

Лекция 18

Информативные параметры акустической эмиссии

Следует различать параметры отдельных импульсов дискретной АЭ, потоков импульсов и параметры непрерывной АЭ.

Импульсы или сигналы АЭ в общем случае представляют собой суперпозицию всех типов упругих волн, способных распространяться в контролируемом объекте. Импульсы АЭ характеризуются

- амплитудой;
- длительностью;
- формой;
- частотным спектром;
- временем появления.

Форма импульса связана с его частотным спектром и зависит от ряда факторов. Она определяется физическим процессом, в результате которого появилось акустическое излучение, передаточными функциями элементов акустического тракта, по которому распространяется импульс от места возникновения до приемного преобразователя, частотной полосой приемного преобразователя.

Форма импульса также зависит от затухания и дисперсии упругих волн. Поскольку затухание волн увеличивается с пройденным расстоянием и сильно возрастает с увеличением частоты, то в импульсе, прошедшем большое расстояние от источника к приемнику, будут преобладать низкочастотные составляющие спектра. Так как произведение ширины спектра импульса Δf на его длительностью $t_{\text{имп}}$ по порядку величины равно единице — $\Delta f \cdot t_{\text{имп}} \sim 1$, то затухание высокочастотных составляющих спектра, и, следовательно, уменьшение его ширины приводят к увеличению длительности регистрируемого импульса.

Импульс АЭ обладает широким частотным спектром, то есть представляет собой суперпозицию множества упругих гармонических волн разной частоты. Из-за дисперсии различные составляющие распространяются с разной скоростью. Это приводит к фазовому сдвигу между частотными составляющими импульса. Он возрастает с увеличением пройденного расстояния. В результате форма регистрируемого импульса искажается, причем искажение тем существенней, чем больше расстояние между источником и приемником упругих волн.

При небольших расстояниях между источником АЭ и приемником влияние дисперсии и затухания волн на форму импульса невелико. Если регистрация АЭ проводится преобразователем с узкой полосой пропускания, который, как правило, обладает более высокой чувствительностью по сравнению с широкополосным, то частота АЭ-сигнала определяется, главным образом, основной частотой преобразователя рис. 1.

После усиления и детектирования импульса определяется его огибающая, максимальное значение которой принимается за амплитуду АЭ-сигнала.

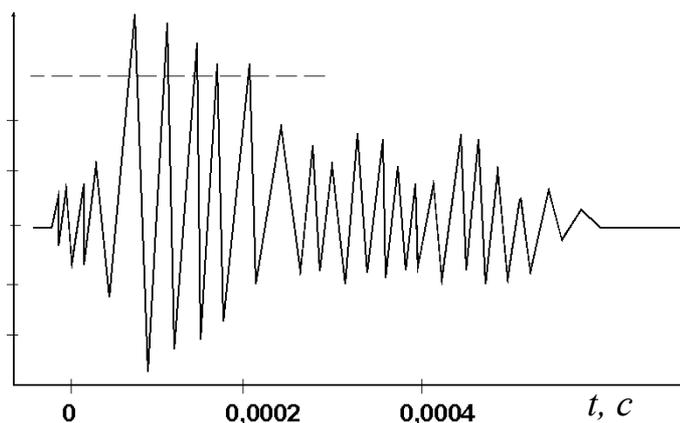


Рис. 1. Форма импульса АЭ, поступающего с первичного преобразователя, имеющего узкую полосу пропускания

Поскольку частотный спектр АЭ-импульсов зависит от трудно измеряемых в реальных ситуациях передаточных функций акустического тракта и приемного преобразователя, он практически не используется в качестве информативного параметра.

Потоком АЭ-сигналов называется последовательность импульсов, у которых случайными величинами является амплитуда и время появления.

Поток сигналов можно характеризовать

- амплитудным распределением;
- амплитудно-временным распределением;
- средним значением амплитуды импульсов;
- дисперсией амплитуды;
- распределением временных интервалов между импульсами;
- средней частотой их появления;
- спектральной плотностью;
- корреляционной функцией.

