

ІНФОРМАЦІЙНО-ДІАГНОСТИЧНІ СИСТЕМИ

УДК 620.179:534.6

ББК Ж. 8432

В.П. Бабак, С.Ф. Филоненко

ДИАГНОСТИКА ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Приведены критериальные оценки состояния изделий с использованием регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии.

Согласно современным представлениям причиной разрушения изделий является уменьшение запаса прочности, возникающее вследствие накопления необратимых изменений в структуре материала под действием напряжений, вызванных нагрузкой и температурой, наличием агрессивных сред, радиационных излучений и других факторов. Внутренний механизм развития процессов в материале определяется структурой материала, наличием в нем разнообразных дефектов и может быть исчерпывающе проанализирован только в каждом конкретном случае с учетом условий эксплуатации и режимов работы. При этом для проведения оценок надежности изделий необходимо знание влияния различных физико-химических процессов на скорость протекания необратимых процессов, что не всегда возможно. Поэтому рассматривают только немногие (основные) процессы, которые при заданных условиях влияют на несущую способность материалов и конструкций.

Оценку состояния и надежности изделий проводят физико-химическими методами структурного анализа, методами механики разрушения, методами математического моделирования и вычислительного эксперимента, методами и средствами неразрушающего контроля. Важным звеном в данной цепочке методов являются методы неразрушающего контроля, позволяющие обнаруживать наличие и характер структурных изменений (дефектов) в материалах. Как правило, такими дефектами являются трещины. Установление допустимых или предельных размеров дефектов для конкретного типа изделия предполагает необходимость проведения обширных испытаний (материалов и готовых изделий), моделирующих эксплуатационную нагрузку. К тому же материалы не идентичны по своим свойствам.

Изначально достаточно сложно обнаружить и идентифицировать дефекты на микроуровне, поэтому результаты испытаний описываются статистически, а 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 [1; 2]. При этом важное значение имеет знание геометрии трещины, например, ее размер и величина раскрытия, что требует повышения точности и разрешающей способности методов неразрушающего контроля. Обнаружение дефектов традиционными методами является не всегда достаточным условием принятия решения о допустимости изделия к эксплуатации. В таких случаях необходимы оценки опасности развития дефектов структуры, что требует привлечения новых методов, позволяющих анализировать динамику развития процессов под действием приложенных напряжений.

Одним из таких методов является метод акустической эмиссии (АЭ). Результаты опубликованных исследований АЭ показывают глубокую природу явления и направлены на поиск основных закономерностей процесса акустического излучения с разработкой специализированных методов контроля материалов и изделий. Накопленный для конкретных материалов и изделий практический опыт реализован в стандартах по применению метода АЭ, в частности, для сосудов высокого давления и трубопроводов с использованием критериальных оценок классификации источников излучения сигналов АЭ, которые приняты в США, Японии и России [3; 4; 5]. В качестве критериев классификации применяются критерии

сравнения параметров АЭ, регистрируемой относительно некоторого порога ограничения, с некоторыми заданными значениями, определенными в предварительных экспериментах для данного материала или конструкции (при этом осуществляется одновременное слежение за возрастанием значений регистрируемых параметров); интегральные критерии, основанные на анализе параметров сигналов с использованием усреднения на выбранных интервалах наблюдения (анализа), и динамические критерии, основанные на анализе параметров событий в соответствии с принятыми определениями.

Оценка опасности развития дефектов структуры является достаточно сложно реализуемой задачей. Большие скорости протекания процессов излучения АЭ, трудности, связанные с интерпретацией и идентификацией информации, обусловили, несмотря на высокую чувствительность метода, контроль и слежение за развитием макропроцессов (высокие устанавливаемые уровни порогов ограничения и значений анализируемых параметров). Фактически используемые критерии классификации направлены на обнаружение возникновения и развития макротрещин в материалах (слежение за их развитием). Результаты исследований показали, что индивидуальный подход к анализу регистрируемой информации при выполнении как точных физических экспериментов, так и испытаний конструкций, позволяет проводить оценку опасности развития процессов на ранних стадиях нагружения материалов и изделий.

В проблеме диагностики изделий можно выделить ряд задач, требующих последовательного решения: обнаружение развивающихся дефектов (трещин) – оценка опасности их развития – прогнозирование дальнейшего поведения. Анализ особенностей процессов излучения сигналов АЭ при деформировании и разрушении широкого класса материалов позволил разработать и использовать критерий выделения сигналов АЭ от трещин K_p , который основан на различии в скорости изменения мощности регистрируемых сигналов АЭ [6; 7]. Его применение дает возможность фиксировать появление и развитие не только макро-, но и микротрещин в различных материалах. На рис. 1 показаны фрагменты результатов обработки сигналов АЭ при испытании катушки со сварным соединением [8], изготовленной из опускной трубы третьего блока ЧАЭС, и испытании железобетонной балки на трехточечный изгиб рассредоточенной нагрузкой.

