



ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ МАКРОРУЙНУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

О. М. СТАНКЕВИЧ

ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів. E-mail: stan_olena@yahoo.com

Розглянуто особливості сигналів акустичної емісії під час макроруйнування різних конструкційних матеріалів (корунду, скла, сталі, стоматологічних полімерів, композитів). Для цього використано результати аналізу локальних максимумів неперервного вейвлет-перетворення сигналів акустичної емісії. За критерієм ідентифікування типів макроруйнування оцінено крихке, в'язко-крихке та в'язке руйнування. Встановлено характерні відмінності сигналів за шириною смуги частот їх локальних максимумів, тривалістю її випромінювання та зміною значень домінуючої частоти. Бібліогр. 34, табл. 1, рис. 5.

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

Одним із факторів, які визначають тривалість експлуатування того чи іншого елемента конструкції або виробу, є ступінь деградування їх конструкційних матеріалів. На основі моніторингу стану останніх методами та засобами неруйнівного контролю можна виявити зародження та розвиток у них небезпечних явищ на ранніх стадіях і відповідним чином запобігати розвитку незворотних руйнівних процесів. Особливої уваги потребують тріщиноподібні дефекти, оскільки окрихчення матеріалів сприяє значному зростанню швидкості руйнування як на стадіях зародження, так і субкритичного розвитку. У зв'язку з цим важливо вміти оцінювати типи руйнування матеріалів, що може дати важливу інформацію про стадії його розвитку, а відтак і ефективно оцінити залишковий ресурс об'єкта контролю.

Стан проблеми. Серед великої кількості методів неруйнівного контролю широкою популярності набув метод, заснований на використанні явища акустичної емісії (АЕ), яка супроводжує руйнування матеріалу [1]. Він ґрунтується на ефективному реєструванні пружних хвиль АЕ як носія інформації про стан досліджуваних об'єктів із подальшим аналізом та опрацюванням зареєстрованих електричних АЕ-сигналів. Сучасні засоби відбору, опрацювання і зберігання АЕ-інформації дають можливість оцінити такі параметри сигналів як амплітуда, частота, час наростання переднього фронту, тривалість, енергія тощо. За їх зміною можна, зокрема, й ідентифікувати тип руйнування.

Динаміку елементарних процесів мікротріщиноутворення та можливість кількісного оцінювання руйнування за сигналами АЕ досліджували у

праці [2]. Доведено, що вибухова АЕ, яка супроводжує ріст макроскопічних субкритичних тріщин, зумовлена миттєво швидким руйнуванням у мікроскопічному об'ємі.

Методику ідентифікування типів макроруйнування за амплітудно-частотними характеристиками сигналів АЕ вперше представлено авторами [3]. Встановлено, що під час пластичного деформування випромінюються неперервні сигнали АЕ з власною частотою коливань приблизно 20 кГц. У зоні плинності матеріалу руйнування супроводжується дискретними сигналами АЕ із частотою коливань близько 50 кГц, а за крихкого руйнування – у діапазоні до 250 кГц. На думку авторів АЕ добре відображає процеси, які корелюють із механічними параметрами росту тріщини, зокрема, зі швидкістю поширення та динамічними змінами в області її вершини.

Взаємозв'язок між енергією АЕ та механізмами пластичної деформації і руйнування досліджували автори роботи [4]. Визначено числові значення енергії для сигналів, що відповідають різним типам руйнування: процеси пластичної деформації характеризуються виділенням енергії порядку $10^{-11} \dots 10^{-7}$ Дж, а процес руйнування супроводжується великою кількістю імпульсів з енергією порядку $10^{-6} \dots 10^{-1}$ Дж.

Більшість відомих критеріїв ідентифікування типів макроруйнування побудовано на особливостях частотних спектрів відповідних сигналів АЕ [5–12]. Так, на основі частотного аналізу сигналів АЕ, які генерувались під час руйнування сталі НФ-1 та латуні 70-30, автори роботи [7] припустили, що зміна частотного спектра сигналів може бути пов'язана зі зміною механізмів деформації.



Для розпізнавання сигналів АЕ від некритичних джерел (зародження пор за пластичної деформації поблизу тріщини) та підростаючої тріщини автори [8] провели аналіз частотних спектрів акустичного випромінювання. Для сталі AISI-4340 частотний пік сигналів АЕ спостерігали у діапазоні більше 200 кГц. Припустили, що такі сигнали відповідають розвитку тріщини. Для в'язкої сталі SA 533В на початкових стадіях розвитку дефекту сигнали мали значні амплітуди у високо-частотній області. За подальшого навантаження відбувалось поступове зміщення форми спектра. Наприкінці руйнування з'являються сигнали з перевагою низькочастотної складової. Автори висунули гіпотезу, що такі зміни у спектрі викликані сигналами від інших джерел, а саме від зародження внаслідок пластичного деформування.

Вивчаючи особливості деформування кремністого заліза, дослідники на основі частотного аналізу виділили такі стадії деформування: виникнення сигналів АЕ з малою амплітудою і частотою свідчить про ранні стадії навантаження, ковзання; поява високочастотних гармонік відповідає передруйнуванню, масовій пластичній течії матеріалу; наступне зникнення високих частот пов'язано з розвитком макроруйнування [9].

За критерій ідентифікування стадій докритичного росту тріщини запропоновано використовувати звуження смуги частот сигналів АЕ [10, 11], а для оцінки типів макроруйнування під час її підростання – критерій на основі найстійкіших параметрів сигналів (амплітуда, смуга спектра частот) із урахуванням режимів відбору АЕ-інформації [1].

Дослідження спектральних особливостей сигналів АЕ зазвичай здійснюють на основі перетворення Фур'є їх амплітудно-часових залежностей. Водночас для розв'язування багатьох практичних та теоретичних задач аналізу сигналів АЕ успішно використовують їх вейвлет-перетворення (ВП). Важливою перевагою ВП перед традиційним перетворенням Фур'є є можливість не лише виділяти частотні компоненти сигналу, але й локалізувати їх у часі, забезпечуючи одночасну роздільну здатність як за частотою (для локалізації низькочастотних складових), так і за часом (для виділення компонент високої частоти) [12].

