



МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Г. В. МИКИТИН, Б. П. КЛИМ, Е. П. ПОЧАПСКИЙ, З. В. ДМИТРИВ

Предложен метрологический подход к использованию метода АЭ в неразрушающем контроле материалов и конструкций, объединяющий объект исследования, первичные измерительные преобразователи (акустические, тензометрические); методологию локации источника сигнала АЭ; систему отбора и обработки информации согласно адекватной физической модели сигнала АЭ; метрологическое обеспечение; интерпретацию результатов акустико-эмиссионного контроля согласно принятой адекватной модели трещины и взаимосвязи измеряемых параметров сигнала АЭ с характеристиками трещины.

Offered metrological approach to the use of the acoustic emission method in the nondestructive testing of materials and constructions. It takes into consideration: object of investigation, initial measuring transformers (acoustic, tensometric), methodology of an acoustic emission source location, system of information extraction and processing based on an adequate physical signal model, metrological securing, interpretation of an acoustic emission control results based on an adequate crack model, correlation of measured acoustic signal parameters with crack characters.

Сегодня научно-исследовательская работа национальных метрологических и прикладных институтов стран-участниц КООМЕТ и ЕВРОМЕТ актуализируется в одном из проблемных направлений метрологии — метрологическом обеспечении акустико-эмиссионных измерений в области неразрушающего контроля (НК) материалов и конструкций [1]. В проблеме акустико-эмиссионных измерений на сегодня решаются такие задачи: методы и средства воспроизведения образцового сигнала АЭ эмиссии (САЭ); современные метрологические требования к методологии акустико-эмиссионных измерений; новые подходы, технологии, методы и средства акустико-эмиссионных измерений; интерпретации результатов измерений параметров САЭ в связи с параметрами физической модели разрушения объекта исследования; внедрение методов оценки неопределенности измерений.

Однако решение указанных задач метрологического обеспечения акустико-эмиссионных измерений каждой в отдельности или в совокупности требует системного метрологического подхода к применению метода АЭ, включающего такие функционально взаимосвязанные элементы: объект исследования и его адекватную модель; методологию локации сигнала АЭ; методологию измерения параметров САЭ; акустико-эмиссионную измерительную систему с заданными метрологическими и техническими характеристиками; образцовый (стохастический) сигнал АЭ и его воспроизведение; стандартизированная методика НК материалов; подход к интерпретации результатов контроля на основании взаимосвязи параметров САЭ и параметров разрушения, установленной в процессе экспериментальных исследований.

В данной работе предложен метрологический подход к применению метода АЭ для НК материалов и конструкций.

Метрологический подход к применению метода АЭ для НК материалов и конструкций. Основными метрологическими критериями, обеспечивающими точность НК (пассивный, активный) конструкционных материалов методом АЭ являются обоснованный по метрологическим характеристикам выбор первичных измерительных преобразователей (преобразователей АЭ (ПАЭ), тензометрических преобразователей (ТП)); обоснование выбора стандартизированной методологии локации — приема и предварительной обработки определенным способом сигнала АЭ эмиссии первичными преобразователями с целью их дальнейшей локализации; применение стандартизированных универсальных аналоговых входных усилителей; управляемых полосовых фильтров; аналого-цифровых преобразователей (АЦП) сигнала АЭ адекватно физической модели сигнала; разработка и применение универсальных алгоритмов, программ анализа и цифровой обработки сигнала; разработка методологии измерения параметров САЭ на основании принципа, метода, методики измерения согласно действующих государственных нормативных документов; разработка структуры метрологического обеспечения измерения (контроля) параметров САЭ; анализ связи стандартизированных параметров САЭ с определенными параметрами трещины адекватно модели трещины (линейная, нелинейная механика разрушения) исследуемого материала.

Достоверность НК конструкционных материалов методом АЭ обусловлена информационными аспектами: наличием (отсутствием) дефектов; локализацией; площадью; условными размерами; формой; ориентацией; количеством; взаимным пространственным расположением; физическими характеристиками неоднородностей; интегральными значениями физико-механических характеристик



материала; пространственным распределением характеристик материала.

