



ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛН АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

А.Я. НЕДОСЕКА, С.А. НЕДОСЕКА

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

Приведены результаты аналитических исследований волн акустической эмиссии (АЭ), возникающих и распространяющихся в тонких пластинах. Анализ проведенных исследований показал, что, используя полученные результаты, можно управлять параметрами АЭ волн, поступающих для дальнейшей обработки в прибор. При этом характеристики АЭ преобразователей можно получить любые, требуемые условиями измерений и обработки. Библиогр. 8, рис. 4.

Ключевые слова: АЭ, аналитическая модель, импульс АЭ, спектр АЭ

Сложность получения и обработки АЭ информации, поступающей в измерительные приборы, предъявляет к АЭ датчикам особые требования. Датчик должен преобразовывать АЭ сигналы, возбуждаемые развивающимися дефектами, к виду, упрощающему их анализ и позволяющему более точно принимать решение о состоянии конструкции [1–8]. Расчеты показывают, что такие возможности можно реализовать аналитическим путем, моделируя процессы возбуждения, формирования и распространения АЭ волн. Следует отметить трудности, возникающие при решении такого рода задач, связанные с достаточно большим количеством факторов, влияющих на конечный результат. Сложность аналитического и физического моделирования процессов, протекающих в материалах при их разрушении, приводит к необходимости вырабатывать специфические требования к способу и процедуре решения задач, к их коррекции в ходе выполнения. Это вызывает необходимость применения определенных специфических приемов в процедуре расчета, а также выдвигает некоторые требования и к специалистам, обеспечивающим получение результатов на необходимом научном уровне и в оптимальный срок. Эти требования вполне понятны. Однако опыт работы на протяжении многих лет показал, что они все-таки должны быть сформулированы и представлены в виде взвешенных частей одного целого. Нам кажется, что условия, которым должен соответствовать специалист, должны быть такими, как представленные на диаграмме рис.1. Использование указанных подходов при решении сложных аналитических задач позволило получить наглядные и доступные для анализа результаты в сравнительно короткий срок.

Итак, рассмотрим пластину небольшой толщины с источником возмущения в ее центре на некоторой глубине от поверхности. Такие задачи нами были решены ранее [4–7]. Решения позво-

лили получить представление о характере волн, распространяющихся в пластинах при их возбуждении точечным источником на различной глубине. Было показано, что элементарные АЭ волны распространяются в неограниченном диапазоне частот и что умелый выбор и суммирование этих частот позволяет получить АЭ датчик с наперед заданными характеристиками.

Так, все волновое поле условно разбито на три диапазона: от нуля до скорости C_2 , от C_2 до C_1 и диапазон скоростей выше C_1 . Как показывают графики зависимостей скорости распространения акустических волн от волновых чисел (спектральные уравнения), зависимость эта с ростом скоростей распространения элементарных волн усложняется, и в случае волн, движущихся со скоростями выше C_1 , приобретает хаотически сложный вид. Эти зависимости для трех диапазонов скоростей представлены на рис. 2, где C_1 и C_2 – базовые физические константы:

$$C_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad C_2 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}}$$

(E – модуль упругости материала, МПа; ν – коэффициент Пуассона; $\rho = \gamma/g$ – плотность материала, $\text{кг см}^2/\text{см}^4$ (γ – удельный вес, $\text{кг}/\text{см}^3$; g – ускорение силы тяжести, $\text{см}/\text{с}^2$)); C_a – мгновенная скорость элементарных волн, составляющих перемещающийся импульс АЭ (определяется спектральным уравнением (А)).

