

ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ, РАСХОДУЕМОЙ НА ОБРАЗОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ РАЗРУШЕНИИ МАТЕРИАЛОВ, НА ОСНОВЕ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Учитывая, что применение акустической эмиссии при непрерывном мониторинге эксплуатирующихся конструкций позволяет эффективно решать целый ряд вопросов обеспечения и управления их безопасностью, а использование интернета обеспечивает контроль этого процесса практически из любой внешней точки, все большую актуальность приобретает применение методов оценки состояния материалов на основе данных акустической эмиссии. Данные, полученные как при мониторинге реальных конструкций, так и при испытаниях образцов, показывают, что для оценки состояния материалов конструкций может представлять интерес энергия, связанная с деформированием материала и образованием в нем повреждений. Выделение из общей энергии разрушения части, связанной с образованием повреждений, может существенно уточнить расчеты на прочность и оценить состояние материала в каждый момент времени его эксплуатации под нагрузкой. В настоящей работе приведены возможности использования данных акустической эмиссии по выделению этой части энергии и показано, какую часть общей энергии разрушения она составляет и ее связь с накоплением повреждений структуры материала, которые в процессе повреждаемости суммируются и, в конечном счете, приводят к разрушению. Библиогр. 15, рис. 5.

Ключевые слова: прочность материалов, энергия разрушения материалов, диагностика

В последнее время при испытании материалов, оценки их несущей способности все большие надежды возлагают на акустическую эмиссию (АЭ), как на средство достаточно надежной оценки состояния конструкций как при испытаниях, так и при эксплуатации [1–15]. Ранее проведенные исследования показали целесообразность такого подхода [1–3, 10, 13]. Так, применение АЭ при непрерывном мониторинге эксплуатирующихся конструкций позволило решить целый ряд вопросов, связанных с обеспечением и управлением их безопасностью [4, 6–8, 10, 14]. Использование интернета в контролирующей аппаратуре позволило управлять контролем практически из любой внешней точки [7]. Для оценки состояния материалов конструкций существенный интерес представляет энергия, связанная с деформированием материала и образованием в нем повреждений. Вопрос о том, какую часть общей энергии разрушения составляет энергия, связанная с образованием повреждений, является важной частью расчетов на прочность, позволяющих оценить состояние материала в каждый момент времени его эксплуатации под нагрузкой. Ниже приведены возможности использования данных АЭ по выделению этой части энергии и показано, какую часть общей энергии разрушения она составляет и ее связь с накоплением повреждений структуры материала, которые в процессе повреждаемости суммируются и, в конечном счете, приводят к разрушению.

Отметим, что полная работа (энергия), затраченная на разрушение, например, образцов, описывается интегралами по направлению действия силы, производящей работу, и может быть представлена известной формулой:

$$A_o = V_m \int_0^{t_p} P t dt, \quad (1)$$

где A_o – полная работа (энергия) затраченная на разрушение образца, Дж; P – действующая нагрузка, кг; V_m – скорость перемещения захватов разрывной машины, м/с; t – время, с; t_p – время до разрушения образца, с.

Часть этой энергии составляют величины, относящиеся к энергии, возникающей в местах образования повреждений. Если амплитуда АЭ событий измеряется в дБ, то энергия будет:

$$\mathcal{E}_A = P A_c K = U_o P 10^{\frac{A_{дБ}}{20} - 5} K, \text{ Дж}; K = \frac{1}{K_1} = F(f), \text{ м/мВ}$$

$$\mathcal{E}_{\Delta\Sigma} = \sum_{i=1}^N P_i A_{c,i} K = U_o \sum_{i=1}^N P_i 10^{\frac{A_{дБ,i}}{20} - 5} K, \text{ Дж}; \quad (2)$$

$$K = \frac{1}{K_1} = F(f), \text{ м/мВ},$$

где U_o – опорный параметр амплитуды, $U_o = 1 \cdot 10^{-9}$, В; P_i – текущая нагрузка, кг; $A_c, A_{c,i}$ – мгновенное и текущее значения амплитуды события АЭ, дБ; $A_{дБ}, A_{дБ,i}$ – мгновенное и текущее значения амплитуды события АЭ, дБ; K – коэффициент перехода от мВ к перемещениям в м (рис. 1); \mathcal{E}_A – энергия единичного события АЭ, Дж; $\mathcal{E}_{\Delta\Sigma}$ – суммарная

