

УДК: 539.3:620.179.17

## АЕ-ДІАГНОСТУВАННЯ ВТОМНОГО РУЙНУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ СИСТЕМИ Al–Zn–Mg–Cu

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ<sup>1</sup>, І. Я. ДОЛІНСЬКА<sup>1</sup>, М. О. РУДАК<sup>1</sup>,  
В. К. ОПАНАСОВИЧ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>2</sup> Львівський національний університет ім. Івана Франка

Описано методику діагностування зародження та стабільного поширення втомного руйнування алюмінієвого сплаву системи Al–Zn–Mg–Cu, в основі якої – особливості генерування акустичної емісії (АЕ) під час зародження та росту втомних тріщин в алюмінієвому сплаві марки 1973-T2. Виявлено, що характер випромінювання сигналів АЕ залежить від мікроструктури та механічних властивостей сплаву, а площа новоутворених дефектів пропорційна сумі амплітуд зареєстрованих сигналів. Встановлено, що перехід від стадії зародження до стабільного поширення втомного руйнування супроводжується різким стрибком АЕ-активності.

**Ключові слова:** акустична емісія, алюмінієвий сплав, втомне руйнування, мікроструктура.

Алюмінієві сплави (АС) широко використовують в авіакосмічній галузі, автомобільному транспорті, суднобудуванні, нафтовій та хімічній промисловості тощо. Це пов'язано, перш за все, з високими фізико-хімічними і механічними характеристиками алюмінію. Як свідчить практика експлуатації навантажених несучих конструкцій, вузлів і агрегатів з деталями та елементами з алюмінієвих сплавів, однією з основних причин їхніх відмов є втомне руйнування. Щоб визначити залишкову довговічність виробу чи елемента конструкції, встановити ресурс її роботи і періодичність профілактичних перевірок, необхідно передбачити розвиток тріщини в заданих режимах експлуатації і її критичний розмір. Тут ефективний метод АЕ, який дає можливість контролювати розвиток дефектів у реальному масштабі часу та незалежно від форми та розмірів об'єкта контролю. Його часто застосовують для контролю поведінки втомної тріщини та визначення координат джерел АЕ в АС [1–4]. За допомогою локації АЕ-джерел досліджено [5] кінетику поширення коротких та довгих втомних тріщин в АС марки LY12CZ (система легування Al–Cu–Mg–Mn). За отриманими результатами побудовано кінетичні діаграми втомного руйнування (КДВР) для різних асиметрій циклу у діапазоні  $R = 0,1 \dots 0,7$ . Встановлено, що за однакового навантаження швидкість росту короткої тріщини суттєво вища, ніж довгої. Також вивчено типові хвильові відображення сигналів АЕ та їх спектральні розподіли, що генеруються під час поширення обох типів тріщин. За формою вони подібні, проте амплітуди, генеровані довгими тріщинами, більш ніж удвічі вищі.

Описано [3, 6, 7] особливості АЕ під час втомного руйнування АС марки 7075-T6. Виявлено [6], що максимальні амплітуди сигналів АЕ відповідають найбільшим швидкостям поширення тріщин. При цьому їх початковий розмір та орієнтація у зразках розподілені випадково. Результати прогнозування залишкового ресурсу за сигналами АЕ збігаються з реальним значенням втомної довговічності зразка. За швидкості росту втомної тріщини  $da/dN \approx 10^{-7}$  м/цикл встановили

Контактна особа: В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, e-mail: skal@ipm.lviv.ua

кількісний взаємозв'язок між розподілом амплітуди сигналів АЕ і розмірами площ інтерметалідних включень у зонах на поверхні руйнування. Тому розподіл амплітуди сигналів АЕ під час росту тріщин у певному зразку з АС 7075-T6 можна прогнозувати за результатами металографічних досліджень [7].

Виконували лабораторні АЕ-дослідження поширення втомних тріщин у габаритних зразках з АС 6082-T6 [4]. Такі зразки використовували, щоб усунути багатократні відбиття пружних хвиль АЕ від поверхонь тіла. Сигнали записували з допомогою резонансних і смугових перетворювачів, прикріплених до поверхні зразків. За експериментальними даними будували скінченно-елементну 3D-модель генерування пружних хвиль АЕ під час поширення втомної тріщини.