ВП сигналів АЕ застосовували для дослідження різних матеріалів (сталей, сплавів тощо) у задачах виявлення та класифікації неоднорідностей [13], дефектів [14, 15] та особливостей мікроруйнування [16, 17]. Ефективним виявився метод ВП для ідентифікування механізмів руйнування композитних матеріалів різної структури та з різноманітними матрицями [18, 19].

Відомо, що для локації джерел АЕ використовують метод триангуляції, у якому за різницею часу приходу пружної хвилі на первинні перетво-

ривачі визначають координати її джерела. Вейвлет-фільтрація сигналів АЕ дає можливість ефективно видаляти шумові компоненти сигналу, що, своєю чергою, сприяє зменшенню впливу шумів та завад на визначення часу приходу сигналу, а відтак, і підвищенню точності локалізації джерел АЕ [20, 21]. Розроблено низку методик прогнозування зміни механічних характеристик промислового обладнання у процесі експлуатування за параметрами ВП сигналів АЕ [22, 23].

Вивчаючи АЕ під час руйнування конструкційних матеріалів, важливо вміти розмежувати походження сигналів АЕ та виділити їх відповідність тим чи іншим механізмам, що відбуваються на різних стадіях руйнування. Аналіз локальних особливостей неперервного вейвлет-перетворення (НВП) сигналів АЕ дає змогу ідентифікувати тип руйнування, яке відбувається у певний момент часу в конструкційному матеріалі.

Мета дослідження – на основі аналізу локальних особливостей неперервного вейвлет-перетворення сигналів АЕ створити методику оцінювання типів макроруйнування різних конструкційних матеріалів.

Розроблення критерію ідентифікування типів руйнування за параметрами вейвлет-перетворення сигналів АЕ. Неперервне вейвлет-перетворення (НВП) використовують для дослідження структурних особливостей сигналів [12]. За означенням НВП – це скалярний добуток вихідного сигналу $s(t) \in L^2(R)$ та базисних функцій

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \text{ так що}$$

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

Базисні функції $\psi_{ab}(t)$ називають вейвлетами. Їх можна розглядати як масштабування та зсув деякої функції-прототипу $\psi(t)$. За рахунок зміни масштабу a , збільшення якого призводить до звуження Фур'є-спектра функції $\psi_{ab}(t)$, вейвети здатні виявляти відмінності в характеристиках на різних шкалах (частотах), а за рахунок зсуву b – проаналізувати властивості сигналу в різних точках на всьому інтервалі, який досліджується.

У програмному середовищі AGU-Vallen Wavelet, розробленому компанією «Vallen Systeme», для НВП сигналів АЕ за функцію-прототип вибрано вейвлет Габора у вигляді

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

де ω_0 – центральна частота і $\gamma = \pi(2 \ln 2)^{1/2} = 5,336$ [24].

Особливості структури сигналу виявляють за великими значеннями коефіцієнтів вейвлет-роз-



кладу. Встановивши ділянку часу, якій відповідає такий коефіцієнт, можна її детально проаналізувати, визначити тривалість і частотний склад.

На основі теоретичних [25, 26] та експериментальних [27, 28] досліджень побудовано критерій ідентифікування типів макроруйнування конструкційних матеріалів за амплітудно-частотними характеристиками локальних особливостей НВП сигналів АЕ. Для цього використано критеріальний параметр κ , значення якого визначають за співвідношенням

$$\kappa = \frac{WT_{\max} \Delta f_0}{\Delta f_{\max}}, \quad (1)$$

де WT_{\max} – максимальне значення вейвлет-коефіцієнта $WT = WT(a, b)$ локальної події в сигналі АЕ; Δf_{\max} – ширина частотної смуги в проекції НВП на площину « $WT - f$ » для центральної частоти f_{\max} , яка визначається за рівнем $0,7WT_{\max}$; Δf_0 – ширина робочої смуги вимірювального АЕ-тракту, яка визначається робочою смугою частот первинного перетворювача. За експериментально встановленими значеннями критеріального параметра тип макроруйнування конструкційних матеріалів розділено на в'язке ($\kappa < 0,1$), в'язко-крихке ($0,1 \leq \kappa < 0,2$) і крихке ($\kappa \geq 0,2$).

Таким чином, у конструкційних матеріалах під час руйнування джерелами АЕ у короткому інтервалі часу можуть бути різні процеси: формування пластичних деформацій, мікротріщиноутворення, розтріскування включень, макроруйнування тощо, що зумовлює вказані типи руйнування. Для їх ідентифікування за сигналами АЕ з використанням критеріального параметра (1) необхідно побудувати НВП сигналу АЕ та визначити максимальне значення вейвлет-коефіцієнта WT_{\max} локальної події; побудувати проекцію НВП на площину « $WT - f$ » у момент досягнення значення WT_{\max} ; визначити ширину смуги частот Δf_{\max} , за рівнем $0,7WT_{\max}$; обчислити критеріальний показник κ за співвідношенням (1) та за його значенням ідентифікувати тип руйнування, що відбувається у фіксований момент часу в матеріалі.

Результати досліджень та їх обґрунтування. Досліджували руйнування різних матеріалів (корунду, скла, сталі, стоматологічних полімерів, композитів). Під час випробувань паралельно проводили відбір АЕ-інформації за допомогою акустико-емісійної вимірювальної системи SKOP-8M [1]. Режими АЕ-вимірювань: тривалість вибірки – 0,5 мс; період дискретизації аналогового сигналу 0,25 мкс; частота зрізу фільтра низьких частот 600 кГц, фільтра високих 200 кГц; поріг дискримінації – у межах 30 %. Коефіцієнт підсилення АЕ-тракту становив 70 дБ (40 дБ – попередній підсилювач). Смуга частот вимірювального АЕ-тракту була 0,2...0,6 МГц, що узгоджується

з відповідними значеннями у згаданому вище критерії ідентифікування типів руйнування конструкційних матеріалів за співвідношенням (1). Відносна похибка реєстрації амплітуди сигналів АЕ не більше $\pm 10\%$.