Единство и точность измерений параметров САЭ обусловлена метрологическими аспектами, в частности наличием метрологического обеспечения метода НК [2, 3]. С целью создания метрологического обеспечения НК материалов и конструкций методом АЭ предлагается метрологический подход к применению метода, учитывающий функционально взаимосвязанные элементы: объект исследования, первичные измерительные преобразователи, локацию 1; акустико-эмиссионную измерительную информационную систему 2; методологию измерения параметров сигнала АЭ 3; метрологическое обеспечение 4; интерпретацию результатов измерения 5 (рис. 1).

Такой метрологический подход позволяет обеспечить точность отбора и обработки САЭ, обусловленной амплитудно-частотной характеристикой измерительных каналов системы; типом и метрологическими характеристиками пьезоэлектрического и тензометрического преобразователей, их калибровкой; коэффициентом преобразования, усиления, фильтрации измерительных каналов; порогом дискриминации; методологию локации (линейной, плоской, на цилиндрических и сферических поверхностях) относительно задачи создания АЭ измерительных информационных систем; методологию измерения параметров САЭ согласно концепции метрологического обеспечения; интерпретацию результатов НК согласно выбранной модели трещины.

В структуру метрологического обеспечения измерения [4] входит применение прецизионных первичных измерительных преобразователей. Достоверная информация о процессах разрушения материала заложена в параметрах САЭ, форме сигнала, частотных характеристиках АЭ системы «объект исследования–первичный измерительный преобразователь» (акустико-эмиссионный для акустического канала системы, тензометрический

— для каналов раскрытия трещины и нагрузки). Точность регистрации амплитудного и частотного спектра САЭ обусловлена методологией и соответственно погрешностью локации источника АЭ; метрологическими характеристиками преобразователя; его калибровкой, причинами, ограничивающими частотный диапазон регистрируемого сигнала.

Среди большой разновидности преобразователей АЭ пьезоэлектрические (резонансные, полосовые, полосовые продольных волн, резонансные теплостойкие, полосовые теплостойкие, резонансные герметические, полосовые герметические, широкополосные; резонансные сдвига) имеют высокую степень помехоустойчивости, вибростойкости, высокую стабильность параметров при условии влияния повышенной температуры и радиации. Согласно техническим характеристикам разработанной шестиканальной АЭ информационно-измерительной системы (ИИС) адекватно модели САЭ выбран полосовой ПАЭ – П1ЭКМ 015-06. Частотный диапазон такого ПАЭ в пределах значений от 0,15 до 0,6 МГц, среднее значение чувствительности не меньше $2,2 \cdot 10^{11}$ В/м.

Для измерения относительной деформации $\Delta l/l$ и внутреннего напряжения в пределах постоянного значения модуля упругости E материала используют тензорезистивные преобразователи. С деформацией (например, под нагрузкой) исследуемого объекта деформируется проволоочная решетка, соответственно меняется сопротивление преобразователя вследствие тензоэффекта. Входной величиной преобразователя является деформация, выходной — изменение сопротивления. Уравнение преобразования тензорезистора соответственно запишется через коэффициент тензочувствительности k , механическое напряжение, модуль упругости E исследуемого материала [5]

