

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ В ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ**

*Приводится краткий обзор методов оценки надежности изделий, а также использование для этих целей неразрушающего контроля.*

Известно, что потеря несущей способности наступает в результате накопления необратимых изменений в материалах. Данный процесс представляет собой временной кинетический процесс, внутренний механизм и скорость которого определяется структурой и свойствами материалов, напряжениями, вызванными нагрузкой и температурой. На ускорение развития процесса разрушения значительное влияние оказывают дефекты структуры, присущие всем твердым телам на микро- и макроуровнях. Поэтому одной из основных проблем современной техники является обеспечение эксплуатационной надежности материалов и изделий на их основе.

Общими физическими моделями процессов разрушения являются, например: деформация и механическое разрушение материалов различного класса; тепловое разрушение материалов; электрохимическая коррозия; износ поверхности деталей и многие другие. Внутренний механизм процессов, приводящих к потере несущей способности и разрушению, может быть исчерпывающе проанализирован только в каждом конкретном случае, для данной конструкции, заданных условий эксплуатации и режимов работы. В работе [1] показано, что вероятность возникновения отказов вследствие потери прочности определяется как

---

где  $\Delta x$  — определяет запас прочности материала;  $\delta S(\Delta x)/\delta t$  — определяет скорость изменения запаса прочности вследствие протекающих внутри или на поверхности материалов физико-химических процессов;  $\delta q/\delta(\Delta x)$  — определяет вероятностные прочностные характеристики материалов:

В общем случае необходимо рассматривать прочность материала и действие различных факторов, вызывающих изменение запаса прочности, т.е. производить оценки возможно, если известны необходимые физические характеристики материалов и влияние различных физико-химических процессов на скорость изменения запаса прочности. Это не всегда удается установить. Поэтому на практике рассматривают только немногие основные процессы, которые при заданных условиях влияют на несущую способность материалов и конструкций. Для этой цели привлекаются различные физико-химические методы структурного анализа, расчетные математические методы моделирования и оценки надежности, методы и средства неразрушающего контроля (НК). Важным звеном в данной цепи являются поверочные испытания изделий, поскольку надежность изделий в конечном итоге определяется изменчивостью материалов во времени при определенных условиях эксплуатации. Однако поверочные испытания часто оказываются неэффективными, что связано с рядом причин. Во-первых, значительные финансовые и временные затраты. Во-вторых, часто невозможно определить

уровни нагрузок, при которых необходимо проводить испытания. В-третьих, достаточно сложно промоделировать распределение нагрузки, возникающей в реальных условиях эксплуатации, особенно при наличии комбинированного воздействия статических и переменных механических и температурных нагрузок. Поэтому поверочные испытания дополняются методами НК, позволяющими обнаруживать наличие и характер структурных изменений (дефектов) в материалах, которые могут привести к разрушению изделия. Как правило, такими дефектами являются трещины.

При определении размеров дефектов допустимых в эксплуатации изделий используются различные подходы и принципы, основанные на представлениях механики разрушения, например, принцип «безопасной работы» [2]. В соответствии с данным принципом предполагается, что первоначально изделие не имеет дефектов. В процессе эксплуатации под действием циклических нагрузок неоднородности материала приводят к постепенному образованию микротрещин, которые перерастают в макротрещины, что, в конечном итоге, является причиной разрушения изделия, т.е. срок службы определяется усталостью материала. Установление допустимых или предельных размеров дефектов для конкретного типа изделия предполагает необходимость проведения обширных испытаний (материалов и готовых изделий), моделирующих эксплуатационную наработку, а также позволяющих определить срок службы, интервалы технического осмотра и профилактического ремонта. Для выполнения программы испытаний требуются значительные временные и финансовые затраты. Следует отметить, что материалы не идентичны по своим свойствам. Изначально достаточно сложно обнаружить и идентифицировать дефекты на микроуровне, поэтому результаты испытаний описываются статистически, что приводит к занижению значения критериальной оценки или так называемого «критерия возникновения дефекта».

