

УДК 667.64:678.02

В. В. МАРАСАНОВ, А. А. ШАРКО,
В. В. КОБЕРСКИЙ
Херсонский национальный технический университет

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Представлены математические модели механизмов возникновения сигналов акустической эмиссии, составлены на основе кинетической теории разрушения твердых тел. Рассмотрены подходы, базирующиеся на динамическом нагружении твердых тел, в которых разрушение представляется как разрыв связей между атомами в кристаллической решетке, в том числе термоактивированное зарождение микротрещин и дислокационные изменения. Связь между процессом образования дефектов и наличия эффекта акустической эмиссии позволяет определить степень работоспособности материала при изменяющихся внешних условий эксплуатации изделия.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, динамическое нагружение, кинетика разрушения.

В. В. МАРАСАНОВ., А. О. ШАРКО,
В. В. КОБЕРСКИЙ
Херсонський національний технічний університет

АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ ВИНИКНЕННЯ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ТВЕРДИХ ТІЛ

Представлені математичні моделі механізмів виникнення сигналів акустичної емісії, складені на основі кінетичної теорії руйнування твердих тіл. Розглянуті підходи, що базуються на динамічному навантаженні твердих тіл, в яких руйнування представляється як розрив зв'язків між атомами в кристалічній решітці, зокрема термоактивірованне зародження микротріщин і дислокаційні зміни. Зв'язок між процесом утворення дефектів і наявності ефекту акустичної емісії дозволяє визначити ступінь працездатності матеріалу зовнішніх умов експлуатації виробу, що змінюються.

Ключові слова: акустична емісія, динамічне навантаження, кінетика руйнування.

V.V. MARASANOW, A.A. SHARKO,
V. V. KOBERESKY
Kherson National Technical University

ANALYSIS OF MECHANISMS ORIGIN ACOUSTIC EMISSION SIGNALS AT DYNAMIC LADENING OF SOLIDS

Mathematical models of origins acoustic emission signals are provided, made on the basis of the kinetic theory of corrupting of solid bodies. The approaches which are based on dynamic loading of solid bodies in which corrupting is represented as a rupture of communications between atoms in a crystalline grid, including the thermoactivated origin of microcracks and dislocation changes are considered. Communication between process of formation of defects and existence of effect of acoustic emission allows to define a level of material operability in case of the changing external operating conditions of a product.

Keywords: acoustic emission, dynamic loading, corrupting kinetics.

Постановка проблемы

Обеспечение эксплуатационной надежности конструкций требует разработки методов диагностики состояния материалов на ранних стадиях развития дефектов. Направление изучения физической природы источников акустической эмиссии (АЭ) связано с исследованиями деформации и разрушения твердых тел, что сопряжено с большими методологическими и экспериментальными трудностями при интерпретации полученных результатов, несмотря на постоянный интерес к этой важной научно-технической проблеме. С этих позиций приобретает актуальность анализ модельных представлений и механизмов разрушения твердых тел, вызывающих появление актов АЭ.

Анализ последних исследований и публикаций

Акустическая эмиссия материала сопровождает широкий спектр физико-механических процессов, происходящих в материалах, к которым относятся пластическая деформация матрицы кристаллической решетки, фазовые превращения полиморфного типа, образование частиц второй фазы при распаде пересыщенных твердых растворов. Наибольшее количество исследований произведено в

области механических испытаний и пластического течения, изучение механизма которых на всех стадиях деформирования и разрушения материала составляет одну из нерешенных задач АЭ контроля и механики разрушения.[1-8]

Формировка цели исследования

Целью исследования является анализ применимости моделей и математических представлений кинетической теории прочности твердых тел к объяснению взаимосвязи интенсивности АЭ с величиной приложенной нагрузки.

Изложение основного материала исследования

Акустико-эмиссионный метод основан на регистрации волн при быстрой локальной перестройке структуры материала. Если в результате нагружения локальная деформация, вызванная существованием дефекта, превышает пороговый уровень, возникает акустическая эмиссия. Интенсивность эмиссии тем больше, чем выше деформация. При этом по суммарной энергетике АЭ можно судить об опасности дефекта.

