

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, І. М. ЛЯСОТА, О. М. СТАНКЕВИЧ (Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАНУ, Львів), Т. В. СЕЛІВОНЧИК (Луцький національний технічний університет)

АКУСТИКО-ЕМІСІЙНЕ ІДЕНТИФІКУВАННЯ ДЖЕРЕЛ РУЙНУВАННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ

Розглянуто особливості генерування акустичної емісії за статичного руйнування термічно зміщеного алюмінієвого сплаву 1201-Т. Металографічними та фрактографічними дослідженнями встановлено, що сплав руйнується за крихко-в'язким механізмом, де крихка складова відповідає розтріскуванню інтерметалідів Al_2Cu , а в'язка – α -твердому розчину. Аналіз хвильових відображень та їх неперервних вейвлет перетворень дає змогу чітко розпізнати за сигналами акустичної емісії механізми руйнування алюмінієвого сплаву.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, акустична емісія, мікроструктура, мікрофрактограма, тріщина

В умовах сучасного науково-технічного прогресу з кожним днем все більше зростають об'єми випуску алюмінію і його високоміцних сплавів. Завдяки комплексу фізико-механічних, корозійних і технологічних властивостей їх успішно використовують практично в усіх галузях науки і техніки, зокрема і у будівництві мостових конструкцій. Однією з найважливіших проблем для сучасних транспортних систем є погіршення стану і зношуваність мостів. Це відбувається головним чином у зв'язку зі складними кліматичними умовами, використанням у зимовий час дорожньої солі, а також збільшення інтенсивності руху і навантаження. Наприклад у Швеції розроблена система алюмінієвого екструзійного мостового полотна для відновлення автомобільних мостів [1]. Таким чином реконструйовано близько 60-и мостів шляхом заміни бетонного полотна на ортотропну плиту, яка складається з алюмінієвих пресованих профілів, зібраних за допомогою з'єднання в шпунт. У деяких випадках така технологія застосовувалась під час будівництва нових мостів, більша частина яких знаходиться у Швеції, Норвегії, Фінляндії, Канаді, Росії тощо [1].

Застосування алюмінієвих сплавів (АС) у мостобудуванні має низку переваг: низька питома вага конструкцій; висока питома міцність та корозійна стійкість. У США за останні 75 років побудовано більше ста алюмінієвих мостів, термін експлуатації більшості яких вже добігає свого кінця [2]. Під дією різного роду навантажень та агресивних середовищ у елементах металокопункцій зароджуються різного роду дефекти, зокрема і гострі тріщини. У зв'язку з цим актуальною на даний час є проблема діагностування зародження руйнування таких мостових алюмінієвих елементів, зокрема

застосування у цьому напрямку методу акустичної емісії (АЕ) [3, 4]. Для ефективного АЕ-діагностування стану конструкцій, виготовлених з алюмінієвих сплавів, важливо створити відповідні методики з оцінки АЕ-активності і особливостей спектральних характеристик сигналів під час зародження і розвитку процесів руйнування.

З аналізу літературних джерел відомо деякі результати таких досліджень. Зокрема, автори праці [5] застосовували метод АЕ для дослідження розвитку штучно створених дефектів-імітаторів у вигляді тріщин під час навантаження внутрішнім тиском резервуарів, виконаних з АС марки АМг6М. За допомогою зареєстрованих під час експерименту сигналів АЕ (САЕ) автори розраховували критичний розмір тріщини, за якого ємність можна експлуатувати.

Вплив мікроструктури на випромінювання САЕ під час розтягання гладких зразків з технічного алюмінію та сплаву АМг6 вивчали у праці [6]. Автори стверджують, що у цьому сплаві активність випромінювання АЕ більше, ніж на порядок перевищує активність АЕ в алюмінії. Це зумовлено поведінкою границь зерен та наявністю часточок вторинної фази у сплаві.