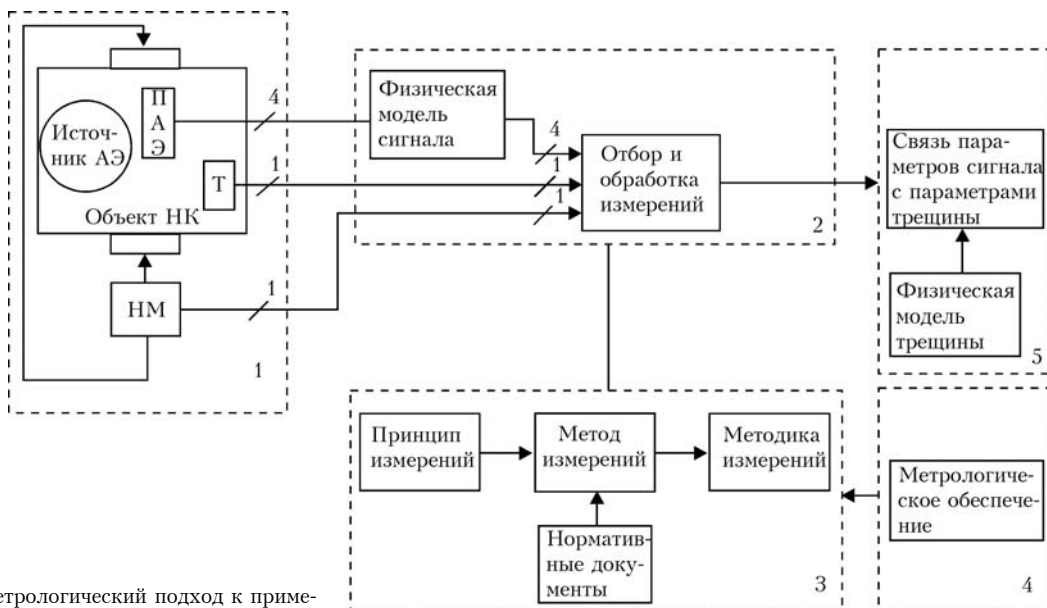


Рис. 1. Метрологический подход к применению метода АЭ для НК

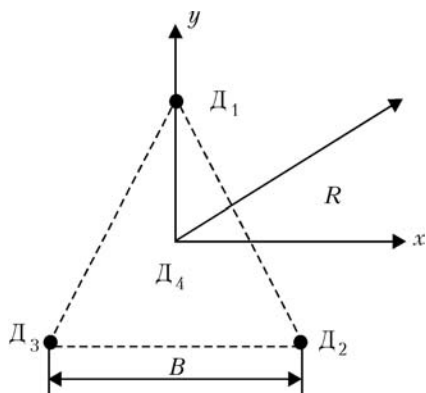


Рис. 2. Четырехточечная антенна для определения координат источников АЭ

$$\Delta R/R = (k/E)\sigma, \quad k = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}, \quad \sigma = E(\Delta l/l),$$

где $\Delta R/R$ — относительное изменение сопротивления преобразователя; $\Delta l/l$ — относительная деформация проволоки.

Для металлов значение относительной деформации $\Delta l/l$ в пределах значения коэффициента $k = 0,5 \dots 4$ обуславливает относительное изменение сопротивления преобразователя $\Delta R/R = (1,25 \dots 10) \cdot 10^{-3}$.

Преимущественно используются электрические цепи с дифференциальным включением тензометрических преобразователей, в которых один тензорезистор R_1 испытывает деформацию растяжения в диапазоне $(R \dots R + \Delta R)$, а второй R_2 — деформацию сжатия в диапазоне $(R \dots R - \Delta R)$. Падение напряжения ΔU , полученное при разомкнутой диагонали моста определяется по формуле [5]:

$$\Delta U = \Delta R U (R_1 + R_2), \quad \Delta R / (R_1 + R_2) = k(\Delta l/l) \approx 2\Delta l/l,$$

где U — напряжение питания моста; $k = 2$ — коэффициент тензочувствительности металлов.

Для равноплечего моста падение напряжения определяется так:

$$\Delta U = \Delta I U / I \quad \text{или} \quad \Delta U = \sigma U / E.$$

Методологические аспекты локации источника АЭ. Технология АЭ контроля (диагностирования) согласно [6], кроме АЭ аппаратуры обязательно

