

Г. В. КУЛАК, А. Г. МАТВЕЕВА
МГПУ им. И.П. Шамякина (г. Мозырь, Беларусь)

РАССЕЯНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН НА ТРЕЩИНАХ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Введение. Теория рассеяния ультразвуковых (УЗ) волн на объектах круглой и цилиндрической формы достаточно хорошо разработана [1–4]. При этом строятся решения волновых уравнений в области рассеивателя и вне ее в виде разложений в ряды по сферическим или цилиндрическим функциям, а затем «сшивают» полученные решения на границах среды и рассеивающего центра. Решения систем алгебраических уравнений с переменными коэффициентами численно или аналитически позволяют рассчитать сечения рассеяния или относительные интенсивности рассеянных волн.

Теоретические результаты и обсуждение. Рассмотрим плоскую задачу рассеяния звука на клиновидном объекте, который предполагаем бесконечно протяженным вдоль оси, перпендикулярной плоскости чертежа. Поверхности, образующие объект в виде трещины, граничат с границей твердого тела. Для описания геометрии объекта и построения решения задачи рассеяния введем полярную систему координат (r, θ) с центром O в угле клина.

Задача теории рассеяния сводится к определению восьми неизвестных: $A_n, B_n, \bar{A}_n, \bar{B}_n, C_n, D_n, E_n, F_n$. Данные неизвестные находим из граничных условий для вектора смещений \vec{S} и тензора напряжений $\hat{\sigma}$ в различных областях в цилиндрической системе координат [1, 5].

Используя условия сшивания продольных и сдвиговых составляющих УЗ полей для падающей плоской волны на границах клиновидных областей, получим систему уравнений для коэффициентов $A_n, B_n, \bar{A}_n, \bar{B}_n, C_n, D_n, E_n, F_n$, где n – число членов ряда в разложении цилиндрических функций, описывающих процесс рассеяния. Для «пустого» дефекта следует положить $E_n = F_n = 0$. Решение таких систем функциональных уравнений проще всего провести численными методами. В простейшем случае $n = 0, 1$, решение системы уравнений можно провести аналитически. Приближение, при котором ограничиваются $n = 0$, соответствует приближению Рэлея в теории рассеяния на сфере [1]. Плотности потока мощности рассеянной (s), падающей (i) УЗ волн даются соотношениями [1]:

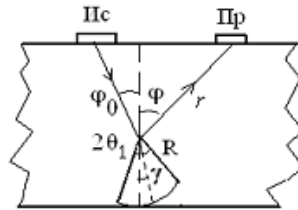
$$P_r^{s,i} = \left(-\frac{i\Omega}{4} \right) \left(\sigma_{rr}^{s,i} S_r^{s,i*} + \sigma_{r\theta}^{s,i} S_\theta^{s,i*} - \sigma_{rr}^{s,i*} S_r^{s,i} - \sigma_{r\theta}^{s,i*} S_\theta^{s,i} \right), \quad (1)$$

где компоненты вектора $\vec{S}^{s,i}$ и тензора $\hat{\sigma}^{s,i}$ определены в результате расчета и из-за громоздкости не приводятся; символ «*» означает комплексное сопряжение.

Относительная интенсивность рассеянного излучения дается соотношением:

$$\eta = P_r^s / P_r^i, \quad (2)$$

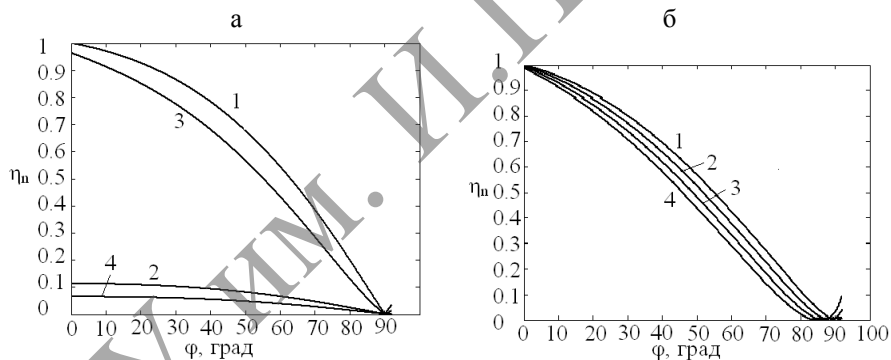
Численные расчеты проводились для стали (Fe) при следующих значениях параметров: $v_l=5921$ м/с – фазовая скорость продольной УЗ волны, $v_t=3223$ м/с – фазовая скорость сдвиговой УЗ волны, $\rho=7870$ кг/м³ – плотность материала, $\nu=0,28$ – коэффициент Пуассона. Для продольной УЗ волны частотой $f = 5 \text{ МГц}$ коэффициент УЗ затухания составляет $0,0001 \text{ мм}^{-1}$, поэтому им в дальнейшем пренебрегаем.



