

УДК 539.3:620.179.17

МЕТОДИКА ВСТАНОВЛЕННЯ ТИПІВ МАКРОРУЙНУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ПАРАМЕТРАМИ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

З. Т. НАЗАРЧУК, В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, О. М. СТАНКЕВИЧ

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

Вивчено особливості сигналів акустичної емісії під час макроруйнування структурно різних конструкційних матеріалів. Для цього використано результати аналізу локальних особливостей сигналів АЕ за їх неперервним вейвлет-перетворенням. За критерієм ідентифікування типів макроруйнування оцінено крихке, в'язко-крихке та в'язке руйнування. Встановлено характерні відмінності сигналів за шириною смуги частот, тривалістю її випромінювання та зміною значень домінуючої частоти.

Ключові слова: *руйнування, акустична емісія, неперервне вейвлет-перетворення, критерій ідентифікування типів руйнування.*

Існує багато чинників, які впливають на здатність матеріалу опиратися руйнуванню. До них, зокрема, належать низька температура, високі напруження і швидкості деформації, що виникають під час динамічних навантажень, концентратори напружень тощо. Унаслідок тривалого експлуатування під їх впливом більшість конструкційних матеріалів суттєво окрихчуються, що призводить до зниження в'язкості руйнування, а відтак, до значного скорочення часу безпечної експлуатації промислових об'єктів чи виробів. Тому для ефективного визначення їх залишкового ресурсу важливо не тільки вміти виявляти різноманітні дефекти, але й оцінювати типи руйнування під час їх докритичного розвитку. Це дасть можливість прийняти оперативні рішення про своєчасне виведення об'єкта контролю з експлуатації чи запобігти його передчасному руйнуванню.

Розроблено низку підходів до ідентифікування типів макроруйнування методом акустичної емісії (АЕ), зокрема, за амплітудно-частотними характеристиками її сигналів [1]. Встановлено, що АЕ добре відображає динаміку розвитку цих процесів, зокрема швидкість поширення тріщин. Щоб виявити типи руйнування, визначали енергію сигналів [2] та зміну їх частотного спектра [3–5]. За критерієм ідентифікації стадій докритичного росту тріщини запропоновано використовувати звуження смуги частот сигналів АЕ [6, 7], а для оцінки типів макроруйнування під час її підростання – критерій, побудований на найстійкіших параметрах сигналів із урахуванням режимів відбору АЕ-інформації [8]. В основі більшості відомих критеріїв – результати аналізу частотного спектра сигналу, який отримують за допомогою перетворення Фур'є. Водночас для вивчення особливостей нестационарних сигналів останнім часом широко використовують їх вейвлет-перетворення, за яким, на відміну від перетворення Фур'є, вдається не лише виділяти частотні компоненти сигналу (для низькочастотних компонентів), але й локалізувати їх у часі (для виділення компонентів високої частоти) [9]. Наприклад, вейвлет-перетворення сигналів АЕ застосовували у задачах локації їх джерел [10, 11], для моніторингу стану інструментів та машин [12, 13], виявлення та розпізнавання пошкод і дефектів [14–16] тощо.

Мета дослідження – ідентифікувати типи макроруйнування різних конструкційних матеріалів на основі аналізу локальних особливостей неперервного вейвлет-перетворення сигналів АЕ.

Методика випроб. Для розпізнавання локальних та “тонких” особливостей сигналів використовують неперервне вейвлет-перетворення (НВП), яке задають у вигляді скалярного добутку вихідного сигналу $s(t) \in L^2(R)$ та базисних функцій $\psi_{ab}(t)$ [17]:

$$W(a,b) = (s(t), \psi_{ab}(t)) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt.$$

Базисні функції $\psi_{ab}(t)$, які називають вейвлетами, будують шляхом масштабування та зсуву у часі деякої функції-прототипу (материнської функції) $\psi(t)$ за співвідношенням

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right).$$

Параметр b відповідає за розташування у часі, а a – за масштаб. За великими значеннями a виділяють низькі частоти сигналів, а за меншими – високі. Результатом НВП є спектр коефіцієнтів $W(a,b)$ кореляції сигналу з вейвлетом у вигляді поверхні у тривимірному просторі.