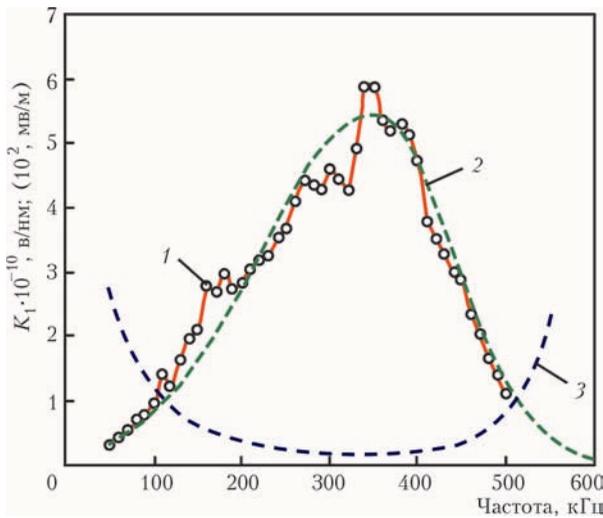


Рис. 1. Принятый в расчетах коэффициент электроакустического преобразования K_1 АЭ датчика с чувствительным элементом ЦТС-19. Представлена экспериментальная кривая 1 на основе работы [4] и аналитическое приближение (пунктирная линия) 2 – прил. K_1 , 3 – прил. $1/K_1$

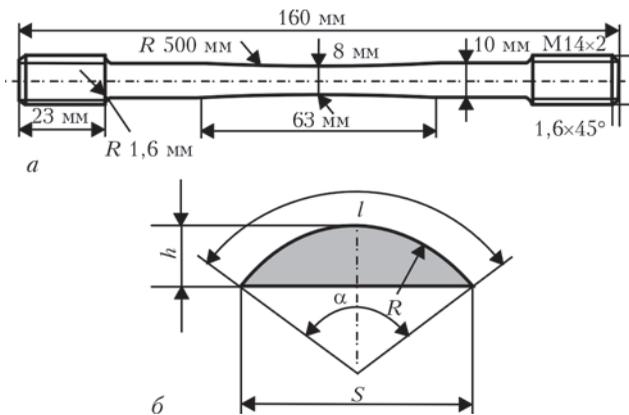


Рис. 2. Чертеж образца, принятого для испытаний (а) и схема к расчету его объема (б)

энергия повреждений, образовавшихся в процессе разрушения, Дж; A_o – общая энергия разрушения образца, Дж:

$$A_o = V_m \int_0^{t_p} Ptdt,$$

где V_m – скорость перемещения захватов разрывной машины, $V_m = 0,0001$ м/с.

Объем испытанного образца (рис. 2) сложной формы с выточкой, образованной окружностью радиусом R , составляет [4]:

$$V = F \int_0^{2\pi} rd\beta = 2\pi rF = \pi rSh, \quad (3)$$

где $F \approx 0,5Sh$ – площадь выточки; β – угловая координата в окружности, образующей цилиндрическую поверхность образца.

Удельная энергия разрушения с учетом приведенных расчетов составляет:

$$\mathcal{E}_{уд} = A_o/V \text{ и } \mathcal{E}_{АЭ,уд} = \mathcal{E}_{АЭ}/V.$$

Рассмотрим этот процесс на примере разрушения образца из стали Х18Н9 (рис. 2). Типичная картина развития разрушения и распределения во времени основных параметров АЭ при растяжении этого образца представлена на рис. 3. Испытания проводили на жесткой разрывной машине, для регистрации АЭ использовали прибор ЕМА-3 с программным обеспечением ЕМА-3.9. Значения используемых параметров АЭ представлены в таблице справа. $S(X)$ – погрешность определения координаты X , мм. Количественные значения нагрузки P и АЭ параметров определяются путем умножения их максимальных величин, указанных в скобках таблицы с правой стороны графика

