критерій, який ґрунтується на оцінці сигналів АЕ у локальні моменти часу, коли вейвлет-коефіцієнт набуває максимального значення. Для цього побудовано критеріальний параметр κ , який ураховує спектральні особливості НВП сигналів АЕ та параметри вимірювального тракту:

$$\kappa = WT_{\max} \times \Delta f_0 / \Delta f, \quad (1)$$

де WT_{\max} – локальний максимум вейвлет-коефіцієнта для події АЕ; Δf – ширина частотної смуги локального максимуму в координатах $WT-f$; Δf_0 – ширина робочої смуги АЕ-тракту, що визначається конструкцією первинного перетворювача. Залежно від експериментально встановленого значення критеріального параметра тип макроруйнування конструкційних матеріалів розділено на в'язке ($\kappa < 0,1$), в'язко-крихке ($0,1 \leq \kappa < 0,2$) та крихке руйнування ($\kappa \geq 0,2$).

Водночас відомо, що активність АЕ характеризується швидким вивільненням енергії в матеріалі, а енергетична характеристика сигналу пов'язана з цим процесом. Оскільки побудований критерій, як показала практика, має несуттєву межу переходу між значеннями критеріального параметра для в'язко-крихкого руйнування, то запропоновано оцінювати

сигнали АЕ за енергією локальних максимумів НВП сигналів АЕ, які характеризують кожний елементарний акт руйнування, за співвідношенням [14]

$$E_{WT} = \int_{t_1}^{t_2} |WT_a(t)|^2 dt, \quad (2)$$

де $[t_1, t_2]$ – ефективна тривалість випромінювання імпульсу на рівні $0,5WT_{\max}$,

$WT_a(t) = A + B \cdot e^{-0,5 \left(\frac{t-C}{D} \right)^2}$ – функція апроксимації проекції локального максимуму на площину “вейвлет-коефіцієнт WT – час t ”, A, B, C, D – коефіцієнти апроксимації. Тоді за новим критерієм, якщо $E_{WT} < 0,01$ – сигнал супроводжує в’язке, $0,01 \leq E_{WT} < 0,1$ – в’язко-крихке та $E_{WT} \geq 0,1$ – крихке руйнування.

Результати та їх обговорення. Для вивчення особливостей руйнування за енергією локальних максимумів НВП сигналів АЕ вибрали такі конструкційні матеріали: корунд, натрій-кальцій-силікатне скло, сталь 38ХНЗМФА. Досліджували за трьома схемами навантаження: розтяг циліндричних сталевих зразків ($\varnothing 4$ мм, $l = 44$ мм); стиск зразків зі скла (тротуарна RGB-плитка); триточковий згин циліндричних зразків із корунду ($\varnothing 13,5$ мм, $l = 80$ мм).

В експериментах використовували установку СВР-5 зі швидкістю переміщення індентора 4×10^{-7} м/с. Щоб уникнути впливу завад, застосували метод паралельного (індикаторного) каналу. АЕ-інформацію реєстрували за допомогою системи SKOP-8M з двома вимірювальними АЕ-каналами. Режими вимірювань: тривалість вибірки 0,5 мкс; період дискретизації аналогового сигналу 0,25 мкс; частота зрізу фільтра низьких частот 600 кГц, високих 200 кГц; поріг дискримінації – у межах 30 %. Коефіцієнт підсилення АЕ-тракту становив 70 дБ (40 дБ – попередній підсилювач). Смугу частот вимірювального каналу визначали за спектральними характеристиками первинного перетворювача. У нашому випадку вона була 0,2 ... 0,6 МГц. Відносна похибка реєстрації амплітуди сигналів АЕ не більше $\pm 10\%$. У режимі постобробки аналізували сигнали АЕ, будували їх НВП та вивчали кореляцію локальних особливостей НВП з типами руйнування.

На рис. 1 представлено двопараметричний розподіл сигналів АЕ під час руйнування корунду та скла в координатах “енергія E_{WT} – коефіцієнт κ ”. Числове значення енергії E_{WT} має діапазон 0,01...0,305, а критеріального показника κ – 0,06...0,56. Найбільша кількість сигналів АЕ має значення енергії $E_{WT} > 0,01$, а значення критеріального показника $\kappa > 0,1$. Тобто, згідно із запропонованими вище критеріями вони відповідають в’язко-крихкому та крихкому руйнуванню, тобто супроводжують розвиток мікротріщиноутворення та поширення макротріщини, відповідно.

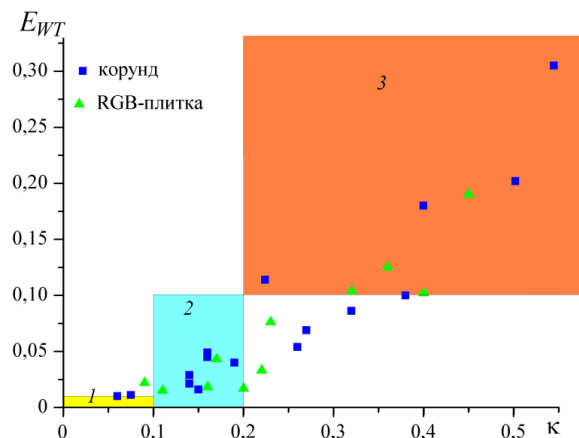


Рис. 1. Двопараметричний розподіл сигналів АЕ, зареєстрованих під час руйнування корунду та RGB-плитки (1 – в’язке, 2 – в’язко-крихке, 3 – крихке руйнування).