Каждая из характеристик связана с порождающим АЭ физическим процессом и содержит информацию о его развитии.

Для потока импульсов дискретной АЭ вводят следующие информативные параметры.

Общее число импульсов N_{Σ} — число зарегистрированных импульсов дискретной АЭ за время наблюдения.

Этот параметр используется для описания потоков неперекрывающихся импульсов, то есть импульсов, длительность которых меньше промежутков времени между ними. Общее число импульсов характеризует процессы, связанные с разрушением материалов, и указывает на число отдельных актов зарождения и распространения дефектов в конструкциях.

Активность АЭ — общее число импульсов, отнесенное к единице времени. Информативность этого параметра такая же, как и предыдущего, но с большей детализацией во времени, что позволяет проследить динамику процесса разрушения.

Суммарная АЭ — число зарегистрированных превышений (выбросов) АЭ-сигналов установленного уровня в течение заданного интервала времени.

Скорость счета \dot{N} — число зарегистрированных превышений АЭ-сигналов установленного уровня в единицу времени.

Эта характеристика является производной суммарной АЭ по времени. Иногда ее называют *интенсивностью АЭ*.

Амплитудное распределение импульсов АЭ $n(A)$ — функция, указывающая количество импульсов АЭ, амплитуда которых заключена в малом интервале от A до $A + dA$, отнесенное к этому интервалу dA .

Если за время наблюдения зарегистрировано N_{Σ} импульсов, то

$$N_{\Sigma} = \int_0^{\infty} n(A) dA.$$

В теоретических работах широко используется связанная с амплитудным распределением функция плотности вероятности амплитуды АЭ-импульсов $w(A)$. Она определяет вероятность того, что амплитуда АЭ-импульса A' находится в интервале от A до $A + dA$:

$$P\{A < A' < A + dA\} = w(A) dA.$$

Плотность вероятности удовлетворяет условию нормировки

$$\int_0^{\infty} w(A) dA = 1,$$

Плотность вероятности $w(A)$ и $n(A)$ связаны следующей зависимостью:

$$w(A) = n(A) / N_{\Sigma} .$$

Функции $w(A)$ и $n(A)$ можно определить по экспериментальным данным, построив гистограмму распределения импульсов по амплитуде. С точностью до постоянного множителя $w(A)$ может быть определена с помощью амплитудного анализатора.

Амплитуда отдельных импульсов содержит информацию об энергии источника АЭ, а амплитудное распределение — об энергетическом распределении источников. Средняя амплитуда и средний квадрат амплитуды интегрально характеризуют энергию процесса, а дисперсия амплитуды импульсов — разброс энергии действующих источников АЭ.

Изменение амплитудного распределения во времени, называемое амплитудно-временным распределением, отражает динамику физических процессов, сопровождаемых излучением АЭ. *Амплитудно-временное распределение импульсов АЭ* $n(A, t)$ — функция, указывающая количество импульсов АЭ dN , зарегистрированных в промежутке времени от t до $t + dt$, амплитуда которых заключена в интервале от A до $A + dA$:

$$dN = n(A, t) dA dt .$$

Если интервал от 0 до T — полное время регистрации АЭ, то

$$n(A) = \int_0^T n(A, t) dt ; \quad N_{\Sigma} = \int_0^T \int_0^{\infty} n(A, t) dt dA .$$

Анализ амплитудного распределения и изменение его во времени позволяет проследить развитие физических процессов, являющихся источником АЭ-сигналов, в частности, проследить рост поврежденности материала в будущем очаге разрушения. В качестве примера на рис. 2 показано изменение текущего амплитудного распределения АЭ-сигналов, регистрируемых при нагружении сварного стального образца с увеличением времени t_i действия нагрузки

$$n(A, t_i) = \int_0^{t_i} n(A, t') dt'$$

Из рис. 4 видно, что по мере увеличения времени в амплитудном распределении возрастает доля импульсов АЭ с высокой амплитудой, что свидетельствует о формировании и развитии очага разрушения в сварном соединении. В дальнейшем в сварном шве появилась макротрещина, рост которой завершил разрушение образца.