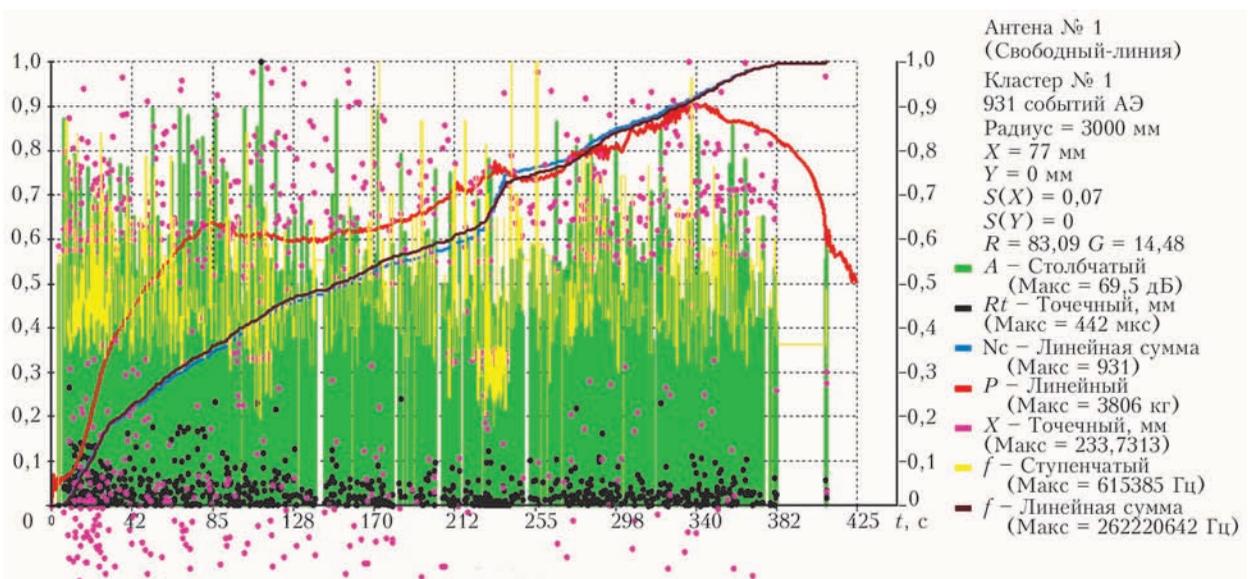


Рис. 3. Распределение во времени параметров АЭ событий, возникших при испытании вплоть до разрушения образца (рис. 2). Представлены АЭ события, участвующие в формировании энергии образующихся повреждений структуры материала образца, в том числе и те, вычисленные координаты которых выходят за его границы в связи с погрешностями в измерении временных задержек (точки розового цвета в нижней части графика)

ка, на значение относительной величины на оси ординат.

Представленные на рис. 3 параметры АЭ означают [5]:

A – амплитуда сигналов в событии АЭ, дБ; Rt – райс тайм (время нарастания сигнала до максимума в событии АЭ), мкс; Nc – общая сумма событий в рассматриваемый момент времени, характеризует число дефектов, возникших к данному моменту времени; P – разрушающая нагрузка, кг; X – координата каждого из событий, возникших в процессе испытания образца, мм; f – частота сигналов АЭ, возникающих при образовании событий, Гц.

Во избежание потери в расчетах энергии АЭ событий, координаты которых, определенные при обработке данных, вышли за пределы контролируемой области в результате погрешностей определения временных задержек, пределы области измерений были расширены в обе стороны граничных размеров образца на величину ± 50 мм, и, кроме этого, увеличена максимально допустимая задержка по времени. Образовавшаяся после такой коррекции картина представлена розовыми точками, вышедшими снизу за пределы графика на рис. 3 – координатами X событий АЭ, в силу погрешности якобы пришедших извне образца, но физически относящихся к реально происходящим в нем процессам.