Особливості руйнування крихких матеріалів. За схемою триточкового згину досліджували циліндричні зразки з корунду (діаметр 13,5 мм, довжина $l = 80$ мм). Вже приблизно через 95 с після початку експерименту система реєструвала сигнали АЕ з максимальними амплітудами у межах 150...250 мкВ. Хвильове відображення та НВП однієї з таких вибірок показано на рис. 1, а, б відповідно. Бачимо, що на початкових стадіях руйнування за короткий проміжок часу (70 мкс) відбуваються інтенсивні зміни у структурі матеріалу, про що свідчить велика кількість локальних максимумів вейвлет-коефіцієнтів НВП. За співвідношенням (1) обчислили значення критеріального параметра для локальних максимумів 1–5 на рис. 1, б: $\kappa_1 = 0,07$; $\kappa_2 = 0,075$; $\kappa_3 = 0,02$; $\kappa_4 = 0,02$; $\kappa_5 = 0,19$. Згідно зазначеного вище критерію ідентифікування типів руйнування локальні максимуми 1, 2, 4 характеризують в'язке руйнування, а 3, 5 – крихке. На основі принципів лінійної механіки руйнування можемо зауважити, що навіть у крихких матеріалах на початкових стадіях руйнування відбувається накопичення пошкодження в мікрооб'ємах суцільного матеріалу (локальні максимуми 1, 2, 4), яке призводить до утворення мікротріщин (локальні максимуми 3, 5). За подальшого росту навантаження окрім зазначених стадій відбувається об'єднання чи злиття мікротріщин у макротріщини та ріст останніх, що врешті призводить до поділу твердого тіла на частини. Це підтверджується зростанням у цей час амплітуд сигналів АЕ та значення критеріального показника κ .

Опрацьовано 50 вибірок. Значення критеріального параметра склали діапазон $0,02 \leq \kappa \leq 0,55$. Їх НВП характеризується чергуванням широкосмугових частотних піків з невеликими значеннями вейвлет-коефіцієнтів WT_{\max} (рис. 1, в) і малою тривалістю випромінювання (рис. 1, з) та вузькосмугових – з більшими значеннями WT_{\max} (рис. 1, д) та значною тривалістю випромінювання (рис. 1, е). Зауважимо також, що домінуюча частота f_{\max} локальних максимумів, які характеризують в'язке руйнування, більша (рис. 1, в), ніж у випадку крихкого руйнування (рис. 1, д). Тобто в'язкі механізми відбуваються з випромінюванням пружних хвиль вищих частот, ніж крихкі.

Із наближенням до критичного навантаження кількість широкосмугових частотних піків суттєво зменшується, а переважають локальні максимуми, що характеризують крихке руйнування. Аналогічні результати отримали раніше, досліджуючи руйнування різних марок скла [27].