Методом АЕ ефективно діагностують руйнування зварних з'єднань в АС [8]. Встановлено [9–11] кількісні показники для оцінки зародження та розвитку руйнування у різних зонах зварного з'єднання сплаву марки 1201-T за параметрами пружних хвиль АЕ. Виявлено [9, 10], що на ранніх стадіях накопичення пошкоджень у кожній зоні зварного з'єднання АЕ відрізняється амплітудно-частотними характеристиками. За втомного руйнування дрібнозернистого та пластичного металу генерується велика кількість сигналів малих амплітуд. Транскристалітне руйнування крупних зерен зони термічного впливу супроводжується випромінюванням невеликої кількості сигналів АЕ з дещо більшою сумою амплітуд у вибірці. Найменша АЕ-активність під час зародження та поширення втомної тріщини вздовж межі сплавлення металу шва та зони термічного впливу. Через крихке відколювання у місці оплавлення рекристалізованих зерен генерується невелика кількість сигналів АЕ з дещо вищими амплітудами.

Встановлено, що основний метал сплаву 1201-T руйнується за крихко-в'язким механізмом [11]. Побудовано залежності площі втомної тріщини від параметрів зареєстрованих сигналів АЕ [11].

Мета дослідження – розробити способи діагностування зародження та поширення втомних макротріщин у високоміцних АС за параметрами пружних хвиль АЕ.

**Матеріал і методи.** Досліджували зразки високоміцного АС 1973-T2 системи легування Al-Zn-Mg-Cu (рис. 1). Його мікроструктуру у вихідному стані утворює твердий розчин на основі алюмінію і різноманітні вторинні фази:  $M(MgZn_2)$ ,  $T(Mg_4Zn_3Al_3)$ ,  $S(Al_2CuMg)$ , які відіграють вирішальну роль у зміцненні сплаву після термічної обробки.

Щоб зафіксувати зародження втомного руйнування, використовували схему консольного

згину стандартних [12] призматичних балкових зразків розмірами  $10 \times 20 \times 160$  mm з концентратором напружень глибиною  $h = 4$  mm і радіусом закруглення вершини  $\rho = 0,2 \dots 0,3$  mm. Навантаження змінювали за синусоїдальним циклом з частотою  $f = 16$  Hz і коефіцієнтом асиметрії циклу  $R = 0,26$ .

Сигнали АЕ, згенеровані внаслідок втомного руйнування, сприймав первинний перетворювач АЕ, який встановлювали на боковій поверхні зразка. Для селекції корисних сигналів від завад використовували паралельний АЕ-канал [11]. Електричні сигнали АЕ підсилювали попередніми підсилювачами, після чого реєстрували багатоканальною вимірювальною АЕ-системою SKOP-8M [13] і опрацьовували на персональному комп'ютері. Щоб послабити вплив хибних сигналів

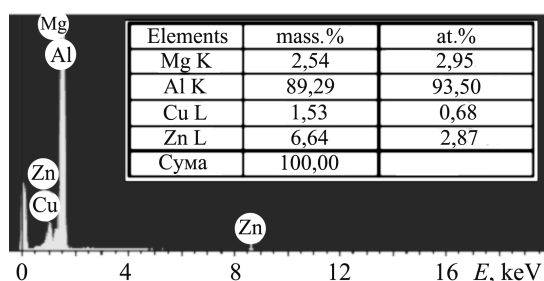


Рис. 1. EDS-спектр розподілу елементів сплаву 1973-T2.

Fig. 1. EDS-range distribution of elements of 1973-T2 alloy.

АЕ від тертя у місці дотикання поверхонь балкового зразка з захопами установки, на них встановлювали антифрикційні прокладки.