При обнаружении дефекта типа трещины его влияние на работоспособность изделия определяется не только размером, но и геометрией и ориентацией по отношению к действующей нагрузке. Для прогнозирования работоспособности изделий с дефектами известных размеров используются методы механики разрушения. Основой такого прогноза являются расчеты на вязкость разрушения при известной длине трещины и действующей нагрузке. Допустим, что внутри упругого тела больших размеров имеется трещина длиной  $2\ell$  (см. рисунок). Если статическое растягивающее напряжение  $\sigma$  приложено по нормали к плоскости трещины [3], то при этом возникает особенность поля напряжений в вершине трещины - в вершине трещины создается местное растягивающее напряжение, описываемое (для случая плоской деформации) выражением вида

$$\sigma_y = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right). \quad (1)$$

На оси  $X - \theta = 0$  и, следовательно,  $\sigma_y = E\sqrt{2\pi r}$  (где  $E$  - модуль упругости материала). Отсюда видно, что поле растягивающих напряжений в вершине трещины определяется только величиной  $K_1$ , которая называется коэффициентом интенсивности напряжений. Эта величина не зависит от  $r$  и  $\theta$  и является некоторой константой материала, определяемой по результатам испытаний образца данного типа. Для образца бесконечных размеров

$$K_1 = \sigma\sqrt{\pi\ell}, \quad (2)$$

где  $\ell$  - полудлина трещины.

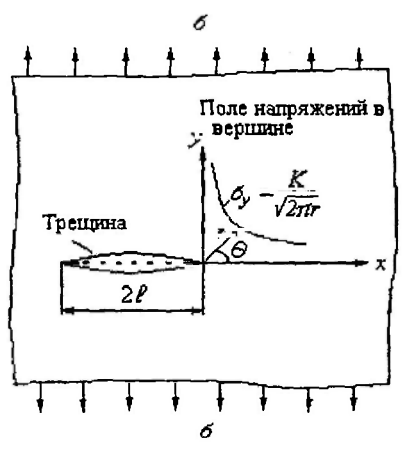
Для образца конечной ширины

$$K_1 = \sigma \sqrt{\ell Y}, \quad (3)$$

где  $Y$  – поправка на конечную ширину образца.

Значения  $K_1$  выводятся из анализа напряжений для каждого типа образца и геометрии трещины. Параметр вязкости разрушения, выраженный в единицах коэффициента интенсивности напряжений, это свойство материала, характеризующее его способность к торможению разрушения, т.е. способность материала испытывать пластические деформации и поглощать энергию при распространении трещины.

Выражение (1) описывает раскрытие трещины по механизму нормального отрыва.



Распределение напряжений в вершине трещины под действием растягивающих напряжений

Аналогично используются соотношения для поля напряжений  $\tau_{xy}$  и  $\sigma_x$  при разрушения по механизму поперечного или продольного сдвига [4].

Естественно, что ни один материал не может неограниченно долго выдерживать напряжение, описываемое выражениями (2), (3), поэтому в окрестности вершины трещины возникает пластическая деформация. Самопроизвольное разрушение наступает тогда, когда в результате медленного роста трещины величина  $K_1$  достигнет некоторого критического значения, определяемого, в свою очередь, критическими значениями длины трещины  $\ell_c$  и напряжения  $\sigma_c$ . Другими словами, если значение этого коэффициента превысит некоторое критическое значение (для условий плоского напряженного состояния -  $K_{1c}$ , для условий плоской деформации  $K_{1c}$ , для коррозионного разрушения -  $K_{1c}$ ), то произойдет катастрофическое разрушение. После обнаружения и определения размеров трещины изделие допускается к использованию, если расчеты показывают, что при тех механических напряжениях, которые будут развиваться в зоне дефекта, не будет происходить ее увеличение до критических размеров за предполагаемый срок эксплуатации. В случае циклических нагрузок развитие магистральной трещины может происходить при нагрузках, меньше предельных. В работе [4] показано, что скорость роста длины трещины и коэффициент интенсивности напряжений связаны функциональной зависимостью

