

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОГО СКОПЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПЛАСТИНАХ

Сообщение 2

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, О. И. БОЙЧУК

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев–150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Получено и проанализировано аналитическое решение задачи по оценке методом АЭ сканирования существующих или развивающихся в процессе эксплуатации дефектов в листовых конструкциях. Решение применено на примере пластины бесконечных размеров, что может быть использовано для листовых конструкций больших габаритов. Поставленная задача решена путем наложения двух независимых решений с разными источниками возбуждения. В первом случае источником возбуждения упругой волны является импульс на излучающем датчике, во втором – ответная волна, полученная от источника. Показано, как генерированная датчиком АЭ волна, отразившись от дефектной области, возвращается к нему с измененной формой и амплитудами, зависящими от плотности и величины дефектов. Полученное решение позволяет определять координаты места возникновения области с развивающимися дефектами и проводить, в дополнение к АЭ контролю, оценку этих дефектов. Выполненные расчеты показывают, что с использованием разработанного метода становится возможным определение координат и оценка текущего состояния материала для областей с неразвивающимися дефектами таким же образом, как и для развивающихся, поскольку при воздействии сканирующего источника АЭ волн на область с дефектами последняя становится самостоятельным источником акустического излучения, который может быть зафиксирован датчиками мониторинговой системы АЭ контроля с последующей оценкой теми же способами, которые используют при оценке развивающихся дефектов. Библиогр. 5, рис. 4.

Ключевые слова: акустическая эмиссия (АЭ), АЭ сканирование, волны деформаций, математическое моделирование физических процессов

В Сообщении 1* были рассмотрены процессы искажения акустических волн, вызванные наличием дефектов, расположенных на цилиндрической поверхности симметрично относительно центра излучения. Показано, что сопротивление распространению акустических волн определяют плотность и размеры области с дефектами. Появляются волны, отраженные от дефектной области, и распространяющиеся в обе стороны от поверхности с дефектами. Таким образом, цилиндрическая поверхность с дефектами становится источником новых волн, зависящих от плотности дефектов на цилиндре (в нашем случае условной величины β_k). С увеличением β_k преодолевшие акустический барьер волны существенно изменяют свою форму. В то же время цилиндрическая поверхность с равномерно распределенными дефектами скорее частный случай и рассмотрен был для подтверждения работы дефектной области как нового источника излучения. Полученные в Сообщении 1 результаты дают возможность рассмотреть более общий случай, когда дефекты сосредотачиваются в некоторой области с произвольными координатами по отношению к источнику излучения (рис. 1).

Поставленную задачу будем решать путем наложения двух независимых решений с разными источниками возбуждения. В первом случае

источником возбуждения упругой волны будет импульс на излучающем датчике, во втором – ответная волна, полученная от источника, мощность которого пропорциональна коэффициенту β_k . Отраженная от дефектной области волна будет распространяться со сдвигом по времени, равному расстоянию до дефектной области, деленному на скорость распространения волны в данном мате-

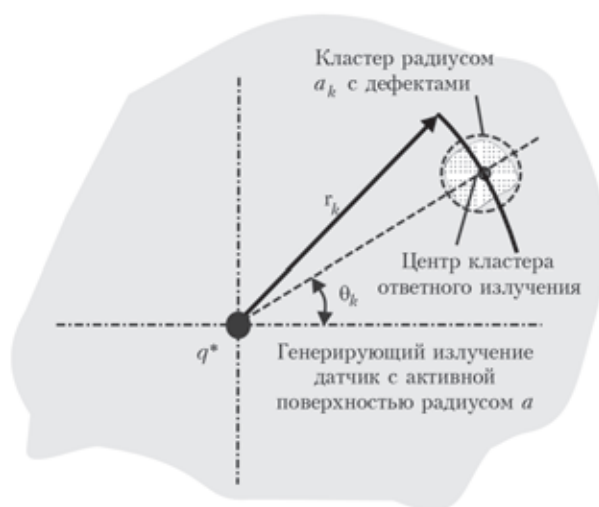


Рис. 1. Пластина бесконечных размеров с областью дефектов, образующихся в процессе разрушения, и датчиком, генерирующим излучение

* Здесь и далее по тексту: Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2013. – №4. – С. 30–36.