Источником акустической эмиссии являются процессы пластической деформации и разрушения. Они вызывают возникновение волн напряжений, которые распространяются в структуре материала и регистрируются пьезоэлектрическим преобразователем.

Кинетическая теория разрушения твердых тел, основана на том, что в твердых телах идет постоянный процесс накопления повреждений [1]. Прочность материала определяется величиной критических напряжений, при которых происходит разрушение материала. Разрушение – это разрыв связей между атомами в кристаллической решетке. Энергетическая теория прочности Гриффита А.А. базируется на законе сохранения энергии при рассмотрении твердого тела как упругого континуума, в котором содержатся трещины. В ней уравнение энергетического баланса при развитии трещины записывается следующим образом

$$(W_n + dW_n) + (W_y - dW_y) = const \quad (1)$$

где W_n - величина поверхностной энергии;

W_y - упругая энергия.

Разрушение твердого тела при наложении на него механических усилий происходит тогда, когда скорость освобождения упругой энергии превосходит скорость прироста поверхностной энергии. Чем больше размер трещин, тем меньше прочность тела, однако, такая характеристика как время действия, в теории Гриффита А.А. не учитывается.

Растущий дефект производит свой собственный сигнал, который может быть обнаружен путем обработки разницы времен прихода волн к различным датчикам. [8]

Каждый импульс АЭ может быть приближенно аппроксимирован зависимостью

$$U = Ae^{-nt} \sin \omega t, \quad (2)$$

где A - амплитуда сигнала;

n - коэффициент затухания;

ω - круговая частота.

$$\omega = \sqrt{p^2 - n^2}, \quad (3)$$

Здесь импульс АЭ системы p равен

$$p = \frac{c}{m}; \quad (4)$$

где C – коэффициент жесткости материала;

m – приведенная масса участка материала конструкции, пришедшая в колебание.

Период колебаний АЭ системы с учетом того, что $n \ll p$ и $\omega \approx p$ можно найти из соотношения:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{p^2 - n^2}} \approx \frac{2\pi}{p}. \quad (5)$$

Информацию об источнике акустической эмиссии содержат амплитуда импульса, его длительность, время прихода в заданную точку поверхности и число импульсов за исследуемый интервал времени.

Среди параметров, характеризующих состояние конструкции, выделяют следующие: температура, давление, величина приложенной нагрузки, цикличность нагрузки, геометрия объекта и т.д.

На основе изучения работ по исследованию эффекта акустической эмиссии и его связи с проблемой контроля прочности объектов, можно выделить несколько подходов, базирующихся на анализе различных математических моделей, устанавливающих связи параметров АЭ с параметрами, характеризующими состояние контролируемого объекта.

Согласно кинетической концепции теории прочности [1], фундаментальным уравнением, описывающим кинетику процесса разрушения является уравнение:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{u_0 - \gamma\sigma}{kT}\right), \tag{6}$$

- где τ - время, оставшееся до разрушения;
 $\tau_0 = 10^{-13}$ с – период колебаний атомов в решетке;
 u_0 – энергия активации разрывов межатомных связей;
 γ - структурно-чувствительный коэффициент;
 σ - постоянное растягивающее напряжение;
 k - постоянная Больцмана;
 T – температура.

В [2] предложен механизм возникновения сигналов акустической эмиссии при динамическом нагружении твердых тел, в котором за основу берется ячеистая излучающая структура материала. Предполагается, что элементарному акту роста микротрещины, представляющему собой разрушение одной ячейки, соответствует один импульс АЭ. Процесс разрушения описывается формулой

$$\dot{N}(L) = \frac{u_0 \delta(T) \sigma_l \sqrt{\frac{L}{l}} + 1}{kT \sigma_m \tau_0 l} \tag{7}$$

- где $\dot{N}(L)$ - интенсивность АЭ;
 L - длина трещины;
 l - размер элементарной ячейки;
 k - постоянная Больцмана;
 u_0 - энергия активации разрывов атомных связей;
 σ_l - постоянна внешняя нагрузка;
 σ_m - теоретический предел прочности;
 δ - параметр, характеризующий отношение прочностных характеристик.

$$\delta = \gamma \frac{\sigma_m}{\sigma_T - \sigma_{nc}} \tag{8}$$

σ_T и σ_{nc} - пределы текучести и пропорциональности.