В результате испытаний было зафиксировано 931 событие АЭ за время 425 с.¹

График на рис. 3 наглядно представляет всю картину АЭ испытаний образца. Виден существенный разброс координат АЭ, показывающий, что события АЭ, а значит и повреждения в материале, возникают по всей его протяженности. При этом каждое событие характеризуется вполне определенной амплитудой, временем нарастания сигнала и его частотой. График также показывает (желтая кривая), что датчики работают практически во всем диапазоне своих возможностей по частоте – от 74,666 до 615,385 кГц. Таким образом, с применением аппаратуры ЕМА-3.9 получена вся необходимая информация для непрерывного анализа и расчета энергии, затраченной на образование повреждений.

Расчет энергии АЭ событий по формулам (2) предусматривает перевод значений амплитуд из размерности в дБ в вольты (В). Далее используется коэффициент K для перехода к перемещениям в каждой конкретной точке возникновения события АЭ. Следует отметить, что значения коэффициента K_1 получены Хабаровским филиалом института ВНИИФТРИ Госстандарта СССР

специально для датчиков АЭ типа ДАЭ 002Р, разработанных для аппаратуры серии ЕМА. В нашем случае величина коэффициента $K = 1/K_1$ определялась с учетом применения для измерений более чувствительных АЭ датчиков². При этом учитывались результаты тестирования, полученные ВНИИФТРИ. Принятые для расчетов данные по электроакустической связи представлены на графике рис. 1. Результаты расчетов приведены на рис. 4. Полная энергия, затраченная на образование повреждений, будет определяться как сумма

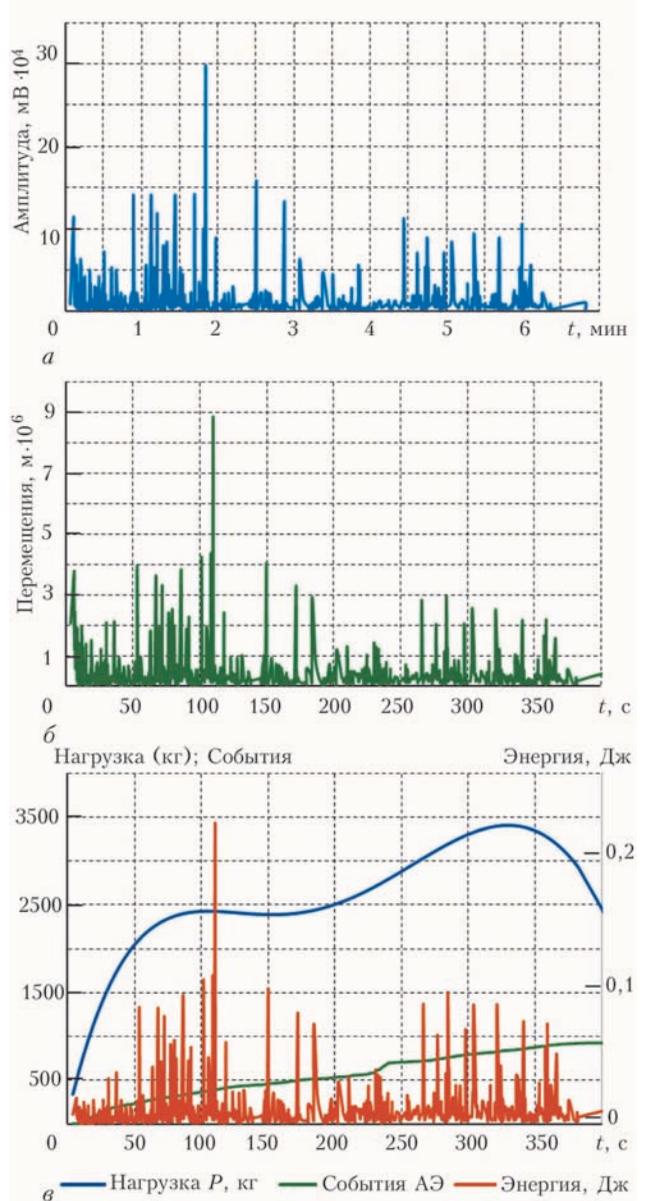


Рис. 4. Распределение амплитуд АЭ событий во времени для каждого события, (а); перемещения материала в местах возникшей АЭ, (б); нагрузка P , суммарное количество зарегистрированных событий АЭ и энергия, затраченная на образование повреждений в каждой конкретной точке возникновения события (в)

¹ При проведении испытаний аппаратура ЕМА-3.9 была настроена на фиксацию всех сигналов АЭ, образующих событие, в предположении, что все построенные события АЭ связаны с образованием повреждений.