$$\ell' = f(K_{1_{\max}}, K_{1_{\min}}),$$

где  $\ell'$  – длина трещины;  $K_{1_{\max}}$ ,  $K_{1_{\min}}$  – максимальное и минимальное значения  $K_1$ , которые описываются большим количеством аналитических соотношений.

Следует отметить, что при проведении расчетов важное значение имеет геометрия трещины, а это, в свою очередь, требует повышения точности и разрешающей способности методов НК по определению размеров трещины и величины ее раскрытия, а также развития методов визуализации дефектов [5]. Кроме того, методики измерения информации традиционными методами НК являются статическими и достаточно сложно использовать их для создания систем мониторинга и прогнозирования.

С этих позиций перспективным является метод акустической эмиссии (АЭ), поскольку явление АЭ возникает при протекании процессов деформирования и разрушения материалов и является их отражением. Регистрируемая информация объемна, а ее изменение, в зависимости от механизмов протекающих процессов, можно отслеживать во времени, что является важнейшим элементом в задачах прогнозирования. Сложная природа протекающих процессов обуславливает проблемы интерпретации регистрируемой информации, поскольку АЭ можно рассматривать как "микроскоп" с высоким разрешением. С одной стороны, это сопряжено со значительными длительностью, сложностью и стоимостью проводимых исследований, направленных на изучение природы явления и установление основных закономерностей излучения, в зависимости от факторов, влияющих на состояние материала, а с другой – с высокой стоимостью и сложностью оборудования для регистрации АЭ, методик обработки, анализа и представления информации. Причем количество и качество получаемой информации тесно взаимосвязаны. Исследования, проводимые в данных направлениях, позволили получить для ограниченного перечня материалов и условий нагружения практически результаты, которые являются основой стандартов, применяемых в различных странах мира. Однако широкое применение метода АЭ ограничено из-за наличия проблем, отмеченных выше, а также из-за большой наукоемкости проводимых исследований.

Значительные массивы регистрируемой информации и результаты ее анализа показывают наличие взаимосвязи количества сигналов АЭ с коэффициентом интенсивности напряжений [6]; [7]; [8]. Полученные соотношения можно использовать для определения момента срабатывания трещины, параметры которой связаны с параметрами сигналов АЭ [9]; [10]; [11]. Зависимости выведены при проведении анализа процессов деформирования и разрушения на специально подготовленных образцах. На реальных объектах проблема интерпретации принимаемой информации остается основной проблемой. Исследования в данном направлении связаны с анализом параметров индивидуальных сигналов АЭ, для определения преобладающего механизма протекающего процесса, оценки источника излучения и, как следствие, оценки состояния изделий. Полученные результаты легли в основу критериев классификации источников излучения, применяемых в стандартах ряда стран [12]; [13].

Анализ параметров излучения АЭ, приведенный в работе [14], позволил получить критериальную оценку выделения сигналов от трещин, которая основана на различии в скорости изменения плотности энергии в зарегистрированном сигнале. Введение поправочных коэффициентов, с учетом влияния параметров усилительного тракта и порога обнаружения сигналов [15], показывает возможность использования данного критерия как при проведении испытаний образцов, так и при проведении испытаний конструкций [16]; [17].