риале. Дефектная область будет ограничена цилиндром радиуса a_k с центром в центре цилиндра.

Дифференциальное уравнение для расчета перемещений поверхности пластины в направлении координаты r при условии постоянного значения сопротивления материала пластины распространению упругой волны имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \alpha \beta \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0}{\delta} \frac{\delta(r-r_0)\delta(t-t_k)}{2\pi r},$$

где t_k – время сдвига начала действия возбужденного источника после прихода к нему волны от возбуждающего источника; β – коэффициент, характеризующий затухание волн в пластине.

Граничные и начальные условия запишем в виде: $w = 0$ при $t = 0, \infty$ и $r = \infty$. При $r = 0$ и $t > 0$ $w \neq 0, \infty$.

Тогда, положив $dV_0 = 2\pi r_0 q^* dr_0$ для $d\varphi$, а затем φ при $t_k=0$, получим [1–5]:

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{aq^* C_1}{2\pi\delta} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} J_1(\alpha a) J_0(\alpha r) \times \\ &\times \exp\left(-\frac{\alpha\beta C_1^2}{2} t\right) \frac{\sin(\alpha C_1 |k| t)}{\alpha |k|} d\alpha, \quad k > 0, \\ \varphi &= \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{vaq^* C_1}{2\pi\delta} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} J_1(\alpha a) J_0(\alpha r) \times \\ &\times \exp\left(-\frac{\alpha\beta C_1^2}{2} t\right) \frac{\text{sh}(\alpha C_1 |k| t)}{\alpha |k|} d\alpha, \quad k < 0, \end{aligned}$$

где $k = \sqrt{1 - \left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2}$; q^* – импульс возбуждения на генерирующем датчике в направлении оси r , см·с; a – активная контактная поверхность АЭ датчика-излучателя.

С учетом формулы (6) из Сообщения 1 для перемещений в кластере получим:

$$\begin{aligned} w_k &= \frac{\nu q^* a C_1}{(1-\nu)(1-2\nu)} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\alpha J_1(\alpha a) J_0(\alpha r_k)}{|k|} \times \\ &\times \exp\left(-\frac{\alpha\beta C_1^2}{2} t_k\right) \sin[\alpha C_1 t_k |k|] d\alpha, \quad k > 0, \\ w_k &= \frac{\nu q^* a C_1}{(1-\nu)(1-2\nu)} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\alpha J_1(\alpha a) J_0(\alpha r_k)}{|k|} \times \end{aligned}$$

$$\times \exp\left(-\frac{\alpha\beta C_1^2}{2} t_k\right) \text{sh}[\alpha C_1 t_k |k|] d\alpha, \quad k < 0.$$

Если положить значение импульса отклика дефектной области на воздействие волны от генерирующего источника излучения $q^* = w_k b_k t_k^*$, где $t_k^* = 2a_k/C_1$, а $b_k = (\beta_k - \beta)C_1$, то перемещения под сканирующим датчиком w_c от возбужденного (ответного) источника будут:

$$\begin{aligned} \text{при } k > 0: \quad w_c &= \frac{2\nu w_k a_k^2 (\beta_k - \beta) C_1}{(1-\nu)(1-2\nu)} \times \\ &\times \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\alpha J_1(\alpha a_k) J_0(\alpha r_k)}{|k|} \exp\left(-\frac{\alpha\beta C_1 r_k}{2}\right) \sin[\alpha r_k |k|] d\alpha; \\ \text{при } k < 0: \quad w_c &= \frac{2\nu w_k a_k^2 (\beta_k - \beta) C_1}{(1-\nu)(1-2\nu)} \times \\ &\times \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\alpha J_1(\alpha a_k) J_0(\alpha r_k)}{|k|} \exp\left(-\frac{\alpha\beta C_1 r_k}{2}\right) \text{sh}[\alpha r_k |k|] d\alpha. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь β_k – коэффициент, характеризующий величину сопротивления области с дефектами перемещению упругой возбужденной генерирующим источником волны ($\beta_k \geq \beta$); a_k – радиус кластера области с дефектами; t_k^* – время прохождения сигнала АЭ через область с дефектами диаметром $2a_k$; a – радиус активной, контактирующей с поверхностью пластины части АЭ датчика, см.