² Датчики новой конструкции разработаны М.А. Яременко и Л.Ф. Харченко.

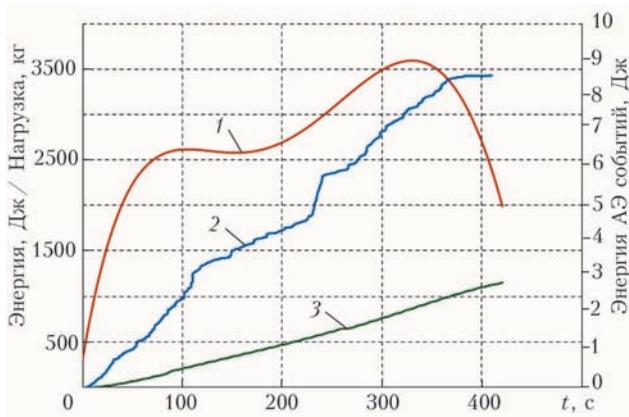


Рис. 5. Накопление с течением времени энергии в образце: 1 – нагрузка; 2 – энергия импульсов АЭ; 3 – общая энергия в образце при его разрушении.

отдельных составляющих. Суммирование энергии по всем событиям дает величину 8,6 Дж. Общая энергия, связанная с разрушением образца, подсчитывается по формуле (1).

$$A_o = V_m \int_0^{t_p} Ptdt = 1153 \text{ Дж.}$$

Таким образом, расчеты показывают, что энергия, затраченная на образование повреждений, составляет примерно 0,74% от общей энергии разрушения. Как видим, величина энергии, связанная с образованием повреждений в материалах при разрушении незначительна. Однако, учитывая, что эта величина достаточно точно и надежно фиксируется и распознается методом АЭ и, в частности, специализированной аппаратурой ЕМА-3.9, можно считать вполне допустимым ее использование при определении кинетики накопления повреждений и, связанного с ними, состояния материала. Накопление с течением времени энергии в образце при его разрушении, подсчитанное по формуле (1), вместе с ростом нагрузки и энергии от событий АЭ представлено на рис. 5.

Для определения общей удельной энергии разрушения образца и энергии, связанной с образованием повреждений, подсчитаем объем разрушаемого образца. Учитывая незначительный при принятых размерах образца объем, связанный с выточкой (примерно 6%) подсчитаем объем образца без ее учета: $V \approx \pi d^2/4l$. Здесь d – диаметр образца, см; l – его длина, см. Тогда $V \approx 12,56 \text{ см}^3$. Удельные энергии разрушения $\mathcal{E}_{уд}$ и образования повреждений $\mathcal{E}_{А,уд}$ будут составлять, соответственно: $\mathcal{E}_{уд} \approx 92 \text{ Дж/см}^3$, $\mathcal{E}_{А,уд} \approx 0,7 \text{ Дж/см}^3$.

Выводы

1. На основе данных, полученных методом АЭ, может быть рассчитана величина энергии, затрачиваемой на образование повреждений, возникающих в процессе разрушения материалов.

2. Величина энергии, затрачиваемой на образование повреждений рассчитывалась с использованием комплекса специализированных параметризованных АЭ, которые реализованы в программном обеспечении аппаратуры ЕМА-3.9. Чувствительности АЭ аппаратуры вполне достаточно для определения величины этой энергии. При этом, энергия может быть определена в процессе деформирования материала или на любом выделенном этапе.

3. Часть общей энергии, затрачиваемой на образование повреждений, незначительна и суммарно составляет для рассмотренного случая испытаний примерно 8,6 Дж.

4. Проведенные исследования показывают, что при достигнутой чувствительности контролирующей аппаратуры и наличии специального программного обеспечения можно достаточно надежно с использованием метода АЭ оценивать энергию, затрачиваемую на образование повреждений материалов при их разрушении. Последнее позволяет оценивать остаточный ресурс материала.

