Интерпретация спектральных характеристик сигналов акустической эмиссии при распозновании образования дефектов в образцах

Ирмухамедова Раъно Мирзахитовна,
Каримова Дильбар,
Джураева Дурдона Шоназарова
Ташкентский государственный технический университет,
E-mail.ru: irmuhamedova@mail.ru

1. Введение.

Неразрушающий контроль материалов и изделий методом акустической эмиссии (АЭ) в своем развитии в плотную подошел к проблеме распознавании стадий и механизмов образования и роста дефектов по сигналам АЭ. С этой целью, начиная с 70-х годов, получил развитие спектральный анализ сигналов АЭ.

Некоторые теоретические расчеты спектров сигналов АЭ, возникающих при разрушении материалов, показали, что диапазон их изменения может достигать нескольких мегагерц [1-4]. Практическое использование такого широкого диапазона частот спектра сигналов АЭ затруднено в силу сложности его реализации в измерительной технике. Однако,в этом и нет большой необходимости. Как показывают экспериментальные результаты, для этих целей достаточно информационным является, диапазон частот до 4 МГц [5, 6]. В работе [7], где использовалась технически хорошо оснащенная измерительная база и широкая гамма различных первичных преобразователей указывалось, что:

1) основной энергетический спектр сигналов АЭ сосредоточен в диапазоне ниже 1 МГц, причем во многих материалах резкий пик сигналов АЭ появляется в диапазоне 100—150 кГц;

2) наибольший пик частотного спектра (при максимальном АЭ-излучении) зарегистрирован на частоте 350 кГц. В работе также отмечается, что полученные экспериментальные результаты не зависят от типа материала (исследовались образцы из стали HF-1 и латуни марки 70—30), преобразователя АЭ, геометрии образца и метода гармонического анализа. Однако в ряде работ утверждается, что спектр сигналов АЭ содержит не только информацию о физических процессах, вызывающих АЭ, но и то что форма и размеры образца, а также характеристики пьезоэлектрических преобразователей значительно меняют первоначальный сигнал АЭ [3].

Из приведенных результатов видно, что частотный спектр сигналов АЭ содержит важную информацию о протекающих в контролируемом объекте процессах, но в ряде случаев полученные данные являются противоречивыми. Кроме того, в литературе недостаточно освещен вопрос связи спектральных характеристик сигналов АЭ со стадиями развития трещины и ее механизмами. Эти вопросы рассмотрены в данной работе.

2. Теоретические предпосылки.

Установим изменение спектра частот сигналов АЭ на различных стадиях развития трещины и его связь с коэффициентом интенсивности напряжений. Как известно, электрическое напряжение *U(t)* на выходе - регистрирующей аппаратуры АЭ можно представить в виде свертки

$$U(t) = \int_{t_0}^{t} u(\tau) v(\tau - t) dx,$$

г д е *u(t)* - интегральное механическое перемещение под преобразователем АЭ; *v(t)* - передаточная функция приемного тракта аппаратуры АЭ.

Если применить к (1) интегральное преобразование Фурье и теорему о свертке, то связь между спектральными характеристиками можно представить следующим образом:

$$\overline{U}(f) = \overline{u}(f)\overline{v}(f),$$

где черточка сверху функций означает преобразование Фурье данных функций; *f* — частота.

Как видно из зависимости (2) при известной передаточной функции $\overline{v}(f)$ можно находить значение $\overline{u}(f)$ по $\overline{U}(f)$ или наоборот, в некотором частотном интервале.

На практике часто бывает, что функция $\overline{v}(f)$ неизвестна. Покажем, что даже в этом случае из зависимости (2) можно получить важные практические результаты. Действительно, если положение преобразователя на объекте исследований не изменяется и идет сбор информации из одной и той же зоны контроля (что легко можно определить с помощью метода триангуляции), то значение $\overline{u}(f)$ будет зависеть от стадии и механизма развития дефекта.

Рассмотрим наиболее опасный с точки зрения прочности изделий дефект типа трещины. В случае образования внутренней дисковидной трещины форма упругой волны (функция *u(t)*) и ее модуль спектра частот (функция $\overline{u}(f)$) приведены в [1,2]. Основной максимум излучения в дальней зоне (максимум $\overline{u}(f)$) на уровне 0,7 от максимального амплитудного значения имеет ширину $\Delta f = 0{,}125 c_2 / \pi r_0$ для металлов, коэффициент Пуассона которых близок к 0,3. Предположим, что в первом приближении форма волны при образовании трещины и скачке трещины на такую же величину, как новообразованная, одинаковы, отличаясь лишь по амплитуде. Тогда ширина спектра частот при единичном скачке трещины

$$\Delta f = 0{,}125 \alpha c_2 / \pi r_0,$$

где *a* - множитель пропорциональности между шириной спектра частот при образовании и скачке трещины; c_2 - скорость поперечной волны; r_0 — радиус диска, равного удвоенной площади новообразованной в результате скачка поверхности; *f* - частота.

