



ДІАГНОСТУВАННЯ МЕХАНІЗМІВ РУЙНУВАННЯ СТАЛІ 38ХНЗМФА ЗА ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯМ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, Л. Р. БОТВИНА, доктори техн. наук, О. М. СТАНКЕВИЧ, інж.,
О. С. ДУБИЦЬКИЙ, Ю. Я. МАТВІЇВ кандидати техн. наук
(Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів)

Розглянуто руйнування конструкційної середньолегованої сталі за вейвлет-аналізом сигналів акустичної емісії (АЕ). Показано, що воно супроводжується сигналами АЕ різних типів, яким можна поставити у відповідність різні його механізми руйнування. Для опису амплітудно-частотних характеристик сигналів використано неперервне вейвлет-перетворення. Перевірено ефективність використання критерію оцінки механізмів руйнування за значеннями вейвлет-коефіцієнтів на всіх ділянках діаграми розтягу.

Fracture of a structural alloy steel was studied with wavelet analysis of acoustic emission signals. It is shown that the fracture process is accompanied with the acoustic emission signals of different types corresponding to certain fracture mechanisms. The description of amplitude-frequential characteristics of signals is performed with continuous wavelet transform. A criterion for the evaluation of fracture mechanisms based on the values of wavelet coefficients was found effective along the entire stress-strain diagram.

Розвиток техніки та підвищення рівня інтенсивності її експлуатації спонукають не лише до створення матеріалів із високою міцністю та в'язкістю руйнування, але й піднімають на новий рівень методи неруйнівного контролю та технічного діагностування. Практично всі конструкційні матеріали неоднорідні за структурою, хімічним складом тощо, що має свій вплив на опір матеріалів руйнуванню, тому дослідження механізмів руйнування та факторів, які сприяють його розвитку, становить актуальну і надзвичайно важливу науково-технічну задачу.

Серед існуючих переваг методу АЕ з поміж інших методів неруйнівного контролю варто звернути увагу на можливість виявлення початку процесів руйнування на ранніх стадіях його зародження. Оскільки до важливих факторів руйнування матеріалів відносять накопичення пошкоджень у локальних зонах концентрації пластичних деформацій, що може призвести до локального інтенсивного утворення тріщиноподібних дефектів, то завданням методу АЕ стає ідентифікація механізмів руйнування з метою правильного прийняття рішень щодо подальшого експлуатування об'єкта контролю.

Стан проблеми. Вивченню проблеми розпізнавання механізмів руйнування конструкційних матеріалів методом АЕ присвячено велику кількість публікацій. Серед них варто зупинитись на працях, присвячених встановленню природи джерел сигналів АЕ. Так, у праці [1] підкреслюється суттєвий вплив на параметри АЕ умов деформування, виду та стану матеріалу, типу кристалічної ґратки, а також інших факторів. У [2] показано, що джерелом генерування пружних

хвиль АЕ є прискорений рух дислокацій та їх різка зупинка. Вивчаючи дислокаційні механізми генерування сигналів АЕ на монокристалах фториду літію, автори праці [3] механізм появи сигналів пов'язують зі взаємодією між групами дислокацій та перепонами, навколо яких наростає локальна енергія напружень, а появу вторинної АЕ розглядають як наслідок зіткнень між когерентними групами рухомих дислокацій і перешкод у площинах їх ковзання. Нарешті, емісія з альтернативним типом коливань виникає за високих напружень після масштабної пластичної деформації, коли концентрації напружень у голові дислокаційних скупчень спричинюють утворення і розвиток мікротріщин. У свою чергу автори праці [4], які досліджували деформацію монокристалів міді, магнію, заліза, полікристалів латуні та сплаву $\text{Cu}-7\%\text{Al}$, дійшли висновку, що спалахи АЕ відповідають процесові формування смуг ковзання шляхом лавиноподібного руху дислокацій. Суттєві результати для розуміння природи джерел АЕ отримано у працях [5–7], де наведено результати досліджень на лужногалоїдних кристалах KCl та LiF . Встановлено, що генерація кожного імпульсу АЕ проходить у результаті одночасного руху дуже великої кількості дислокацій. Якщо просумувати їх довжину, отримаємо декілька тисяч сантиметрів. На цій підставі висунуто гіпотезу про залежність інтенсивності сигналів АЕ від ступеня деформації.