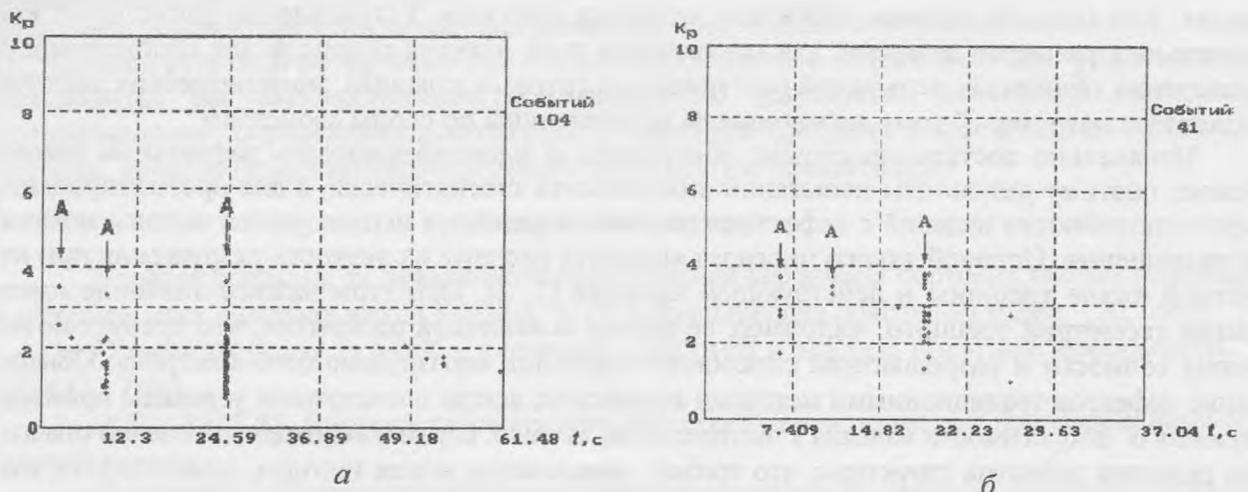


Рис. 1. Параметры акустического излучения при испытании конструкций:
 а – катушка со сварным соединением (гидравлическое давление 2,0 МПа);
 б – железобетонная балка (нагрузка 3,5 кН)

Испытания проводили по схеме ступенчатого нагружения с выдержкой под давлением (рис. 2).

На рис. 1 каждая точка соответствует значению критериальной оценки для каждого зарегистрированного сигнала АЭ. Точкой А отмечены моменты появления сигналов от трещин. Превышение числового значения, отмеченного штрихпунктирной линией, соответствует сигналу АЭ от трещин. В первом случае (рис. 1,а) дополнительные исследования сварного

соединения с использованием ультразвукового метода (методика ультразвуковых колебаний аустенитных сварных соединений на базе дефектоскопа US-52, частота ввода ультразвуковых колебаний – 4,5 МГц; методика ультразвуковых колебаний на базе дефектоскопа УД-12, частота ввода ультразвуковых колебаний – 1,8 МГц) и радиационного метода (источника Ir-192) показали наличие дефекта типа трещина с линейным размером порядка 100 мм. Во втором случае (рис. 1, б) проводилось сравнение теоретических (расчетных) и экспериментальных данных, которое показало расхождение значений в 5%. Следует отметить, что экспериментальная проверка теоретических данных существующими методами для бетонных конструкций – достаточно трудная задача.



Рис.2. Схемы проведения испытаний:

а – катушка со сварным соединением; *б* – диаграмма нагружения; *в* – железобетонная балка;

1 – гидравлическое нагружающее устройство; 2 – манометр давления; 3 – входной трубопровод; 4 – катушка; 5 – сварной шов; 6 – вентиль сброса давления; 7 – датчик АЭ; 8 – усилитель; 9 – персональный компьютер; 10 – железобетонная балка; 11 – волновод

Аналогичным образом проводились испытания СКАФАНДРА РЗМ 488 блока №3 ЧАЭС при его нагружении гидравлическим давлением водой. СКАФАНДР представляет собой колонну переменного диаметра со сварными соединениями. Максимальный диаметр СКАФАНДРА – 500 мм, высота – 25 м, толщина стенки – 25 мм. Результаты испытаний с использованием АЭ показали отсутствие дефектов типа трещин, что подтвердилось контролем радиационным методом. Временные и финансовые затраты на проведение контроля несоизмеримы.