У праці [7] виконано дослідження, метою яких було спостереження поведінки АЕ під час руйнування сплаву АМг6М, а також встановлення залежності характеру САЕ від виду дефекту. Показано, що вже за невеликих напружень у межах пружної деформації (80...90 МПа) спостерігається значна активність (6...8 імпл/с) АЕ, яка характеризується сигналами великої амплітуди. Встановлено, що навантаження зразка до напружень, у результаті яких з'являється пластична деформація

(300...320 МПа), не викликає помітної АЕ. Подальше зростання деформації характеризується появою одиничних АЕ-імпульсів малої енергії і активності. У зоні глибокої пластичної деформації АЕ носить імпульсний характер, тобто з'являється у вигляді «емісії вибухового типу». Підвищення навантаження аж до руйнування супроводжується появою САЕ малої амплітуди.

Мета досліджень – вивчення особливостей генерування сигналів АС за статичного навантаження зразків з термічно обробленого сплаву 1201-Т і визначення за параметрами САЕ моменту старту макротріщини та ідентифікація джерел руйнування алюмінієвого сплаву.

Матеріали та методика АЕ-випробувань

За схемою триточкового згину випробовували призматичні зразки розмірами 10×20×160 мм з термічно зміцненого АС марки 1201-Т. Зразки виготовляли з дотриманням норм і характерних співвідношень геометричних розмірів, що регламентуються у [8]. Довжина втомної тріщини разом із концентратором становила 10 мм. Структурну схему експериментальних досліджень представлено на рис. 1.

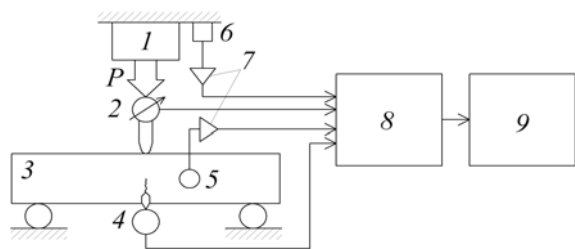


Рис. 1. Структурна схема експериментальних досліджень

Навантажували зразки на установці СВР-5, з якої зусилля P через динамометр 2 передавалось на досліджуваний зразок 3. Розкриття берегів тріщини реєстрували тензометричним перетворювачем розкриття берегів тріщини 4. Сигнали АЕ, згенеровані у результаті руйнування, сприймалися первинним перетворювачем АЕ (ПАЕ) 5, який встановлювали на боковій поверхні зразка. Для селекції корисних сигналів від завад використовували паралельний АЕ-канал [4] (ПАЕ 6). Електричні сигнали АЕ підсилювали попередніми підсилювачами 7, після чого реєстрували багатоканальною вимірювальною АЕ-системою SKOP-8М 8 і обробляли на персональному комп'ютері 9. Для зменшення впливу хибних САЕ від тертя у місці дотикання поверхонь балкового зразка з опорами установки на них встановлювали антифрикційні прокладки. Навантаження та розкриття берегів тріщини реєстрували параметричними каналами вищезгаданої систе-

ми. У режимі постобробки будували діаграми «навантаження P – розкриття берегів тріщини v » та «навантаження P – час руйнування τ ».

Для відбору сигналів використовували ПАЕ з робочою смугою частот 0,2...0,6 МГц. Перед початком кожного експерименту проводили тарування вимірювальних каналів [4]. Встановлювали такі налаштування АЕ-системи SKOP-8М: кількість вимірювальних каналів – 4, з яких два – для реєстрування САЕ (підсилення кожного 40 дБ); тривалість вибірки – 0,5 мс; період дискретизації аналогового сигналу – 0,25 мкс; частота зрізу фільтра низьких частот – 700 кГц; фільтра високих частот – 40 кГц; поріг дискримінації – 28 %; рівень власних шумів, приведених до входу попереднього підсилювача – 7 мкВ; коефіцієнт підсилення попередніх підсилювачів становив 34 дБ.

Дослідження мікроструктури та фрактографії сплаву 1201-Т

Для ідентифікації АЕ-методом джерел руйнування важливо дослідити мікроструктуру та мікрофрактограми зломів зразків АС. Сплав 1201-Т відноситься до системи легування Al – Cu – Mn (рис. 2, а). За кімнатної температури його мікроструктура складається з зерен, тіло яких становить α -твердий розчин міді і мангану в алюмінії та вторинної фази Al_2Cu , що рівномірно розподілена по зерну у вигляді дрібних голчастих включень, а також вздовж їх границь у формі крупних пластівців (див. рис. 2, б).