Використовували первинні перетворювачі з робочою смугою частот 0,2... 0,6 МГц. Перед початком кожного експерименту вимірювальні канали тарували. Налаштовували АЕ-систему SKOP-8М так: кількість вимірювальних каналів 4, з яких два – для реєстрування сигналів АЕ (підсилення кожного 40 dB); тривалість вибірки 0,25 ms; період дискретизації аналогового сигналу 0,25  $\mu$ s; частота зрізу фільтра низьких частот 0,7, а високих 0,2 МГц; поріг дискримінації 28%; рівень власних шумів, приведених до входу попереднього підсилювача, 7  $\mu$ V. Коефіцієнт підсилення попередніх підсилювачів 34 dB.

**Результати та їх обговорення.** На ранніх стадіях втоми матеріалу в зоні концентратора напружень накопичуються локальні пружно-пластичні деформації і зароджуються мікротріщини, що продукує невелику кількість сигналів АЕ (рис. 2a), які генерують окремі групи під час утворення нових поверхонь руйнування (рис. 2b).

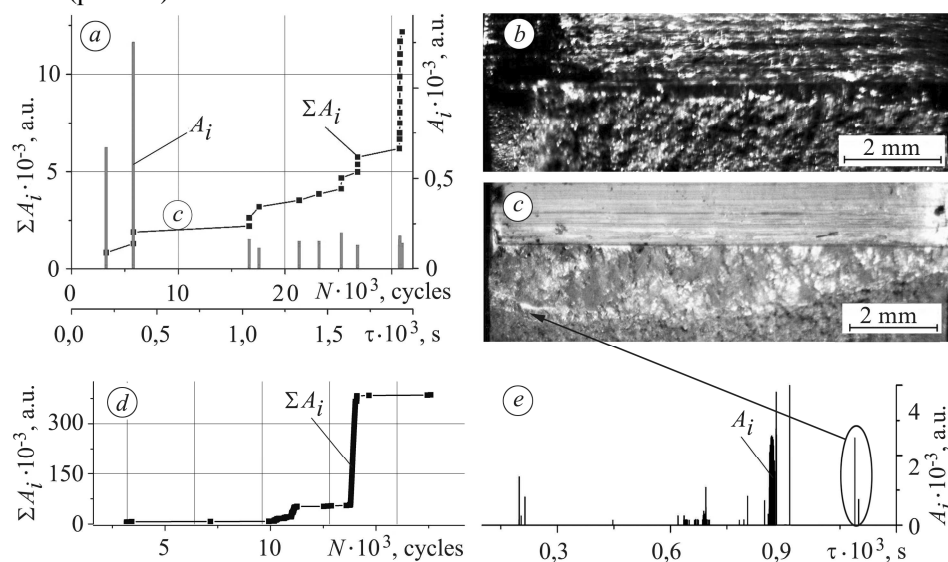


Рис. 2. Зміна суми амплітуд сигналів АЕ у вибірці  $A_i$  та всіх зареєстрованих сигналів за час експерименту  $\Sigma A_i$  (a, d, e), викликаних поширенням втомної макротріщини у сплаві 1973-T2 на ранній стадії (b) та стадії стабільного розвитку (c).

Fig. 2. Temporal variation of the sum of acoustic emission signals amplitude in sampling  $A_i$  and all recorded signals during experiment  $\Sigma A_i$  (a, d, e), caused by fatigue macrocrack propagation in 1973-T2 alloy at the early stage of its initiation (b) and at the stage of its stable propagation (c).

Перехід до наступної стадії втомного руйнування – стабільного поширення фронту тріщини (рис. 2c) (ділянка Періса на КДВР) – супроводжується різким стрибком активності АЕ (рис. 2d).

Для вимірювання площі пророщених тріщин після втомних випробувань зразки руйнували на маятниковому копрі, а потім отримані злами вивчали на оптичному мікроскопі. Оскільки виявити тріщини малих розмірів ( $< 0,2 \text{ mm}^2$ ) на доламі складно, під час підростання тріщини завдовжки приблизно 1 mm після близько 14 тис. циклів навантаження установку зупиняли. Після короткої витримки приблизно 600 s експеримент знову продовжували. У результаті зупинки установки в околі вершини тріщини напруження релаксували, що призвело до гальмування стабільного росту тріщини, а отже, до припинення безперервного

генерування сигналів АЕ. Від моменту відновлення навантаження впродовж 3,5 тис. циклів жодних АЕ-подій не виявили (ефект Кайзера). Власне це і є інкубаційний період, пов'язаний з накопиченням у локальних об'ємах напруженого металу критичної густини дислокацій, після чого відбувається акт підростання тріщини (утворення нової поверхні) площею  $0,15 \text{ mm}^2$  (на рис. 2с, новоутворену поверхню вказано стрілкою), що супроводжується генеруванням кількох сигналів АЕ (рис. 2е).