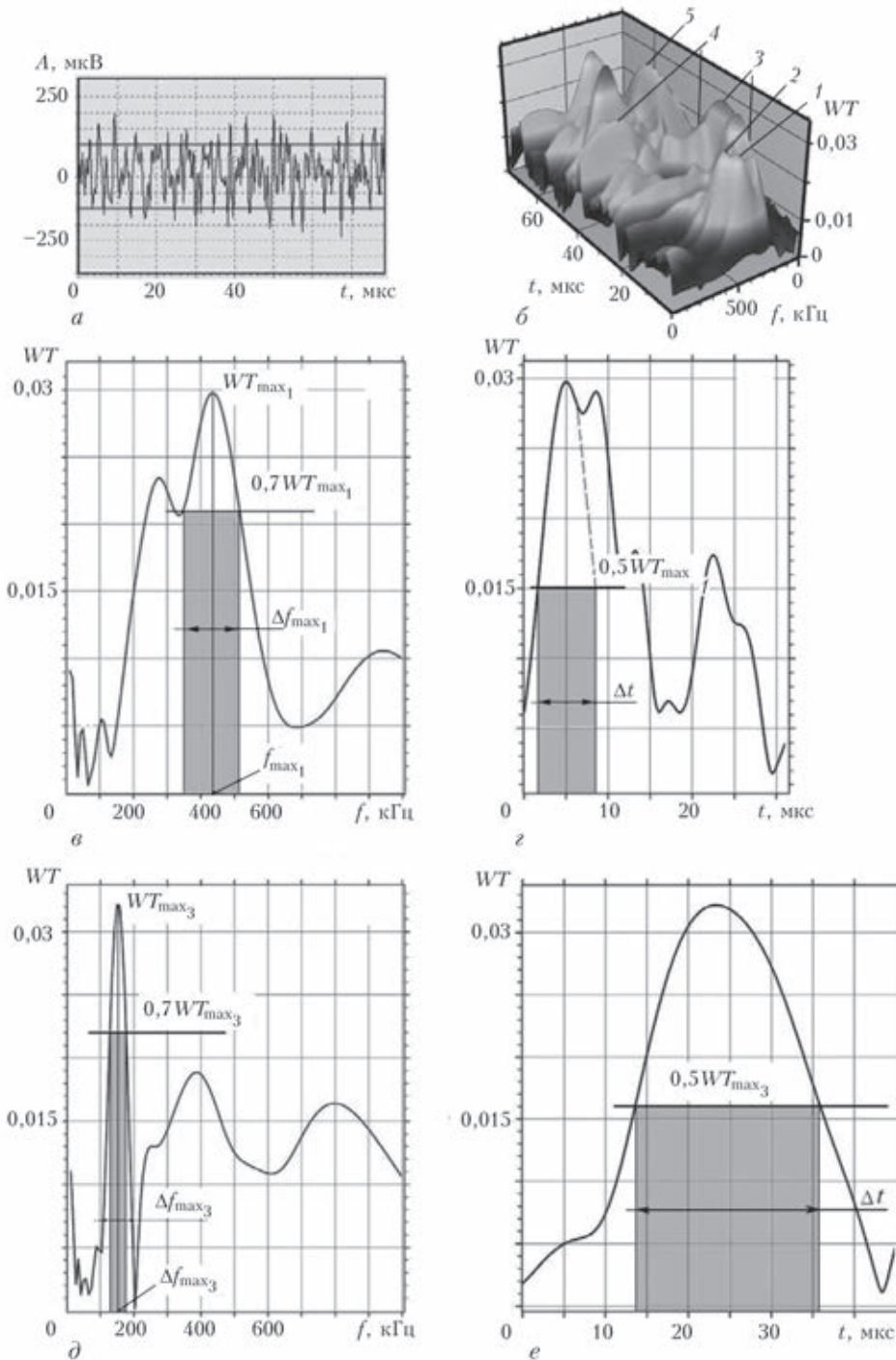


Рис. 1. Хвильове відображення сигналу АЕ (а) та його НВП (б) на початкових стадіях руйнування корунду. Типові проєкції НВП на площини « $WT-f$ » та « $WT-t$ » у момент досягнення максимального значення вейвлет-коефіцієнта WT_{max} для в'язкого (в, д) та крихкого (д, е) руйнування

Руйнування сталей. Руйнування циліндричних зразків зі сталі 3сп (діаметр 4 мм, $l = 40$ мм) досліджували під час квазістатичного розтягу зі швидкістю переміщення затискачів $4 \cdot 10^{-7}$ м/с. У режимі постобробки будували діаграми розтягу і розподілу амплітуд (рис. 2), НВП зареєстрованих сигналів АЕ та визначали параметри його локальних особливостей.

Побудована діаграма розтягу підтверджує, що даний конструкційний матеріал є яскравим представником в'язких матеріалів [1]. Для оцінки типів

руйнування, які протікають у ньому, будували неперервне ВП для сигналів АЕ. Для порівняння параметрів локальних особливостей НВП сигналів АЕ проаналізували результати опрацювання сигналів, отриманих на різних стадіях руйнування (рис. 2): *A* – за початкового навантаження; *B* – на ділянці пластичності (під час звуження зразка); *C* – за досягнення критичного значення навантаження.

Оскільки значення критеріального параметра k за початкового навантаження належать діапазону $0,03 \leq k \leq 0,11$, то можна припустити, що у

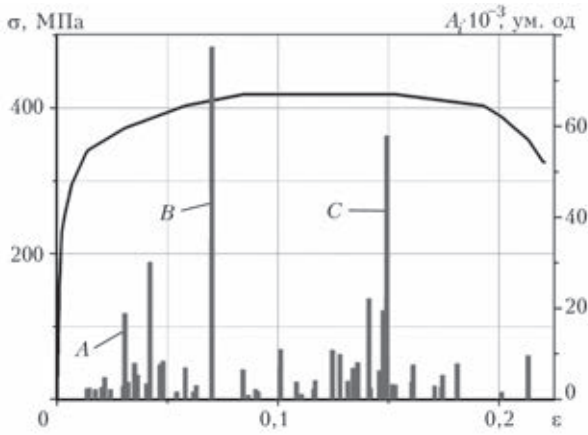


Рис. 2. Діаграма розтягу та розподіл амплітуд сигналів АЕ для сталі 3сп

цей час переважають механізми в'язкого руйнування, тобто у матеріалі відбувається накопичення рухомих дислокацій (пластична деформація) перед перешкодами (гранями зерен, міжфазними границями, можливими включеннями тощо). Для локальних максимумів цих сигналів характерним є невеликі значення максимальних вейвлет-коефіцієнтів $0,03 \leq WT_{max} \leq 0,06$ та порівняно значна ширина частотної смуги в проекції « $WT - f$ » $0,1 \leq \Delta f_{max} \leq 0,17$. За подальшого розтягу з'являються сигнали АЕ, для локальних максимумів яких значення критеріального параме-

тра є дещо більшими: $0,1 \leq \kappa \leq 0,18$. Це може бути підтвердженням розвитку процесу мікротріщиноутворення, який чергується з процесом розвитку пластичних деформацій, адже за зміною значення показника κ спостерігаємо чергування сигналів двох типів. За досягнення навантаження $\sigma = 403$ МПа з'являються сигнали АЕ, які гіпотетично генеруються внаслідок стрімкого злиття мікротріщин або стрибкоподібного підростання макротріщини, оскільки для їх локальних максимумів значення критеріального параметра становлять $0,3 \leq \kappa \leq 0,6$. Чергування сигналів двох типів спостерігаємо впродовж подальшого розтягу аж до руйнування зразка, що підтверджує тезу про те, що на кожному етапі просування тріщини присутні як в'язкі, так і крихкі механізми руйнування.

На рис. 3 зображено НВП характерних сигналів АЕ, які відповідають в'язкому (рис. 3, а) та крихкому (рис. 3, б) руйнуванню сталі 3сп. Аналогічно до випадку руйнування крихких матеріалів (рис. 1) видно, що для НВП сигналів АЕ за в'язкого руйнування характерною ознакою є широка смуга частот у проекції локального максимуму на площину « $WT - f$ » та невелика тривалість випромінювання за проекцією на площину « $WT - t$ », а за крихкого руйнування – відбувається