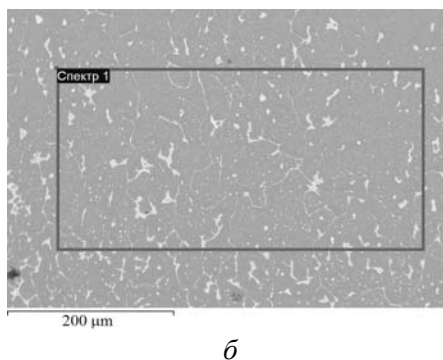
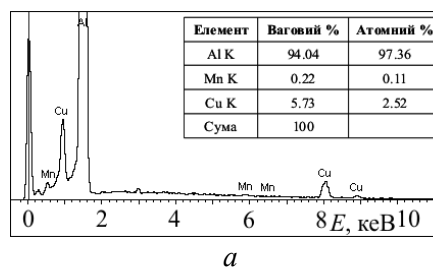


Рис. 2. Мікроструктура (а) та EDS-спектр розподілу елементів (б) в основному металі сплаву 1201-Т

З мікрофрактограми основного металу (рис. 3, а) бачимо, що злам є енергоємним, відповідає крихко-в'язкого типу руйнування. Спостерігається значна кількість квазівідкольних фасеток. Злам в основному складається з великих випуклостей та вм'ятин, поверхня яких всіяна дрібними фасетками. Співставивши мікроструктуру (див. рис. 2, б) та мікрофрактограми основного металу сплаву 1201-Т (див. рис. 3, а) бачимо, що форма та розміри зерен чітко співпадають з розмірами випуклостей та впадин і становлять приблизно 120...150 мкм. Геометрія включень вторинної фази Al_2Cu на мікроструктурі співмірна з розмірами крихких відколів на мікрофрактограмі (25...35 мкм) (див. рис. 3, б).

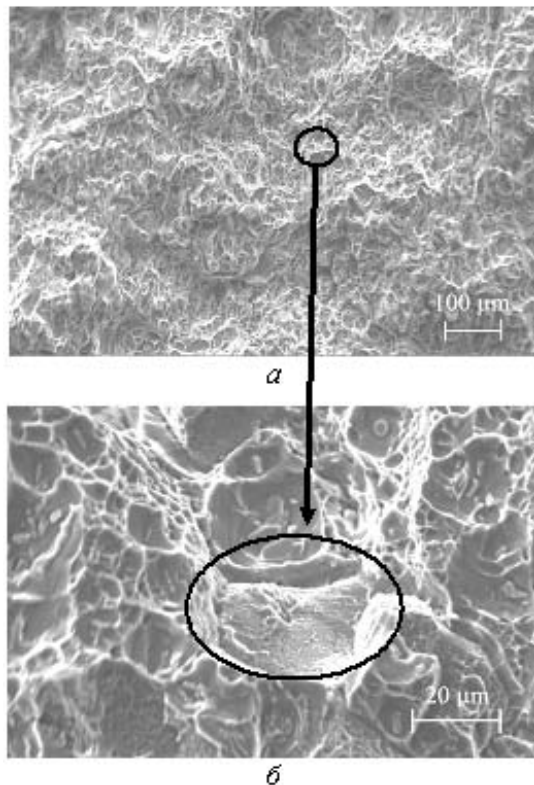


Рис. 3. Мікрофрактограми сплаву 1201-Т

Таким чином, можна зробити висновок, що в основному металі сплаву 1201-Т за статичного його навантаження тріщина рухається здебільшого по границях зерен, характер руйнування є крихко-в'язким, де в'язка складова відповідає руйнуванню a -твердого розчину, а крихка – розтріскуванню включень зміцнюючої фази.

Результати АЕ-досліджень та їх обговорення

Відомо [3], що метод АЕ чутливо реагує на процеси тріщиноутворення і дозволяє точніше, ніж традиційні методи [8] визначити початок субкритичного росту тріщини. Показано [3], що

за початок росту макротріщини слід брати момент якісної зміни інтенсивності САЕ на акустограмі, яка записана паралельно із діаграмою руйнування. За визначенням таким чином значенням навантаження P_{AE} , яке пропонуємо приймати за старт тріщини, обчислюють параметр K_{IAE} . Зазвичай K_{IAE} має нижче значення від K_{IC} , визначеного за регламентованими нормативно-технічною документацією методиками.