Можливість визначення міцнісних характеристик сталей методом АЕ досліджувалась у працях [8–10]. Зокрема, в [10] досліджено закономірності зміни сигналів АЕ під час деформування розтягом



зразків середньовуглецевих конструкційних сталей. Результати досліджень показали нерівномірний характер АЕ під час деформування сталей, зокрема відносно високий рівень сигналів АЕ реєстрували на пружній ділянці навантаження. Для визначення характеристик міцності вибраних матеріалів методом АЕ найцікавішим є регулярний пік АЕ поблизу межі плинності $\sigma_{0,2}$, максимум якого відповідає межі пружності $\sigma_{0,05}$, а його початок — межі пропорційності $\sigma_{\text{пр}}$. Таким чином, у праці доведено, що методом АЕ можна виявляти ранні стадії руйнування матеріалів за будь-яких механізмів його перебігу.

Уперше ідентифікування механізмів руйнування конструкційних матеріалів за сигналами АЕ зроблено у працях [11, 12]. Авторами встановлено, що під час формування пластичних деформацій реєструють довготривалі та незначні за амплітудою сигнали АЕ, за крихкого руйнування фіксують короткотривалі імпульси з великими амплітудами. Водночас, від амплітуди сигналу та його тривалості залежить кількість імпульсів АЕ. За умови збільшення тривалості сигналів АЕ і незмінної амплітуди зростає кількість імпульсів, які сприймаються, зокрема, резонансними первинними перетворювачами сигналів АЕ, тому слід очікувати сигнали з малими амплітудами і порівняно великим їх сумарним рахунком. Зародження та ріст макро- і мікротріщин породжують сигнали АЕ з великими амплітудами і відносно невеликим сумарним рахунком.

Разом із тим, використання зазначених особливостей для ідентифікації сигналів АЕ від тріщини, що розвивається, ефективно за умови наявності лише двох механізмів генерування АЕ: пластичної деформації і росту макротріщини. Проте у деяких матеріалах з'являються додаткові джерела АЕ, наприклад, руйнування крихких включень [13] чи утворення мікротріщин. У праці [14] на підставі проведених численних експериментів на різних конструкційних матеріалах запропоновано критерій оцінки типів руйнування, який ураховує специфіку зміни амплітудно-частотних характеристик сигналів АЕ під час докритичного росту тріщин, руйнування різного роду включень, утворення мікротріщин тощо. Спроби визначення особливостей макроруйнування матеріалів за енергетичним критерієм та розподілом вейвлет-коефіцієнтів протягом усього часу навантаження зразка (аж до повного його руйнування) представлено у праці [15].

Отже, метод АЕ дедалі частіше застосовують у фундаментальних і прикладних дослідженнях як пластичного деформування, так і зародження й розвитку руйнування у різних конструкційних матеріалах. Разом із тим, досягнення вищої ефек-

тивності методу можливе за умови подальшого вдосконалення методик обробки сигналів АЕ.

Останнім часом серед різноманітних методів цифрової обробки сигналів набув розвитку вейвлет-аналіз. Вейвлет-перетворення (ВП) сигналів АЕ (вейвлет-хвилька) — це знаходження частотного розподілу складових сигналів АЕ у часовому інтервалі вимірювань. Цей ефективний засіб локалізації й класифікації особливих точок нестационарних сигналів дозволяє здійснювати аналіз одночасно в частотній та часовій областях [16].

Мета роботи — оцінити механізми руйнування конструкційної середньолегованої сталі за умов квазістатичного розтягу зразків за результатами вейвлет-аналізу сигналів АЕ.

Методика досліджень. Згідно з означенням [16], неперервне вейвлет-перетворення (НВП) сигналу $s(t)$ обчислюють за формулою

$$W_s(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int s(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

де $\psi(t)$ — материнський вейвлет; a — масштаб; b — часовий зсув; t — час.

Наявність у сигналі значних флуктуацій у деякий момент часу визначається великими значеннями вейвлет-коефіцієнтів. Чим сильніше виражена особливість сигналу, тим сильніше вона виділяється на спектрограмі і тим вищий рівень вейвлет-коефіцієнтів.

