

УДК 621.791.05:620.179.17

АКУСТИКО-ЕМІСІЙНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ ЗАРОДЖЕННЯ ВТОМНОГО РУЙНУВАННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ 1201-Т

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, І. М. ЛЯСОТА, О. М. СТАНКЕВИЧ

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

Розглянуто особливості генерування акустичної емісії за втомного руйнування термічно зміцненого алюмінієвого сплаву марки 1201-Т. Металографічними та фрактографічними дослідженнями, а також аналізом типових сигналів встановлено, що сплав руйнується за крихко-в'язким механізмом. Характер випромінювання акустичної емісії залежить від його мікроструктури та механічних характеристик, а площа утвореного дефекту пропорційна сумі амплітуд зареєстрованих сигналів. Перехід від зародження до стабільного поширення втомної тріщини супроводжується різким стрибком АЕ-активності.

Ключові слова: *алюмінієвий сплав, акустична емісія, мікроструктура, мікрофрактограма, вейвлет-перетворення.*

Сучасний розвиток промисловості України стимулює збільшення об'ємів випуску алюмінію і його високоміцних сплавів, оскільки завдяки комплексу фізико-механічних, корозійних і технологічних властивостей їх успішно використовують практично в усіх галузях науки і техніки. Під час експлуатації під впливом різних чинників, зокрема і змінного навантаження, в елементах конструкцій з алюмінієвих сплавів (АС) часто зароджується мікро- та макроруйнування. Досить ефективно поширення тріщин виявляє метод акустичної емісії (АЕ) [1]. Проте для визначення втомної міцності АС його застосовували мало [2]. Тому для якісного АЕ-діагностування стану елементів конструкцій з АС важливо знати АЕ-активність і особливості сигналів під час зародження і розвитку у них процесів втомного руйнування.

Стан проблеми. Відомо, [3] що довжина втомної тріщини на ранній стадії зародження прямо пропорційна сумі амплітуд зареєстрованих сигналів АЕ (САЕ). Проте подальше її підростання супроводжується стрибкоподібною зміною АЕ-активності [4–6]. Встановлено [6], що за багатоциклового втомного руйнування сплаву на основі кобальту та хрому залежність суми амплітуд САЕ від кількості циклів навантаження змінюється “східчасто”. Автори стверджують, що періодичне різке підвищення активності АЕ свідчить про стрибкоподібне підростання макротріщини, а між стрибками під час т. зв. “інкубаційного” періоду (утворення пластичної зони на вістрі тріщини) генеруються САЕ малих амплітуд.

За допомогою АЕ-методу досліджено [7, 8] поширення втомних тріщин в АС марки 7075-Т6 та легованій сталі. Встановлено кореляційний зв'язок між підростанням макротріщини, коефіцієнтом інтенсивності напружень (КІН) та параметрами САЕ, а також між сумарним рахунком САЕ та енергією, що виділяється під час поширення тріщини за один цикл навантаження. Показано [8], що метод АЕ виявляє зародження мікроруйнування вже у припороговій області кінетичної діаграми втоми за швидкостей менше 10^{-6} m/cycle.

Ідентифіковано [9, 10] джерела АЕ під час втоми АС. За спектральними характеристиками САЕ та результатами фрактографічних досліджень встановлено,

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

що основним джерелом генерування АЕ є руйнування крихких інтерметалідних включень. Частка таких САЕ становить 80% від усіх зареєстрованих, а їх амплітуда та інтенсивність залежать від форми, розміру і просторового розміщення включення.

Нижче вивчено особливості генерування сигналів АЕ за багатоциклового змінного навантаження зразків з АС марки 1201-Т та побудовано залежності між площею утвореної втомної тріщини і параметрами зареєстрованих сигналів АЕ.

Методика експериментів. Досліджували зародження втомного руйнування за схемою консольного згину призматичних балкових зразків розмірами $10 \times 20 \times 160$ mm з термічно зміцненого сплаву 1201-Т (рис. 1).