На рис. 4 показана діаграма «навантаження P – розкриття берегів тріщини v », а також зміну у часі суми амплітуд сигналів A_i , що перевищили поріг дискримінації.

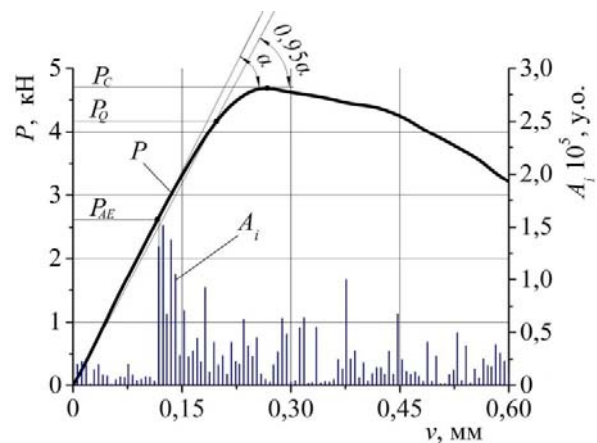


Рис. 4. Діаграма « $P - v$ » та зміна суми амплітуд вибірок A_i під час руйнування сплаву 1201-Т

З графіка бачимо різке підвищення АЕ-активності за навантаження 2,5 кН, а це, згідно [3] свідчить про старт макротріщини. Експерименти показали, що значення навантаження P_{AE} менше, ніж P_0 за яким оцінюють статичну тріщиностійкість K_{IC} , на 1,5...2 кН, що підтверджує краще визначення моменту старту тріщини АЕ-методом. Для сплаву 1201-Т коефіцієнт інтенсивності напружень визначений за P_{AE} становив $K_{IAE} = 20,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, а розрахований за методикою [8] – $K_{IC} = 32,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Для сплаву 1201-Т, який є гартованим та штучно зістареним, діаграма « $P - v$ » (див. рис. 4) відповідає крихко-в'язкому типу руйнування. На пружній ділянці генеруються САЕ слабких амплітуд, що свідчить про процеси скупчення та руху дислокацій та пластичного деформування металу. За навантаження 2,6 кН спостерігається різке підвищення амплітуд сигналів, що відповідає стрибкоподібному росту макротріщини. На закритичній стадії руйнування інтенсивність АЕ дещо послаблюється.

Вивчення особливостей САЕ, генерованих під час руйнування АС

Необхідну інформацію про механізми руйнування твердих тіл можна отримати, скориставшись методами вейвлет-перетворення [9].

Його суть полягає у тому, що розглядають простір $L^2(R)$ функцій $s(t)$, які визначені на всій дійсній осі $R(-\infty, \infty)$ і мають скінчену енергію. Функціональний простір $L^2(R)$ конструюють за допомогою одного вейвлета $\psi(t)$, використовуючи зсув у часі (b) та зміну часового масштабу (a)

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in R, \quad \psi \in L^2(R). \quad (1)$$

Інтегральним (неперервним) вейвлет-перетворенням функції (сигналу) $s(t)$ з простору $L^2(R)$ вираз

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_{ab}^*(t) dt. \quad (2)$$

Обернена величина масштабу a в співвідношенні (2) відповідає частоті ω у перетворенні Фур'є: $\omega \approx 1/a$. Параметр b задає часову локалізацію вейвлета і називається зсувом. Множник $1/\sqrt{a}$ забезпечує незалежність норми функції від числа a . За рахунок зміни масштабу a вейвлети можуть виявляти частотні особливості процесу, який аналізують, а внаслідок варіацій зсуву b можна локалізувати характерні особливості процесу у часі [9].