Наличие дефектов требует не только слежения за их развитием, но и разработки критериев оценки опасности [3], а также прогнозирования несущей способности материалов и конструкций. В данном направлении разработана методика и математический аппарат проведения совместного анализа экспериментальных данных, который базируется на следующем. Процессы разрушения материалов [9] сводятся, главным образом, к постепенному накоплению повреждений из-за наложения последовательных отдельных локальных разрушений, которые суммируются до предельного состояния, когда наступает полное разрушение. Это характеризует принцип наложения или суммирования парциальных разрушений до предельного состояния.

Поскольку АЭ является отражением внутренних процессов, происходящих в структуре материала при действии напряжений, и возникает при развитии локальных разрушений, то, очевидно, принцип наложения в полной мере относится и к АЭ, что соответствует возрастанию зависимостей накопления значений параметров АЭ (числа и энергии сигналов АЭ) во времени. Это наблюдается как при испытании материалов непрерывно возрастающей нагрузкой до разрушения (рис.3,а), так и при испытании ступенчато-возрастающей нагрузкой, когда АЭ регистрируется в процессе выдержки, т.е. в процессе релаксации напряжений вследствие развития дефектов структуры (рис.3,б).

С позиций кинетики развития процесса имеет смысл говорить о накоплении значений параметров АЭ, так как мгновенные значения регистрируемой АЭ, очевидно, определяются параметрами локального процесса разрушения, происходящего в данном объеме материала ΔV , в данный момент времени t .

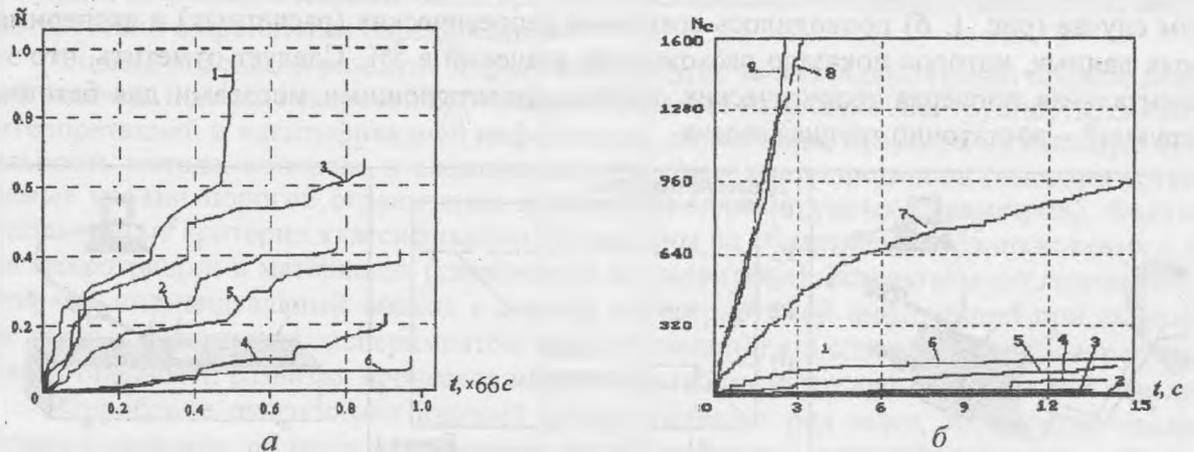


Рис.3. Зависимости накопления числа сигналов АЭ:

a – при деформировании и разрушении паяных соединений АТР (припой Л63):
 1-6 – номера образцов; $\bar{N} = N_T / N_n$; N_T – текущее накопленное значение числа сигналов АЭ; N_n – максимальное значение числа сигналов АЭ;
b – при ступенчатом нагружении швеллера (ступень нагрузки: 1 – 25,0 кН; 2 – 30,0 кН; 3 – 35,0 кН; 4 – 40,0 кН; 5 – 45,0 кН; 6 – 50,0 кН; 7 – 55,0 кН; 8 – 60,0 кН; 9 – 65,0 кН)

Если проводить анализ накопления параметров сигналов в определенные моменты времени t , на интервале регистрации информации T_a с привязкой полученных значений к значениям характеристического параметра Π_ℓ для данных условий испытаний, например, прочности, твердости, нагрузки на ступени нагружения, то можно определять закономерности изменения АЭ:

$$\begin{cases} E_n = f_1(\Pi_\ell, t) & \text{при } t = t_i = \text{const}; \\ N_n = f_2(\Pi_\ell, t) & \text{при } t = t_i = \text{const}, \end{cases} \quad (1)$$

где E_n , N_n – накопленные значения энергии и числа сигналов АЭ; Π_ℓ – характеристический параметр; t_i – временное сечение процесса накопления параметров АЭ.