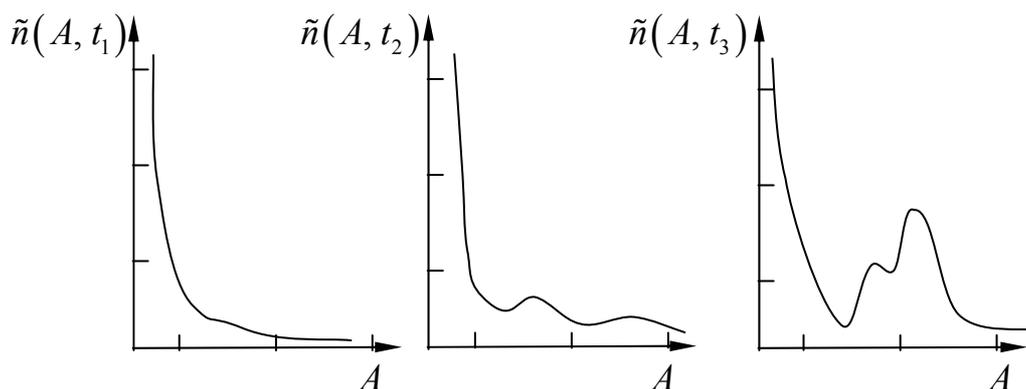


Рис. 2. Изменение амплитудного распределения АЭ-сигналов со временем при нагружении стальной образца со сварным соединением под действием постоянной растягивающей нагрузки

Из рис. 2 видно, что по мере увеличения времени в амплитудном распределении возрастает доля импульсов АЭ с высокой амплитудой, что свидетельствует о формировании и развитии очага разрушения в сварном соединении. В дальнейшем в сварном шве появилась макротрещина, рост которой завершил разрушение образца.

Амплитуда, амплитудное и амплитудно-временное распределения являются важнейшими характеристиками акустического излучения. Амплитуда импульсов АЭ и, следовательно, параметры соответствующих амплитудных распределений зависят от многих факторов. Эти факторы можно разделить на две группы по характеру влияния на амплитуду импульсов АЭ, табл. 1. Эти сведения оказываются полезными при анализе и интерпретации данных контроля и позволяют предсказать, каким образом изменится амплитуда излучения при смене режимов или условий АЭ-диагностики.

Спектральная плотность дискретной АЭ характеризует мощность процесса в единичной полосе частот. Спектральная плотность характеризует скорость протекания процесса, инициирующего сигналы АЭ.

Таблица 1. Факторы, оказывающие влияние на амплитуду импульсов АЭ

Факторы, повышающие амплитуду АЭ	Факторы, понижающие амплитуду АЭ
Высокая прочность материала и низкая пластичность	Низкая прочность материала и высокая пластичность
Высокая скорость нагружения и деформирования	Низкая скорость нагружения и деформирования
Анизотропия свойств	Изотропность структуры материала
Неоднородность материала	Однородность материала
Большая толщина конструкции	Малая толщина конструкции
Низкая температура материала	Высокая температура материала
Повышенная дефектность структуры материала	Бездефектность структуры материала
Крупнозернистая структура материала	Малый размер зерна
Высвобождение упругой энергии за счет трещинообразования	Высвобождение упругой энергии за счет пластического деформирования
Отсутствие текстуры материала	Наличие текстуры материала