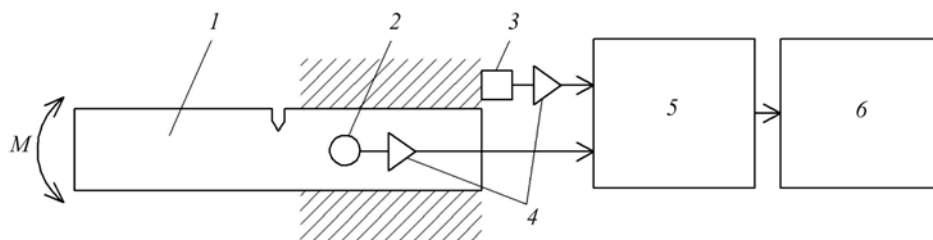


Рис. 1. Схема експериментальних досліджень: 1 – зразок; 2 – первинний перетворювач АЕ; 3 – паралельний АЕ-канал; 4 – підсилювачі; 5 – АЕ-система SKOP-8; 6 – персональний комп'ютер.

Fig. 1. The experimental investigation scheme: 1 – specimen; 2 – sensor; 3 – parallel AE-channel; 4 – amplifiers; 5 – AE-system SKOP-8; 6 – personal computer.

Зразки виготовляли, дотримуючись норм і регламентованих характерних співвідношень геометричних розмірів [11]. Глибина концентратора напружень $h = 4$ mm, а радіус закруглення його вершини $\rho = 0,2 \dots 0,3$ mm. Навантаження змінювали за синусоїдальним циклом з частотою $f = 16$ Hz. Амплітуда деформування зразка на краю важеля установки $A = 0,8 \dots 0,9$ mm. Коефіцієнт асиметрії циклу $R = 0,26$.

Зразок навантажували моментом $M = 8 \dots 24$ N·m. Сигнали АЕ, згенеровані внаслідок втомного руйнування, сприймав первинний перетворювач (ПАЕ), встановлений на боковій поверхні зразка. Для селекції корисних сигналів від завад використовували паралельний АЕ-канал [1]. Електричні сигнали АЕ підсилювали попередніми підсилювачами, після чого реєстрували багатоканальною вимірювальною АЕ-системою SKOP-8 і обробляли на персональному комп'ютері. Щоб зменшити вплив хибних САЕ від тертя у місці дотикання поверхонь балкового зразка з захопами установки, на них встановлювали антифрикційні прокладки. Для відбору САЕ використовували ПАЕ з робочою смугою частот $0,2 \dots 0,6$ MHz. Перед початком кожного експерименту вимірювальні канали тарували [1]. Для АЕ-системи SKOP-8 встановлювали: кількість вимірювальних каналів для реєстрування САЕ (підсилення кожного 40 dB) – 4; тривалість вибірки (0,25 ms); період дискретизації аналогового сигналу (0,25 μ s); частоту зрізу фільтра низьких (0,7 MHz) та високих (0,2 MHz) частот; поріг дискримінації (28%); рівень власних шумів, приведені до входу попереднього підсилювача (7 μ V). Коефіцієнт підсилення попередніх підсилювачів становив 34 dB.

Кінетика поширення втомної тріщини. За результатами експериментальних досліджень побудовано (рис. 2) кінетичну діаграму втомного руйнування (КДВР) сплаву 1201-Т. Їй властиве порогове значення розмаху КІН $\Delta K_{th} = 4$ MPa·m^{1/2}, а на початку прямолінійної ділянки Періса, де швидкість поширення тріщини $da/dN = 1 \cdot 10^{-8}$ m/cycle, $\Delta K_{1-2} = 5$ MPa·m^{1/2}. Отримані результати збігаються з літературними [12].