Если через A_n обозначить накапливаемые параметры АЭ (E_n , N_n), то выражение (1) запишем в обобщенном виде:

$$A_n = f_3(\Pi_\ell, t) \quad \text{при } t = t_i = \text{const}. \quad (2)$$

При проведении испытаний материалов и изделий с использованием АЭ представление результатов анализа осуществляется в виде зависимостей изменения регистрируемых параметров во времени: интенсивность – время, усредненная амплитуда – время, накопление числа сигналов – время и другие. Для установления закономерностей изменения параметров АЭ проводят серии как однотипных испытаний, например, одинаковых образцов одного и того же материала с одинаковой длиной надреза, так и серии испытаний с изменяемым параметром Π_ℓ , например, одинаковых образцов одного и того же материала с различной длиной надреза.

Подобные испытания осуществляют для установления числовых значений параметров регистрируемой АЭ, которые используются при классификации источников излучения [3; 4; 5]. В то же время результаты опубликованных исследований показывают наличие разброса в числовых значениях параметров АЭ даже для однотипных испытаний одного и того же материала, что, очевидно, связано с различиями в исходной структуре (дефектности) на микроуровне. Причем эти различия наблюдаются и в числовых значениях характеристиче-

ского параметра, например, разрушающих нагрузках или прочности изделий. Тогда анализ тенденций изменения параметров АЭ в зависимости от характеристического параметра по результатам M испытаний можно проводить путем анализа экспериментальных данных с определением конкретного вида зависимостей в соответствии с выражением (2), т.е. проводить совместный анализ экспериментальных данных по АЭ, полученных для каждого изделия, испытанного до разрушения, или для каждой ступени нагружения одного и того же изделия без разрушения, во временном сечении регистрируемых процессов.

Наличие зависимостей, описывающих тенденции изменения АЭ при изменении характеристического параметра, позволяет осуществлять прогноз числовых параметров и проводить оценки состояния или оценки опасности развития процессов разрушения. Мы разделяем данные понятия, поскольку числовое прогнозирование можно осуществлять, если известны предельные значения анализируемых параметров, которые получают либо из теоретических расчетов, либо при разрушении статистически значимого M -го количества изделий. Теоретическими расчетами можно определить предельные значения характеристического параметра, например, прочностные свойства изделий. Однако в настоящее время данные расчеты невозможно выполнить для определения параметров АЭ. Поэтому значения предельных параметров АЭ с использованием данного типа электронной аппаратуры определяются только при разрушении изделий.

Если испытания изделий проводятся с разрушением, то для последующего прогнозирования свойств изделий в качестве параметра Π_ℓ может использоваться любой параметр, определяемый целью решаемых задач, например, прочность изделия, предельные напряжения, твердость или любую другую характеристику. Методика проведения испытаний и обработка результатов строятся на определении конкретного вида зависимости в соответствии с выражением (2), или обратной зависимости $\Pi_\ell = f_3^{-1}(A_n, t)$ при $t = t_i = \text{const}$, или при постоянном шаге приращения $t_i = \Delta t_i, 2\Delta t_i, 3\Delta t_i, \dots (\Delta t_i = \text{const})$ с определением интервала значений $\Delta T_a = (t_{i2} - t_{i1})$, в пределах которого характер изменения зависимости описывается однотипной функцией. Так как зависимости накопления значений параметров АЭ во времени представляют собой непрерывно возрастающие функции (рис.3) для каждого определенного значения характеристического параметра Π_ℓ , то естественно, что с увеличением параметра t_i будет происходить увеличение абсолютных значений величин A_n . Поэтому для сравнения результатов, независимых от абсолютных значений A_n , анализ экспериментальных данных необходимо проводить с формализацией их представления. Тогда выражение (2) запишем в виде

$$\text{или} \quad \left. \begin{aligned} \bar{A}_n &= f_4(\bar{\Pi}_\ell, t) \\ \tilde{A}_n &= f_5(\bar{\Pi}_\ell, t) \end{aligned} \right\} \text{при } t = t_i = \text{const}, \quad (3)$$

где $\bar{A}_n = A_n/A_{n\text{max}}$; $A_n, A_{n\text{max}}$ - соответственно текущее и максимальное значения накапливаемого параметра АЭ при данном значении t_i ; $\bar{\Pi}_\ell = \Pi_\ell/\Pi_{n\text{max}}$; $\Pi_\ell, \Pi_{n\text{max}}$ - соответственно текущее и максимальное значения характеристического параметра.