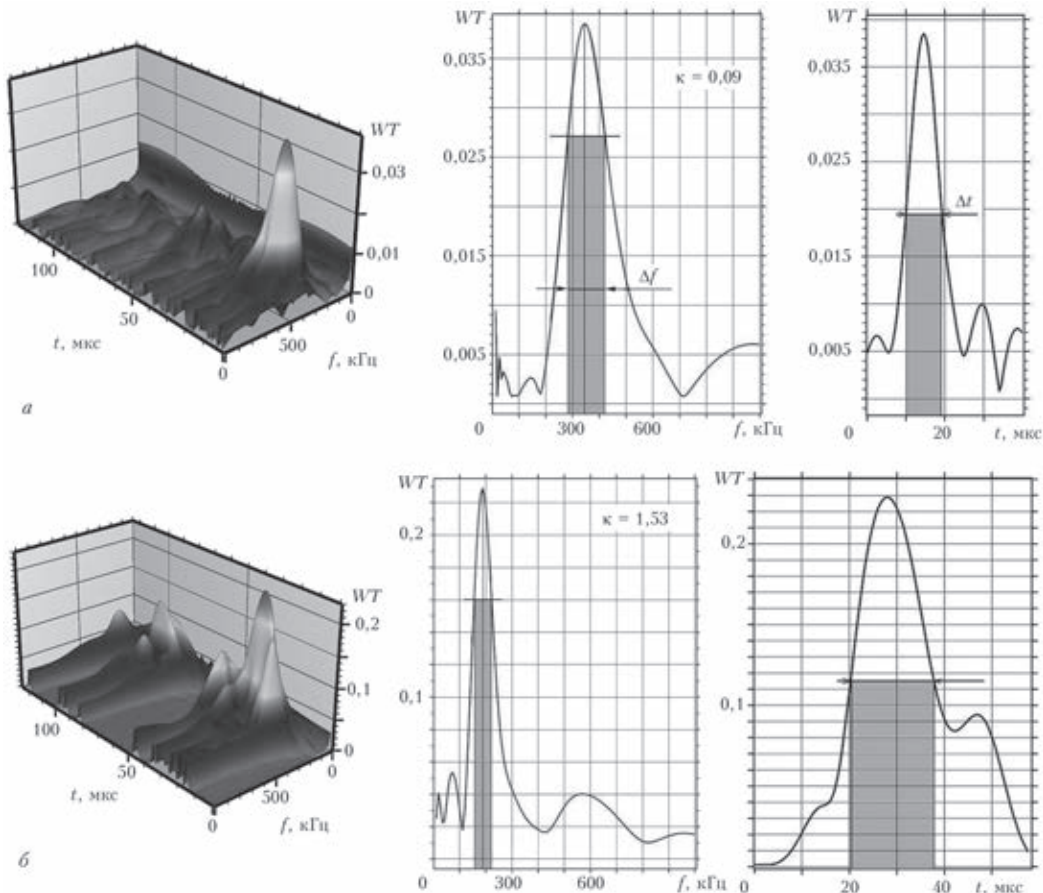


Рис. 3. НВП сигналів АЕ за в'язкого (а) та крихкого (б) руйнування сталі 3сп (3D-зображення; проекція на площини « $WT - f$ » та « $WT - t$ » у момент досягнення WT_{max} відповідно)

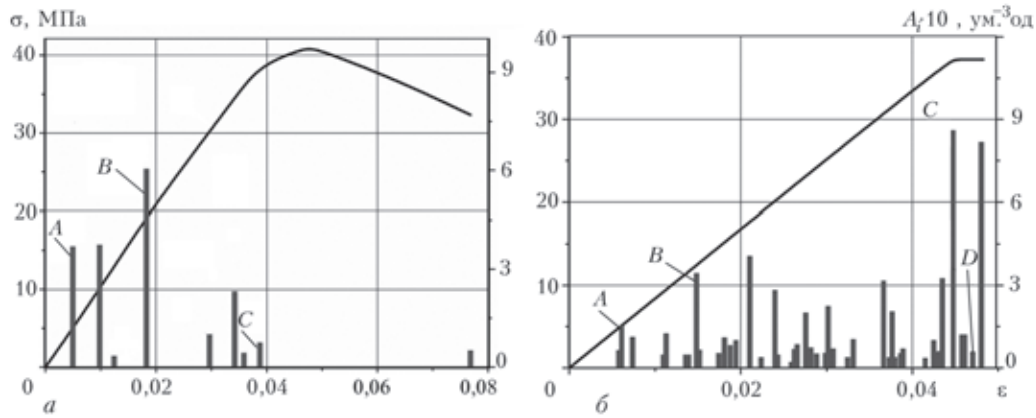


Рис. 4. Діаграми розтягу та розподіл амплітуд сигналів АЕ для зразків з полімерних матеріалів: а – Protemp; б – Acrodent

звуження відповідної частотної смуги, збільшення часу її випромінювання та зміщення у сторону нижчих частот домінуючої частоти.

Отримані результати корелюють з аналогічними дослідженнями інших конструкційних сталей [28, 29]. На відміну від випадку руйнування корунду під час розтягу сталі 3сп переважають сигнали АЕ, які за критерієм ідентифікування типів руйнування характеризують в'язкий тип, що підтверджує його класифікацію як в'язкого матеріалу.

Отже, на основі дослідження руйнування різних типів конструкційних матеріалів (крихких та в'язких) підтверджено стабільність розвитку цього процесу незалежно від їх структури, а параметри сигналів АЕ, пов'язані з локальною перебудовою структури матеріалів, корелюють з параметрами кінетики розвитку дефектів та руйнування матеріалу.

Оцінювання типів руйнування полімерів. Досліджували руйнування під час квазістатичного розтягу полімерних пластинчатих зразків із провізорних матеріалів Protemp™ 4 (3М ESPE, США), Acrodent (АО СТОМА, Україна). На рис. 4 зображено діаграми розтягу і розподіл амплітуд сигналів АЕ.

Із рис. 4 випливає, що всі досліджувані полімери руйнуються квазікрихко, що характерно для такого роду матеріалів [29]. Для оцінки типів руйнування, які протікають у полімерах, будували неперервне ВП для сигналів АЕ, отриманих за різних значень навантаження (точки А, В, С, D). Обчислені за співвідношенням (1) значення критеріального показника κ представлено у таблиці.

Згідно з критерієм ідентифікування типів руйнування конструкційних матеріалів за даними НВП на початкових стадіях у досліджуваних полімерів генеруються сигнали АЕ, що відповідає значенням критеріального параметра κ сигналів АЕ, згенерованих під час руйнування полімерів за різних значень навантаження

Полімер	κ			
	A	B	C	D
Acrodent	0,13	0,18	0,28	0,09
Protemp™ 4	0,14	0,54	0,12	–

ють в'язко-крихкому руйнуванню ($0,1 \leq \kappa < 0,2$). Почерговість появи сигналів АЕ з високими та низькими значеннями показника κ (див. таблицю) можна розглядати як чергування макророзтріскування матеріалу з утворенням пластичних зон перед макротріщиною, відповідно.