Вибір конкретного материнського вейвлета залежить від мети досліджень та типу сигналу, який необхідно проаналізувати. Найпоширеніші дійсні неперервні бази конструкують, використовуючи функцію Гауса $g(t) = \exp(-t^2/2)$, яка має найкращі локалізаційні властивості як у часовій, так і у частотній областях, що важливо для аналізу нестационарних сигналів [18]. У програмному середовищі AGU-Vallen Wavelet [19], розробленому компанією Vallen Systeme для НВП сигналів АЕ, за материнський вибрано вейвлет Габора на основі функції Гауса. Материнський вейвлет та його перетворення Фур’є мають вигляд

$$\psi_g(t) = \pi^{-1/4} \left(\frac{\omega_0}{\gamma}\right)^{1/2} \exp\left[-\frac{t^2}{2} \left(\frac{\omega_0}{\gamma}\right)^2 + i\omega_0 t\right], \quad (1)$$

$$\hat{\psi}_g(\omega) = (2\pi)^{1/2} \pi^{-1/4} \left(\frac{\omega_0}{\gamma}\right)^{1/2} \exp\left[-\frac{t^2}{2} \left(\frac{\omega_0}{\gamma}\right)^2 (\omega - \omega_0)^2\right], \quad (2)$$

де ω_0 – центральна частота і $\gamma = \pi(2\ln 2)^{1/2} = 5,336$ [20]. Функцію Габора (1) можна розглядати як віконну функцію Гауса з центром у точці $t = 0$, а її перетворення Фур’є (2) зосереджене поблизу частоти $\omega = \omega_0$. Тоді зміщена та масштабована функція $\psi_g((t-b)/a)$ зосереджена поблизу точки $t = b$, а її перетворення Фур’є $[a \exp(-ib\omega)] \hat{\psi}_g(a\omega)$ – поблизу частоти $\omega = \omega_0/a$. Таким чином, НВП характеризує часово-частотні коефіцієнти $WT = W(a,b)$ сигналу $s(t)$ поблизу точок $t = b$ і $f = \omega_0/a$. За зміною цих коефіцієнтів на різних масштабах можна виявити локальні екстремуми структури досліджуваного сигналу. Великі значення вейвлет-коефіцієнтів WT характеризують одночасно сильно виражену особливість сигналу та добру відповідність вейвлет-функції його обвідній.

З урахуванням результатів теоретичних [21, 22] та експериментальних досліджень [23, 24] для кількісної оцінки сигналів АЕ під час руйнування конструкційних матеріалів за параметрами НВП запропоновано критеріальний показник κ :

$$\kappa = \frac{WT_{\max} \times \Delta f_0}{\Delta f}, \quad (3)$$

де WT_{\max} – максимальне значення вейвлет-коефіцієнта WT для події АЕ; Δf – ширина частотної смуги для цієї події в координатах “ $WT-f$ ”; Δf_0 – ширина робочої смуги вимірювального АЕ-тракту, сумірної з робочою смугою частот первинного перетворювача. Залежно від експериментально визначеного значення критеріального параметра тип макроруйнування конструкційних матеріалів розділено на в’язке ($\kappa < 0,1$), в’язко-крихке ($0,1 \leq \kappa < 0,2$) і крихке ($\kappa \geq 0,2$). Збільшення показника κ свідчить про зростання ймовірності крихкого руйнування.

У конструкційних матеріалах можуть одночасно відбуватись мікротріщиноутворення, розтріскування включень, формування пластичних деформацій, макроруйнування тощо, що зумовлює вказані механізми руйнування. Для їх ідентифікування за сигналами АЕ запропоновано методику за таким алгоритмом: 1 – побудувати НВП сигналу АЕ та визначити значення вейвлет-коефіцієнта WT_{\max} у цій події; 2 – побудувати проекцію НВП на площину “ $WT-f$ ” у момент досягнення цього значення; 3 – визначити ширину смуги частот Δf (MHz), яка відповідає значенню WT_{\max} ; 4 – обчислити критеріальний показник κ за співвідношенням (3) та за його значенням ідентифікувати тип руйнування, що протікає у фіксований момент часу в матеріалі [23, 24]. Отже, за критерієм (3) можна оцінити тип руйнування у масштабі реального часу.