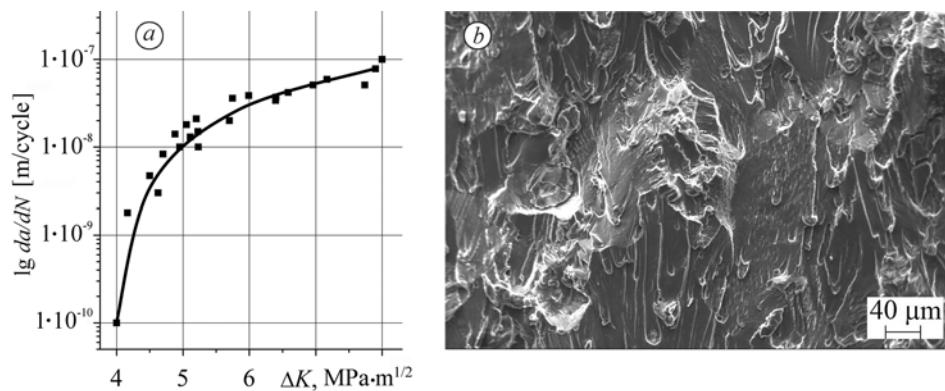


Рис. 2. КДВР (а) та мікрофрактограма втомного зламу (b) сплаву 1201-Т ($\Delta K = 5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Fig. 2. The 1201-T alloy fatigue fracture kinetic diagram (a) and micrograph of fatigue fracture surface (b) ($\Delta K = 5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Сплав 1201-Т відноситься до системи легування Al–Cu–Mn, гартований та штучно зістарений. Марганець у твердому розчині та його інтерметаліди вирізняють його з-поміж інших дюралюмінів, зокрема від сплаву Д16-Т. Його мікроструктура – це зерна α -твердого розчину міді і мангану в алюмінії, що зміцнені включеннями вторинних фаз Al_2Cu та $\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}$, рівномірно розподіленими по зерну та вздовж його меж у вигляді крупних пластівців [13]. Така мікроструктура впливає на динаміку втомного руйнування сплаву. Тут вершина тріщини проходить здебільш уздовж локальних скупчень крихких інтерметалідних фаз та меж зерен. Втомний злам (рис. 2b) складається з крихких борозенок з великою кількістю квазівідкольних фасеток, що свідчить про крихкий механізм руйнування.

Особливості генерування АЕ за втомного руйнування сплаву. Під час зародження та розвитку тріщин за циклічного навантаження зразків спостерігали кінетику генерування АЕ, а також досліджували особливості записаних САЕ. Для вимірювання площі пророщених тріщин після випроб зразки руйнували з великою швидкістю на маятниковому копрі і вивчали отримані злами на оптичному мікроскопі.

Відомо [14], що втомне руйнування, згідно з КДВР, відбувається у чотири етапи: інкубаційний (накопичення критичної густини дислокацій у локальних об'ємах напруженого металу); накопичення пошкод у межах окремих зерен; стабільний ріст тріщини; лавиноподібне руйнування.

Ранні стадії руйнування сплаву супроводжуються незначною кількістю САЕ, що випромінюють окремі групи. На рис. 3a подано суму амплітуд огинаючої САЕ у кожній i -ій вибірці A_i та суму амплітуд всіх зареєстрованих САЕ за час експерименту ΣA_i , а також проілюстровано розвиток втомної макротріщини на стадії, коли пошкоди накопичуються в околі окремих зерен (припорогова область КДВР, рис. 2a). Як бачимо, кількість АЕ-подій у кожній вибірці зростає зі збільшенням пошкод. Важливо відмітити також, що кількість т. зв. “пакетів” САЕ збігається з кількістю квазівідкольних областей поширення тріщини на зламі зразка (рис. 3a) і у нашому випадку дорівнює 6.

Така динаміка генерування АЕ триває до тих пір, поки береги тріщини не зрівняються з бічними поверхнями зразка. Після цього різко зростають амплітуда та кількість САЕ, що свідчить про перехід до третьої стадії втомного руйнування – стабільного поширення фронту макротріщини (рис. 3b), що відповідає початку прямолінійної ділянки Періса на КДВР (див. рис. 2a).