Зависимости в соответствии с выражениями (2) и (3) могут описываться различными математическими функциями, характер изменения которых связан с постановкой решаемой задачи и типом проводимых испытаний. Наличие зависимости с ее математическим описанием позволяет разрабатывать специализированные методики контроля и прогнозирования или проводить определение числовых величин требуемых параметров изделия без разрушения.

Совместный анализ экспериментальных данных, полученных при проведении испытаний ряда изделий с разрушением, позволил определить вид зависимости по выражению (3). На основании математических описаний зависимостей разработаны методики контроля и прогнозирования (определения) физико-механических характеристик изделий без их разрушения.

На рис.4 показаны зависимости для прогнозирования разрушающих нагрузок паяных соединений алмазно-твердосплавных резцов и твердости абразивных кругов [6] с использованием АЭ.

Зависимости описываются выражениями вида

$$\tilde{E}_H = aP^b; \quad (4)$$

$$H = c\alpha + d, \quad (5)$$

где \tilde{E}_H – накопленная энергия сигналов АЭ при уровне нагрузки P , не превышающей 3 % от максимального значения; P – разрушающая нагрузка, кН; a, b, c, d – константы для данного типа конструкции, материала, используемой аппаратуры АЭ, условий испытания; H – твердость по Бринелю; α – угол наклона кривой накопления энергии сигналов АЭ.

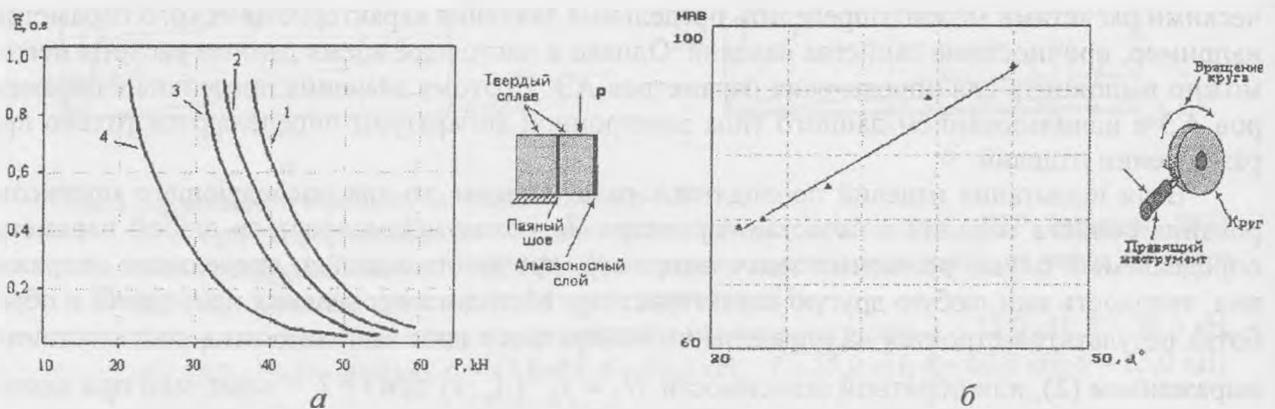


Рис.4. Прогнозирование физико-механических характеристик материалов:

a – прочности паяных соединений алмазно-твердосплавных резцов по суммарной энергии АЭ; b – твердости абразивных кругов по углу наклона кривой накопления энергии при их правке природным алмазом (глубина правки 15 мкм); 1 – припой № 7; 2 – припой № 16; 3 – припой ЛБ3; 4 – припой № 34

Анализ экспериментальных данных в соответствии с выражениями (4) и (5) показывает, что ошибка прогнозирования числовых значений величин не превышает 6 – 8 %.

Представленные прогнозные зависимости получены для изделий серийного производства, исследования которых можно проводить с разрушением, причем в первом случае с полной непригодностью дальнейшего их использования, а во втором – на уровне обычной технологической операции правки инструмента.

Конструкции и изделия, работающие в промышленных условиях, контролируются стандартными методами неразрушающего контроля, а их испытания осуществляются в соответствии с нормативами без разрушения. Например, нагружение изделий до 1,1 рабочей нагрузки с проведением последующего обследования, ступенчатое повышение нагрузки на изделие; определение действующих напряжений с использованием тензометрии и сравнение полученных результатов с расчетными или исходными величинами и другие виды испытаний. Так как изделия испытывают без разрушения, то использование АЭ возможно для проведения оценки их состояния или оценки опасности развития процессов разрушения.