У праці [10] запропоновано критерій кількісної оцінки руйнування конструкційних матеріалів за параметрами неперервного вейвлет-перетворення сигналів АЕ. Для дослідження їх особливостей використано програму AGU-Vallen Wavelet [11]. Де для побудови неперервного вейвлет-перетворення сигналів АЕ за материнський вибрано вейвлет Габора, який дозволяє добре виділяти локальні особливості сигналів АЕ та забезпечує їх частотно-часове представлення

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} \left(\frac{\omega_p}{\gamma}\right)^{1/2} \exp\left[-\frac{t^2}{2} \left(\frac{\omega_p}{\gamma}\right)^2 + i\omega_p t\right], \quad (3)$$

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

Ураховуючи властивості вейвлет-коефіцієнтів неперервного вейвлет-перетворення сигналів АЕ та результати теоретичних досліджень зміни амплітудно-частотних характеристик пружних хвиль АЕ під час різних процесів руйнування у твердих тілах, кількісною характеристикою сигналів АЕ під час руйнування запропоновано критеріальний показник κ [10]:

$$\kappa = \frac{WT_{\max} \times \Delta f_0}{\Delta f}, \quad (4)$$

де WT_{\max} – максимальне значення вейвлет-коефіцієнта в події АЕ у певний момент часу; Δf – ширина смуги спектра частот, що відповідає WT_{\max} в події АЕ, у координатах $WT - f$; Δf_0 – ширина робочої смуги АЕ-тракту, що визначається робочою смугою частот первинного перетворювача (у даному випадку 0,2...0,6 МГц). Залежно від значення експериментально встановленого критеріального параметра тип макроруйнування конструкційних матеріалів розділено на в'язке ($\kappa < 0,1$), в'язкокрихке ($0,2 \leq \kappa < 0,3$) та крихке руйнування ($\kappa \geq 0,3$). З подальшим збільшенням значення κ схильність до крихкого руйнування матеріалу об'єкта контролю зростає [10].

Опрацювання сигналів АЕ, зареєстрованих під час руйнування АС, здійснювали у такій послідовності: для кожного сигналу будували неперервне вейвлет-перетворення; встановлювали максимальне значення вейвлет-коефіцієнта WT_{\max} у події АЕ; будували проекцію неперервного вейвлет-перетворення на площину «вейвлет-коефіцієнт WT – частота f » у момент часу досягнення WT_{\max} ; визначали ширину смуги частот Δf (МГц), яка відповідає WT_{\max} ; за співвідношенням (4) визначали значення критеріального показника κ .

На рис. 5 показано хвильові відображення та неперервні вейвлет-перетворення характерних САЕ, зареєстрованих під час руйнування АС.

Під час АЕ-випробувань сплаву 1201-Т реєстрували сигнали двох типів: тип I – з невеликими амплітудами ($A = 0,4...0,5$ мВ) і показником $\kappa = 0,2...0,3$ (див. рис. 5, а) та тип II – потужніші САЕ ($A = 1,5...2,0$ мВ), для яких критеріальний параметр $\kappa = 0,5...0,6$ (див. рис. 5, б). Характерною особливістю усіх запи-

саних сигналів є значна їх тривалість у часі ($t = 20 \dots 30 t = 20 \dots 30$ мкс) порівняно з САЕ, зареєстрованими під час руйнування інших ма-

теріалів [10], що обумовлює властиву алюмінієвим сплавам форму вейвлет-спектрів (див. рис. 5, в, з).