Результати та їх обговорення. Для вивчення особливостей руйнування за критеріальним параметром κ вибрали такі конструкційні матеріали: корунд, сталь 38ХНЗМФА, алюмінієвий сплав Д16 та листовий ебоніт. Досліджували за двома схемами навантаження: розтяг циліндричних сталевих зразків (діаметром 4 mm, довжиною 44 mm), плоских зі сплаву Д16 (40×9×2 mm) та листового ебоніту (44×9,4×2,8 mm); триточковий згин циліндричних зразків з корунду (діаметром 13,5 mm, довжиною 80 mm).

Для цього використовували установку СВР-5 [8] зі швидкістю навантаження $4 \cdot 10^{-7}$ m/s. Щоб уникнути впливу завад, застосовували метод паралельного (індикаторного) каналу [25]. АЕ-інформацію відбирали за допомогою системи SKOP-8M [8] з двома вимірювальними АЕ-каналами. Режими вимірювань: тривалість вибірки 0,5 ms; період дискретизації аналогового сигналу 0,25 μ s; частота зрізу фільтра низьких частот 600 kHz, високих 200 kHz; поріг дискримінації – у межах 30%. Коефіцієнт підсилення АЕ-тракту становив 70 dB (40 dB – попередній підсилювач). Смугу частот вимірювального АЕ-тракту визначали за спектральними характеристиками первинного перетворювача. У нашому випадку 0,2...0,6 MHz. 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.

Під час руйнування циліндричних зразків із корунду система SKOP-8M реєструвала сигнали АЕ, для яких $0,12 \leq \kappa \leq 0,55$. Опрацьовано 100 сигналів. Їх НВП характеризується вузькосмуговими частотними піками та високими значеннями вейвлет-коефіцієнтів WT_{\max} . Встановлено, що зі збільшенням значення WT_{\max} ширина смуги частот, яка йому відповідає за проекцією на площину “ $WT-f$ ”, звужується. Аналогічні результати отримали раніше, досліджуючи руйнування різних марок скла [23]. Отже, такі сигнали відповідають крихкому руйнуванню (рис. 1).

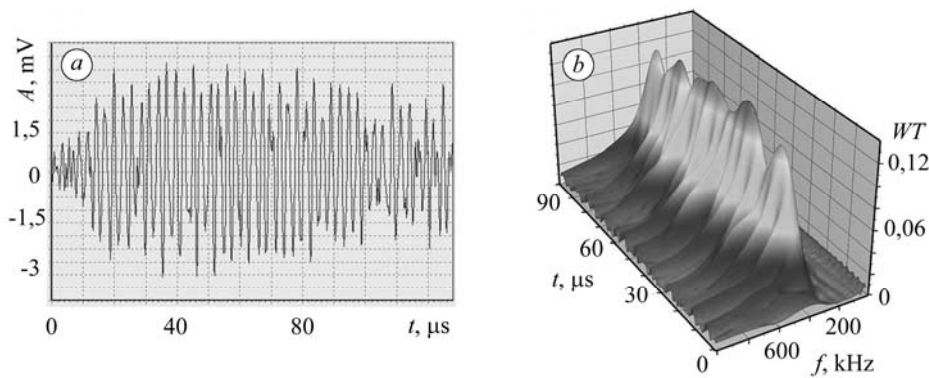


Рис. 1. Характерний сигнал АЕ (а) та його НВП (b) для крихкого руйнування.

Fig. 1. AE typical signal (a) and its continuous wavelet transform (CWT) (b) for brittle fracture.