$2\theta_1$ – угол клина; R – размер клина (трещины); ϕ_0 – угол падения УЗ волны; ϕ – угол рассеяния УЗ волны;
 r – расстояние до приемника, пройденное рассеянной УЗ волной; γ – угол наклона трещины;
 Ис – источник ультразвука; Пр – приемник)

Рисунок 1 – Схема рассеяния ультразвука трещиной

На рисунке 2 представлена зависимость относительной интенсивности рассеянной УЗ волны η_n от угла рассеяния ϕ при различных углах при вершине трещины (клина) $2\theta_1$ (а).



$r = 5$ см, $R = 5$ мм, $\phi_0 = 10$ град, $f = 5$ МГц; а) θ_1 : 1–2, 2–4, 3–6, 4–8 град., $\gamma = 0$; б) γ : 1–2, 2–4, 3–6, 4–8 град., $\theta_1 = 5$ град.

Рисунок 2 – Зависимость относительной интенсивности рассеянной УЗ волны η_n от угла рассеяния ϕ

Из рисунка 2, а следует, что наибольшая относительная интенсивность η_n при любых углах рассеяния достигается для наименьшего угла клина θ_1 . При углах рассеяния, стремящихся к 90 градусам, эти зависимости сближаются. При других углах клина зависимости имеют нелинейный характер. Зависимость относительной интенсивности рассеянной УЗ волны η_n от угла рассеяния ϕ при различных углах наклона трещины γ представлена на рисунке 2, б. Из рисунка 2, б следует, что наибольшая относительная интенсивность η_n при любых промежуточных углах рассеяния из диапазона 0–90 град. достигается для наименьшего угла клина γ . Наибольшее различие эффективностей рассеяния достигается при углах ϕ , близких к 45 градусам.

С увеличением размера (R) клина (трещины) от 1 до 4 мм максимальное значение относительной интенсивности рассеянного излучения достигается для $R = 2$ мм. Данная особенность объясняется интерференционными эффектами при наложении плосковолновых составляющих УЗ волн, дифрагированных на клиновидных объектах. Отсутствие рассеянного излучения при углах $\phi = 90$ град. объясняется ограниченностью количества членов ряда, включенных в схему расчета с $n = 0, 1$. Такое приближение можно считать близким к рэлеевскому рассеянию ($n = 0$).

Заключение. Рассмотренные зависимости показывают, что угловые закономерности рассеянного ультразвукового излучения на клиновидных дефектах, близким по форме к трещинам, позволяют определить размер трещины, угол ее «раскрыва», угол наклона трещины и ее местоположение по отношению к источнику и приемнику излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Труэл, Р. Ультразвуковые методы в физике твердого тела / Р. Труэл, Ч. Эльбаум, Б. Чик; пер. с англ.; под ред. Н.Г. Михайлова и В.В. Леманова. – М.: Мир, 1972. – 307 с.
2. Кайно, Г. Акустические волны. Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов / Г. Кайно. – М.: Мир, 1990. – 652с.
3. Шендеров, Е.Л. Излучение и рассеяние звука / Е.Л. Шендеров. – М.: Судостроение, 1989. – 301 с.
4. Keller, J.V. Geometrical theory of diffraction / J.V. Keller // J. Opt. Soc. Amer. – 1962. – V. 52. – P. 116–130.
5. Гринченко, В.Т. Рассеяние звука на конечных клиновидных объектах / В.Т. Гринченко, В.Т. Мацьпура // Акустичний вісник. – 2003. – Т. 6. – № 2. – С. 23–33.

МГТУ ИМ. И.П. ШАМЯКИНА