Согласно теоретическим представлениям усредненную величину единичного скачка Δl_{cp} можно представить в виде

$$\Delta l_{cp} = r_0 = \alpha K l_{cp0},$$

где *a* - постоянная материала; Kl_{cp0} - усредненное значение коэффициента интенсивности напряжений.

Тогда площадь скачка трещины (площадь полукруга)

$$\Delta s = 0{,}5 \alpha^2 K l_{cp}.$$

оставляя (4) в (3) имеем

$$\Delta f = \beta K l_{cp0},$$

где β - $0{,}25 a c_2 / a\pi$, т. е. ширина частотного интервала обратно пропорциональна квадрату

коэффициента интенсивности напряжений при прочих равных условиях.

Как показывают экспериментальные исследования, значение K_{IAA} (при растягивании трещины) и K_{IMA} (максимальное} коэффициента интенсивности напряжении, относятся между собой в интервале от 1:2.3 для различных материалов, т.е. в среднем как 1:1.9.Поэтому согласно (6) ширина спектра частот в начале роста трещины до перехода в критическую стадию ее развитие будет в среднем в 3,6 раза меньше. Например, для титанового сплава K_{IAA} относится к K_c, как 1:1.35, т.е. в конечной стадии развития трещины ширина спектра уменьшилась согласно (6) в **1,82** раза по сравнению с ее стартом.

Ширина спектра частот Δf при значении $K_{icp} = K_c$ согласно (6) равна

$$\Delta f_c = \beta K_c^{-2}$$

Из приведенных теоретических результатов следует, что в процессе роста трещины происходит сужение ширины спектра частот сигналов АЭ. Если во время развития трещины измерять этот параметр и сравнивать его значение с вычисленным по формуле (6), то можно прогнозировать разрушение материала или элемента конструкции. Например, при достижении $\Delta f = \beta(0{,}7K_c)^{-2}$ эксплуатация элемента конструкции прекращается. Поэтому ширину спектра частот можно использовать в качестве информационного параметра для диагностики эксплуатации материалов и элементов конструкций. Покажем, что полученные теоретические результаты хорошо коррелируют с данными экспериментов.

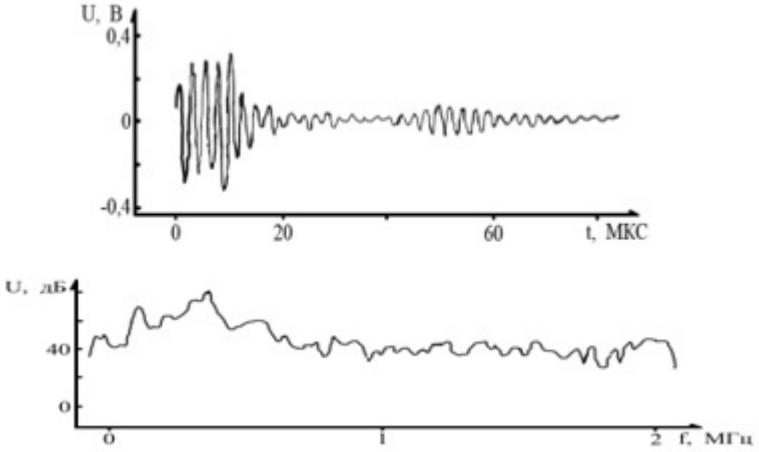

Рис. I. Сигнал калибровки от излома стеклянного капилляра (а) и полученная в результате этого амплитудно-частотная характеристика преобразователя АЭ.

3. Измерение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) системы образец-преобразователь.

На основании полученных экспериментальных данных и их анализа показано, что акустические поля, возбуждаемые точечным источником локально однородны, а АЧХ системы объект исследования-преобразователь обладает свойствами эргодичности. Поэтому рекомендуется для получения АЧХ системы при калибровке возбуждать систему точечным источником случайного АЭ-процесса.

Нам удалось в процессе калибровки системы преобразователь-образец-нагружающее устройство получить кратковременный импульсный сигнал АЭ при нагружении образца. Его вид и спектральная характеристика этой системы приведены на рис. 2. Такой сигнал был зарегистри-

рован от единичного короткого скачка трещины. Сигнал достаточно малой длительности, поэтому приведенная АЧХ максимально отображает спектральные свойства системы. Длительность импульса составляла 3,5 мкс., а размах его на выходе измерительного комплекса был равен 1,33 В.

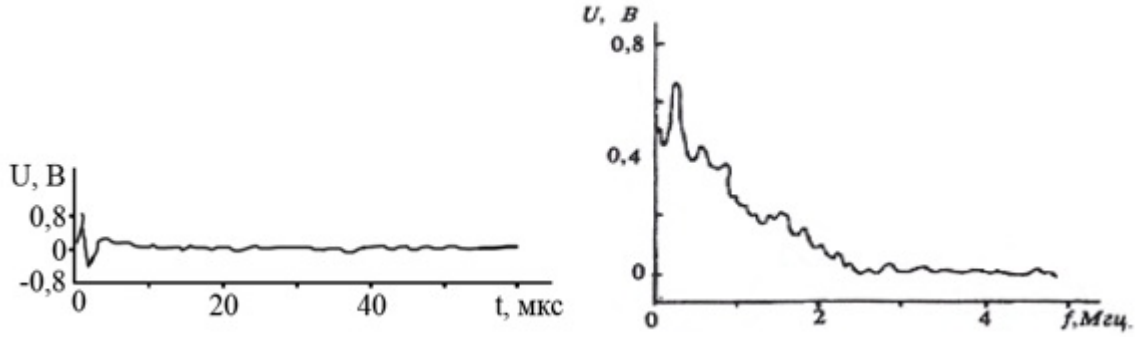

Рис 2. Калибровочный импульс от скачка трещины (а)