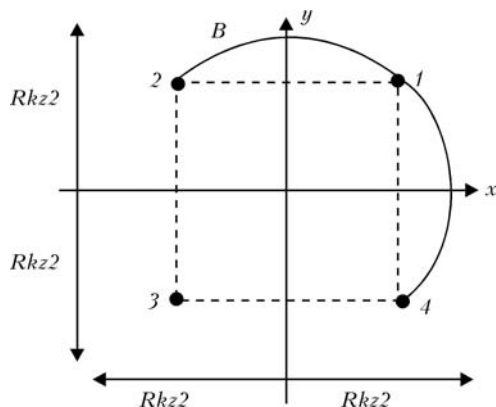


Рис. 3. Определение координат источников АЭ по четырехточечной схеме приема САЭ

должна содержать развернутую схему (карту) расположения первичных преобразователей АЭ, являющейся основой определенного типа локации. В литературе [7–10] приведены различные подходы к определению значения разницы времени прихода (РВП) сигналов АЭ по N-точечным схемам принятия сигнала. В [6] приведены наиболее распространенные варианты расположения ПАЭ в АЭ антеннах. Для определения координат источников АЭ различают: зонную, линейную, плоскую локацию.

Для функционирования АЭ системы используется методология локации плоского типа по схеме: четыре ПАЭ расположены в вершинах и в центре равностороннего треугольника (датчики Д1–Д4) (рис. 2) [7]. Преимуществами используемой четырехточечной схемы локации источников АЭ на плоскости являются:

- наличие трех независимых значений РВП, позволяющих по алгоритму однозначно определять координаты источника по сравнению с трехточечной схемой размещения ПАЭ, принятой минимально количественной для определения координат источника АЭ на поверхности материала, конструкции;

- уменьшение вероятности регистрации мнимого события АЭ при воздействии помех, соответственно повышение помехоустойчивости;

- гибкость расположения ПАЭ при техническом диагностировании поверхности материалов, конструкции сложной конфигурации.

На практике для определения координат источников АЭ на объектах контроля плоского типа четыре ПАЭ располагают в вершинах квадрата на плоскости (рис. 3) [6]. Базой антенны B является расстояние между двумя «соседними» ПАЭ (точки 1, 2 или 1, 4). Координаты источников АЭ определяют в пределах зоны контроля, т. е. в пределах участка, который задают значениями $Rkz1, Rkz2$. Алгоритм и погрешность вычисления координат источника САЭ для четырехточечной схемы приема сигнала приведен согласно структуре блока локации в измерительной информационной системе отбора информации, представленной сигналами АЭ. Точность вычисления координат источника АЭ определяется погрешностью измерения разности времени прихода сигнала на ПАЭ и размещением элементов приемной антенны [6]. В работе [7] приведена методология оценки погрешности определения координат в случае использования четырехэлементной антенны.

Плоскую локацию (четыре ПАЭ) используют для определения координат источников АЭ на цилиндрических и сферических поверхностях [6]. Локацию на цилиндрической поверхности проводят с учетом развертки цилиндра, используя линейно-плоскостные комбинации (например, шесть ПАЭ, расположенных в вершинах трех квадратов, имеющих общие стороны). Для сферических поверхностей, имеющих большие радиусы кривизны, условно принятых за плоские, используют алгоритмы определения координат по схеме четырех ПАЭ, расположенных в вершинах квадрата, на плоскости.



В работе [13] предложен способ определения координат АЭ источника с помощью пространственной локации. Для реализации этого способа на сферической поверхности объекта располагают шесть ПАЭ. Три группы ПАЭ — по два в каждой размещают на поверхности объекта на трех взаимно перпендикулярных осях, пересекающихся в центре сферического объекта, по два ПАЭ на каждой оси, т. е. каждая группа ПАЭ контролирует соответствующую ось координат x , y , z , причем ПАЭ равноудалены один от другого (рис. 4) [13].

Для каждой группы ПАЭ определяют разницу времени прихода на соответствующие ПАЭ. Используя разницу времени прихода сигналов на ПАЭ и скорость волны в материале объекта, определяют координаты источника АЭ. Для такой пространственной локации на практике использованы три модифицированные двухканальные АЭ регистратор (типа АФ-15) с персональным компьютером, обрабатывающие зарегистрированную информацию. При условии, что координаты ПАЭ известны, каждый из приборов АФ-15 регистрирует разницу времени прихода τ_1 , τ_2 сигналов на свою пару ПАЭ. Эти значения РВП дают информацию о разнице расстояний от источника сигналов АЭ к соответствующим ПАЭ.