Побудували (рис. 3) експериментальну залежність (точки на кривій) площі тріщини від суми амплітуд зареєстрованих сигналів АЕ, згенерованих за втомного руйнування сплаву 1973-T2. На його початковій стадії залежність має пологий характер, ніж за подальшого стабільного росту тріщини. Це зумовлено підвищенням АЕ-активності під час поширення всього фронту тріщини, що свідчить про перехід руйнування з припорогової області до прямолінійної ділянки Періса на КДВР [14]. При цьому швидкість росту втомної тріщини, визначена за КДВР, стрибком змінилась з  $2 \cdot 10^{-9}$  на  $6 \cdot 10^{-9} \text{ m/cycle}$ . Результати експериментів апроксимували експоненціальною залежністю

$$\sum A_i(s) = y_0 + B \cdot \exp(s/t),$$

де  $y_0 = 10,602$ ;  $B = 0,125$ ;  $t = 0,397$  – параметри апроксимації; середнє значення кореляції  $R = 0,994$ .

**Алгоритм методики акустико-емісійного діагностування елементів конструкцій, виготовлених з АС.** Ця методика полягає ось у чому. Шляхом триангуляції локалізуємо місце руйнування (джерело АЕ). Аналізуємо динаміку генерування АЕ (за амплітудою сигналу та швидкістю рахунку), за якою визначаємо стадію втомного руйнування. Порівнюємо отримані результати з базою цих сигналів, одержаних в лабораторних умовах. За кривими залежності площі втомної тріщини від суми амплітуд зареєстрованих сигналів АЕ оцінюємо площу новоутвореного дефекту. З аналізу амплітудно-частотних характеристик зареєстрованих сигналів АЕ визначаємо тип руйнування і приймаємо рішення про подальшу експлуатацію об'єкта контролю. Запропонований алгоритм дає можливість діагностувати стан матеріалу (виробу) за кількісними показниками для вказаного конструкційного елемента.

## ВИСНОВКИ

Методом АЕ можна ефективно визначити момент зародження та досліджувати динаміку поширення втомного руйнування високоміцного алюмінієвого сплаву марки 1973-T2. Виявлено, що в момент переходу від зародження до стабільного поширення втомної макротріщини відбувається різкий стрибок АЕ-активності. Застосовуючи методику АЕ-діагностування стану елементів конструкцій зі сплаву 1973-T2, можна під час експлуатації оперативно приймати рішення про їх залишковий ресурс.

*РЕЗЮМЕ.* Описана методика діагностування зародження і стабільного розповсюдження усталостного руйнування алюмінієвого сплаву системи Al-Zn-Mg-Cu. В її основі – особливості генерування акустичної емісії (АЕ) при зародженні і рості усталостних тріщин в алюмінієвому сплаві марки 1973-T2. Виявлено, що характер излу-

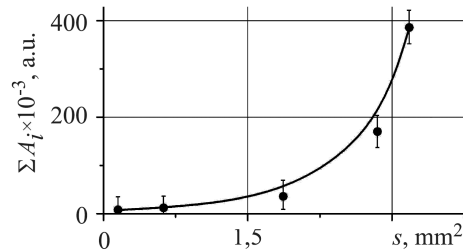


Рис. 3. Залежність площі тріщини від суми амплітуд зареєстрованих сигналів АЕ за втомного руйнування сплаву 1973-T2.

Fig. 3. Dependence of the crack area on the sum of the acoustic emission signals amplitudes of 1973-T2 alloy fatigue fracture.

чення АЭ зависит от микроструктуры и механических свойств сплава, а площадь вновь образованных дефектов пропорциональна сумме амплитуд зарегистрированных сигналов. Установлено, что переход от стадии зарождения к стабильному распространению усталостного разрушения сопровождается резким скачком АЭ-активности.