В случае, если АЭ датчик имеет явно выраженную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), то интегрирование выражений для определения перемещений необходимо выполнять с учетом этой характеристики. Так, для случая, когда показатель кривой изменения АЧХ равен ξ , значение w_c может быть подсчитано по приведенным ниже формулам:

$$\begin{aligned} w_c &= \frac{2\nu w_k a_k^2 (\beta_k - \beta) C_1}{(1-\nu)(1-2\nu)} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\alpha J_1(\alpha a_k) J_0(\alpha r_k)}{|k|} \times \\ &\times \exp\left[-\frac{\alpha\beta C_1 r_k}{2} - \xi^2 (\alpha - \alpha_0)^2\right] \sin[\alpha r_k |k|] d\alpha, \quad k > 0, \\ w_c &= \frac{2\nu w_k a_k^2 (\beta_k - \beta) C_1}{(1-\nu)(1-2\nu)} \times \\ &\times \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\alpha J_1(\alpha a_k) J_0(\alpha r_k)}{|k|} \exp\left[-\frac{\alpha\beta C_1 r_k}{2} - \xi^2 (\alpha - \alpha_0)^2\right] \times \\ &\times \text{sh}[\alpha r_k |k|] d\alpha, \quad k < 0. \end{aligned} \quad (2)$$

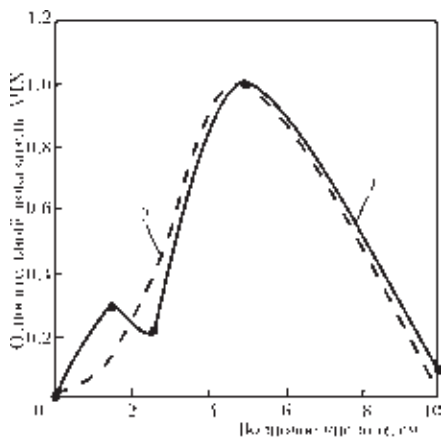


Рис. 2. АЧХ АЭ датчика типа ДАЕ системы ЕМА3,9 (по данным М.А.Яременко и Л.Ф.Харченко): 1 – реальная; 2 – расчетная

Для датчиков типа ДАЕ этот коэффициент равен 0,4 см, величина $\alpha_0 = 4,4 \text{ см}^{-1}$. График АЧХ для этого датчика приведен на рис. 2.

Формулы (1) и (2) могут быть использованы при оценке существующих или образующихся в процессе эксплуатации повреждений в областях пластины, где есть показания АЭ аппаратуры с указанием опасности начальных уровней. В этом случае, зная расстояние до проблемного кластера r_k и величину перемещений w_k , полученных генерирующим волну датчиком от ответного возбужденного, можно определить величину $\beta_k C_1$. Зная $\beta_k C_1$, далее по предварительно полученным экспериментальным данным определяем степень опасности зафиксированного места.

Практическое применение разработанной методики может быть осуществлено в следующем порядке. Пусть на поверхности крупногабаритной емкости установлены АЭ датчики, работающие в режиме непрерывного мониторинга. В какой-то момент времени контрольная аппаратура обнаружила область с развивающимися дефектами, например, категории второго предупреждения. Область кластеризуется с параметрами r_k и a_k кластера. Для более точной оценки состояния материала в зафиксированной области на расстоянии r_k от первого сработавшего датчика запустим зондирующую волну системой генерации аппаратуры. Полученная волна распространяется и достигает дефектной области с кластером радиусом a_k , отражается от нее и возвращается обратно. Через время t_k , равное расстоянию до центра кластера, деленному на скорость распространения волны, запустивший ее датчик сработает, зафиксировав перемещение w . Зная это перемещение и соответствующее ему значение $\beta_k C_1$ и процент деформации разрушения для данного материала, уточняем состояние материала в этой области. Такая же картина получается и в том случае, если проблемная область не имеет развивающихся дефектов. На-