Методология локации (плоской, пространственной) источника АЭ основывается на применении принципа, метода и методики локации. *Принцип локации* — физическое явление приема и способ обработки сигналов АЭ преобразователями с целью их дальнейшей локализации.

Локализация источника АЭ — определение местонахождения источника АЭ по совокупности зарегистрированных сигналов АЭ [6].

Метод локации основывается на алгоритме функционирования блока локации в АЭ ИИС и, соответственно, созданного алгоритмического и программного обеспечения системы. Методика локации основывается на применении процедур выбора количества ПАЭ и схемы их размещения на исследуемом объекте (материале, конструкции); разработке алгоритма определения координат источника АЭ с соответствующей точностью по уже выбранной схеме размещения ПАЭ.

Методология измерения параметров сигнала АЭ и метрологическое обеспечение. Принцип, метод и методика измерения физической величины является основой методологии измерения параметров сигналов [14]. Взаимосвязь элементов методологии измерения параметров сигнала АЭ: объект исследования; принцип измерения; метод измерения; методика измерения; методология измерения; измерительная информационная система, нормативные документы. Основными аспектами методологии измерения параметров сигнала АЭ являются:

изучение физических свойств объекта исследования и физической природы возникновения АЭ; разработка адекватной модели сигнала АЭ; анализ параметров сигнала АЭ; выбор метода регистрации (измерения) параметров САЭ, адекватной модели сигнала, алгоритма регистрации; разработка (выбор) средства регистрации сигнала АЭ ИИС с целью измерения параметров сигнала АЭ, обра-

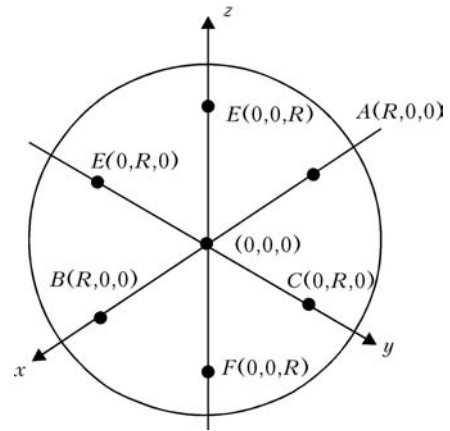


Рис. 4. Структурная схема пространственной локации источников АЭ

ботка и интерпретация результатов; выбор метода, алгоритма измерения параметров сигналов АЭ; разработка алгоритма проведения натуральных испытаний (растяжение и сжатие исследуемого образца) с целью установления связи параметров АЭ с параметрами разрушения материала; разработка метрологических основ применения метода АЭ и подхода к метрологическому обеспечению АЭ ИИС.

На основании структуры единой методологии измерения (контроля, диагностирования, прогнозирования, распознавания параметров объекта), анализа особенностей процесса АЭ измерения приведена структура методологии измерения параметров сигнала АЭ: объект исследования 1; источник АЭ 2; пьезоэлектрический преобразователь 3; модель сигнала 4; метод измерения 5; методика измерения 6; модель акустического измерительного канала ИИС 7; модель погрешности измерительного канала системы 8; методика оценивания метрологических характеристик измерительного канала 9; метрологическое обеспечение 10 (рис. 5) [14].