Під час руйнування сталі 38ХНЗМФА та сплаву Д16 реєстрували сигнали АЕ трьох типів. Зокрема, на ранніх стадіях значення їх критеріального показника низькі ($0,03 \leq \kappa \leq 0,1$) і гіпотетично відповідають відшаруванню включень у в'язкій феритній матриці, утворенню мікропор та їх злиттю, а також дислокаційним механізмам мікротріщиноутворення, що характеризують в'язке руйнування матеріалу. Сигналів з такими значеннями κ займали приблизно 45% від загальної кількості для сталі та 57% – для сплаву. Опрацьовано 160 сигналів АЕ, які супроводжували руйнування сталі, та 60 сигналів – для сплаву. На рис. 2а подано хвильове відображення сигналу, а на рис. 2b – його НВП ($\kappa = 0,048$) під час розтягу сталевого зразка за в'язкого руйнування.

Отже, аналізуючи особливості НВП сигналів АЕ, виявили, що сплав Д16 пластичніший, ніж сталь 387ХНЗМФА, оскільки під час його руйнування випромінюється більша кількість сигналів зі значенням $\kappa < 0,1$ (57 проти 45%), що добре узгоджується з відомими результатами досліджень за іншими методиками [8].

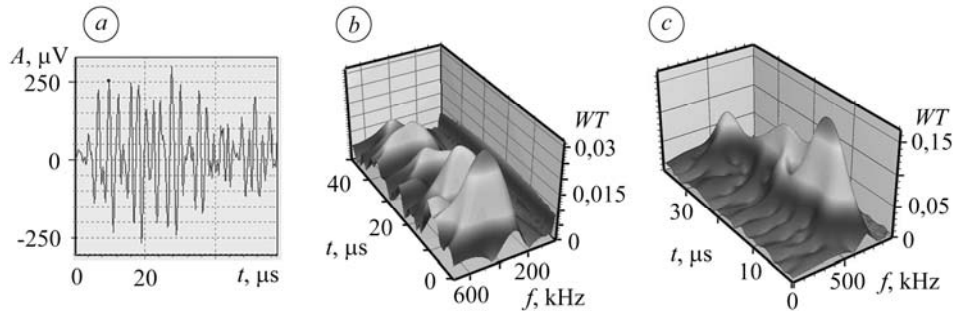


Рис. 2. Хвильове відображення сигналу АЕ (а) та його НВП (b) за в'язкого руйнування, а також НВП сигналу (c) за крихкого руйнування сталі 38ХНЗМФА.

Fig. 2. Waveform (a) and CWT of AE signal (b) for ductile fracture, and CWT of AE signal (c) for brittle fracture of 38ХНЗМФА steel.

Водночас зі збільшенням навантаження поза границю текучості з'являються дискретні сигнали АЕ з високими амплітудами і вузькими частотними спектрами, для яких значення κ суттєво зростають. Це характерно для інтенсивнішого утворення мікротріщин або підростання макротріщини. Кількість таких сигналів становить 25% від загальної кількості для сталі 38ХНЗМФА та 23% – для сплаву Д16, а критеріальний параметр для них змінюється в діапазонах $0,2 \leq \kappa \leq 0,56$ і

$0,2 \leq \kappa \leq 0,4$, відповідно, що сумірно з його значеннями під час руйнування корунду та скла [23]. На рис. 2с зображено НВП типового сигналу, для якого $\kappa = 0,56$.

Встановили, що серед зареєстрованих під час руйнування сталі 38ХНЗМФА та сплаву Д16 сигналів АЕ є такі, для яких $0,1 \leq \kappa \leq 0,2$. Їх кількість (від загальної кількості зареєстрованих) – 30% для сталі та 20% – для сплаву. На рис. 3а–с зображено сигнал АЕ, для якого $\kappa = 0,127$, НВП та його проекцію на площину “ $WT-f$ ” у момент досягнення значення WT_{\max} для цієї АЕ-події.