*SUMMARY.* The method for diagnosing the initiation and stable propagation of fatigue fracture of the Al–Zn–Mg–Cu aluminum alloy has been described. The method is based on the generation features of acoustic emission (AE) during fatigue cracks initiation and growth in 1973-T2 aluminum alloy. It is shown that the acoustic emission radiation character directly depends on the alloy microstructure and its mechanical properties. The initiated defect area is proportional to the amplitude of the registered signals sum. An abrupt rise in the AE-activity is caused by a transition from the initiation stage to the fatigue fracture stable growth.

1. *Acoustic emission during fatigue crack propagation in SiC particle reinforced Al matrix composites / A. Niklas, L. Froyen, M. Wevers, L. Delaey // Metallurgical and Materials Transactions: A. – 1995. – 26, № 12. – P. 3183–3189.*
2. *Weatherly G., Titchmarsh J. M., and Scruby C. B. Acoustic emission monitoring of fatigue in 7010 aluminium alloys // Mat. Sci. and Techn. – 1986. – 2, № 4. – P. 374–385.*
3. *Gong Z., DuQuesnay D. L., and McBride S. L. Measurement and interpretation of fatigue crack growth in 7075 aluminum alloy using acoustic emission monitoring // J. Title. – 1998. – 26, № 6. – P. 567–574.*
4. *Guided wave acoustic emission from fatigue crack growth in aluminium plate / C. K. Lee, J. J. Scholey, P. D. Wilcox, M. R. Wisnom, Michael I. Friswell, B. W. Drinkwater / Adv. Mat. Research. – 2006. – 13, № 14. – P. 23–28.*
5. *Acoustic emission study of fatigue crack closure of physical short and long cracks for aluminium alloy LY12CZ / H. Chang, E. H. Han, J. Q. Wang, W. Ke // Int. J. of Fatigue. – 2009. – 31. – P. 403–407.*
6. *Baram J. and Rosen M. Prediction of low-cycle fatigue-life by acoustic emission – 2: 7075-T6 aluminum alloy // Eng. Fract. Mech. – 1981. – 15, № 3–4. – P. 487–494.*
7. *McBride S. L., MacLachlan J. W., and Paradis B. P. Acoustic emission and inclusion fracture in 7075 aluminum alloys // J. of Nondestructive Evaluation. – 1981. – 2, № 1. – P. 35–41.*
8. *Скальський В., Лясота І. Застосування явища акустичної емісії для діагностування руйнування зварних з'єднань алюмінієвих сплавів (огляд) // Машинознавство. – 2009. – № 9. – С. 42–47.*
9. *Скальський В. Р., Лясота І. М. Застосування методу акустичної емісії для визначення моменту початку макроруйнування зварних з'єднань алюмінієвого сплаву // Техн. діагностика и неразр. контроль. – 2012. – № 3. – С. 7–12.*
10. *Скальський В., Лясота І. Акустико-емісійне діагностування руйнування зварних з'єднань алюмінієвих сплавів // Тези доп. Дев'ятого міжнар. симп. укр. інженерів-механіків у Львові, 20–22 травня 2009 р. – Львів, 2009. – С. 223–224.*
11. *Скальський В. Р., Лясота І. М., Станкевич О. М. Акустико-емісійне діагностування втомного руйнування алюмінієвого сплаву 1201-T // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – 48, № 5. – С. 110–116.*  
*(Skal's'kyi V. R., Lyasota I. M., and Stankevych O. M. Acoustic-emission diagnostics of the initiation of fatigue fracture of 1201-T aluminum alloy // Materials Science. – 2013. – 48, № 5. – P. 680–686.)*
12. *Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик сопротивления развитию трещины (трещиностойкости) при циклическом нагружении. – Львов: Гос. комитет стандартов СССР, 1979. – 116 с.*
13. *Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: наук.-техн. посіб.: у 3-х т. – К.: Наук. думка, 2009. – Т. 3: Засоби та застосування методу акустичної емісії. – 328 с.*
14. *Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1990. – Т. 4.: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин, Н. А. Махутов, М. М. Стадник. – 680 с.*

*Одержано 17.02.2015*