Распределение временных интервалов $w(\tau)$ между отдельными АЭ-импульсами содержит информацию о физике процесса, сопровождаемого излучением упругих волн и характере его развития. При взаимной независимости и одинаковой вероятности протекания элементарных событий их последовательность (поток событий) описывается законом Пуассона, согласно которому вероятность зарегистрировать N импульсов АЭ за время t описывается соотношением

$$P(N, t) = \left\{ (vt)^N / N! \right\} \exp\{-vt\},$$

где v — среднее число импульсов АЭ в единицу времени (интенсивность потока). Если интенсивность потока меняется во времени $v(t)$, но элементарные события, приводящие к излучению импульсов, независимы, то вероятность зарегистрировать N АЭ-импульсов за время t рассчитывается по формуле

$$P(N, t) = \left[\left(\int_0^t v(t') dt' \right)^N / N! \right] \exp \left\{ - \int_0^t v(t') dt' \right\}.$$

Если поток стационарен, то распределение интервалов времени между импульсами АЭ подчиняется экспоненциальному закону с плотностью вероятности

$$w(\tau) = v \exp\{-v\tau\},$$

причем среднее значение временного интервала между импульсами составляет величину $\bar{\tau} = 1/v$, а дисперсия $\sigma_{\tau}^2 = 1/v^2$.

Справедливо и обратное утверждение — при экспоненциальном распределении интервалов между отдельными АЭ-импульсами, последние распределены по закону Пуассона. Это указывает на отсутствие взаимосвязи между отдельными событиями — источниками АЭ-сигналов. Последнее само по себе служит важной информацией о характере процесса. Например, о делокализованном накоплении дефектов в материале нагруженной конструкции.

Для **непрерывной АЭ** меняется содержание некоторых из указанных характеристик. Уже нельзя говорить об амплитуде отдельных импульсов, суммарная АЭ и скорость АЭ определяются числом выбросов случайного процесса над заданным уровнем дискриминации, то есть числом превышений регистрируемой величиной (электрическим напряжением) установленного уровня дискриминации за все время регистрации или за единицу времени соответственно. Вместо амплитудного распределения следует использовать плотность вероятности АЭ, определяющую долю времени наблюдения, в течение которого регистрируемая величина находится в интервале вблизи заданного значения амплитуды. Кроме того, можно ввести одномерные и многомерные функции распределения указанных выше параметров. В этом случае применим хорошо разработанный математический аппарат описания и анализа непрерывных случайных процессов.

Поскольку АЭ-метод позволяет обнаружить ранние стадии трещинообразования, предшествующие катастрофическому разрушению нагруженных конструкций, было предпринято много попыток по определению расчетных соотношений, связывающих параметры АЭ с характеристиками микро- и макротрещин в материалах. Это — довольно непростая задача в полной мере не решена и до настоящего времени. Были предложены разные зависимости, определяющие связь параметров акустической эмиссии и характеристик трещин с динамикой их роста. Однако большая их часть лишь в той или иной степени описывает некоторые частные случаи. Наиболее универсальной, по мнению многих исследователей, следует признать связь между общим числом импульсов дискретной эмиссии и коэффициентом интенсивности напряжений K_I в вершине развивающейся трещины:

$$N_{\Sigma} = N_0 K_I^m,$$

где N_0 — постоянная, зависящая от свойств материала конструкции и чувствительности регистрирующей аппаратуры, показатель степени $m = 4 \dots 11$. Установлено, что параметр m зависит от безразмерного комплекса $K_{Ic}^2 / E\eta$, в котором K_{Ic} — вязкость разрушения, E — модуль Юнга и η — поверхностная энергия материала. Последнее соотношение можно ис-

пользовать для оценки увеличения коэффициента интенсивности напряжений развивающейся трещины по данным акустико-эмиссионных испытаний.

Акустико-эмиссионное диагностическое оборудование

Требования к датчикам АЭ-сигналов

Датчики или первичные преобразователи информации для регистрации АЭ-сигналов являются важной частью диагностического оборудования. К ним предъявляют ряд требований, зависящих от условий работы и особенностей конструкции контролируемого объекта. Среди основных требований отметим следующие:

- возможность измерений в рабочих условиях диагностируемого объекта;
- стабильность характеристик датчика при воздействии окружающей среды, температурная и радиационная стойкость;
- защищенность от электромагнитных помех, вибраций и сторонних акустических шумов;
- обеспечение максимальной чувствительности в рабочей полосе частот;
- простота и технологичность конструкции датчика;
- механическая прочность.