Как было сказано выше, разрушение конструкций наступает в результате накопления необратимых процессов, происходящих в материалах под влиянием различных физико-химических процессов. Отследить и учесть влияние отдельных составляющих данных процессов на несущую способность конструкции практически сложно, а задача определения

влияния дефекта типа трещин на несущую способность конструкции в каждом конкретном случае решается индивидуально. В работе [18] отмечено, что процессы разрушения материалов сводятся главным образом к постепенному накоплению повреждений вследствие последовательных единичных нарушений (вследствие каждого парциального влияния нагрузки). В случае изменяющегося во времени напряжения или произвольной последовательности напряжений  $\sigma_i$ , каждому из которых соответствует долговечность  $\tau(\sigma_i)$  (причем время действия каждого напряжения равно  $\Delta t_i$ ), – разрушение материала произойдет тогда, когда сумма относительных уменьшений долговечности (располагаемого ресурса) станет равной единице. Для случая дискретной зависимости напряжения  $\sigma$  от времени  $t$ , когда напряжение на отдельных интервалах времени остается постоянным, изменяясь только при переходе от одного интервала к другому, условием разрушения будет

$$\sum_{i=0}^n \frac{\Delta t_i}{\tau(\sigma_i)} = 1. \quad (4)$$

Если напряжение является непрерывной функцией времени  $\sigma(t)$ , условие разрушения имеет вид

$$\int_0^{t_p} \frac{\partial t}{\tau[\sigma(t)]} = 1, \quad (5)$$

где  $t_p$  – время до разрушения;  $\sigma(t)$  – временной режим нагружения;  $\tau[\sigma(t)] = Ae^{-\alpha\sigma(t)}$  – долговечность при данном напряжении;  $A, \alpha$  – постоянные коэффициенты.

Условия (4) и (5) характеризуют принцип наложения или суммирования парциальных разрушений, т.е. отдельные локальные разрушения суммируются вплоть до предельного состояния, когда трещина достигает критической величины и наступает разрушение. Это в полной мере относится и к АЭ, поскольку она является отражением протекания внутренних процессов, происходящих в структуре материала на микро- и макроуровнях, вплоть до разрушения. Результаты многочисленных исследований показывают, что во всех материалах и изделиях при их нагружении регистрируются сигналы АЭ. С повышением уровня нагрузки наблюдаются сигналы АЭ от трещин, появление которых с приближением к разрушению приобретает характер лавинообразного процесса, что отражает факт развития дефектов структуры с постепенным накоплением повреждений, приводящих к разрушению материалов. В работах [16]; [19] рассмотрен подход, основанный на совместном анализе экспериментальных данных, полученных для каждого испытанного образца (конструкции), или для каждой ступени нагружения одного и того же образца, проводимый во временном сечении регистрируемых процессов АЭ. Его использование позволяет осуществлять оценки опасности развития дефектов структуры. При формализации описания зависимостей, полученных по результатам аппроксимации экспериментальных данных, в соответствии с программами нагружения образцов материалов и элементов конструкций, выведены соотношения для процесса накопления энергии сигналов АЭ:

$$\bar{E}_n = c\bar{P}^{|a|}, \quad (6)$$

где  $c, a$  – константы;  $P$  – нагрузка.

Показатель степени  $a$  может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Обработка экспериментальных данных при использовании программы ступенчатого повышения нагрузок с последующей выдержкой под нагрузкой, с анализом изменения параметров в аппроксимирующем выражении (6) по возрастанию ступеней нагружения показывает, что при практическом постоянстве коэффициента  $c$  по мере деформирования материалов наблюдается изменение показателя степени  $a$ , который может использоваться в качестве критерия опасности развития дефектов структуры.

Следует отметить, что применение рассмотренного подхода при использовании общих концепций измерения и обработки акустической информации требует проведения индивидуального детального анализа информации об АЭ для каждого конкретного изделия в соответствии с принятыми условиями его нагружения.