Під час руйнування сталі 38ХНЗМФА реєстрували сигнали АЕ трьох типів. Як видно з двопараметричного розподілу (рис. 2, б) на ранніх стадіях (ділянка I рис. 2, а) активність утворення мікротріщин є малою порівняно з дислокаційними механізмами та активно зростає на етапі навантаження, який відповідає початку пластичної деформації (ділянка II). Далі спостерігали ріст АЕ-активності. Наявність у цей час сигналів АЕ, які відповідають різним типам руйнування, свідчить про інтенсивний розвиток мікро- та макротріщиноутворення. Подальша деформація супроводжується локальними пластичними зсувами. Остання стадія навантаження (ділянка III) протікає зі зменшенням деформованого об'єму і локалізацією зони деформації (відбувається утворення шийки). Цей процес супроводжується підростанням і злиттям утворених раніше мікротріщин, що врешті призводить до руйнування зразка.

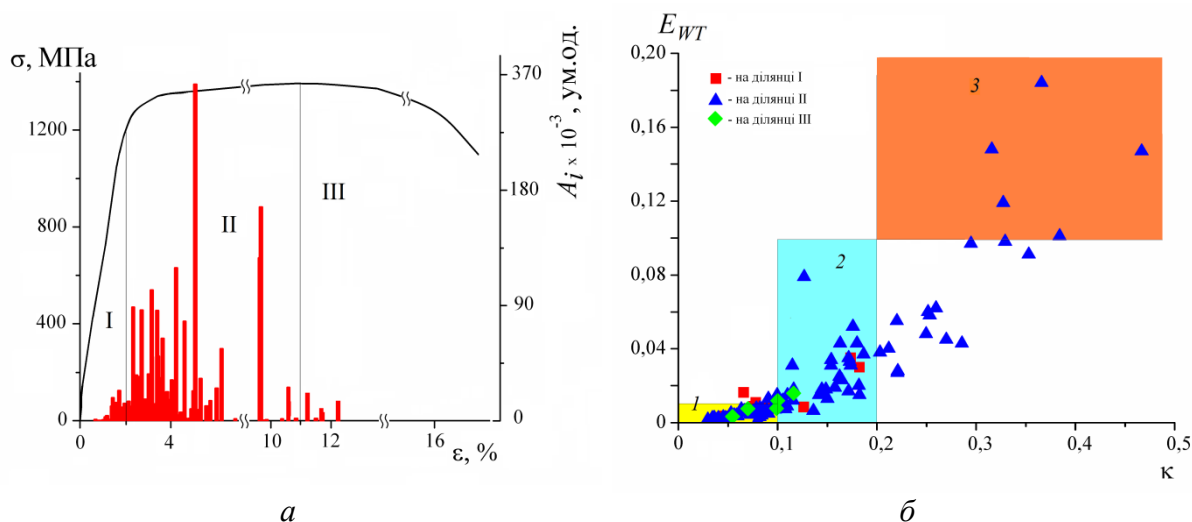


Рис. 2. Діаграма розтягу та розподіл амплітуд сигналів АЕ за виборками (а) та їх двопараметричний розподіл за різного навантаження (б) для сталі 38ХНЗМФА.

Обчислення частки енергії різних типів руйнування показали, що найбільший відсоток енергії (68,3%) під час руйнування сталі 38ХНЗМФА виділяється за в'язкого та в'язко-крихкого руйнування, тобто під час пластичних деформацій та мікротріщиноутворення (обл. 1, 2 на рис. 2, б). Водночас для крихких матеріалів (корунд та скло) загальна енергія руйнування припадає на в'язко-крихке (корунд – 45,8 %, RGB-плитка – 19,15 %) та крихке (корунд – 54,2 %, RGB-плитка – 80,85 %) руйнування (обл. 2, 3 на рис. 1).

Для верифікування енергетичного критерію співставили отримані результати з раніше проведеними дослідженнями [14]. На рис. 3 представлено діаграму розподілу частки енергії типів руйнування для різних матеріалів. Бачимо, що в крихких матеріалах найбільша частка енергії припадає на в'язко-крихке та крихке (скло, корунд, сталь 45(гарт.)), а у в'язких сталях – на в'язке та в'язко-крихке руйнування (сталь 45(стан. пост.), сталь 38ХНЗМФА), що узгоджується з уже відомими даними [1].