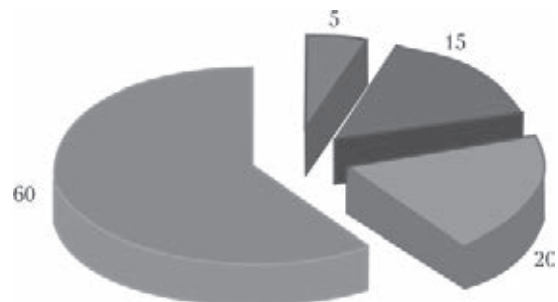


Рис. 1. Требования к специалистам, %: 5 – знания; 15 – опыт; 20 – умение; 60 – желание и настойчивость



На рис. 2, а представлены кривые зависимости относительной скорости перемещения АЭ волны от волнового числа α . Графики показывают нелинейную зависимость между указанными параметрами. Нелинейность постепенно перемещается к нулевому значению α и при толщине пластины 10 см и более эта зависимость прямолинейна и дает постоянное значение отношения C_α/C_2 , равное $0,927C_2$. Это скорость волны Рэлея, распространяющейся по поверхности пластины большой толщины. Можно также отметить, что это достаточно простые зависимости, выраженные одной нелинейной зависимостью для каждой толщины. Анализируя далее графики рис. 2, а, видим, что для этого случая зависимость между волновым числом и скоростью перемещения волны для заданной толщины пластины однозначна, т.е. каждому значению волнового числа α соответствует единственное значение скорости.

Но если скорости распространения волн становятся выше скорости C_2 , то в случае (рис. 2, б), когда рассматривается диапазон скоростей от C_2 до C_1 , зависимость между скоростями и волновыми числами становится сложной. Так, только для пластины толщиной 1 см все поле графика покрывается сетью кривых, указывая на большое число элементарных волн, распространяющихся в этой пластине. В этом случае наблюдаем неоднозначность, когда одному значению α соответствует несколько скоростей перемещения элементарных волн.

Картина еще более усложняется, когда элементарные волны двигаются со скоростями выше C_1 (рис. 2, в). Тогда каждому значению волнового числа соответствует бесчисленное значение скоростей. На рисунке показана сеть элементарных волн, покрывающая всю поверхность графика с ничтожно малыми интервалами между ними.

На графике показан диапазон скоростей, когда C_α/C_1 достигает значения 25. Нами также были проведены расчеты до значений $C_\alpha/C_1=1200$ и далее. Результаты расчетов показали, что элементарные волны существуют во всех этих диапазонах. В то же время можно отметить, что величины перемещений поверхностей пластин практически мало зависят от элементарных составляющих волн,двигающихся с очень большими скоростями.

Зная спектральные характеристики пластины, другими словами, зная какие длины волн и при каких скоростях они могут распространяться в пластине, можно путем фильтрации выбрать требуемый для данного конкретного случая диапазон групп частот и шаг между ними, а также диапазон

скоростей, которые целесообразно получить для дальнейшего анализа.

Таким образом, можно построить преобразователь АЭ, который реализует заданные условия фильтрации волны и в прибор для дальнейшей обработки поступит АЭ импульс, сформированный по наперед заданным параметрам. Анализируя графики рис. 2, можно сделать вывод, что такими параметрами являются: α ; $\Delta\alpha$; $C_\alpha/C_{1,2}$; $\Delta(C_\alpha/C_{1,2})$ или $\sum (\Delta C_\alpha/C_{1,2})$.

Представим пример расчета параметров АЭ преобразователя для работы с пластинами со средней толщиной 1 см. Выберем значение $\Delta\alpha = 1 \dots 10 \text{ см}^{-1}$, что соответствует частотному диапазону 80...800 кГц. Величину $\Delta(C_\alpha/C_1)$ примем равной $1 \dots 3$ с шагом 0,1. Проведя расчет перемещений верхней поверхности пластины при таких параметрах датчика, получим спектр волн, представленный на рис. 3.

Анализируя результаты расчета, можем сделать вывод, что на расстоянии 71 см сформировался импульс, распространяющийся с мгновенной скоростью, равной $0,71 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ (на графике выделен областью синего цвета). Импульс имеет несколько явно выраженных пиков с достаточно крутым передним фронтом, что позволяет проводить их обработку по специальным программам.