Несмотря на значительную наукоемкость исследований рассмотренный подход, при соответствующем программном математическом обеспечении, позволяет проводить оценку состояния и прогнозировать поведение изделий в зависимости от класса решаемых задач: обнаружение развития дефектов структуры; анализ развития процесса разрушения; оценка потери несущей способности изделия и т.д. Рассмотренный подход можно использовать для мониторинга изделий при разработке методов оценки состояния и прогнозирования их остаточного ресурса, включая и изделия, находящиеся в эксплуатации. Если априори неизвестна информация или, другими словами, когда отсутствует реперная точка отсчета, то использование непрерывного мониторинга позволит оценить стадию развития процессов, протекающих в материале и, как следствие, прогнозировать дальнейшее их поведение.

### Список литературы

1. Маламедов И.М. Физические основы надежности. – Л.: Энергия, 1970. – 152 с.
2. Coffin M.D., Tiffany C.F. New air force requirements for structural safety, durability and life management. – J. Aircraft. – v.13, 1976. – P.93–98.
3. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упруго-пластического разрушения. – М.: Наука, 1974. – 416 с.
4. Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Харин В.С. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов. – К.: Наук. думка, 1977. – 280 с.
5. Бабак В.П. Обробка сигналів при формуванні зображень об'єктів. – К.: Либідь, 1994. – 192 с.
6. Dunegan H.L., Harris D O., Tatro C.A. Fracture analysis by use of acoustic emission // Eng. Fract. Mechanics. – 1968. – 1, N 1. – P.105–122.
7. Гулевский И.В. Обнаружение устойчивого роста трещин методом акустической эмиссии // Автоматическая сварка. – 1984. – № 5. – С. 21–25.
8. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В. Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. – К.: Наук. думка, 1989. – 176 с.

9. Болотин Ю.И., Маслов В.А., Полунин В.И. Установление корреляции между размером трещины и амплитудой импульсов акустической эмиссии // Дефектоскопия. – 1975. – № 4. – С. 119–122.
10. Landy R.J., Ono K. Acoustic emission behavior of a low alloy steel // J. of Acoust. Emiss. – 1982. – N1. – P. 7–19.
11. Баранов В.М. Акустические измерения в ядерной энергетике. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
12. NDIS 2412-1980. Acoustic emission testing of spherical pressure vessels made of high tensile strength steel and classification of test results.
13. РД-03-131-97. Правила организации и проведения акусто-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 40 с.
14. Новиков Н.В., Филоненко С.Ф., Городыский Н.И., Бирюков В.С. К критерию определения источника сигналов акустической эмиссии при нагружении материалов // Сверхтвердые материалы. – 1987. – №2. – С. 42–45.
15. Бабак В.П., Филоненко С.Ф. Вплив порога обмеження на критеріальну оцінку виділення сигналів акустичної емісії від тріщин // Вісник ЖІТІ. – 1998. – № 7. – С. 31–39.
16. Филоненко С.Ф. Дослідження акустичної емісії під час руйнування виробів на основі бетону // Вісник Державного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. – 1998. – № 360. – С. 45–53
17. Филоненко С.Ф. Акустическая эмиссия при исследовании изделий из реакторных сталей. // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. – 1999. – № 1. – С. 30–37.
18. Маламедов И.М. Физические основы надежности. – Л.: Энергия, 1970. – 152 с.
19. Филоненко С.Ф. Критерии состояния изделий с использованием метода акустической эмиссии // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. – 1998. – № 2. – С. 103–113.

Стаття надійшла до редакції 21 листопада 1998 року.

**Філоненко Сергій Федорович** (1954) закінчив у 1977 році Київський політехнічний інститут. Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри наукових, аналітичних і екологічних приладів та систем НТУУ «КПІ». Має понад 60 наукових праць в області акустичної емісії в технічній діагностиці.

Круг научных интересов: акустическая эмиссия в технической диагностике.

**Sergey .F. Philonenko** (b.1954) graduated from Kyiv Polytechnical Institute (1977). PhD (Eng.), senior scientific researcher of Scientific, analytical and ecological devices and systems Department of National Technical University of the Ukraine «KPI». Author of more than 60 publications in the field of acoustic emission in technical diagnostic.