НВП сигналів АЕ, які супроводжують крихке та в'язке чи в'язко-крихке руйнування, має аналогічні до попередніх двох типів матеріалів особливості: для крихкого типу руйнування – порівняно велике значення максимального вейвлет-коефіцієнта WT_{max} та вузька смуга частот Δf у проекції « $WT_{max} - f$ » на рівні $0,7WT_{max}$, в іншому випадку – значення WT_{max} є значно меншим, а відповідна смуга частот суттєво ширша. Частота f_{max} , за якої досягається WT_{max} , у випадку крихкого руйнування є меншою, ніж за в'язкого чи в'язко-крихкого, оскільки збільшення розмірів дефекту сприяє зменшенню домінуючої частоти відповідних пружних коливань [26].

Для пояснення досліджених процесів руйнування, які відбуваються під дією навантаження у полімерних матеріалах, вивчали їх мікроструктуру. Матеріал Protemp відрізняється високою гомогенністю, тому під час руйнування є менш АЕ-активний (рис. 4, а). В матеріалі Acrodent пористість значно більша і зосереджена локально, чим пояснюється генерування більшої кількості сигналів АЕ (рис. 4, б). Отримані результати співпадають із представленими у праці [30].

Застосування НВП для оцінки особливостей руйнування композитів. Під час розтягу композитних матеріалів (КМ) розрізняють низку можливих стадій руйнування: поширення тріщини поперек волокон (одночасно з розтріскуванням матриці); поширення тріщини вздовж границі волокно-матриця по всій довжині зразка (відшарування волокон від матриці); накопичення розривів волокон у зразку з ростом навантаження, їх витягування тощо.

Досліджували руйнування під дією квазістатичного розтягу композита, який структурно складався з одиничного р-арамідного волокна у двокомпонентній епоксидній матриці (співвід-

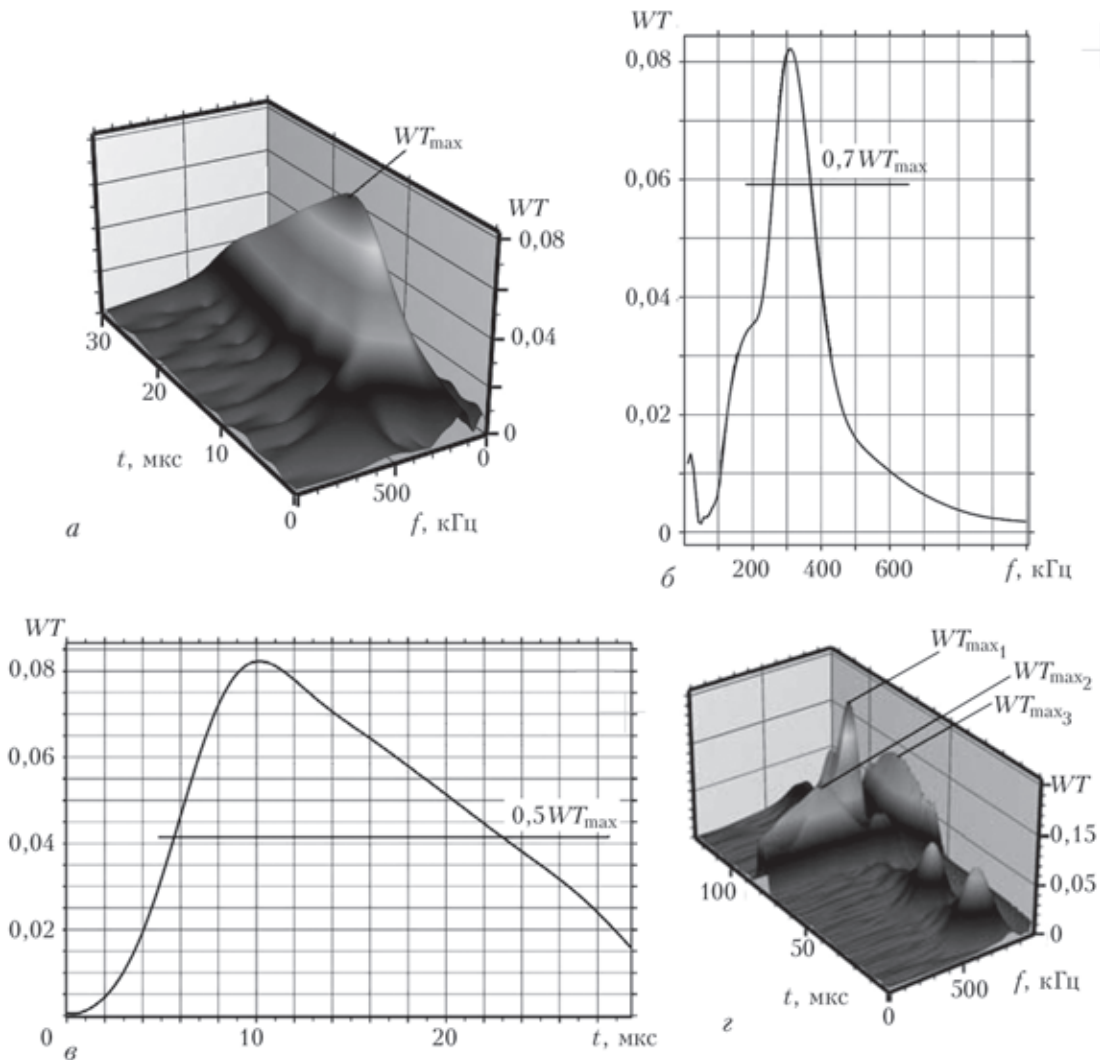


Рис. 5. НВП сигналів АЕ під час руйнування КМ: а, д – 3D-зображення; б – проєкція на площину « $WT-f$ » та в – « $WT-t$ » у момент досягнення WT_{max} у події АЕ

ношення затверджувача до епоксидної складової 50:50). Поверхня волокна оброблена плазмою, а його діаметр становив 10 мкм.