Список литературы

1. Бриджмен Н. (1955) *Исследование больших пластических деформаций и разрыва*. Москва, Изд-во иностр. лит.
2. Волков В. А. (1980) *Основные результаты базового эксперимента по механике разрушения на низкопрочной стали*. Проблемы разрушения металлов. Москва, Знание.
3. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. (1988) *Экспресс-метод оценки трещиностойкости пластичных материалов*. Киев, АН УССР, препринт.
4. Недосека А. Я. (2008) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*. Патон Б. Е. (ред.) Киев, Индпром.
5. Недосека А. Я., Недосека С. А., Маркашова Л. И., Алексеев Т. А. (2018) Исследование методом акустической эмиссии кинетики накопления повреждений при разрушении материалов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **3**, 3–10.
6. Недосека С. А. (1992) Метод акустической эмиссии как эффективное средство для исследования кинетики разрушения материалов на стадиях зарождения и развития трещин (Обзор). *Там же*, **3**, 26–34.
7. Недосека С. А. (1998) Причины возникновения повреждений и остаточный ресурс материала аварийного участка трубопровода Дашава-Киев. *Там же*, **1**, 38–50.
8. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я. и др. (2014) О применении АЭ технологии при непрерывном мониторинге трубопроводов энергетических комплексов, работающих при высокой температуре. *Там же*, **3**, 7–14.
9. Скальський В. Р. (2003) Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії. *Там же*, **4**, 29–36.
10. Чаусов Н. Г., Недосека С. А., Лебедев А. А. (1993) Исследование кинетики разрушения сталей на заключительных стадиях деформирования методом акустической эмиссии. *Проблемы прочности*, **12**, 14–21.
11. Stone D. E., Dingwall P. F. (1977) Acoustic Emission parameters and their interpretation. *NDT international*, **10**, 51–56.
12. Nakamura Yosio, Veach C. L., McCauley B. O. (1971) Amplitude distribution of acoustic emission signals. *A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials*. Bal Harbour, 7–8 December, pp. 164–186.
13. Tetelman A. S., Chow R. (1971) Acoustic emission testing and micro cracking processes. *A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials*. Bal Harbour, 7–8 December, pp. 30–40.

14. Beveridge A., Ham B., Rosenbrock L., Kriesl N. (2009) Acoustic emission monitoring of high energy piping. *IIV Annual assembly and international conference, 12–18 July 2009*. XI-926–09, Singapore.
15. (2015) 68-я ежегодная ассамблея международного института сварки IIW-2015. Хельсинки, Финляндия, *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 58

References

1. Bridgeman, N. (1955) *Investigation of large plastic deformations and rupture*. Moscow, Inostr. Lit-ra [in Russian].
2. Volkov, V.A. (1980) *Main results of basic experiment on fracture mechanics on low-strength steel. Problems of metal fracture*. Moscow, Znanie [in Russian].
3. Lebedev, A.A., Chausov, N.G. (1988) *Express-method of evaluation of crack resistance of ductile materials*. Kiev, AN Ukr.SSR [in Russian].
4. Nedoseka, A.Ya. (2018) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures*. Ed. by B.E. Paton. Kiev, Indprom [in Russian].
5. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Markashova, L.I., Alekseenko, T.A. (2018) Investigation by acoustic emission method of the kinetics of damage accumulation at fracture of materials. *Tekh. Diagnost. i Nerazruch. Kontrol*, **3**, 3-13 [in Russian].
6. Nedoseka, S.A. (1992) Method of acoustic emission as an effective tool for investigation of the kinetics of material fracture at the stages of crack initiation and propagation (Review). *Ibid.*, **3**, 26-34 [in Russian].
7. Nedoseka, S.A. (1998) Causes for damage initiation and residual life of the material of emergency section of Dasha-va-Kiev pipeline. *Ibid.*, **1**, 38-50 [in Russian].
8. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2014) On application of AE technology at continuous monitoring of piping of power units operating at high temperature. *Ibid.*, **3**, 7-14 [in Russian].
9. Skalsky, V.R. (2003) Evaluation of accumulation of bulk damage in solids, based on acoustic emission signals. *Ibid.*, **4**, 29-36 [in Russian].
10. Chausov, N.G., Nedoseka, S.A., Lebedev, A.A. (1993) Investigation by acoustic emission method of the kinetics of steel fracture at final stages of deformation. *Problemy Prochnosti*, **12**, 14-21 [in Russian].
11. Stone, D.E., Dingwall, P.F. (1977) Acoustic emission parameters and their interpretation. *NDT Intern.*, **10**, 51-56.
12. Nakamura Yosio, Veach, C.L., McCauley, B.O. (1971) Amplitude distribution of acoustic emission signals. In: *Proc. of Symp. presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials (Bal Harbour, 7-8 December 1971)*, 164-186.
13. Tetelman, A.S., Chow, R. (1971) Acoustic emission testing and micro cracking processes. In: *Proc. of Symp. presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials (Bal Harbour, 7-8 December 1971)*, 30-40.
14. Beveridge, A., Ham, B., Rosenbrock, L., Kriesl, N. (2009) Acoustic emission monitoring of high energy piping. *IIV Annual Assembly and Intern. Conference (12-18 July 2009, Singapore)*. XI-926-09.
15. (2015) 68th Annual Assembly of the International Institute of Welding – IIW 2015 (Helsinki, Finland). *Tekh. Diagnost. i Nerazruch. Kontrol*, **4**, 58.