Для регистрации АЭ-сигналов наибольшее распространение получили пьезоэлектрические датчики на основе цирконаттитаната свинца (ЦТС) со сравнительно высокой точкой Кюри — 400 °С (для ЦТС-21). Такая пьезокерамика сохраняет работоспособность при штатных температурных режимах водо-водяных ядерных реакторов. Керамика ЦТС обладает устойчивостью к нейтронному и гамма-излучению. При флюенсах нейтронов 10^{18} – 10^{22} нейтрон/м² и температурах до 200 °С она практически не меняет своих свойств, а облучение гамма-квантами с мощностью дозы $1,9 \cdot 10^5$ Р/ч и интегральной дозой $1,35 \cdot 10^7$ Р также существенно не ухудшат ее пьезоэлектрических характеристик.

Для определения рабочих характеристик датчиков проводится их градуировка (калибровка). При градуировке определяют эффективность преобразования механической энергии упругой волны в электрическую и обратно. Различают *относительную* и *абсолютную* градуировку.

Если определяется относительное изменение амплитуды электрического сигнала при изменении частоты акустической волны, регистрируемой датчиком, говорят об относительной градуировке.

Существенно более сложной является процедура определения абсолютных значений коэффициента преобразования в широком частотном диапазоне. Возможен и такой подход. В полосе частот проводится относительная градуировка, а на одной выбранной частоте — абсолютная. В дальнейшем чувствительность датчика на других частотах рассчитывается по данным абсолютной градуировки на выбранной частоте.

Для градуировки необходим источник акустических сигналов с широким спектром частот. Таким спектром обладают упругие волны, возникающие от ударного воздействия, например удара твердого шарика, падающего на массивное основание. В качестве источника сигналов можно использовать вспомогательный задающий преобразователь, установленный на массивном металлическом основании на некотором расстоянии градуируемого датчика. Если размеры задающего преобразователя меньше длины волны, соответствующей верхней границы частотного диапазона градуировки, частотная зависимость амплитуды сигнала с испытываемого датчика соответствует его амплитудно-частотной характеристике. Широким частотным спектром обладают акустические шумы, возбуждаемые струей песка или мелкой дробью, высыпаемой на поверхность градуируемого датчика.

Для абсолютной градуировки преобразователей применяют метод, основанный на регистрации акустического импульса, возникающего при раздавливании стеклянного капилляра на поверхности массивного блока из алюминия. На начальном этапе колебания массивного основания регистрируются емкостным преобразователем с известными метрологическими характеристиками. В дальнейшем он заменяется на градуируемый датчик, и при разрушении нового капилляра параметры сигнала, зарегистрированные градуированным датчиком, сравниваются с показателями емкостного преобразователя. По результатам сравнения определяются характеристики испытываемого датчика. Существует модификация данной методики, когда вместо стеклянного капилляра разрушают тонкий грифель — *источник Су-Нильсена*.

Наиболее точным является метод абсолютной градуировки АЭ-датчиков с применением лазерной интерферометрии. Однако он достаточно трудоемок, требует специального дорогостоящего оборудования и проводится, главным образом, в целях сертификации эталонных преобразователей.

Параметры регистрируемых сигналов зависят не только от амплитудно-частотной характеристики датчика, но и способа крепления датчика к объекту контроля, а также передаточной функции всего акустического тракта, по которому распространяется сигнал от источника АЭ до регистрирующей аппаратуры. Поэтому для повышения достоверности АЭ изме-

рений следует проводить градуировку датчиков, установленных непосредственно на контролируемом объекте.