Для аналізу нестационарних сигналів, як правило, неперервні бази конструкують на основі функції Гауса, яка має найкращі показники локалізації як у часовій, так і у частотній областях. У програмі AGU-Vallen Wavelet [17] для вейвлет-перетворення сигналів АЕ за материнський вибрано вейвлет Габора, в основі якого лежить функція Гауса:

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

де ω_p — несуча частота; γ — константа ($\gamma = \pi(2\ln 2)^{1/2} = 5,336$).

НВП сигналів АЕ є важливим джерелом одержання діагностичної інформації, за якою можна ідентифікувати механізми макроруйнування у будь-якому часовому інтервалі навантаження. У попередніх дослідженнях [18] для кількісної оцінки сигналів АЕ під час руйнування різних типів скломатеріалів на основі НВП було запропоновано критеріальний параметр k , який ураховує параметри вимірювального тракту і особливості спектрів сигналів АЕ:

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

де WT_{\max} — максимальне значення вейвлет-коефіцієнта для події АЕ; Δf — ширина частотної

смуги для події АЕ в координатах $WT-f$, Δf_0 — ширина робочої смуги АЕ-тракту, що визначається робочою смугою частот первинного перетворювача.

Враховуючи те, що під час розтягання циліндричних зразків конструкційних матеріалів можуть виникати різні типи руйнування (мікротріщиноутворення, розтріскування включень, утворення пластичних деформацій, що супроводжуються перерозподілом дислокацій та їх скупчень за різними механізмами, макроруйнування тощо), постає необхідність визначення цих механізмів на ранніх стадіях руйнування матеріалу. Цю проблему вивчали здебільшого за допомогою металографії та мікрофрактографічним аналізом [14]. Такі підходи сьогодні вже не задовольняють дослідників і тим більше експлуатаційників. Важливо під час моніторингу об'єктів тривалого експлуатування проводити таку оцінку методами неруйнівного контролю в режимі on-line. Саме таким чином можна запобігти передчасному руйнуванню об'єктів контролю.

Результати досліджень та їх обговорення.

Досліджували розтягом циліндричні зразки з конструкційної сталі 38ХНЗМФА діаметром 4 мм та довжиною 44 мм. Сталь 38ХНЗМФА належить до класу конструкційних покращених сталей, які використовують після загартовування з високим відпуском. У нашому випадку він становив 893К. Структура сталі після покращення — сорбіт. Склад сталі 38ХНЗМФА у стані поставки: вуглець 0,33...0,4 %; хром 1,20...1,50 %; нікель 3,00...3,50 %; марганець 0,25...0,50 %; ванадій 0,10...0,18 %; кремній 0,17...0,37 %; мідь — не більше 0,30 %; фосфор — не більше 0,025 %; сірка — не більше 0,025 %. Мікроструктура сталі у початковому стані, як правило, має дрібнозернисту феритну структуру з дрібнодисперсними карбідами. Після термообробки можливе утворення карбідів заліза, хрому, ванадію та молібдену,

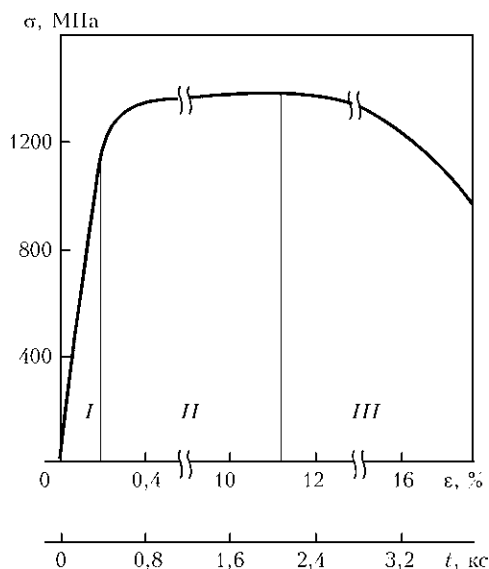


Рис. 1. Діаграма розтягу гладкого циліндричного зразка зі сталі 38ХНЗМФА (опис I–III — див. у тексті)

а також складнолегованих карбідів з їх коагуляцією, сульфідів марганцю.