Согласно представлениям кинетической теории разрушение твердых тел – это постепенный кинетический процесс деформирования и разрушения, развивающийся в механически напряженном материале во времени с момента приложения к нему нагрузки. При этом деформация и разрушение характеризуются скоростью их развития и требующимся для их разрушения временем, которые зависят от структуры и свойств твердого тела, от напряжений и температуры. В то же время общей особенностью кинетики развития процесса разрушения является его лавинообразный характер, интенсивность и скорость которого увеличиваются с приближением к предельному состоянию (полному разрушению тела) и описываются экспоненциальными функциями [9].

Лавинообразный характер увеличения интенсивности процессов с приближением к разрушению наблюдается и в АЭ, регистрируемой как при нагружении изделий непрерывно возрастающей нагрузкой (рис.5, а), так и при испытании изделий с использованием ступенчато-возрастающей нагрузки с выдержкой (рис.5, б, в, г).

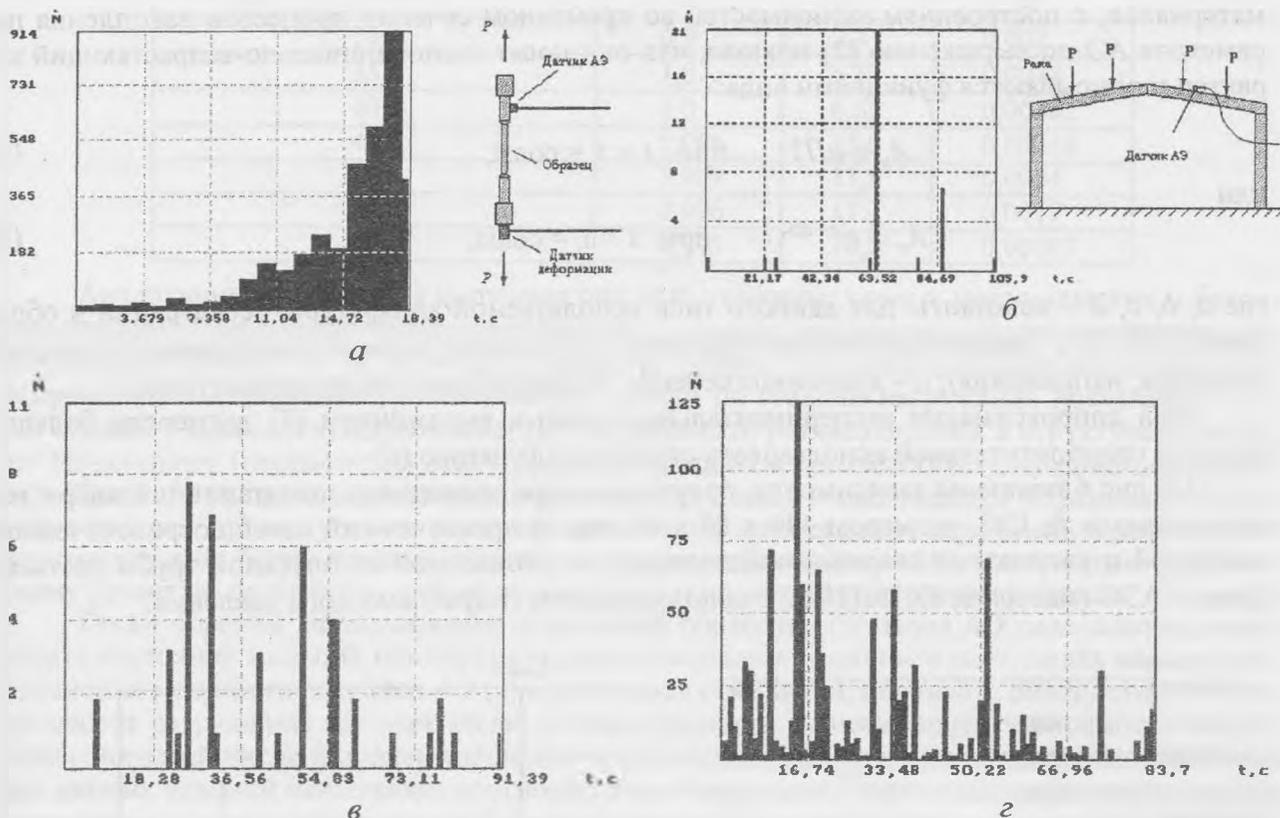


Рис. 5. Интенсивность регистрируемых сигналов АЭ: а – при непрерывном нагружении образца из тяжелого ультрадисперсного сплава на растяжение; б, в, г. – при ступенчатом нагружении рамы производственного помещения с пролетом 15 м (ступень нагрузки: б – 1,75 кН; в – 2,0 кН; г – 2,25 кН)