Методология измерения параметров сигнала АЭ включает такие аспекты:

метод АЭ, основой которого является явление АЭ и ПЭП, как измерительное средство, предназначенное для приема акустических волн и преобразования их в электрический сигнал; методология локации координат дефектов в плоских объектах, основой которого является измерение разницы времени прихода сигнала от источника АЭ на первичные измерительные преобразователи; измерительным средством является блок измерения РВП; метод измерения, сущность которого состоит в измерении самих параметров сигнала АЭ, функционально-связанных с параметрами разрушения

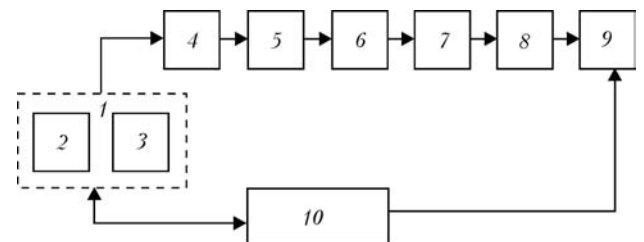


Рис. 5. Структурная схема методологии измерения параметров сигнала АЭ



материала; измерительным средством является АЦП, представляющий измеряемую непрерывную величину кодом.

Используя такую методологию система отбора и обработки сигнала АЭ, регистрирует волновую картинку АЭ по заданному времени прихода и в течение определенного интервала, обусловленного возможностью оперативной памяти для ее записи, и далее обрабатывает информацию по заданной программе. Т. е., на основании зарегистрированного сигнала можно определить максимальное значение амплитуды огибающей САЭ и активность — число зарегистрированных импульсов АЭ за единицу времени согласно нормативному документу [6].

Рассмотрим метрологическое обеспечение измерения физических величин, в частности параметров сигнала АЭ. В работе [4] представлен концептуальный подход к созданию метрологического обеспечения измерений (контроля, диагностирования, прогнозирования, распознавания) параметров исследуемых объектов. Такая концепция метрологического обеспечения применима в области НК материалов.

Соответственно в работе [9] уделено внимание особенностям метрологического обеспечения НК материалов, в частности методам и средствам. Одной из основных задач метрологического обеспечения является метрологическая аттестация средств измерительной техники (измерительных приборов, ИИС). В работе [15] рассмотрены особенности метрологической аттестации измерительных каналов АЭ ИИС согласно требованиям, предъявляемым в государственных стандартах по метрологическому обеспечению ИИС на основании модели измерительного канала и модели погрешности канала. В работе [16] предложена методика определения метрологических характеристик измерительных каналов АЭ системы согласно рекомендациям государственных и межгосударственных стандартов по метрологическому обеспечению ИИС.

Связь параметров сигнала АЭ с параметрами разрушения материалов. Взаимосвязь параметров САЭ с параметрами дефекта материала зависит от самого механизма генерирования сигнала, далее от вида источника АЭ, наделенного соответствующими спектрами амплитуд импульса АЭ, длительности сигнала, ширины частотного спектра. Такое состояние оценивания является подходом к интерпретации результатов НК.

Регистрация определенных параметров САЭ, например, амплитуды и числа импульсов АЭ в техническом аспекте обусловлена чувствительностью ИИС, в частности метрологическими характеристиками используемого типа ПЭП; методом локализации координат источника САЭ; методом отбора САЭ, в котором заложен уровень дискриминации, амплитудный и частотный диапазоны измерения; количеством и структурой измерительных каналов системы отбора сигнала АЭ. Ниже описана связь параметров САЭ с параметрами разрушения материала [17].

Кoeffициент интенсивности напряжений K	$N \sim K^3$; $N \sim K^3 / E$
Суммарное раскрытие трещины δ	$\delta \sim (1 - \gamma)N / (0,2G_T)$
Суммарная площадь раскрытой трещины S	$S \sim N$
Длина скачка трещины Δl	$\Delta l \sim U_a$
Площадь микротрещины ΔS_M	$\Delta S_M \sim U_a$
Скачкообразное увеличение площади трещины ΔS	$\Delta S \sim (\sum U_a)^2 \cdot E / K^2$
Длина трещины l	$L = cT$

Здесь U_a — амплитуда АЭ; c — скорость распространения продольных колебаний; T — длительность первой полуволны АЭ; N — число импульсов АЭ; g — коэффициент Пуассона; G — предел текучести.