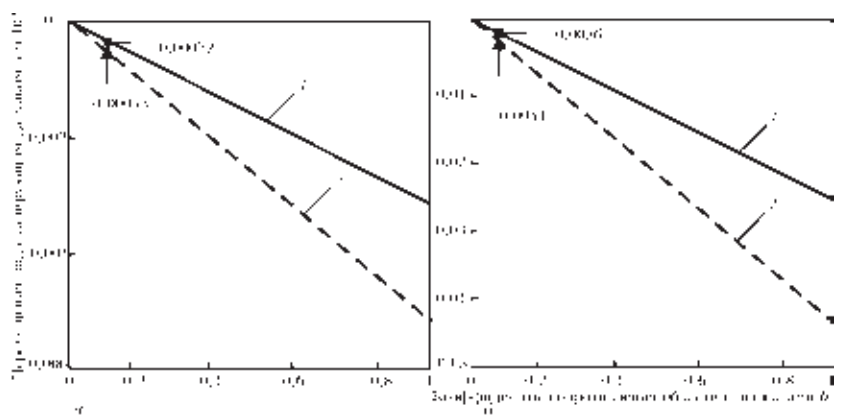


Рис. 3. Перемещения на сканирующем датчике в зависимости от сопротивления области с дефектами $b_k = (\beta_k - \beta)C_1$ радиусом $a_k = 5 \text{ см}$, обнаруженной на расстояниях $r_k = 100$ и 200 см от него: а – с учетом реальной АЧХ датчика (рис. 2); б – равномерной АЧХ; 1 – $r_k = 200 \text{ см}$; 2 – 100

личие неразвивающихся дефектов приводит к повышению коэффициента сопротивления β_k в этой области, а следовательно, возникновению в ней источника излучения, координаты которого будут определены системой датчиков, а оценка области будет сделана по шкале таблицы значения коэффициентов сопротивления среды [1].

В качестве примера рассмотрим два случая, когда центр кластера дефектной области расположен на расстоянии $r_k = 100$ и 200 см от сканирующего источника, а радиус образовавшегося кластера составляет $a_k = 5 \text{ см}$ в обоих случаях. Радиус активной поверхности используемого при контроле стандартного АЭ датчика равен $a = 0,55 \text{ см}$. Условный коэффициент затухания сигнала в пластине из материала сталь 20 составляет $\beta C_1 = 0,002$. Для расчета используем реальную АЧХ АЭ датчика (рис. 2) и для сравнения равномерную на промежутке $1 \dots 10 \text{ см}^{-1}$. На рис. 3 в пределах пропускной способности АЭ датчика ($\alpha_1 = 1$; $\alpha_2 = 10 \text{ см}^{-1}$, что соответствует диапазону частот от 80 до 800 кГц) представлены результаты расчета для различных значений $(\beta_k - \beta)C_1$ при использовании реальной характеристики АЭ датчика (рис. 2) и равномерной в пределах $1 \dots 10 \text{ см}^{-1}$. Значения $\beta_k C_1$, процент деформации разрушения берутся из таблицы [1]. Если, например, за допустимую деформацию материала пластины принять $[\epsilon] = 1,5 \%$, что равносильно сопротивлению области с дефектами, равному 0,1 (см. таблицу), то на расстоянии кластера области с дефектами от сканирующего датчика равному 200 см значение w_c на сканирующем датчике в соответствии с графиком рис. 2 не должно превышать $0,00032 \cdot 10^{-5} \text{ см}$, а при $r_k = 100 \text{ см}$ эта величина равна $0,00053 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ (при сканировании пластины стандартным для АЭ оборудования ЕМА 3,9 сигналом). Таким образом могут быть построены таблицы значений w_c для различных величин относительной деформации дефектной области. Зная w_c , можно определить опасность развития процессов разрушения мате-

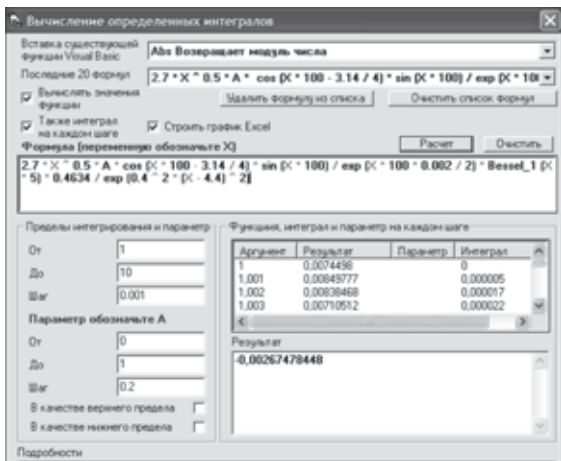


Рис. 4. Окно универсальной программы вычисления интегралов

риала. Как видно из рис. 3, сканирование пластины широкополосным АЭ датчиком с равномерной АЧХ в пределах $1 \dots 10 \text{ см}^{-1}$ показывает значительно большие значения величины w_c (рис. 3, б).