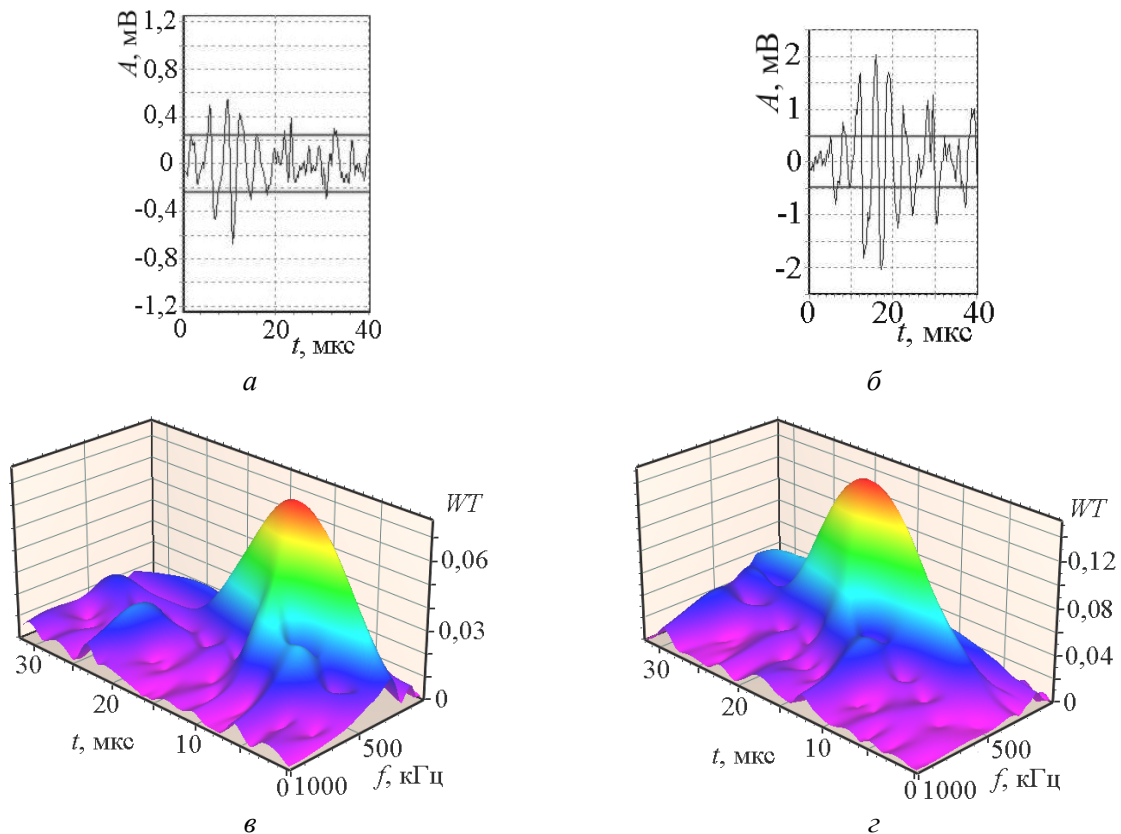


Рис. 5. Хвильові відображення (а, б) та неперервні вейвлет-перетворення (в, з) характерних САЕ під час руйнування зразків сплаву 1201-Т

Сигнали типу I мають невеликі значення максимальних вейвлет-коефіцієнтів $WT_{\max} = 0,06 \dots 0,07$ (див. рис. 5, в) та дещо ширші смуги частот $\Delta f = 115 \dots 120$ кГц. Згідно запропонованої раніше методики [10] такі САЕ з $\kappa = 0,2$ відповідають крихко-в'язкому руйнуванню матриці (термозміцненого α -твердого розчину міді та мангану в алюмінії). Сигналам типу II властиві вищі значення максимальних вейвлет-коефіцієнтів $WT_{\max} = 0,15 \dots 0,16$ (див. рис. 5, з), а також вужчі смуги частот $\Delta f = 100 \dots 110$ кГц. Ці сигнали генеровані квазікрихким розтріскуванням крупних включень інтерметаліду Al_2Cu , розміщених на границях зерен (див. рис. 3, б).

З отриманих результатів бачимо, що АЕ-метод дає змогу чітко розпізнати механізми руйнування алюмінієвого сплаву 1201-Т.

Висновки

Проведені експериментальні дослідження показали, що метод АЕ дає змогу ефективно визначати момент старту макротріщини у АС

за квазістатичного навантаження, а значить і кількісно об'єктивніше оцінювати в'язкість руйнування металоконструкцій. Це дозволить у режимі реального часу діагностувати процеси розвитку тріщиноутворення об'єктів довготривалого експлуатування.

З аналізу зареєстрованих хвильових відображень САЕ та їх неперервних вейвлет-перетворень встановлено походження джерела випромінювання. Крихко-в'язке руйнування твердого розчину міді в алюмінії генерує сигнали низьких та середніх амплітуд ($A = 0,2 \dots 0,5$ мВ) для яких критерій κ коливається в межах $0,2 \dots 0,3$. Розтріскування крихких інтерметалідів супроводжується потужними сигналами ($A = 0,5 \dots 4,0$ мВ) з показником $\kappa = 0,5 \dots 0,9$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алюминиевые мости в Швеции. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://stroyprofile.com/archive/1640>.