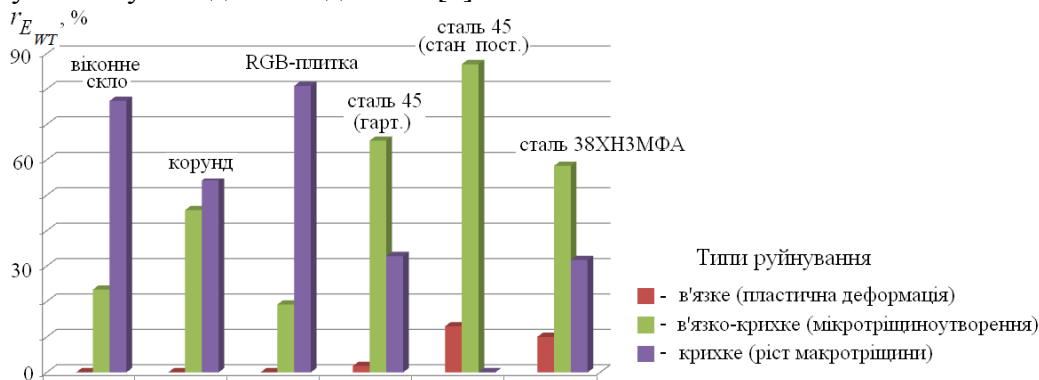


Рис. 3. Частка енергії типів руйнування для різних конструкційних матеріалів.

Висновки. Аналіз амплітудно-частотних та енергетичних параметрів локальних максимумів НВП сигналів АЕ під час руйнування різних конструкційних матеріалів за запропонованими критеріями ідентифікування типів руйнування дав можливість розділити сигнали АЕ на три типи: що супроводжують пластичну деформацію, утворення і розвиток мікротріщин та поширення макротріщини.

Побудовані методики підтвердили ефективність застосування енергетичного критерію, що побудований на основі неперервного вейвлет-перетворення сигналів АЕ, для вивчення динаміки та ідентифікування типів руйнування конструкційних матеріалів.

1. Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування типів макроруйнування конструкційних матеріалів / В. Р. Скальський, В. В. Божидарнік, О. М. Станкевич. – К. : Наукова думка, 2014. – 264 с.
2. Crack detection in pressure piping by acoustic emission / P. H. Hutton, R. N. Ord, H. N. Pedersen, J. C. Spanner // Nuclear Safety Quarterly Report – July, August, September, October, 1967 for Nuclear Safety Branch of USAEC Division of Reactor Development and Technology. BNWL-754. – Battelle–Northwest, Richland, Washington. – 1968. – P. 3.1–3.13.
3. Gerberich W. An acoustic emission investigation of microscopic ductile fracture / W. Gerberich, D. G. Atteridge, J. F. Lessar // Metallurgical Transactions. – 1975. – A6(4). – P. 797–801.
4. Залесский В. В. Спектральный анализ сигналов акустической эмиссии / В. В. Залесский, А. С. Трипалин, Н. Я. Портной // Физико-математические исследования. – Ростов-на-Дону, 1972. – С. 91–94.
5. Pardee W. Analysis of acoustic emission frequency spectra / W. Pardee, L. J. Graham // IEEE Ultrasonic symposium: proc. – Los Angeles, 1975. – P. 597–600.
6. Kline R. A. Frequency analysis of acoustic emission signals / R. A. Kline, W. Hartman // 2nd International conference on mechanical behavior of materials: proc. – 1976. – P. 1631–1635.
7. Иванов В. И. Применение метода АЭ для неразрушающего контроля и исследования материалов (обзор основных проблем и задач) / В. И. Иванов // Дефектоскопия. – 1980. – № 5. – С. 65–84.
8. Acoustic emission crack monitoring in fracture-toughness tests for AISI-4340 and SA 533B steels / H. Takahashi, M. A. Khan, M. Kikuchi, M. Suzuki // Experimental Mechanics. – 1981. – 21(3). – P. 89–99.
9. Исследование деформирования кремнистого железа методом акустической эмиссии / Г. Б. Муравин, В. М. Финкель, Л. М. Лезвинская, Я. В. Симкин // Дефектоскопия. – 1984. – № 10. – С. 88–91.
10. Теоретические концепции метода акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения / А. Е. Андрейкив, Н. В. Лысак, О. Н. Сергиенко, В. Р. Скальський. – Львов, 1987. – 49 с. – (Препр. / АН УССР. Физ.-мех. ин-т; № 137).
11. Woodward B. Identification of acoustic emission source mechanisms by energy spectrum analysis / B. Woodward // Ultrasonic. – 1976. – 14(6). – P. 249–255.
12. Mirabile M. Acoustic emission energy and mechanisms of plastic deformation and fracture / M. Mirabile // Nondestructive testing. – 1975. – 8(2). – P. 77–85.
13. Real-time evaluation of energy attenuation: A novel approach to acoustic emission analysis for damage monitoring of ceramic matrix composites / E. Maillat, N. Godin, M. R’Mili et al. // Journal of the European Ceramic Society. – 2014. – 34. – P. 1673–1679.
14. Назарчук З. Характеристика механізмів руйнування сталі 45 за вейвлет-перетворенням сигналів акустичної емісії / З. Назарчук, В. Скальський, О. Станкевич // 12-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові (МСУІМЛІ-12): праці, (28-29 травня 2015 р., Львів). – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2015. – С. 3.