Параметры САЭ, регистрируемые ИИС, должны быть четко связаны с той или иной моделью источника АЭ. Известны такие модели микротрещины с дислокационными скоплениями: модели образования микротрещины из дислокационных скоплений; модель роста трещины [21].

Модель образования микротрещины связана с оцениванием энергии упругих колебаний, в которой заложены параметры трещины. Так, в работе [18] энергия АЭ для любой модели определяется из соотношения

$$W_{AЭ} = \frac{1}{2} \frac{E}{25} h l (nb) - \frac{Eb}{50} hl,$$

где h — глубина микротрещины; l — длина микротрещины; n — число дислокаций, обуславливающих начало микротрещины; E — модуль Юнга; b — постоянная решетки материала.

С моделями образования и роста микротрещины связана форма сигнала АЭ. В зависимости от типа источника одиночный сигнал АЭ может быть релаксационного или акселерационного типа [20].

Связь параметров сигнала АЭ с параметрами разрушения материала раскрывается постановкой задачи исследования, моделью трещины, видом исследуемого образца, метрологическими характеристиками АЭ исследуемого ИИС. По литературным данным известны зависимости между интенсивностью САЭ, амплитудой импульсов АЭ и величиной дефекта материала; интенсивностью и временем разрушения; суммарным количеством импульсов и коэффициентом интенсивности; энергией САЭ и длиной трещины [21].

Установлена теоретическая и экспериментальная связь между длиной трещины и амплитудой импульсов сигнала АЭ. Аналитически такое линейное соотношение представлено [20]:

$$\sum_i \Delta l_i \sim \sum_i (A_i')^{2/3},$$

где $A_i' = \int_0^{\Delta t} A_i(t) dt$ — амплитуда зарегистрированного

электрического сигнала для двух типов образцов — стали Ст40Х, материала Д16-АТ.

Суммарный счет АЭ при развитии трещины в условиях монотонной нагрузки связан с коэффициентом интенсивности напряжений [17, 18]



$$N = aK^m,$$

где a , m — параметры, зависящие от материала, его состояния, условий роста трещины для различных материалов и условий испытаний, в частности для определенного вида материалов m принимает значение в диапазоне 4Ш12.

Известна эмпирическая связь энергии САЭ с параметром длины трещины [17]:

$$\sum E_e^2 = K^2 \sum 2\Delta l / E,$$

где K — коэффициент концентрации напряжений в вершине трещины; Δl — прирост длины трещины; E — модуль упругости.

Коэффициент интенсивности напряжения K , как общепринятый параметр разрушения связан со стандартизированным параметром сигнала АЭ числом импульсов N следующим выражением [18, 21]:

$$N = aK^m,$$

где a , m — параметры исследуемого типа образца (материала, конструкции).

Соответственно, измеряя число импульсов N сигнала АЭ (при значении m для соответствующего материала), получаем информацию о росте трещины через параметр l [21].

Выводы

Неразрушающий контроль материалов и конструкций методом АЭ включает процедуру измерения параметров сигнала АЭ, несущего информацию о состоянии объекта исследования. Точность НК материалов обусловлена точностью измерения параметров САЭ. Сам процесс измерения параметров САЭ должен иметь не только метрологическое обеспечение, обеспечивающее единство и точность измерения физических величин, связанных с параметрами разрушения, но и метрологический подход к использованию метода АЭ для НК. В данной статье предложен такой метрологический подход к использованию метода АЭ, учитывающий физическую модель сигнала; методологию локации источника сигнала АЭ; методологию измерения параметров сигнала АЭ; первичные измерительные преобразователи; акустико-эмиссионную ИИС и алгоритм обработки результатов измерений; стандартизированную методологию контроля (диагностирования); метрологическое обеспечение и подход к интерпретации результатов НК объекта на основании моделей САЭ и трещины и взаимосвязи их параметров.

1. Патон Б. Е., Недосека А. Я. О новых подходах в оценке состояния сварных конструкций и определения их оста-

точного ресурса // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 1. — С. 3–8.