Під час розтягу зразка в реальному масштабі часу сигнали АЕ реєстрували за допомогою акустико-емісійної вимірювальної системи SKOP-8 [14]. Смугою частот вимірювального АЕ-тракту визначали робочою смугою частот первинного перетворювача АЕ, яка становила 0,2...0,6 МГц. Далі в режимі постобробки результатів будували діаграми розтягу (рис. 1) та аналізували параметри сигналів АЕ.

Аналіз сигналів АЕ здійснювали у такому порядку: 1 — визначали за хвилювим відображенням кожного сигналу АЕ максимальне значення амплітуди A_i та час t_i настання АЕ-події від початку експерименту; 2 — встановлювали за неперервним вейвлет-перетворенням (з використанням програмного забезпечення AGU-Vallen Wavelet) для кожного сигналу, що супроводжує подію АЕ, максимальний вейвлет-коефіцієнт WT_{max} ; 3 — оцінювали ширину смуги частот Δf спектра сигналів АЕ на основі 2D-проекції НВП сигналу на площину «вейвлет-коефіцієнт WT — частота f », що відповідає WT_{max} даної події (рис. 2, б); 4 — за отриманими таким чином даними обчислювали критеріальний параметр k за залежністю (3).

Для ділянки I діаграми розтягу (рис. 1) характерні такі типи сигналів АЕ, що супроводжують процес руйнування сталі. Спочатку сигнали АЕ мають низькі значення максимальних амплітуд (150...250 мкВ), широкі смуги частотних спектрів Δf (0,2...0,3 МГц) у момент часу, який відповідає WT_{max} , а значення самих максимальних вейвлет-коефіцієнтів WT_{max} не перевищують 0,1 (0,03...0,08). Відповідно величини критеріального параметра k лежать у діапазоні 0,03...0,15. Умовно віднесемо сигнали з такими параметрами до сигналів першого типу (рис. 2).

У деякий момент часу (наприклад, $t \approx 200...210$ с від початку експерименту) з'являються сигнали АЕ зі значно більшими значеннями амплітуд (400...600 мкВ). Окрім того, вони мають вузьку ширину смуги частот Δf (0,12...0,19 МГц), а значення WT_{max} перевищують 0,1 (0,11...0,15), у результаті чого зростають і значення параметра k , що вже визначається діапазоном 0,2...0,5. Таким чином, з'являються сигнали другого типу (рис. 3), які чергуються на цій ділянці діаграми розтягу із сигналами першого типу. Із наближенням до межі плинності $\sigma_{0,2}$ амплітуди сигналів обох типів поступово збільшуються і перевищують початкові амплітуди приблизно на порядок, але при цьому ширина смуги частот Δf , максимальні вейвлет-коефіцієнти WT_{max} та значення критеріального параметра k зберігаються у межах, встановлених вище, для кожного із двох виділених типів.

Співставивши отримані результати із раніше отриманими числовими результатами оцінки ме-