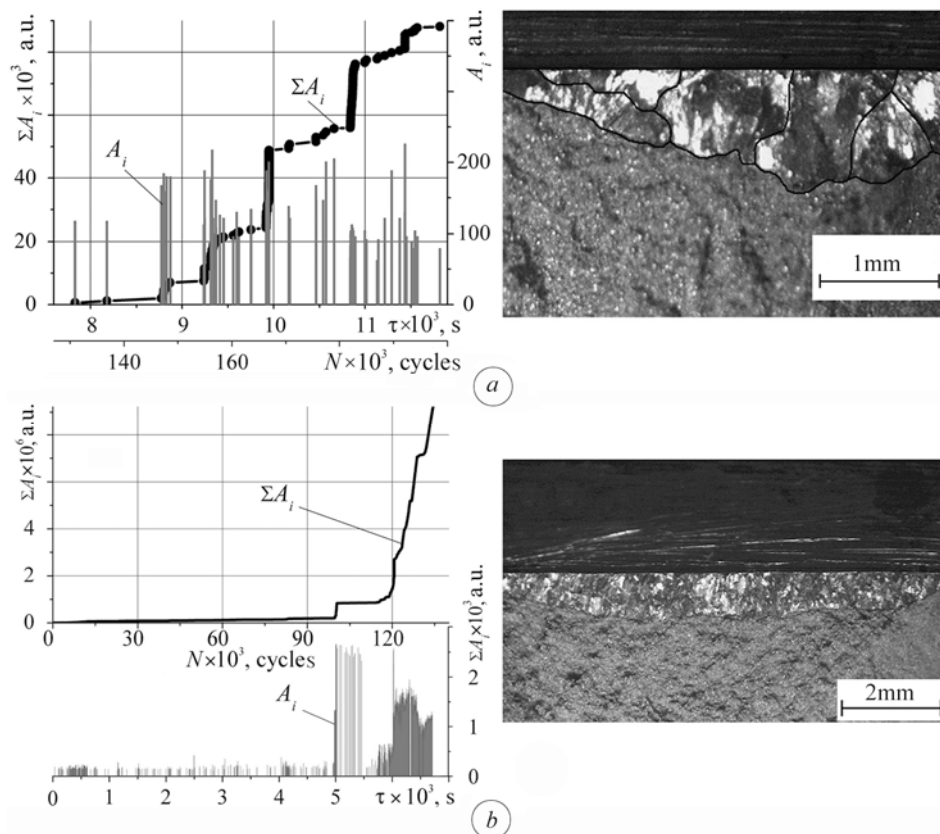


Рис. 3. Зміна суми амплітуд САЕ у вибірці A_i та суми амплітуд всіх зареєстрованих сигналів за час експерименту, а також поширення втомної макротріщини у сплаві 1201-Т на ранній стадії зародження (а) та стадії стабільного розвитку (б).

Fig. 3. Temporal variation of acoustic emission signals amplitude sum in sampling A_i and all recorded signals during experiment and fatigue macrocrack propagation in 1201-T alloy at the early stage of its initiation (a) and at the stage of its stable propagation (b).

Проаналізуємо коротко результати експериментів. Багато дослідників намагались встановити кореляцію між параметрами САЕ і геометрією тріщини. Виявлено [15, 16] співвідношення між сумарним рахунком САЕ та площею новоутвореної макротріщини, а кількісну інформацію про кожне дискретне її підростання запропоновано отримувати за амплітудними показниками САЕ. Зазначено [16], що кожен імпульс АЕ відповідає стрибкові фронту тріщини, а амплітуди САЕ лінійно корелюють із енергією, яка супроводжує її ріст. Стверджують [15], що амплітуда САЕ пропорційна площі мікротріщини, а квадрат суми амплітуд імпульсів АЕ, які супроводжують стрибкоподібний ріст макротріщини, пропорційний її площі.

Подібний ефект спостерігаємо і за втоми АС. Встановлено (рис. 4) експериментальну залежність площі втомних тріщин від суми амплітуд зареєстрованих САЕ, генерованих їх розвитком. На початкових стадіях руйнування ця залежність має пологий характер, а далі сума амплітуд різко зростає, що, очевидно, свідчить про перехід руйнування з припорогової області до ділянки Періса на КДВР.