Уже на ранніх стадіях руйнування АЕ-вимірвальна система реєструвала сигнали АЕ, амплітуди яких спочатку були невеликі, а згодом зростали. За результатами НВП виділили два типи сигналів АЕ. Для I-го типу особливістю НВП була вузька смуга частот в координатах « $WT-f$ » у момент досягнення максимального значення вейлет-коефіцієнта (рис. 5, б), а тривалість її випромінювання досягала 18 мкс (рис. 5, в). Значення критеріального параметра κ , обчислені за співвідношенням (1), лежали у діапазоні $0,14 \leq \kappa \leq 0,5$, що відповідає крихкому типу руйнування.

Для НВП сигналів АЕ, віднесених до типу II, зазначена вище смуга частот була дещо вужчою, тривалість її випромінювання не перевищувала 12 мкс, критеріальний параметр знаходився в межах $0,2 \leq \kappa \leq 0,3$, що також відповідає крихкому руйнуванню. У першому випадку домінуючі частоти лежали у діапазоні 300...350 кГц, а в другому – 200...300 кГц.

Зважаючи на результати відомих досліджень [31, 32], можна припустити, що джерелом сигналів типу I є відшарування арамідного волокна від матриці або накопичення пошкоджень у самому волокні, а джерелами сигналів типу II могло бути злиття мікротріщин із ростом навантаження, враховуючи звуження смуги частот та зменшення значення домінуючої частоти в НВП локальних максимумів [26]. В обох випадках руйнування відбувається за крихким механізмом, що узгоджується з отриманими кількісними оцінками відповідних сигналів АЕ.

Наприкінці руйнування зразків зареєстровано кілька сигналів АЕ, які мали більше одного спектрального максимуму, що може свідчити про накладання у часі різних механізмів руйнування КМ. На рис. 5, д представлено НВП одного з них. За параметрами НВП подія зі значенням WT_{max1} є аналогічною до сигналів АЕ типу I, але з більшими значеннями критеріального показника $0,52 \leq \kappa \leq 0,54$. Імовірно цей локальний сплеск згенерувався внаслідок розриву арамідного волокна, що призвело до руйнування самого зразка.



Відомо, що під час розтріскування матриці генеруються сигнали АЕ з частотами, нижче 100 кГц [33]. У нашому випадку можна припустити, що подія з $WT_{\max 3}$ відповідає саме цьому механізму руйнування, оскільки частота, за якої досягається даний максимум, $f_{\max} = 60$ кГц. Для $WT_{\max 2}$ характерною є широка частотна смуга, а критеріальний параметр $\kappa = 0,12$, що відповідає в'язко-крихкому руйнуванню. У нашому випадку причиною такого локального максимуму може бути діагональний зсув частин у матриці [34].

Висновки

Проведені експериментальні дослідження показали, що критерій оцінки типів руйнування за локальними особливостями неперервного вейвлет-перетворення сигналів АЕ є ефективним інструментом вивчення динаміки процесів руйнування в структурно різних конструкційних матеріалах.

Дослідження руйнування різних типів матеріалів (крихких та в'язких) підтвердили положення лінійної механіки руйнування про наявність процесів пластичного деформування і стрибкоподібного росту тріщин незалежно від їх структури. За параметрами сигналів АЕ, які тісно пов'язані з локальною перебудовою структури матеріалів, можна охарактеризувати особливості кінетики розвитку дефектів та руйнування матеріалу. Зміна критеріального показника у сторону його збільшення слугує ознакою початку розвитку макротріщини в матеріалі, а відтак попередженням про загрозу спонтанного його руйнування.

Реалізація побудованого критерію у програмному забезпеченні сучасних вимірювальних засобів АЕ-діагностування сприятиме підвищенню ефективності діагностичних робіт та неруйнівного контролю виробів та елементів конструкцій.

Рассмотрены особенности сигналов акустической эмиссии при макроразрушении разных конструкционных материалов (корунд, стекло, стали, стоматологические полимеры, композиты). Для этого использованы результаты анализа локальных максимумов непрерывного вейвлет-преобразования сигналов акустической эмиссии. По критерию типов макроразрушения оценено хрупкое, вязко-хрупкое и вязкое разрушения. Установлены характерные отличия сигналов по ширине полосы частот их локальных максимумов, длительности ее излучения и изменению значений доминирующей частоты.

Ключевые слова: разрушение, акустическая эмиссия, непрерывное вейвлет-преобразование, критерий идентификации типов разрушения

1. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн. посібник: у 3 т. – Київ: Наук. думка, 2009. – 887 с.

2. Oxipa T., Kishi T. Мікроруйнування металів і моделювання акустичної емісії // Ніхон кіндзоку гаккайсі. – 1983. – 47, № 7. – С. 575–581.
3. 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, Sept., Oct., 1967) for Nuclear Safety Branch of USAEC Division of Reactor Development and Technology. BNWL-754. – Battelle-Northwest, Richland, Washington. – June 1968. – P. 3.1–3.13.
4. Mirabile M. Acoustic emission energy and mechanisms of plastic deformation and fracture // Nondestructive testing. – 1975. – 8, № 2. – P. 77–85.
5. Залесский В. В., Трипалин А. С., Портной Н. Я. Спектральный анализ сигналов акустической эмиссии // Физ.-матем. исследования. – Ростов-на-Дону, 1972. – С. 91–94.
6. Pardee W., Graham L. J. Analysis of acoustic emission frequency spectra // IEEE Ultrasonic symposium: proc. – Los Angeles, 1975. – P. 597–600.
7. Kline R. A., Hartman W. Frequency analysis of acoustic emission signals // 2nd Intern. conf. on mechanical behaviour of materials: proc. – 1976. – P. 1631–1635.
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. Спектральный анализ акустической эмиссии растущей трещины / А.Е. Андрейкив, Н.В. Лысак, В.Р. Скальський и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 1993. – № 1. – С. 75–94.
11. Lysak M.V. Acoustic emission during jumps in subcritical growth of crack in three-dimensional bodies // Engineering Fracture Mechanics. – 1994. – 47, № 6. – P. 873–879.
12. Добешу И. Десять лекций по вейвлетам / Пер. с англ. – Ижевск, 2001. – 464 с.
13. Grabowska J., Palacz M., Krawczuk M. Damage identification by wavelet analysis // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2008. – 22. – P. 1623–1635.
14. Kim H., Melhem H. Damage detection of structures by wavelet analysis // Engineering Structures. – 2004. – 26. – P. 347–362.
15. Piotrkowski R., Castro E., Gallego A. Wavelet power, entropy and bispectrum applied to AE signals for damage identification and evaluation of corroded galvanized steel // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2009. – 23. – P. 432–445.
16. Li Y., 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.
17. Khamedi R., Fallahi A., Refahi Oskouei A. 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.
18. Ni Q.-Q., Iwamoto M. Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites // Engineering Fracture Mechanics. – 2002. – 69. – P. 717–728.
19. Jonson M. Classification of AE transients based on numerical simulations of composite laminates // NDT&E International. – 2003. – 36. – P. 319–329.
20. Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Рамазанов И. С. Вейвлет-фильтрация в задачах локализации сигналов акустической эмиссии // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 1. – С. 15–19.
21. Ciampa F., Meo M. A new algorithm for acoustic emission localization and flexural group velocity determination in anisotropic structures // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2010. – 41. – P. 1777–1786.
22. Бабичева И. Ф., Шарко А. В. Теоретические разработки по использованию вейвлет-анализа и нейросетевых техноло-