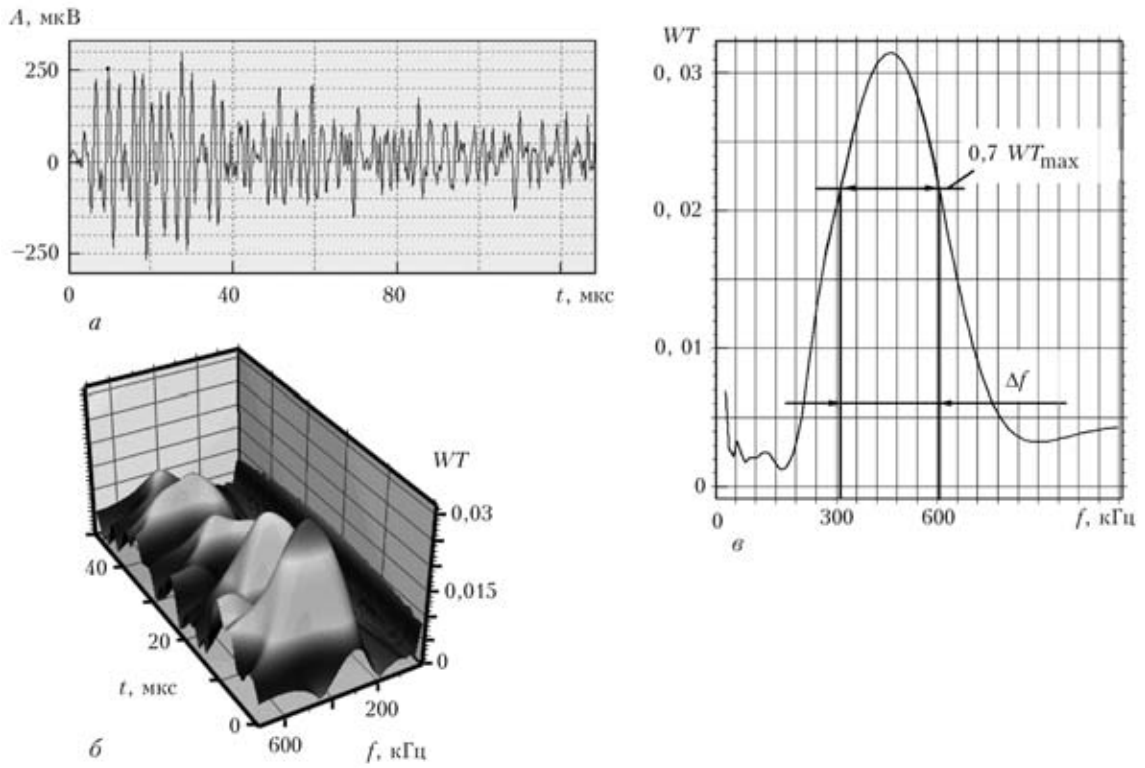


Рис. 2. Характерні сигнали АЕ першого типу: а — хвильове відображення; б — НВП сигналу АЕ; в — проекція НВП сигналу АЕ на площину « $WT - f$ » у момент часу, що відповідає WT_{max}