Амплітуди таких сигналів вищі, ніж сигналів, що відповідають в’язкому руйнуванню (рис. 2а), але нижчі, ніж сигналів АЕ, що відповідають крихкому руйнуванню (див. рис. 1а). Їх НВП (рис. 3b, d) свідчить про декілька максимумів вейвлет-коефіцієнтів WT у короткому інтервалі часу на різних частотах, а проекція НВП на площину “ $WT-f$ ” (рис. 3c) – про широкий спектр частот, що, ймовірно, відповідає накладанню пружних коливань від різних механізмів руйнування в одній АЕ-події. Ці сигнали можна віднести до таких, що супроводжують в’язко-крихке руйнування.

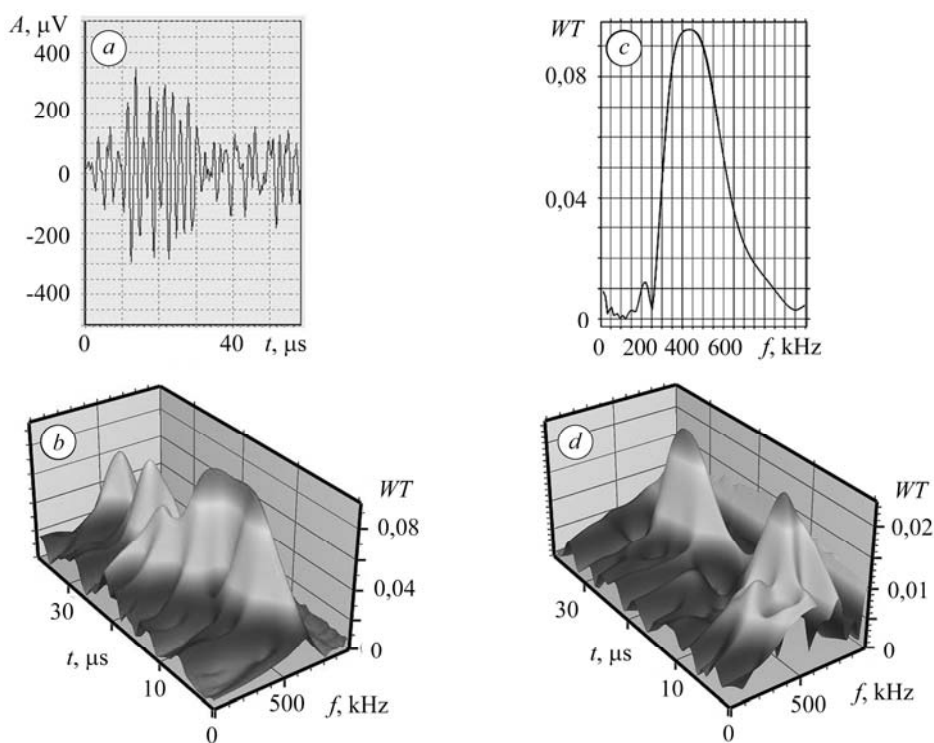


Рис. 3. Хвильове відображення (а), НВП (b) та його проекція на площину “ $WT-f$ ” (c) сигналу АЕ для сталі 38ХНЗМФА та НВП сигналу для сплаву Д16 (d), які відповідають в’язко-крихкому руйнуванню.

Fig. 3. Waveform (a), CWT (b) and “ $WT-f$ ” representation (c) of AE signal for 38ХНЗМФА steel and CWT of AE signal for Д16 alloy (d) for ductile-brittle fracture.

Під час руйнування листового ебоніту присутні два типи сигналів АЕ: на початкових стадіях зі значеннями критеріального показника $0,02 \leq \kappa \leq 0,08$, що відповідає в’язкому руйнуванню, та за подальшого збільшення навантаження – в інтервалі $0,1 \leq \kappa \leq 0,36$, що відповідає крихкому руйнуванню. Всього опрацьовано 500 сигналів. На рис. 4а зображено НВП сигналу АЕ, для якого $\kappa = 0,32$. За

проекцією НВП на площину “ $WT-f$ ” у момент досягнення значення WT_{\max} отримали вузьку смугу частот ($\Delta f = 0,1 \text{ MHz}$) (рис. 4b) з тривалістю випромінювання $\sim 10 \mu\text{s}$ (рис. 4c).