Можно считать, что АЭ преобразователь с такими параметрами может быть использован в контролирующей аппаратуре типа ЕМА-3. В расчетах были использованы формулы, полученные ранее [4-7]. Программа для расчета параметров фильтрации волны представлена на рис. 4.

Аналитические зависимости

$$w = \frac{1+v}{1-v} \frac{V_0}{2\pi^2} \int_0^{\alpha_2} \left[1 - \frac{2}{1-\gamma_2^2} \right] \alpha \cos(\alpha\gamma_1 z_0) \times \\ \times \sin(\alpha C_\alpha t) J_0(\alpha r) d\alpha, \\ 2(1-\gamma_2^2)^2 \cos(\alpha\gamma_1 \delta) \sin(\alpha\gamma_1 z_0) \sin(\alpha\gamma_2 \delta) + \\ + 8\gamma_1 \gamma_2 \sin(\alpha\gamma_1 \delta) \sin(\alpha\gamma_1 z_0) \cos(\alpha\gamma_2 \delta) + \\ + \left[4\gamma_1 \gamma_2 - (1-\gamma_2^2)^2 \right] \sin(\alpha\gamma_1 \delta) \times \\ \times \cos(\alpha\gamma_1 z_0) \sin(\alpha\gamma_2 \delta) = 0$$

представляют математическую модель волнового процесса для диапазона скоростей выше C_1 при возникновении мгновенного изменения объема материала в любой точке пластины [4-6]. Модель состоит из формулы, описывающей перемещение поверхности пластины и спектрального уравнения, определяющего состав спектра элементарных волн, образующих их пакет.