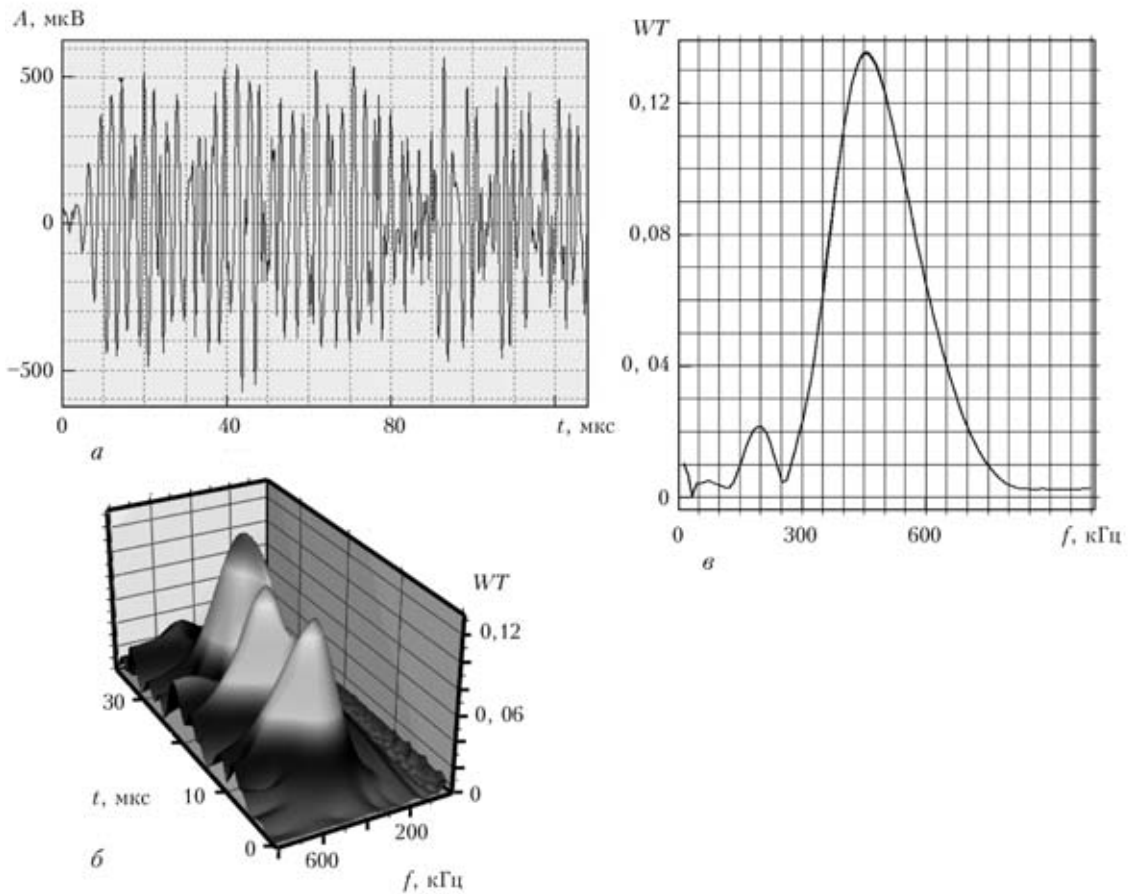


Рис. 3. Сигнали АЕ, що характерні для другого типу руйнування (а-в те саме, що і на рис. 2)



ханізмів крихкого руйнування скла [18], сигнали другого типу умовно можна віднести до таких, що характеризують крихке руйнування, а першого типу — в'язке.

Отже, на підставі зробленого аналізу сигналів АЕ на I ділянці діаграми розтягу, можна припустити, що на початку руйнування матеріалу переважають механізми в'язкого руйнування. З появою сигналів АЕ із вищими значеннями амплітуд гіпотетично можна вважати, що відбувається розвиток мікротріщиноутворення та початок макро-руйнування матеріалу (крихке руйнування). Під час подальшого розтягу процес мікротріщиноутворення чергується із процесом розвитку пластичних деформацій, оскільки чергуються сигнали двох встановлених типів. Особливо активно це відбувається з наближенням до межі плинності $\sigma_{0,2}$ матеріалу. В її околі відбуваються інтенсивні дислокаційні процеси, які супроводжуються відповідними низькоамплітудними та широкосмуговими сигналами АЕ [14].

Наведені міркування щодо механізмів руйнування, встановлених за сигналами АЕ, які генеруються під час навантаження зразків зі сталі 38ХНЗМФА, підтверджуються результатами, представленими у праці [19]. У ній автори зафіксували фрактографічно (рис. 4) утворення внутрішніх мікротріщин у перерізі зразка вздовж осі прикладання зусиль розтягу.

Серед сигналів АЕ, які реєстрували на ділянці II діаграми розтягу, здебільшого проявлялись сигнали першого типу і рідко з'являлись сигнали другого типу, а на ділянці III спостерігали домінування сигналів першого типу.

Отримані результати АЕ-досліджень показують, що під час руйнування сталі механізми руйнування чергуються між собою: в'язке змінюється крихким і навпаки. Це підтверджує основоположні принципи лінійної механіки руйнування [20] про початкові

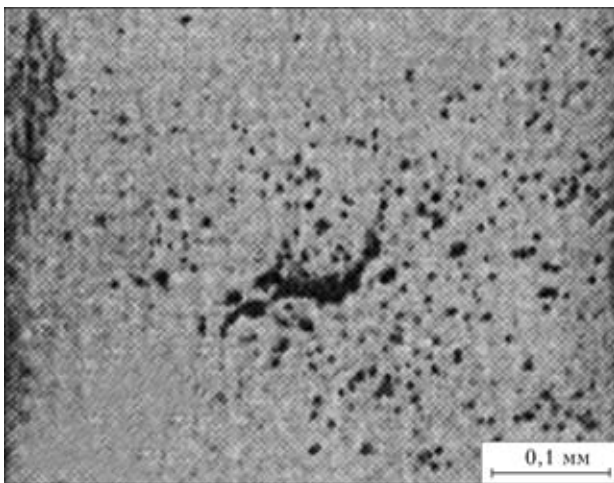


Рис. 4. Утворення внутрішніх мікротріщин під час розтягання зразка з технічно чистої (99,9 %) електролітної міді у стані поставки [19]

стадії руйнування: утворення пластичних зон, стрибкоподібне підростання тріщин, руйнування крихких включень. Очевидно, що на кожному етапі просування тріщини ці механізми наявні, про що свідчить НВП сигналів АЕ.