Как следует из приведенной на рис.4 АЧХ системы, наиболее эффективно в процессе регистрации сигналов АЭ будут проходить частоты до 980 кГц, но при этом вся полоса АЧХ лежит в пределах 0,01-1,9 МГц, что достаточно для экспериментальных исследований.

4. Результаты измерений и их интерпретация.

Спектральный анализ сигналов АЭ проводили в различных точках диаграммы «нагрузка-раскрытие берегов трещины». В линейной области этой диаграммы самые первые сигналы АЭ были зарегистрированы при низких значениях нагрузки Р (соответственно коэффициенте интенсивности напряжений K_i). Такой сигнал АЭ и его спектр приведен на рис. 3.

Спектральные характеристики этого сигнала отличаются довольно широкой полосой, приблизительно до 2 МГц, а пик излучения приходится на частоту 0,62 МГц. По-видимому, этому сигналу соответствует рост пластической зоны в вершине предварительно выведенной усталостной трещины и микрорастрескивание.

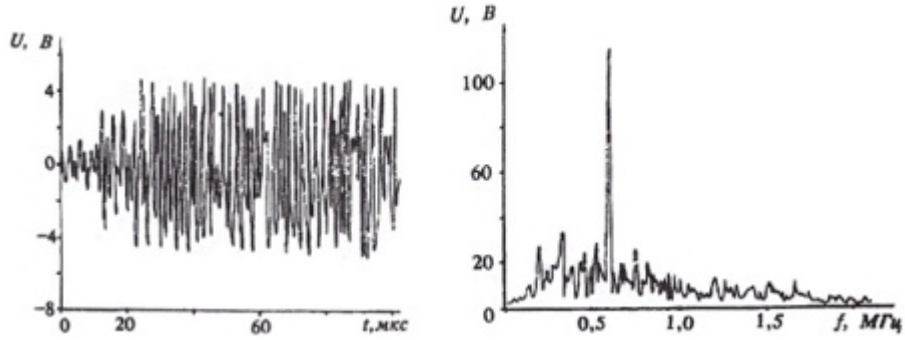

Рис. 3. Сигнал АЭ, полученный на линейном участке диаграммы «нагрузка-раскрытие берегов трещины» (а) и его АЧХ (б)

Выводы.

Переход разрушения от стадии пластической деформации и микроразрушения к стадии докритического роста трещины характеризуется сужением спектра сигналов АЭ.

Основная часть энергии сигналов АЭ при росте трещины нормального отрыва сосредоточена в спектральном диапазоне ниже 1 МГц. При этом докритический рост трещины на начальных этапах отличается от конечных ее этапов дальнейшим сужением спектра частот, ширина которого обратно пропорциональна квадрату коэффициента интенсивности напряжений.

Переход разрушения от механизма нормального отрыва к смешанному отрыв-сдвиг приводит к

расширению спектра частот, что усложняет идентификацию по этому параметру стадий докритического роста трещины и механизма ее развития.

Литература:

1. Андрейкив А. Е., Лысак Н. В.Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. - Киев: Наук, думка, 1989. - 176 с.
2. А. Е. Андрейкив, Н. В. Лысак, О. Н. Сергиенко, В. Р. Скальский. Теоретические концепции метода акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. /- Львов /ФМИ им. Г. В. Карпенко АН УССР, 1987.- 49 с. (Препринт № 137).
3. Грешников В. А., Брагинский А. П. Об анализе сигналов акустической эмиссии //-Дефектоскопия. 1980. - N° 5. - С. 101-106.
4. Верлань А.Ф., Горошко И.О., Карпенко Е.Ю., Королев В.Ю., Мосенцова Л.В. Методы и алгоритмы восстановления сигналов и изображений //-К.НАН Украины, 2001.-369с.
5. AcquavivaC. J.Interlaboratorycomparisaua of acoustic emission spec //NDT International. 1980. - № 5. - P. 230-234.
6. Муравин Г. Б., Лезвинская Л. М. Исследование спектральной плотности сигнала АЭ //-Дефектоскопия. 1982. - № 7. - С. 10-15.
7. Трухачев А.А. Анализ процедур и алгоритмов обнаружения сигналов. -М:. Радио и связь, 2003. - 248 с.
8. Горбунов А. Лыков Ю. И. Влияние амплитудно-частотных характеристик объекта на спектральные характеристики сигналов АЭ //-Дефектоскопия. 1986.- № 9. - С. 39-45