Результати експериментів апроксимували степеневою залежністю

$$\Sigma A_i(s) = A + B \cdot s^6, \quad (1)$$

де $A = 156,247$, $B = 0,862$ – параметри апроксимації, а середнє значення коефіцієнта кореляції $r = 0,994$.

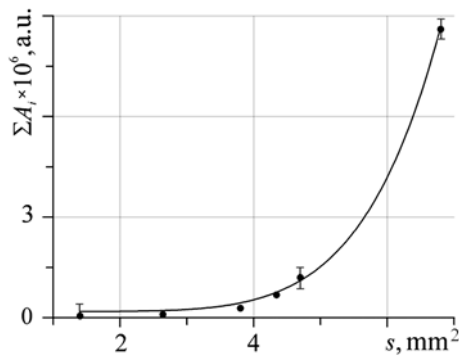


Рис. 4. Залежність суми амплітуд зареєстрованих САЕ від площі тріщини за втомного руйнування сплаву 1201-Г.

Fig. 4. Dependence of the recorded acoustic emission signals amplitudes sum on crack area for 1201-T alloy fatigue fracture.

Особливості САЕ, генерованих втомним руйнуванням сплаву. Важливу інформацію про особливості динаміки процесів руйнування у твердих тілах можна отримати, скориставшись методами вейвлет-перетворення (ВП) САЕ [17]. Запропоновано [18, 19] відповідний критерій кількісної оцінки руйнування конструкційних матеріалів за параметрами неперервного ВП. Для дослідження особливостей САЕ використано програму AGU-Vallen Wavelet [20], де для побудови неперервного ВП сигналів АЕ за материнський вибрано вейвлет Габо́ра [17], який дає можливість виділяти локальні особливості сигналів АЕ та забезпечує їх частотно-часове подання.

Враховуючи властивості вейвлет-коефіцієнтів неперервного ВП САЕ та результати теоретичних досліджень зміни амплітудно-частотних характеристик пружних хвиль АЕ під час різних процесів руйнування у твердих тілах, за кількісну характеристику сигналів АЕ для їх ідентифікування обрали критеріальний показник [18]

$$\kappa = \frac{WT_{\max} \cdot \Delta f_0}{\Delta f}, \quad (2)$$

де WT_{\max} – максимальне значення вейвлет-коефіцієнта в події АЕ у певний момент часу; Δf – ширина смуги спектра частот, що відповідає значенню WT_{\max} у події АЕ, у координатах $WT-f$; Δf_0 – ширина робочої смуги АЕ-тракту, яка залежить від робочої смуги частот первинного перетворювача (тут 0,2...0,6 МГц). Залежно від значення κ тип макроруйнування конструкційних матеріалів розділено на в'язке ($\kappa < 0,2$), в'язко-крихке ($0,2 \leq \kappa < 0,3$) та крихке ($\kappa \geq 0,3$). З подальшим збільшенням значення κ схильність до крихкого руйнування матеріалу зростає [18].

Сигнали АЕ, зареєстровані під час руйнування, опрацьовували у такій послідовності. Для кожного сигналу будували неперервне ВП. Встановлювали максимальне значення вейвлет-коефіцієнта WT_{\max} у події АЕ. Будували проекцію неперервного ВП на площину “вейвлет-коефіцієнт WT – частота f ” у момент часу досягнення значення WT_{\max} . Визначали ширину смуги частот Δf (МГц), яка відповідає значенню WT_{\max} . За співвідношенням (2) розраховували критеріальний показник κ .

Під час АЕ-випробувань сплаву найчастіше реєстрували САЕ з амплітудами на виході з ПАЕ $A = 0,4...0,5$ мВ і показником $\kappa = 0,25...0,35$ (рис. 5а). Характерною особливістю усіх сигналів є значна їх тривалість у часі ($t = 20...40$ мс) проти генерованих руйнуванням інших матеріалів [19], що обумовлює властиву АС форму вейвлет-спектрів (рис. 5б).