Висновки

Під час зародження і розвитку руйнування конструкційної сталі 38ХНЗМФА спостерігаються різні типи сигналів АЕ, які відповідають різним його механізмам. Неперервне вейвлет-перетворення цих сигналів показало ефективність застосування вейвлет-коефіцієнтів для побудови критерію оцінки механізмів руйнування.

Ранні стадії руйнування сталі характеризуються низькими значеннями критеріального показника k і сигнали АЕ, що генеруються у цей час, гіпотетично супроводжують відшарування включень у в'язкій феритній матриці, їх розтріскування, а також дислокаційні механізми мікротріщиноутворення. Такий тип руйнування можна вважати в'язким. Зі збільшенням навантаження поза межі плинності з'являються дискретні сигнали АЕ з високими амплітудними значеннями і вузькими частотними спектрами, а значення k відповідають крихкому руйнуванню (співмірні зі значеннями цього критерію у випадку руйнування скла).

Застосування критеріального параметра k дозволяє ефективно встановлювати механізми руйнування конструкційних матеріалів під час технічного діагностування чи моніторингу різних виробів та елементів конструкцій.

Развитие техники и повышение уровня интенсивности ее эксплуатации приводят не только к созданию материалов с высокой прочностью и вязкостью разрушения, но и поднимают на новый уровень методы неразрушающего контроля и технической диагностики. Практически все конструкционные материалы неоднородны по структуре, химическому составу и т. д., что по-своему влияет на сопротивление материалов разрушению, поэтому исследование механизмов разрушения и факторов, которые способствуют его развитию, является актуальной и очень важной научно-технической задачей.

Среди существующих преимуществ метода АЭ среди других методов неразрушающего контроля стоит выделить возможность обнаружения начала процессов разрушения на ранних стадиях его зарождения.

Изучению проблемы распознавания механизмов разрушения конструкционных материалов методом АЭ посвящено большое количество публикаций. Среди них работы по установлению природы источников сигналов АЭ, возможности определения прочностных характеристик сталей методом АЭ, оценке типов разрушения с учетом амплитудно-частотных характеристик сигналов



АЭ, определению особенностей макроразрушения материалов по энергетическому критерию и распределению вейвлет-коэффициентов и т. д.

Таким образом, метод АЭ все чаще применяют в фундаментальных и прикладных исследованиях как пластической деформации, так и зарождения и развития разрушения в разных конструкционных материалах. В то же время достижение высшей эффективности метода возможно при условии дальнейшего совершенствования методики обработки сигналов АЭ.

Последнее время среди разных методов цифровой обработки сигналов получил развитие вейвлет-анализ, который является эффективным средством локализации и классификации особых точек нестационарных сигналов и разрешает осуществлять анализ одновременно в частотной и временной областях.

Непрерывное вейвлет-преобразование является важным источником диагностической информации, с помощью которой можно идентифицировать механизмы разрушения на любом временном интервале нагрузки. Наличие в сигнале значительных флуктуаций в некоторый момент времени определяется большими значениями вейвлет-коэффициентов. Чем сильнее выражена особенность сигнала, тем сильнее она выделяется на спектрограмме и тем выше уровень вейвлет-коэффициента.

Исследовали растяжением цилиндрические образцы из конструкционной стали 38ХНЗМФА диаметром 4 мм и длиной 44 мм. При зарождении и развитии разрушения в образцах наблюдаются разные типы сигналов АЭ, которые соответствуют разным его механизмам. Непрерывное вейвлет-преобразование этих сигналов показало эффективность использования вейвлет-коэффициентов для построения критерия оценки механизмов разрушения.

Ранние стадии разрушения стали характеризуются низкими значениями критериального показателя k и сигналы АЭ, которые генерируются в это время, гипотетически сопровождают отслоение включений в вязкой ферритной матрице, их растрескивание, а также дислокационные механизмы микротрещинообразования. Такой тип разрушения можно считать вязким. С увеличением нагрузки за предел текучести появляются дискретные сигналы АЭ с высокими амплитудными значениями и узкими частотными спектрами, а значения k соответствуют хрупкому разрушению (соизмеримы со значениями этого критерия в случае разрушения стекла).