Требования к аппаратуре для АЭ-контроля

В настоящее время выпускается АЭ-аппаратура различного функционального назначения и разной степени сложности. Различают

- многофункциональные приборы для комплексных исследований в лабораторных и производственных условиях;
- специализированные приборы для решения конкретных задач мониторинга или технологического контроля.

Многофункциональная аппаратура обладает широкими возможностями и позволяет регистрировать большое число информативных параметров АЭ-сигналов, при этом обработка данных проводится с помощью ЭВМ, входящей в состав оборудования. Для нее характерно большое число регулировок и многопараметрическое представление результатов, выражающееся в выводе большого числа промежуточных данных, например, всевозможных функций распределения параметров АЭ-сигналов, их характеристик, координат местоположения источников АЭ и т. д.

Несмотря на многообразие выпускаемых АЭ-систем, предназначенных для испытаний сосудов давления, трубопроводов и других энергонапряженных объектов и конструкций, разработчики независимо друг от друга пришли к достаточно близким основным техническим характеристикам контрольно-измерительной аппаратуры. Системы различаются, в основном, числом каналов регистрации сигналов, набором определяемых информативных параметров АЭ и способом представления информации. Такие информационно-измерительные системы обладают широкими функциональными возможностями и в зависимости от назначения снабжаются тем или иным программным и сервисным обеспечением. При создании такой аппаратуры широко используется модульный принцип построения. Он допускает расширение функциональных возможностей аппаратуры, ее совершенствование и создание новых модификаций приборов без коренного изменения их структурной схемы, например, за счет замены или введения дополнительных блоков.

Специализированные приборы создаются по результатам тщательных предварительных исследований параметров АЭ, сопровождающих контролируемый процесс. Характеристики такой аппаратуры оптимизируют и выбирают так, чтобы наилучшим образом решить отдельную конкретную задачу — обнаружение утечек жидкости или газа,

контроль того или иного технологического процесса, например, режимов механической обработки изделий и т. п. Такие приборы более компактны, имеют более высокую помехозащищенность, малое число регулировок и сравнительно дешевы. Информация может выводиться на встроенный цифровой, звуковой, цветовой индикатор или на пульт оператора в любом приемлемом виде.

Независимо от назначения и уровня сложности любая АЭ измерительная система содержит следующие основные блоки — блок усиления электрических сигналов, блоки преобразования параметров сигналов, индикации или представления информации. Конструктивное исполнение блоков может быть различным и зависит от назначения аппаратуры и условий ее эксплуатации.

Измерительная система должна обеспечивать отбраковку ложных событий как на аппаратном, так и программном уровнях. Программы управления процессом диагностики должны обеспечивать удобство ввода команд и заданий на изменение параметров обработки данных в диалоговом режиме.

Координаты источников акустической эмиссии определяются методом многоканальной локации по результатам обработки АЭ-сигналов, поступающих с системы датчиков, размещенных в зоне контроля. Координаты источника вычисляют с помощью специальной программы в так называемом режиме планарной локации, то есть определяют только координаты источника на поверхности объекта, а не глубину его залегания. Погрешность измерений координат зависит, главным образом, от погрешности измерений времени регистрации импульсов АЭ датчиками системы. Она не должна превышать значения удвоенной толщины стенки диагностируемого объекта (двойной толщины элемента конструкции) или 5 % минимального расстояния между датчиками в зоне контроля в зависимости от того, какое из значений окажется большим.

Местоположение источников АЭ отображается в виде точек на схеме локации, привязанной к координатным осям диагностируемого объекта. На схеме локации выделяют зоны повышенной концентрации источников АЭ — кластеры. В результате можно получить представление о степени поврежденности тех или иных зон диагностируемого объекта. Если в ходе испытаний выявляется источник АЭ или кластер источников с характеристиками, соответствующими достижению объекта — трубопровода, сосуда давления, металлоконструкции и т. д., предельного состояния, должна быть предусмотрена подача сигнала тревоги.