Сигнали мають невеликі значення максимальних вейвлет-коефіцієнтів $WT_{\max} = 0,06...0,07$ (рис. 5б) та смуги частот $\Delta f = 100...110$ кГц. Згідно з відомою

методикою [18] такі САЕ з $\kappa = 0,3$ відповідають крихко-в'язкому руйнуванню термічно зміцненого твердого розчину міді та марганцю в алюмінії.

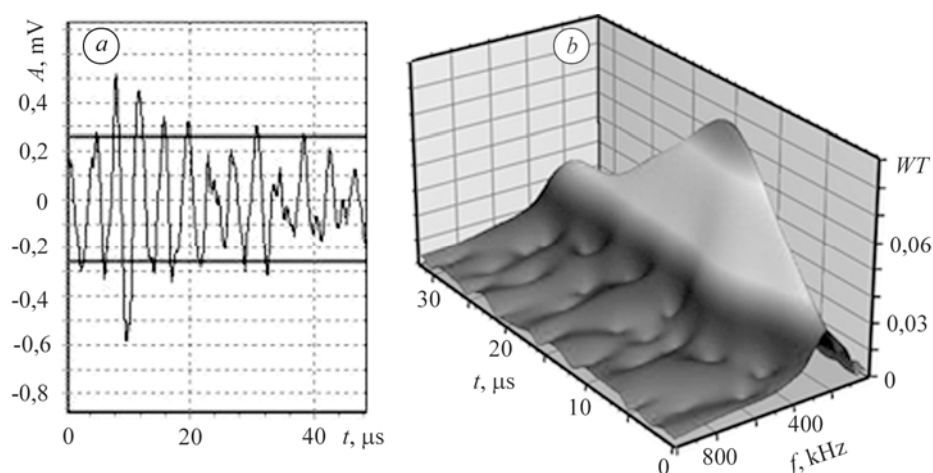


Рис. 5. Хвильове відображення (а) та неперервне вейвлет-перетворення (b) САЕ, генерованих втомним руйнуванням зразків зі сплаву 1201-Т.

Fig. 5. The waveform (a) and continuous wavelet transform (b) of the acoustic emission signals generated by 1201-T alloy specimens fatigue fracture.

ВИСНОВКИ

Метод АЕ дає змогу ефективно визначати момент зародження та досліджувати динаміку поширення втомного руйнування в алюмінієвих сплавах. Характерною особливістю генерування АЕ на стадії зародження втомного руйнування є те, що сигнали, які відповідають утворенню нових поверхонь біля фронту тріщини, випромінюють певні групи, а площа тріщини пропорційна сумі амплітуд зареєстрованих сигналів. Переходу від зародження до стабільного поширення руйнування властивий різкий стрибок амплітуд та кількості САЕ. З аналізу зареєстрованих хвильових відображень САЕ та неперервних їх вейвлет-перетворень встановлено, що крихко-в'язке руйнування сплаву супроводжується сигналами, для яких критерій κ коливається в межах $0,3 \dots 0,35$.

РЕЗЮМЕ. Рассмотрены особенности генерирования акустической эмиссии при усталостном разрушении термически упрочненного алюминиевого сплава марки 1201-Т. Металлографическими и фраттографическими исследованиями, а также анализом типичных сигналов установлено, что механизм разрушения сплава хрупко-вязкий. Характер излучения акустической эмиссии напрямую зависит от его микроструктуры и механических характеристик, а площадь образованного дефекта пропорциональна сумме амплитуд зарегистрированных сигналов. Переход от зарождения к стабильному распространению усталостной трещины сопровождается резким скачком АЭ-активности.

SUMMARY. Acoustic emission generation features caused by fatigue fracture of thermo-strengthened 1201-T aluminum alloy were considered. Based on the metallographic and fractographic investigations and relevant signals analysis the alloy brittle-ductile fracture mechanism was found out. The acoustic emission radiation character directly depended on the alloy microstructure and its mechanical properties. The initiated defect area was in proportional to the amplitude sum of registered signals. An abrupt rise of AE-activity was caused by crack initiation transfer to the fatigue crack stable growth.