- гий в системе диагностики и прогнозирования остаточного ресурса промышленного оборудования // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2005. – № 2. – С. 17–21.
23. *Velayudham A., Krishnamurthy R., Soundarapandian T.* Acoustic emission based drill condition monitoring during drilling of glass/phenolic polymeric composite using wavelet packet transform // *Materials Sci. and Eng. A* 412. – 2005. – P. 141–145.
 24. *Vallen System: The Acoustic Emission Company* [Virtual Resource]. – Access Mode: URL: <http://www.vallen.de/products/software/wavelet>. – Title from Screen (12.03.2014).
 25. *Skalsky V., Stankevych O., 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.
 26. *Амплітудно-частотні характеристики пружних коливань поверхні півпростору, послабленого 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, 2012. – Вип. 3. – С. 175–180.*
 27. *Skal'skii V. R., Builo S. I., 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.
 28. *Діагностування механізмів руйнування сталі 38ХН3М-ФА за вейвлет-перетворенням сигналів акустичної емісії* / В.Р. Скальський, Л.Р. Ботвіна, О.М. Станкевич та ін. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2011. – №. 3. – С. 12–17.
 29. *Скальський В. Р., Божидарнік В. В., Станкевич О. М.* Акустико-емісійне діагностування типів макроруйнування конструкційних матеріалів. – Київ: Наук. думка, 2014. – 264 с.
 30. *Protemp™ 4* [Virtual Resource]. – Access Mode: URL: http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=SSSSSufSevTsZxtUOx2Bmx_GevUqevTSevTSevTSeSSSSS&fn=protemp_pl_clin_result.pdf. – Title from Screen (02.04.2014).
 31. *Narisawa I., Oba T.* An evaluation of acoustic emission from fibre-reinforced composites. Part 2. The application of acoustic emission techniques to aramid fibre-reinforced model composites // *J. of Materials Sci.* – 1985. – **20**, № 12. – P. 4527–4531.
 32. *Morgan R. G., Pruneda C. O., Steele W. J.* The relationship between the physical structure and the microscopic deformation and failure processes of poly (p-phenylene terephthalamide) fibers (Kevlar-49) // *J. of Polymer Sci.* – 1983. – **21**. – P. 1757–1783.
 33. *Ni Q-Q., Iwamoto M.* Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2002. – **69**. – P. 717–728.
 34. *Failure modes and fracture mechanisms in flexure of Kevlar-epoxy composites* / M. Davidovitz, A. Mittelman, I. Roman, G. Marom // *Jo. of Materials Sci.* – 1984. – **19**, № 2. – P. 377–384.

Features of acoustic emission signals during macrofracture of different structural materials (corundum, glass, steels, dental polymers, composites) are considered. Results of analysis of local maxima of continuous wavelet-transformation of acoustic emission signals were used for this purpose. Criterion of identification of macrofracture types was used to assess the brittle, ductile-brittle and brittle fracture. Characteristic features of signals by the width of the frequency band of their local maxima, its emission duration and change of dominating frequency values were established. 34 References, 1 Table, 5 Figures.

Keywords: fracture, acoustic emission, continuous wavelet-transformation, criteria of identification of fracture types

*Надійшла до реакції
03.14.2014*

КАЛЕНДАРЬ ВЫСТАВОК И КОНФЕРЕНЦИЙ ПО НК В 2015 г.

Дата	Место проведения	Мероприятие
25–27 марта	Львов/Украина	Специализированная выставка «Металл. Оборудование. Инструмент 2015»
31 марта–02 апреля	Киев/Украина	Международная выставка «Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Инструмент»
май	Киев/Украина	Сессия Научного совета по новым материалам МААН
19–22 мая	С.-Петербург/Россия	Выставка-конгресс технологий, оборудования и материалов антикоррозионной защиты и неразрушающего контроля в промышленности
20–22 мая	Ворзель/Киев. обл.	Международная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии»
01–05 июня	Киев/Украина	Конференция «Инженерия поверхности и реновация изделий»
09–11 июня	Трускавец/Украина	Конференция «Лазерные технологии, лазеры и их применение»
09–12 июня	Познань/Польша	Ярмарка международной торговли в Познани
15–17 июня	Киев/Украина	Международная научно-техническая конференция «Наплавка. Наука. Производство. Перспективы»
15–19 июня	Созополь, Болгария	Международный форум «NDT Days 2015» и Юбилейная 30-я конференция «Дефектоскопия»
24–26 ноября	Екатеринбург/Россия	Выставка «Сварка. Контроль и диагностика»
24–27 ноября	Киев/Украина	Международный промышленный форум-2015 с разделом «Неразрушающий контроль»