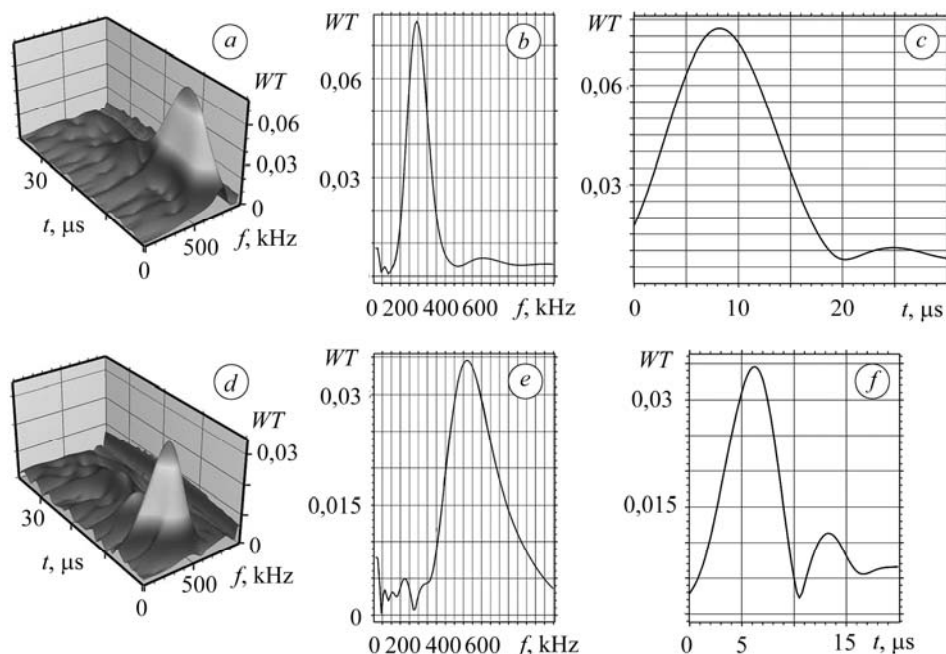


Рис. 4. Характерний сигнал АЕ за крихкого (a–c) та в’язкого (d–f) руйнування ебоніту: a, d – НВП, b, e, c, f – проєкції НВП на площини “ $WT-f$ ” та “ $WT-t$ ”, відповідно.

Fig. 4. AE typical signal for brittle (a–c) and ductile (d–f) fracture of ebonite: a, d – CWT, b, e, c, f – “ $WT-f$ ” and “ $WT-t$ ” representations, respectively.

На рис. 4d вказано аналогічні параметри сигналу АЕ, коли $\kappa = 0,06$. За проєкцією НВП на площину “ $WT-f$ ” цьому сигналу відповідає ширша смуга частот ($\Delta f = 0,15 \text{ MHz}$) (рис. 5b), ніж у попередньому випадку, а тривалість її випромінювання, навпаки, зменшується і становить приблизно $4 \mu\text{s}$ (рис. 4f).

Таким чином, особливістю НВП сигналів АЕ, які відповідають крихкому руйнуванню, є довготривале випромінювання вузького спектра частот за досягнення коефіцієнта WT_{\max} (див. рис. 1b, 2c і 4a), проти сигналів, які супроводжують в’язке руйнування, де випромінювання широкого спектра частот нетривале (рис. 2b і 4d). Це можна пояснити відмінностями фізичної природи різних типів руйнування [26].

Як виявив аналіз НВП, під час випромінювання сигналів АЕ, які супроводжують крихке руйнування, частота, що відповідає коефіцієнту WT_{\max} , зменшується порівняно з частотою сигналів АЕ, які характеризують в’язке руйнування (див. рис. 1b, 2c, 4a, b та 2b, 4d, e). Цей результат узгоджується з отриманими раніше теоретичними розв’язками відповідних задач, з яких випливає, що зі збільшенням розмірів тріщини в твердому тілі зростає амплітуда переміщень, звужується ширина смуги домінуючих частот та зменшується приведена частота, за якої амплітуди досягають максимальних значень [21, 22].