Полученное выражение справедливо для начальных стадий развития трещины, распространяющейся сравнительно равномерно и с небольшой скоростью. В этой модели интенсивность АЭ определяется кинетикой разрушения, что позволяет произвести расчет временной зависимости интенсивности АЭ при единичном акте термоактивированного зарождения микротрещины.

Построение феноменологической модели, в которой разрушение представляет собой термоактивированное зарождение целого ансамбля микротрещин представлено в [3,4]. Рассматривается термоактивированное зарождение микротрещин при нагрузке линейно-изменяющийся со временем

$$p = qt \tag{9}$$

- где q – коэффициент, определяющий степень изменения нагрузки.
 При этом изучаются следующие явления:
 - ячейки с прочностью $\sigma < p$ механически разрушаются;

- ячейки с прочностью $\sigma > p$ приближаются к разрыву на протяжении времени $t = \tau_1$ определяемого из формулы

$$\int_0^{\tau_1} \frac{dt}{\tau[p(t)]} = 1 \tag{10}$$

Для этой гипотезы разрушения получена следующая формула

$$N(t) = \frac{N_0 \exp \frac{\sigma_T - \sigma_{nc}}{\sigma_m}}{\frac{\sigma_T - \sigma_{nc}}{\sigma_m} + y} \frac{\sigma_T - \sigma_{nc}}{q} \frac{1}{t^2} \left[\exp\left(\frac{\sigma_{nc} - \sigma_T}{lyqt}\right) + \left(\frac{\sigma_T - \sigma_{nc}}{lyqt} - 1\right) \exp\left(\frac{\sigma_{nc} - \sigma_T}{yqt}\right) \right] \tag{11}$$

где N_0 - начальное число ячеек в испытываемом образце.

Разрушение каждой ячейки сопровождается излучением одного импульса АЭ, поэтому количество ячеек, разрушаемых в единицу времени, соответствует термоактивированной составляющей интенсивности АЭ.

В этом уравнении величины N_0 , q , τ представляют собой характеристики прочностных свойств материалов, причем величина N_0 не зависит от структуры материала, а параметр γ зависит от размеров изделия и технологии его изготовления. Это существенно усложняет расчеты времени оставшегося до разрушения и поэтому степень опасности дефектов определяется эмпирическим путем.

Механизм возникновения сигналов акустической эмиссии при динамическом нагружении твердых тел в рамках дислокационных представлений рассмотрен в [5-7]. В качестве источников эмиссии волн напряжений можно назвать следующие процессы и явления:

- двойникование;
- фазовые переходы;
- движение дислокаций;
- скольжение границ зерен;
- рост трещин;
- водородное охрупчивание;
- коррозионное растрескивание;
- усталостные нарушения.

Исследования акустической эмиссии, проводимые на дислокационном уровне, носят качественный характер, т.к. в этом случае состояние материала еще далеко до разрушения.

Оценить величину упругого смещения D_{surf} на расстоянии D от дефекта типа дислокационного сегмента, движущегося со скоростью V с характерным размером $[n \cdot b \cdot r]$ можно используя формулу [7]:

$$D_{surf} = \frac{n \cdot b \cdot r \cdot V \cdot C_s^2}{DC_l^3} \tag{12}$$

- где n - число дислокаций в сегменте;
 b - модуль вектора Бюргера, м;
 r - радиус отслеживаемой петли, м;
 V - скорость движения дислокации, м/с;
 C_s - скорость поперечных акустических волн, м/с;
 C_l - скорость продольных акустических волн, м/с.