Использование критериального параметра k дает возможность эффективно устанавливать механизмы разрушения конструкционных материалов при техническом диагностировании или мониторинге различных изделий и элементов конструкций.

1. Fitzgerald E. R. Mechanical resonance dispersion and plastic flow in crystalline solids // J. Acoust. Soc. Amer. — 1960. — **32**, № 10. — P. 1270–1289.
2. Ookawa A., Yazu K. The energy radiated from a dislocation by an accelerated motion through impurity fields // J. Phys. Soc. Japan. — 1963. — **18** (Supplement I). — P. 36–43.
3. Engle R. B. Acoustic emission and related displacements in lithium fluoride single crystals / Ph. D. Thesis. Michigan State University, East Lansing Michigan. — 1966.
4. Fisher R. M., Lally L. S. Microplasticity detected by an acoustic technique // Canad. J. Phys. — 1967. — **45**, № 2. — P. 1147–1159.
5. James D. R. The source of acoustic emission in deforming single crystals / In: Int. conf. on Mechanical Behaviour of Materials, 1971, Kyoto, Abstr. — **3**. — P. 960–961.
6. Segwick R. T. Acoustic emission from single crystals of LiF and KCl // J. Appl. Phys. — 1968. — **39**, № 3. — P. 1728–1740.
7. James D. R., Carpenter S. H. Relationship between acoustic emission and dislocation kinetics in crystalline solids // Ibid. — 1971. — **42**, № 12. — P. 4685–4697.
8. Применение акустической эмиссии для определения предела упругости конструкционных сталей / А. В. Скобло, А. П. Жигин, Л. П. Дулина, С. А. Колосов // Завод. лаб. — 1971. — С. 363–367.
9. Исследование деформирования образцов с выточками методом акустической эмиссии / С. М. Пичков, В. В. Данилин, С. Д. Шеряков, Ю. Л. Гагарин // Физ.-хим. механика материалов. — 1980. — № 3. — С. 120–122.
10. Определение механических характеристик стали методом акустической эмиссии / Ю. И. Фадеев, О. А. Бартевнев, З. Г. Волкова, Н. Г. Чекмарев // Дефектоскопия. — 1987. — № 8. — С. 44–49.
11. Филоненко С. Ф., Городиский Н. И., Бирюков В. С. Особенности сигналов акустической эмиссии при пластическом деформировании и хрупком разрушении материалов // Физ.-хим. механика материалов. — 1985. — № 6. — С. 105–106.
12. Методические аспекты применения метода акустической эмиссии при определении статической трещиностойкости материалов / А. Е. Андрейкив, Н. В. Лысак, В. Р. Скальский, О. Н. Сергиенко (Препр. АН УССР. Физ.-хим. ин-т, № 165). — Львов, 1990. — 34 с.
13. Скальський В. Р., Сергієнко О. М., Окренкий Ю. С. Підходи до оцінки руйнування включень у твердому тілі (Огляд) // Техн. діагностика і неразруш. контроль. — 2007. — № 3. — С. 18–25.
14. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: науково-технічний посібник: у 3 т. — Киев: Наук. думка, 2009. — 878 с.
15. Скальський В., Станкевич О., Галан П. Визначення особливостей макроруйнування матеріалів за вейвлет-аналізом сигналів акустичної емісії // Матеріали конференції: «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів ЛЕОТЕСТ-2011», 21–26 лютого 2011 р. — Львів, 2011. — С. 67–71.
16. Яковлев А. Н. Введение в вейвлет-преобразования: учеб. пособие. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. — 104 с.
17. Vallen Systeme: The Acoustic Emission Company. — [Virtual Resource]. — Access Mode: URL: <http://www.vallen.de/software/index.html>.
18. Скальський В. Р., Буйло С. И., Станкевич Е. М. Критерий оценки хрупкого разрушения стекла по сигналам акустической эмиссии // Дефектоскопия. — 2011.
19. Pottik K. E. Ductile Fracture in Metals // Phil. Mag. — 1959. — **4**. — P. 964–969.
20. Макклиток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов / Пер. с англ.; под ред. Е. М. Морозова, Б. М. Струнина. — М.: Мир, 1970. — 443 с.

Надійшла до редакції
09.05.2011