2. Патон Б. Е., Недосека А. Я. Диагностика и прогнозирование остаточного ресурса сварных соединений // Там же. — 1992. — № 1. — С. 3–17.
3. Чаусов Н. Г., Недосека С. А. Использование метода АЭ для экспресс-контроля разрушения бетонов с добавками пластификаторов // Там же. — 1998. — № 3. — С. 12–16.
4. Концептуальний підхід до створення метрологічного забезпечення вимірювань / Г. В. Микитин, О. П. Бухало, Б. П. Клим, Є. П. Почапський // Укр. метролог. журн. — 2001. — № 4. — С. 5–9.
5. Аспекти міряння параметрів сигналу акустичної емісії / О. П. Бухало, Я. П. Драган, Б. П. Клим, Г. В. Микитин, Є. П. Почапський // Комп'ютерні технології друкарства. — 1999. — №3. — С. 168–183.
6. ДСТУ 4227-2003. Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки. — Київ: Держспоживстандарт України, 2003. — 25 с.
7. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / В. Н. Артюхов, К. Б. Вакар, В. Н. Макаров, и др. / Под. ред. К. Б. Вакара. — М.: Атомиздат, 1980. — 216 с.
8. Микитин Г. В. Актуальні питання теорії вимірювання. Фіз. зб. НТШ. — Т. 4. — 2001. — С. 347–353.
9. Особливості метрологічного забезпечення неруйнівного контролю / Механіка руйнування і міцність матеріалів. Довідник. посібник / Під заг. ред. В. В. Панасюка. — Т. 5. Неруйнівний контроль. Средства и методы измерений // Под. ред. Е. Г. Шрамкова. — М.: Энергоатомиздат, 2002. — 520 с.
10. Бобренко В. М., Полесская Л. М. Определение координат источника АЭ двумя парами приемников // Дефектоскопия. — 1980. — № 6. — С. 36–41.
11. Холькин О. И. О локационной информативности сигналов АЭ // Там же. — 1983. — № 2. — С. 32–40.
12. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / В. И. Артюхов, К. Б. Вакар, В. И. Макаров и др. / Под. ред. К. Б. Вакара. — М.: Атомиздат, 1980. — 216 с.
13. Ройzman В. П., Ковтун Ю. І., Горошко А. В. Просторова локація джерел акустичної емісії // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2001. — № 2. — С. 84–86.
14. Методологічні основи міряння фізичних величин / Я. Драган, Г. В. Микитин, О. П., Бухало, Б. П. Клим, Є. П. Почапський // Комп'ютерні технології друкарства. — 2000. — № 5. — С. 303–309.
15. Аспекти метрологічної агестації вимірювальних каналів системи відбору і обробки сигналів акустичної емісії / О. П. Бухало, Б. П. Клим, Г. В. Микитин та ін. // Вісн. Тернопіл. держ. техн. ун-ту. — № 3. — Т. 8. — 2003. — С. 91–102.
16. Клим Б. П., Микитин Г. В., Почапський Є. П. Методика визначення метрологічних характеристик вимірювальних каналів акустико-емісійної системи // Фіз. методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. — 2005. — С. 90–94.
17. Бушина Н. А. Исследование пластической деформации металлов методом акустической эмиссии. — Л.: Изд-во Ленинград. ун-та. — 1990. — 156 с.
18. Иванов В. И., Белов В. М. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. — М.: Машиностроение, 1981. — 184 с.
19. Методы акустического контроля металлов / Н. П. Алешин, В. Е. Бельый, А. Х. Вопилкин и др. // Под. ред. Н. П. Алешина. — М.: Машиностроение, 1989. — 456 с.
20. Болотин А. Н., Маслов Л. А., Полунин В. И. Установление корреляции между размером трещины и амплитудой импульсов АЭ // Дефектоскопия. — 1975. — № 4. — С. 119–122.
21. Основы экспериментальной механики разрушения / И. М. Керштейн, В. Д. Клошников, Е. В. Ломакин и др. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. — 140 с.