Из этой формулы видно, что величина регистрируемого смещения поверхности линейно зависит от параметров движущегося дефекта $n \cdot b \cdot r$ и V .

В рамках дислокационных представлений получена формула, связывающая скорость отсчета $\frac{dn}{dt}$ или число отсчетов осцилляций в единицу времени с величиной пластической деформации ϵ_p

$$\frac{dn}{dt} = h \dot{\varepsilon}_p h' \varepsilon_p e^{-\phi \varepsilon_p} \quad (13)$$

где $\dot{\varepsilon}_p$ - скорость изменения деформации;

ϕ - константа, определяемая свойствами материала;

h и h' - размерностные коэффициенты.

В этой модели подвижная плотность дислокаций N_m равна

$$N_m = m_p \varepsilon_p \exp(-\phi \varepsilon_p) \quad (14)$$

где m_p – коэффициент, характеризующий исследуемый материал.

Для бесконечной пластины в предположении, что интенсивность АЭ \dot{N} пропорциональна скорости возрастания объема развивающейся трещины V_p , заключенного в зоне с деформациями ε_1 и ε_2 аппроксимируя границы этой зоны окружностями получены соотношения

$$\dot{N} = m V_p \quad (15)$$

где m – коэффициент пропорциональности.

Величина объема развивающейся трещины V_p равна

$$V_p = \frac{d}{4\pi} \frac{\varepsilon_2^4 - \varepsilon_1^4}{(E \varepsilon_1 \varepsilon_2)^4} \cdot k^4 \quad (16)$$

где d – толщина пластины;

E – модуль упругости;

k – коэффициент интенсивности напряжений.

В этой формуле значение k равно

$$k = \delta_0 \sqrt{\pi l} \quad (17)$$

где δ_0 – напряжение, приложенное к пластине, инициирующее развитие трещины;

l – длина трещины.

Из приведенных соображений следует, что интенсивность АЭ пропорциональна четвертой степени коэффициента интенсивности напряжений.

Выводы

Анализ рассмотренных представлений и математических моделей позволяет с единых позиций кинетической теории прочности оценить активность и амплитуду сигналов АЭ при динамическом нагружении контролируемого объекта.

Тесная связь между процессами, происходящими внутри материала при разрушении, и наличием эффекта АЭ дают основание поставить важную практическую задачу: регистрируя эффект АЭ, определить степень опасности изменений, происходящих в материале, т.е. степень близости материала к состоянию разрушения.

Список использованной литературы

- Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая теория прочности твердых тел. М.: Наука 1974 - 560с.
- Вайнберг В.Е. Применение кинетической концепции разрушения для расчета интенсивности акустической эмиссии./ В.Е.Вайнберг, А.Ш.Кантор, Р.Г. Лупашку// Дефектоскопия 1976 - №3 - С.89-96
- Вайнберг В.Е., Лупашку В.Г. Интенсивность акустической эмиссии при трещинообразовании / Дефектоскопия 1975 - №6 - С.129-131
- Холодилов О.В., Белоногий Д.Ю. О вкладе термоактивационной составляющей акустической эмиссии при трении // неразрушающий контроль и техническая диагностика 2012 - №4 -С.14-19

13. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В., Моисеенко Д.Д. Природа локализации пластической деформации твердых тел // Журнал технической физики 2007 – Т:77 - №8 – С.77-84
14. Мерсон Д. А. Физическая природа акустической эмиссии при деформационных процессах в металлах и сплавах: диссертация доктора физико – математических наук 01.04.07 Барнаул 2001 – 327с
15. Wadley H. N. G. A study of deformation and fracture processes in a low- alloy steel by acoustic emission transient analysis. / H. N. G.Wadley, C.V.Scruby // Acta Met. – 1979. – 27, №4. – P. 613-626
16. Марасанов В.В., Шарко А.А. Исследование методов и устройств обработки сигналов акустической эмиссии / Матеріал ІV Всеукраїнської науково – практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з автоматичного управління, присвяченої Дню космонавтики 2016р. 12 квітня, С.128 – 134.