ОЦІНКА ЕНЕРГІЇ, ЩО ВИТРАЧАЄТЬСЯ НА УТВОРЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ПРИ РУЙНУВАННІ МАТЕРІАЛІВ, НА ОСНОВІ ДАНИХ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

A. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
 З огляду на те, що застосування акустичної емісії при безпервному моніторингу конструкцій при експлуатації дозволяє ефективно вирішувати цілий ряд питань забезпечення і управління їх безпеки, а використання інтернету забезпечує контроль цього процесу практично з будь-якої зовнішньої точки, все більшої актуальності набуває застосування методів оцінки стану матеріалів на основі даних акустичної емісії. Дані, отримані як при моніторингу реальних конструкцій, так і при випробуваннях зразків, показують, що для оцінки стану матеріалів конструкції може становити інтерес енергія, пов'язана з деформацією матеріалу і утворенням в ньому пошкоджень. Виділення із загальної енергії руйнування частини, пов'язаної з утворенням пошкоджень, може істотно уточнити розрахунки на міцність і оцінити стан матеріалу в кожен момент часу його експлуатації під навантаженням. У даній роботі приведені можливості використання даних акустичної емісії по виділенню цієї частини енергії і показано, яку частину загальної енергії руйнування вона становить, її зв'язок з накопиченням пошкоджень структури матеріалу, які в процесі пошкоджуваності підсумовуються і, в кінцевому рахунку, призводять до руйнування. Бібліогр. 15, рис. 5.

Ключові слова: міцність матеріалів, енергія руйнування матеріалів, діагностика

EVALUATION OF ENERGY CONSUMED IN DAMAGE INITIATION AT FRACTURE OF MATERIALS, BASED ON ACOUSTIC EMISSION DATA

A.Ya. NEDOSEKA, S.A. NEDOSEKA
 E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS Ukraine,
 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
 E-mail: office@paton.kiev.ua

Considering that application of acoustic emission at continuous monitoring of structures in service allows effectively solving a whole range of questions to guarantee and manage their safety, and use of Internet ensures control of this process practically from any external point, application of methods for evaluation of the state of materials based on acoustic emission data is becoming ever more urgent. The data obtained both during monitoring of the real structures, and at testing samples, show that energy associated with material deformation and formation of damage in it, can be of interest for evaluation of the state of structure materials. Separation from the total fracture energy of the part associated with formation of damage, can provide much greater precision of strength analysis and enable evaluation of the state of material at each moment of time of its operation under load. This work demonstrates the possibilities of application of acoustic emission data, shows the part of the total fracture energy to which it amounts, and its relation to accumulation of damage in the material structure, which is summed up during the damaging process, and eventually leads to fracture. 15 Ref., 5 Fig.

Keywords: material strength, material fracture energy, diagnostics

Поступила в редакцію
 25.09.2018