2. Мости из алюминиевых сплавов. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://abondarcev.livejournal.com/55628.html>.
3. Скальський, В. Р. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій [Текст] / В. Р. Скальський, П. М. Коваль. – Львів: СПОЛЮМ, 2005. – 396 с.
4. Назарчук, З. Т. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: науково-технічний посібник [Текст]: у 3 т. / З. Т. Назарчук, В. Р. Скальський. – К: Наукова думка. – 2009. – Т. 2: Методологія акустико-емісійного діагностування. – К.: Наукова думка, 2009. – 263 с.
5. Мезинцев, Е. Д. Применение имитаторов дефектов при испытании акустико-эмиссионной системы технической диагностики [Текст] / Е. Д. Мезинцев, В. Г. Тихий, Л. П. Карасев // Автоматическая сварка. – 1982. – № 9. – С. 28–30.
6. Тихонов, Л. В. Дитонационные механизмы деформации, разрушения и акустической эмиссии в алюминии и его сплавах [Текст] / Л. В. Тихонов, Г. И. Прокопенко // Технич. диагностика и неразрушающий контроль. – 1991. – № 1. – С. 73–76.
7. Тихий, В. Г. Исследование зависимости сигналов акустической эмиссии от характера дефектов сварки в сплаве АМг6 [Текст] / В. Г. Тихий, Ф. П. Санин, Д. Г. Борщевская // Автоматическая сварка. – 1982. – № 9. – С. 36–38.
8. ГОСТ 25506-85 Методы механических испытаний металлов. Определение характеристики трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 61 с.
9. Астафьева, Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения [Текст] / Н. М. Астафьева // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166. – № 11. – С. 1145–1170.
10. Скальський, В. Р. Критерий оценки хрупкого разрушения стекла по сигналам акустической эмиссии [Текст] / В. Р. Скальський, С. И. Буйло, Е. М. Станкевич // Дефектоскопия. – 2012. – № 5. – С. 26–34.
11. Vallen Systeme: The Acoustic Emission Company. – [Virtual Resource]. – Access Mode: URL: <http://www.vallen.de>.

Надійшла до редколегії 26.06.2012.

Прийнята до друку 09.07.2012.

В. Р. СКАЛЬСКИЙ, И. Н. ЛЯСОТА, Е. М. СТАНКЕВИЧ (Физико-механический институт имени Г. В. Карпенка НАНУ, Львов), Т. В. СЕЛИВОНЧИК (Луцкий национальный технический университет)

АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОЧАГОВ РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Рассмотрены особенности генерирования акустической эмиссии при статическом разрушении термически упрочненного алюминиевого сплава 1201-T. По металлографическим и фрактографическим исследованиям установлено, что механизм их разрушения хрупко-вязкий, где хрупкая составляющая соответствует растрескиванию интерметаллидов Al_2Cu , а вязкая – α -твердого раствора. Анализ волновых отображений и их непрерывных вейвлет-преобразований позволяет распознавать по сигналам акустической эмиссии механизмы разрушения алюминиевого сплава.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, акустическая эмиссия, микроструктура, микрофрактограмма, трещина

V. R. SKALSKY, I. M. LYASOTA, O. M. STANKEVYCH (Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv), T. M. SELIVONCHYK (National Technical University of Lutsk)

ACOUSTIC EMISSION IDENTIFYING OF FRACTURE SOURCES OF ALUMINUM ALLOY

The features of acoustic emission generation by static fracture of thermostrengthened aluminum alloy 1201-T were considered. With the help of metallographic and fractographical studies it was found that the alloy is destroyed by brittle-ductile fracture mechanism, where the brittle component corresponds to intermetallic cracking Al_2Cu and ductile – to solid solution. Analysis of wave representation and their continuous wavelet transformation allows us to recognize clearly the aluminum alloy fracture mechanisms using acoustic emission signals.

Keywords: aluminum alloy, acoustic emission, microstructure, micro fractography, crack