Для выполнения интегрирования в представленных выше формулах разработали универсальную программу с параметром, обеспечивающим интегрирование по необходимому для построения графиков количеству точек. Формула записывается в окне программы, а пределы интегрирования и параметр с необходимым шагом выбираются в полях пределов и параметров, представленных в левой части окна. Верхнее поле окна программы содержит некоторые обычные и специальные функции, часто встречающиеся при расчетах. Требуемая функция выбирается из списка курсором мыши и нажатием кнопки ввода вставляется в нужное место формулы. За полем функций следует поле, содержащее в памяти программы последние 20 расчетных формул. Остальные обозначения ясны из рис. 4. Программа при необходимости автоматически выводит результаты расчета в виде таблиц и графиков в Excel Microsoft Office.

Выводы

Получено аналитическое решение задачи сканирования генерирующим АЭ датчиком пластины с образовавшейся в ней локальной областью дефектов. Обратное к датчику возвращается изменившая свою форму и амплитуды отраженная от дефектной области волна. Искажение формы и амплитуд отраженной волны зависит от плотности и величины изменений структуры материала в области. Полученное решение, используя принцип возбужденного источника, позволяет определять координаты места возникновения области с развивающимися дефектами и проводить дополнительную к АЭ методу оценку этих дефектов.

Координаты и оценка областей с неразвивающимися дефектами осуществляется таким же образом, поскольку при воздействии сканирующего источника АЭ волн на область с дефектами последняя становится самостоятельным источником излучения и может быть зафиксирована датчиками мониторинговой системы.

Полученное решение предполагается использовать при разработке методики и технологии поиска и оценки дефектов путем сканирования волнами АЭ листовых конструкций, оснащенных постоянно действующими АЭ датчиками, работающими в режиме непрерывного мониторинга.

1. Недосека А. Я., Недосека С. А. Влияние локального скопления дефектов на распространение волн акустической эмиссии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. Сообщение 1. – 2013. – № 2. – С. 3–8.
2. Недосека А. Я., Недосека С. А., Бойчук О. И. Влияние локального скопления дефектов на распространение волн акустической эмиссии. Сообщение 2 // Там же. – 2013. – № 2. – С. 9–14.
3. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б.Е.Патона. – Киев: Индпром, 2008. – 815 с.
4. Грантер К. Дж. Интегральные преобразования в математической физике. – М.: Гостехиздат, 1956. – 204 с.
5. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z преобразования. – М.: Наука, 1971. – 288 с.

Analytical solution of a problem on evaluation of defects existing or developing in process of operation in sheet structures was obtained and analyzed using AE scanning method. The solution is shown by example of infinite size plate that can be used for large dimension sheet structures. The set problem was solved by superposition of two independent solutions with different sources of excitation. In the first case, the source of elastic wave excitation is a pulse on emitting transducer, in the second it is response wave obtained from the source. It is shown how the AE wave generated by the transducer and reflected from the defect area, returns to it with changed form and amplitudes depending on density and defect size. Obtained solution allows determining the coordinates of place of appearance of area with developing defects and carrying out evaluation of these defects in addition to AE testing. Performed calculations showed that the application of developed method allows determination of coordinates and evaluation of current material state for areas with undeveloping defects in the same way as for developing ones, since under effect of scanning source of AE waves on the area with defects, the latter transforms in the independent acoustic emission source which can be registered by transducers of AE testing monitoring system with further evaluation by the same methods, used in evaluation of the developing defects. Ref. 5, Figures 4.

К е y w o r d s : Acoustic emission (AE), AE scanning, deformation waves, mathematic modelling of physical processes.

Поступила в редакцию
05.06.2013