1. Скальський В. Р., Коваль П. М. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. – Львів: СПОЛЮМ, 2005. – 396 с.
2. Duke J. C. and Green R. E. Simultaneous monitoring of acoustic emission and ultrasonic attenuation during fatigue of 7075 aluminium // Int. J. Fatigue. – 1979. – 1. – P. 125–132.

3. *Roberts T. M. and Talebzadeh M.* Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation // *J. Constructional Steel Research.* – 2003. – **59**. – P. 695–712.
4. *Berkovits A. and Fang D.* Study of fatigue crack characteristics by acoustic emission // *Engng. Fract. Mech.* – 1995. – **51**. – P. 401–409.
5. *Fang D. and Berkovits A.* Fatigue Design Model Based on Damage Mechanisms Revealed by Acoustic Emission Measurements // *Trans. of ASME.* – 1995. – **117**. – P. 200–208.
6. *Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research* / M. Huang, L. Jiang, P. K. Liaw et al. // *JOM J. Minerals, Metals and Materials Soc.* – 1998. – **50**, № 11. – P. 1–12.
7. *Harris D. O. and Dunegan H. L.* Continuous monitoring of fatigue-crack growth by acoustic-emission techniques // *Exp. Mech.* – 1974. – **14**, № 2. – P. 71–81.
8. *Lindley T. C., Palmer I. G., and Richards C. E.* Acoustic emission monitoring of fatigue crack growth // *Mat. Sci. and Engng.* – 1978. – **32**. – P. 1–15.
9. *Scruby C. B., Baldwin G. R., and Stacey K. A.* Characterization of fatigue crack extension by quantitative acoustic emission // *Int. J. of Fract.* – 1985. – **28**, № 4. – P. 201–222.
10. *Fatigue crack monitoring of riveted aluminum strap joints by Lamb wave analysis and acoustic emission measurement techniques* / S. Grondel, C. Delebarre, J. Assaad et. al. // *NDT & E Int.* – 2002. – **35**. – P. 137–146.
11. *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. – 115 с.
12. *Miller M. S. and Gallagher J. P.* An analysis of several fatigue crack growth rate description // *Fatigue Crack Growth Measurement and Data Analysis.* – Philadelphia: Amer. Soc. Test. Mater, 1981. – P. 205–251.
13. *Skalsky V. R. and Lyasota I. M.* Estimation of the heat-affected zone for the electron-beam welding of plates // *Mat. Sci.* – 2010. – **46**, № 1. – P. 115–123.
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 и др. – 680 с.
15. *Gerberich W. W., Alteridge D. G., and Lessar J. E.* Acoustic emission investigation of microscopic ductile fracture // *Met. Trans.* – 1975. – **A6**, № 2. – P. 797–801.
16. *Radon I. C. and Pollock A. A.* Acoustic emission and energy transfer during crack propagation // *Engng. Fract. Mech.* – 1972. – **4**, № 2. – P. 295–310.
17. *Астафьева Н. М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физ. наук.* – 1996. – **166**, № 11. – С. 1145–1170.
18. *Скальський В. Р., Буйло С. И., Станкевич Е. М.* Критерий оценки хрупкого разрушения стекла по сигналам акустической эмиссии // *Дефектоскопия.* – 2012. – № 5. – С. 26–34.
19. *Скальський В. Р., Ботвіна Л. Р., Станкевич О. М.* Діагностування механізмів руйнування сталі 38ХНЗМФА за вейвлет-перетворенням сигналів акустичної емісії // *Техн. діагностика и неразр. контроль.* – 2011. – № 3. – С. 12–17.
20. *Vallen Systeme: The Acoustic Emission Company.* – [Virtual Resource]. – Access Mode: URL: <http://www.vallen.de>.

Одержано 08.08.2012