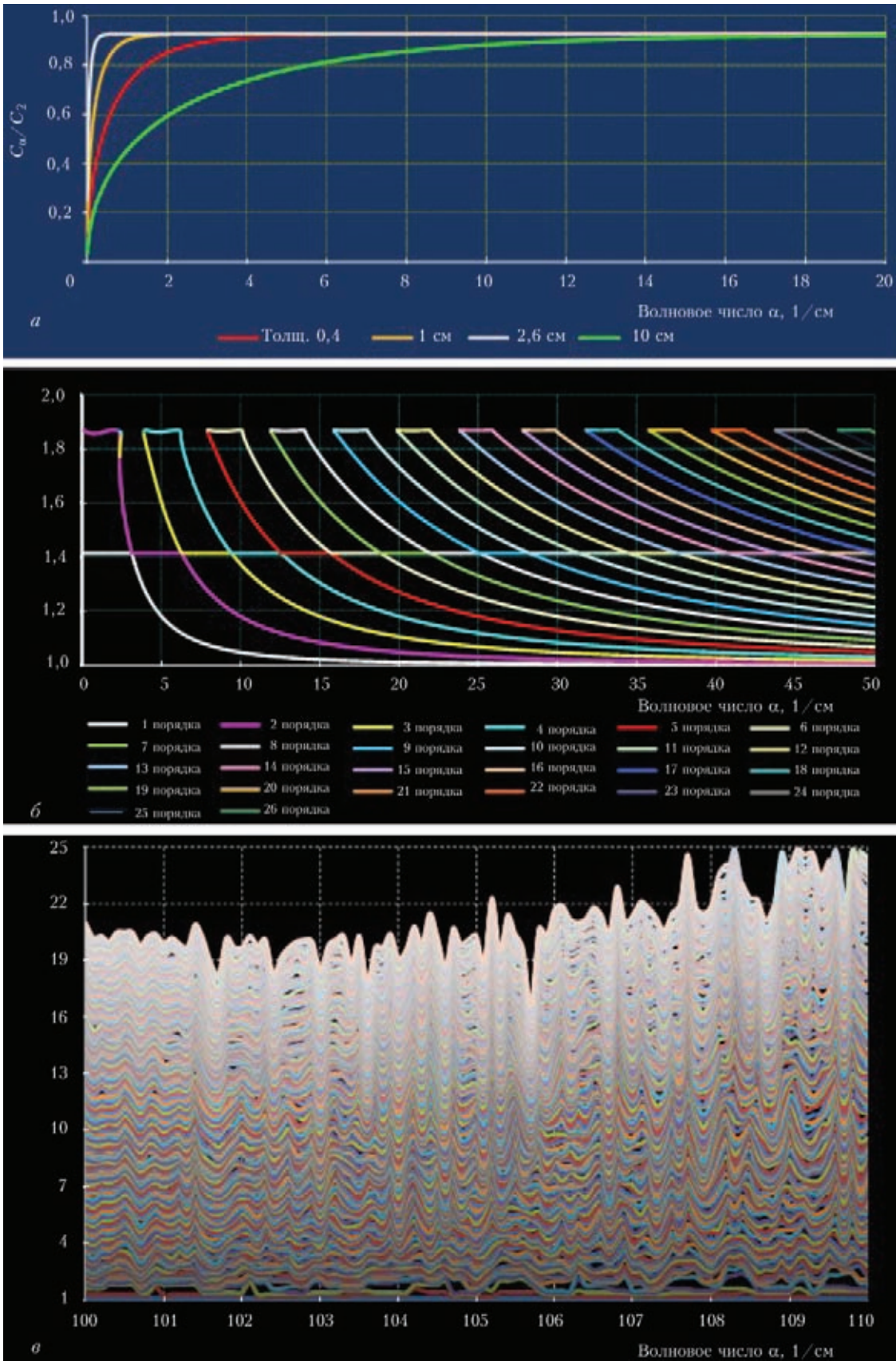


Рис. 2. Спектры АЭ волн для трех диапазонов волнового поля (описание а-в см. в тексте)

Здесь ν – коэффициент Пуассона; V_0 – внезапное изменение объема материала, вызвавшее АЭ, см³·с; δ – толщина пластины; z_0 – глубина залегания изменившегося объема материала V_0 ;

t – время, с; r – радиус, см.

Остальные величины, входящие в формулы, ясны из приведенных ниже выражений:

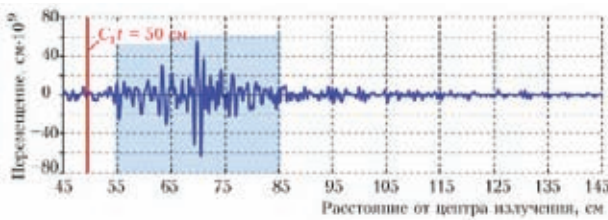


Рис. 3. Перемещения верхней поверхности пластины толщиной 1 см, вызванные источником излучения на глубине 0,2 см от поверхности (параметры фильтрации приведены в тексте)

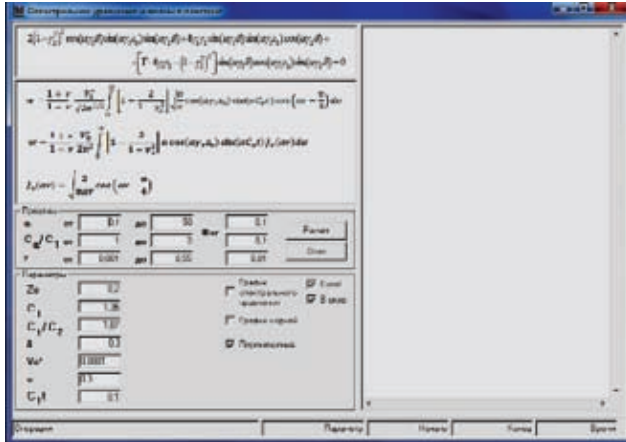


Рис. 4. Окно программы для выбора параметров АЭ преобразователя путем фильтрации волнового поля пластины

$$\Gamma = \frac{4\gamma_1\gamma_2}{(1-\gamma_2^2)^2}, \quad \gamma_2 = \sqrt{\frac{C_\alpha^2}{C_2^2} - 1}, \quad \gamma_1 = \sqrt{\frac{C_\alpha^2}{C_1^2} - 1}. \quad (A)$$