ВИСНОВКИ

Опираючись на результати експериментальних досліджень, можна стверджувати, що за критерієм оцінки типів руйнування, побудованим на застосуванні

до сигналів АЕ неперервного вейвлет-перетворення, добре можна проаналізувати особливості руйнування структурно різних конструкційних матеріалів.

Оцінюючи локальні характеристики НВП сигналів АЕ, виявили, що за крихкого руйнування критеріальний параметр $\kappa \geq 0,2$. Їм притаманна вузька смуга частот за проекцією НВП на площину “ $WT-f$ ” у момент досягнення вейвлет-коефіцієнта WT_{\max} та значна тривалість її випромінювання.

Для НВП сигналів АЕ, властивих в’язкому руйнуванню конструкційних матеріалів різної структури, критеріальний параметр $\kappa < 0,1$. За значень WT_{\max} сигнали мають широку смугу частот у проекції НВП на площину “ $WT-f$ ” та коротку тривалість її випромінювання. Частота, за якої досягається вейвлет-коефіцієнт WT_{\max} , більша, ніж за крихкого руйнування.

Під час руйнування сталі 38ХНЗМФА та сплаву Д16 випромінюються також сигнали АЕ зі значеннями критеріального параметра у діапазоні $0,1 \leq \kappa < 0,2$, які, очевидно, характеризують в’язко-крихке руйнування. Їх НВП має декілька локальних максимумів на різних частотах, а проекція НВП на площину “ $WT-f$ ” – широку смугу, що свідчить про можливе накладання різних механізмів руйнування в одній АЕ-події.

Отже, досліджені конструкційні матеріали за переважальними типами руйнування можна класифікувати так: корунд та ебоніт руйнуються крихко, сталь 38ХНЗМФА та сплав Д16 – в’язко, причому руйнування сплаву супроводжує суттєво більша кількість відповідних сигналів АЕ.

РЕЗЮМЕ. Исследованы особенности сигналов акустической эмиссии при макроразрушении структурно различных конструкционных материалов. Для этого использованы результаты анализа локальных особенностей сигналов АЭ по их непрерывному вейвлет-преобразованию. По критерию идентификации типов макроразрушения оценено хрупкое, вязко-хрупкое и вязкое разрушение. Установлены характерные отличия сигналов по ширине полосы частот, длительности ее излучения и изменению доминирующей частоты.

SUMMARY. The features of acoustic emission signals during macro-fracture of the different structural materials were studied. For this purpose the analysis of the local features of acoustic emission signals by the continuous wavelet transform was used. Brittle, ductile-brittle and ductile fracture were described by the macro-fracture types identification criterion. The characteristic differences between signals in the bandwidth, duration of its radiation and change of the dominant frequency were established.

1. Crack detection in pressure piping by acoustic emission / P. H. Hutton, R. N. Ord, H. N. Pedersen, and J. C. Spanner // Nuclear Safety Quarterly Report (July–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.
2. Mirabile M. Acoustic emission energy and mechanisms of plastic deformation and fracture // Nondestructive testing. – 1975. – 8, № 2. – P. 77–85.
3. Kline R. A. and Hartman W. Frequency analysis of acoustic emission signals // Proc. 2nd Int. conf. on mechanical behaviour of materials. – Boston, 1976. – S. 1. – P. 1631–1635.
4. Woodward B. Identification of acoustic emission source mechanisms by energy spectrum analysis // Ultrasonic. – 1976. – 14, № 6. – P. 249–255.
5. Иванов В. И. Применение метода АЭ для неразрушающего контроля и исследования материалов (обзор основных проблем и задач) // Дефектоскопия. – 1980. – № 5. – С. 65–84.
6. Lysak M. V. Acoustic emission during jumps in subcritical growth of crack in three-dimensional bodies // Engng. Fract. Mech. – 1994. – 47, № 6. – P. 873–879.
7. Механіка руйнування і міцність матеріалів / Заг. ред. В. В. Панасюка. – Т. 5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / З. Т. Назарчук, В. В. Кошовий, В. Р. Скальський та ін. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. – 1134 с.

8. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: у 3-х т. Т. 2: Методологія акустико-емісійного діагностування. – К.: Наук. думка, 2009. – 263 с.
9. Яковлев А. Н. Введение в вейвлет-преобразование. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.
10. Ciampa F. and Meo M. A new algorithm for acoustic emission localization and flexural group velocity determination in anisotropic structures // *Composites Part A: App. Scie. and Manufacturing*. – 2010. – **41**. – P. 1777–1786.
11. Ding Y., Reuben R. L., and Steel J. A. A new method for waveform analysis for estimating AE wave arrival times using wavelet decomposition // *NDT&E Int.* – 2004. – **37**. – P. 279–290.
12. Wavelet packet analysis for the propagation of acoustic emission signals across turbine runners / X. H. Wang, C. M. Zhu, H. L. Mao, and Z. F. Huang // *Ibid.* – 2009. – **42**. – P. 42–46.
13. Kunpeng Z., San W. Y., and Soon H. G. Wavelet analysis of sensor signals for tool condition monitoring: A review and some new results // *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*. – 2009. – **49**. – P. 537–553.
14. Li Y. and Yi-Chu Z. Wavelet analysis of acoustic emission signals from thermal barrier coatings // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2006. – **16**. – P. 270–275.
15. Khamedi R., Fallahi A., and Oskouei A. R. Effect of martensite phase volume fraction on acoustic emission signals using wavelet packet analysis during tensile loading of dual phase steels // *Materials and Design*. – 2010. – **31**. – P. 2752–2759.
16. Kim H. and Melhem H. Damage detection of structures by wavelet analysis // *Engng. Struct.* – 2004. – **26**. – P. 347–362.
17. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / Пер. с англ. – Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001. – 464 с.
18. Воробьев В. И., Грибунин В. Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. – СПб.: ВУС, 1999. – 204 с.
19. *Vallen Systeme: The Acoustic Emission Company*. – <http://www.vallen.de/software/index.html>.
20. Wavelet transform of acoustic emission signals / H. Suzuki, T. Kinjo, Y. Hayashi et al. // *J. of Acoustic Emission*. – 1996. – **14**(2). – P. 69–84.
21. Skalsky V., Stankevych O., and Serhiyenko O. Wave displacement field at a half-space surface caused by an internal crack under twisting load // *Wave Motion*. – 2013. – **50**, № 2. – P. 326–333.
22. Амплітудно-частотні характеристики пружних коливань поверхні півпростору, ослабленого дископодібною тріщиною відриву / В. Р. Скальський, О. М. Станкевич, В. З. Станкевич, Ю. Я. Матвіїв // *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика: зб. наук. пр.* – Дніпропетровськ: ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна, 2012. – Вип. 3. – С. 175–180.
23. Skal'skii V. R., Builo S. I., and Stankevich E. M. A Criterion for Evaluating the Brittle Fracturing of Glass Using Acoustic Emission Signals // *Russian J. of Nondestructive Testing*. – 2012. – **48**(5). – P. 277–284.
24. Діагностування механізмів руйнування сталі 38ХНЗМФА за вейвлет-перетворенням сигналів акустичної емісії / В. Р. Скальський, Л. Р. Ботвіна, О. М. Станкевич та ін. // *Техн. диагностика и неразр. контроль*. – 2011. – №. 3. – С. 12–17.
25. Патент України № 2914. МПК: G01N29/14. Спосіб контролю росту тріщин у зразках матеріалів / О. Є. Андрейків, В. Р. Скальський, М. В. Лисак. – Опубл. 26.12.94 р.; Бюл. № 5–1.
26. Владимиров В. И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.

Одержано 09.04.2013