Зависимости изменения параметров АЭ во времени на каждой стадии нагружения не имеют плавного характера, что затрудняет обработку и интерпретацию регистрируемой информации. Однако при этом сохраняются общие тенденции их изменения. Увеличение уровня нагрузки, приложенной к изделию, изменяет его напряженное состояние и способствует протеканию локальных процессов в структуре материала (деформации и разрушения). Развитие последних при выдержке изделия под нагрузкой приводит к перераспределению и релаксации внутренних напряжений с установлением нового напряженного состояния. С увеличением ступени нагружения интенсивность или скорость протекания данных процессов возрастает. Подобный характер наблюдается и в акустическом излучении – увеличение интенсивности с переходом к лавинообразному процессу при увеличении ступени нагружения и постепенное затухание интенсивности излучения на каждой ступени при возрастании времени выдержки (рис.5, б, в, г).

Лавинообразный характер изменения интенсивности АЭ свидетельствует о том, что скорость развития процесса разрушения определяет скорость развития процесса излучения АЭ. Тогда, если разрушение происходит с увеличением скорости, которая стремится к предельному значению ($v_e \rightarrow v_{\text{лпр}}$), т.е. представляет собой лавинообразный процесс, то зависимости накопления параметров АЭ должны носить экспоненциально-возрастающий характер с приближением к предельным числовым значениям. Отсюда следует, что по степени на-

растания зависимостей $A_n = f(\Pi_\ell)$ или скорости их изменения v_a можно проводить оценки опасности развития процесса разрушения.

Совместный анализ экспериментальных данных, полученных при испытании разнообразных изделий (образцов и конструктивных элементов), изготовленных из различных материалов, с построением зависимостей во временном сечении процессов накопления параметров АЭ по выражению (2) показал, что они носят экспоненциально-возрастающий характер и описываются функциями вида:

$$A_n = a\Pi_\ell^b \quad \text{при } t = t_i = \text{const}, \quad (6)$$

или

$$A_n = e^{(c+d\Pi_\ell)} \quad \text{при } t = t_i = \text{const}, \quad (7)$$

где a, b, c, d – константы для данного типа используемой аппаратуры регистрации и обработки АЭ; Π – характеристический параметр для данных условий проведения испытаний (нагрузка, напряжения); t_i – временное сечение процесса накопления параметров АЭ.

При аппроксимации экспериментальных данных выражением (7) дисперсия больше, поэтому предпочтительней использовать степенную функцию (6).

На рис.6 показаны зависимости, полученные при проведении испытаний швеллера, изготовленного из Ст3, размером 440 x 80 x 45 мм, на трехточечный изгиб сосредоточенной нагрузкой и катушки со сварным соединением, изготовленной из опускной трубы третьего блока ЧАЭС (материал 8X18H10T), с использованием гидравлического давления.

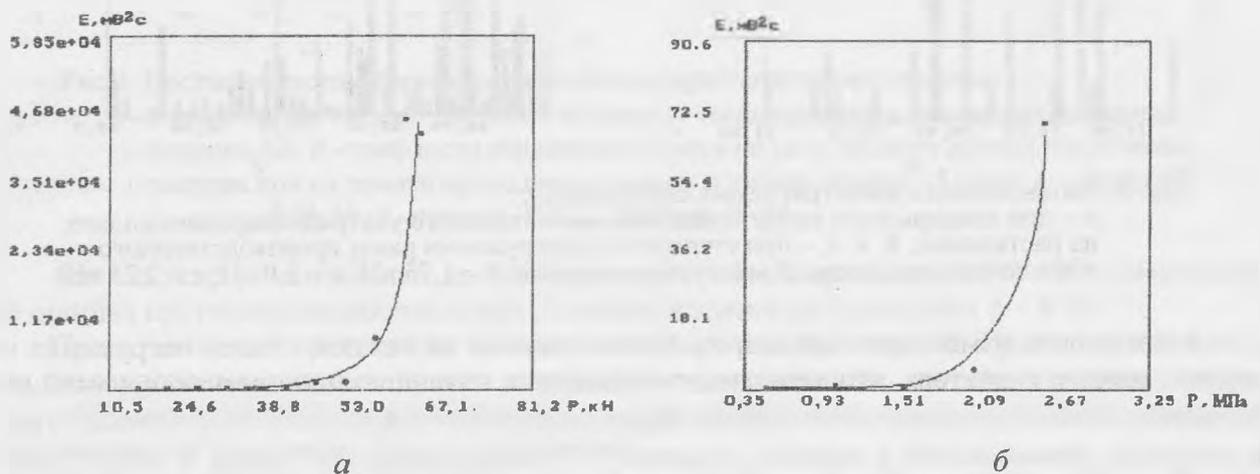


Рис.6. Зависимости накопленной энергии сигналов АЭ от нагрузки:

a – при ступенчатом нагружении швеллера; b – при гидравлическом нагружении катушки со сварным соединением

Анализ результатов с формализацией их представления (для приведения к единичной шкале отсчетов) по выражению

$$\bar{A} = a\bar{\Pi}^b, \quad (8)$$

где $\bar{A} = A_T/A_{\max}$, $\bar{\Pi} = \Pi_T/\Pi_{\max}$; $A_T, A_{\max}, \Pi_T, \Pi_{\max}$ – текущие и максимальные значения параметров, показал, что с увеличением ступеней нагружения происходит возрастание показателя степени b . В таблице приведены значения коэффициентов аппроксимирующего выражения (8) при испытании швеллера ($t_i=17,5$ с). Визуальная потеря устойчивости (критическое развитие процесса) наблюдается при значении показателя $b > 10$.

Значения коэффициентов аппроксимирующего выражения при испытании швеллера

Максимальная нагрузка на ступени нагружения P , кН	Коэффициент		Среднеквадратическое отклонение σ^2
	a	b	
30,0	0,9	2,4	0,002
35,0	1,0	6,8	0,0048
40,0	1,0	6,62	0,00062
45,0	0,986	15,0	0,00246
50,0	0,999	13,8	0,0004
55,0	0,996	17,4	0,0017
60,0	0,975	18,5	0,00007

Аналогичные результаты получены при испытании различных металлических и бетонных изделий. При этом развитию критического процесса разрушения соответствует значение показателя степени $b > 10$, которое сохраняется вплоть до полного разрушения. Измерение напряжений и деформаций, обследование изделий по стадиям нагружения показывают, что АЭ обладает высокой чувствительностью к процессам, развивающимся в структуре материала. Начальному (неопасному) этапу развития процессов соответствует значение показателя $b < 3$. При $3 < b < 10$ происходит опасное развитие процессов – наблюдается образование и развитие трещин, промежуточная потеря устойчивости, хотя скачки напряжений и деформаций фиксируются на более поздних стадиях нагружения. Значение $b > 10$ соответствует критическому развитию процессов – наблюдаемые визуально макропроцессы разрушения.

Таким образом, использование совместной обработки сигналов АЭ позволяет анализировать состояние изделий: обнаруживать развивающиеся трещины в материалах по скорости изменения мощности сигналов АЭ (критериальная оценка K_p); оценивать опасности развития процессов разрушения по показателю степени функции, описывающей зависимости накопления значений числа или энергии сигналов АЭ от значения характеристического параметра для данных условий испытаний; прогнозировать (определять) значения характеристического параметра для однотипных изделий без их разрушения при известных максимальных значениях предельных параметров, соответствующих полному разрушению.

Список литературы

1. Coffin M.D., Tiffany C.F. New air force requirements for structural safety, durability and life management. –J.Aircraft. –Vol.13. –1976. –P. 93–98.
2. Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Харин В.С. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов. –К.: Наук. думка, 1977. –280 с.
3. РД-03-131-97. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. –М.: Изд-во стандартов, 1996. –40 с.
4. ASME. Acoustic emission for successive inspections. Section XI, Div.1, Case N-471, Supplement № 5, Code Cases 1989 Edition, Nuclear Components, Boiler and Pressure Vessels, Code Appruvel Date: 30 Apr. 1990.
5. NDIS 2412-1980. Acoustic emission testing of Spherical pressure vessels made of high tensile strength steel and classification of test results.
6. Бабак В.П., Филоненко С.Ф. Исследование материалов и изделий методом акустической эмиссии для прогнозирования их состояния // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. – 1997. –№ 1. –С. 37–50.
7. 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.
8. Филоненко С.Ф. Акустическая эмиссия при исследовании изделий из реакторных сталей. // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. –1999. –№ 1. –С. 30–37.
9. Маламедов И.М. Физические основы надежности. –Л.: Энергия, 1970. –152 с.

Стаття надійшла до редакції 20 травня 2000 року.