На рис. 4 показано окно программы расчета волн АЭ при различных условиях фильтрации. Программы типичные для всех трех диапазонов скоростей волн, поэтому в качестве примера на рисунке приведена программа для случая, когда диапазон рассматриваемых скоростей находится между C_1 и бесконечностью. В верхнем левом углу окна приведены расчетные формулы: сверху – спектральное уравнение, ниже – формула для расчета перемещений w . Формула для расчета условно представлена в пределах интегрирования от 0 до бесконечности – полный спектр элементарных волн. Действительное значение спектра выбирается по первой строке поля исходных значений (условно обозначено «пределы»). Туда подставляются значения нижнего и верхнего пределов интегрирования. Точность выполнения расчета определяет шаг по α в последней колонке верхней строки. Вторая строка поля «пределы» определяет диапазон и шаг сче-

та выбранных скоростей волн. Еще ниже расположена строка значений и шага счета по радиусу от 0 до принятого для конкретного случая значения. В поле «параметры» устанавливаются исходные параметры счета для данной пластины (толщина, материал, объем начального излучения, положение источника по глубине, примерное ожидаемое расположение максимального импульса по радиусу пластины). Там же указываются необходимые требования к оформлению расчетных данных и способам их представления. Программы построены для каждого диапазона скоростей.

Выводы

Построена аналитическая модель волнового поля пластины, появляющегося при внезапном возникновении АЭ источника.

Разработаны специальная методика и программы для выбора в общем волновом поле пластин требуемых рабочих параметров АЭ преобразователей.

Приведены основные параметры, характеризующие спектральный состав АЭ волны на выходе преобразователя (α ; $\Delta\alpha$; $C_\alpha/C_{1,2}$; $\Delta(C_\alpha/C_{1,2})$ или $\sum(\Delta C_\alpha/C_{1,2})_i$).

Спектральный состав импульса, поступающего в прибор, зависит только от амплитудно-частотной характеристики преобразователя.

1. *Акустическая эмиссия и ресурс конструкций* / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека. – Киев: Индпром, 2012. – 312 с.
2. *Андрейків А. Е., Лысак Н. В. Метод АЭ в исследовании процессов разрушения.* – Киев: Наук. думка, 1989. – 176 с.
3. *Механіка руйнування і міцність матеріалів / Під заг. ред. В.В.Панасюка: Довід. посіб. Т. 5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З.Т.Назарчука.* – Львів: ФМІ, 2001. – 1132 с.
4. *Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б.Е.Патона.* – Киев: Индпром, 2008. – 815 с.
5. *Недосека А. Я., Недосека С. А., Волошкевич И. Г. Волны деформаций, возникающие при локальной перестройке структуры материалов // Техн. диагностика и неразруш. контроль.* – 2004. – № 3. – С. 8–15.
6. *Недосека А. Я., Недосека С. А., Волошкевич И. Г. О волнах Рэлея в пластинах ограниченной толщины // Там же.* – 2006. – № 3. – С. 3–8.
7. *Недосека А. Я., Недосека С. А., Волошкевич И. Г. О движении волн акустической эмиссии с большими скоростями // Там же.* – 2013. – № 1. – С. 3–9.
8. *Недосека А. Я., Недосека С. А., Овсиенко М. А. Влияние методов обработки акустико-эмиссионной информации на формирование АЭ событий и определение их координат // Там же.* – 2011. – № 2. – С. 5–14.

The paper gives the results of analytical studies of acoustic emission (AE) waves emerging and propagating in thin plates. Analysis of the conducted investigations showed that by applying the derived results it is possible to control AE wave parameters, sent to the instrument for further processing. Any characteristics of AE transducers that are required by measurement and processing conditions can be obtained. 8 References, 4 Figures.

Key words: waves in thin plates, AE parameters monitoring

Поступила в редакцию
21.05.2013