Физика волновых процессов и радиотехнические системы

УДК 534.24, 534.6.08

Ультразвуковая диагностика дефектов зоны сплавления в слоистых композиционных материалах

В.В. Яцышен, М.В. Слюсарев

Волгоградский государственный университет 400062, Россия, г. Волгоград Университетский пр., 100

В работе рассматривается акустическая диагностика слоистой системы с биметаллическими образцами при использовании оптимальных параметров диагностики. Анализ спектров отражения показывает, что наличие дефекта дает эффект полного внутреннего отражения – для всех частот из рассматриваемого диапазона энергетический коэффициент отражения равен 1, соответственно, коэффициент прохождения равен 0. Полученные результаты показывают эффективность данного подхода при диагностике слоистых систем, содержащих биметаллические слои. Ключевые слова: ультразвуковая диагностика, слоистые композиты, плоская гармоническая акустическая волна, биметаллический слой, дефекты слоистой структуры.

Акустические волны УЗ-диапазона широко используются в диагностике металлов [3, 4]. В настоящей работе рассматривается диагностика биметаллических образцов с использованием оптимальных параметров диагностики. Биметаллические структуры находят широкое применение в машиностроении и других отраслях народного хозяйства.

Рассмотрим распространение плоской гармонической акустической волны с частотой ω в неоднородной по координате *z* среде.

Решение уравнения Гельмгольца для давления

$$\Delta \psi + k^2 \psi = 0 \tag{1}$$

ищем в виде

$$\psi(x,z) = \varphi(z) \exp(ik_{\rm H}z) \,. \tag{2}$$

Здесь k_{II} проекция волнового вектора на ось x.

Для зависящей от *z* функции получаем уравнение

$$\Delta \varphi + k_z^2 \varphi = 0 , \qquad (3)$$

где

$$k_z = \sqrt{k^2 - k_{\rm II}^2}, \quad k = \frac{\omega}{c_l}, \tag{4}$$

Для проекции скорости [1] получаем:

$$v_z = \frac{1}{i\omega\rho_0} \frac{d\varphi}{dz}.$$
(5)

Здесь р₀ – плотность среды. Вводим обозначения $\vec{Q}(z) = \begin{pmatrix} \varphi(z) \\ \upsilon_z(z) \end{pmatrix}, \quad \hat{A} = \begin{pmatrix} 0 & \omega \rho_0 \\ \frac{k_z^2}{\omega \rho_0} & 0 \end{pmatrix}. \tag{6}$

Тогда уравнения для $\phi(z)$ и $v_z(z)$ записываются в векторном виде:

$$\frac{d\bar{Q}}{dz} = i\widehat{A}\overline{Q}.$$
(7)

Для этого уравнения по методу, изложенному в [2], получаем следующую характеристическую матрицу:

$$\widehat{M}(z) = \begin{pmatrix} \cos(\lambda_1 z) & -\frac{i}{b_1} \sin(\lambda_1 z) \\ -ib_1 \sin(\lambda_1 z) & \cos(\lambda_1 z) \end{pmatrix}.$$
(8)

Здесь

$$\lambda_1 = k_z, \quad b_1 = \frac{k_z}{\omega \rho_0}.$$
(9)

Возьмем теперь систему, состоящую из *n* слоев.

Для характеристической матрицы многослойной системы получаем следующий результат:

$$\widehat{M}(z_n) = \prod_{j=1}^n \widehat{M}_j (z_j - z_{j-1}).$$
(10)

Здесь $d_j = z_j - z_{j-1}$ — толщина слоя, а $\widehat{M}_j(z_j - z_{j-1})$ соответствующая характеристическая матрица *j*-го слоя (рис. 1).

Рассматриваем теперь задачу об отражении звуковой волны на границе раздела двух сред (рис. 2).



Рис. 1. Многослойная система из n слоев: 1 — область пространства, откуда приходит волна; t — подложка; z_j — координаты границ слоев; $d_j = z_j - z_{j-1}$ — толщина слоя

Для волн давления и скорости падающей (*i*), отраженной (*R*), прошедшей (*T*) соответственно имеем:

$$\begin{split} \varphi_{i} &= A_{0} \exp(ik_{1z}z), \\ \varphi_{R} &= A_{R} \exp(-ik_{1z}z), \\ \varphi_{T} &= A_{T} \exp(ik_{tz}(z-z_{n})); \\ v_{z}^{i} &= A_{0} \frac{k_{1z}}{\omega \rho_{1}} \exp(ik_{1z}z), \\ v_{z}^{R} &= -A_{R} \frac{k_{1z}}{\omega \rho_{1}} \exp(ik_{1z}z), \\ v_{z}^{T} &= A_{T} \frac{k_{tz}}{\omega \rho_{t}} \exp(ik_{tz}(z-z_{n})). \end{split}$$
(11)

Здесь индексы 1 и *t* относятся к первой среде и подложке соответственно (см. рис. 2).

Рассматривая сшивание полей на границе среды, получаем следующие формулы для амплитудных коэффициентов отражения и прохождения:

$$R = \frac{A_R}{A_0} = \frac{b_1(m_{11} + b_t m_{12}) - (m_{21} + b_t m_{22})}{b_1(m_{11} + b_t m_{12}) + (m_{21} + b_t m_{22})},$$
 (12)

$$T = \frac{A_T}{A_0} = \frac{2b_1}{b_1(m_{11} + b_t m_{12}) + (m_{21} + b_t m_{22})}.$$
 (13)

Здесь m_{ij} – элементы характеристической матрицы слоистой системы, $b_t = k_{tz} / (\omega \rho_t)$.

Для энергетических коэффициентов отражения и прохождения получаем:

$$\mathfrak{R} = \left| R \right|^2,\tag{14}$$

$$\Im = \frac{\rho_1}{\rho_t} \frac{\operatorname{Re} k_{tz}}{\operatorname{Re} k_{1z}} |T| \,. \tag{15}$$

На рис. 3 и 4 представлены частотные спектры отражения и прохождения для различных слу-



Рис. 2. Геометрия отражения звуковой волны на границе раздела двух сред – волновые векторы волн давления падающей (i), отраженной (R), прошедшей (T); $\widehat{M}(z_n)$ – характеристическая матрица многослойной структуры

чаев при нормальном падении. Видно, что частота 2.5 МГц попадает в область минимального отражения для параметров рис. 3, что является приемлемым. При другом значении параметров иммерсионного слоя отражение будет гораздо более значительным 75 % (рис. 4), что очень затрудняет диагностику дефекта. Таким образом, можно подобрать оптимальные параметры этого слоя. Из рисунков следует, что видна интерференция волн из-за слоистости системы. При этом характер интерференции определяется размерами слоев и характеристиками их материалов.

Рассмотрен также случай, когда биметаллический слой содержит дефект в виде тонкого воздушного слоя. Исследовались случаи биметаллов сталь-сталь-2, медь-сталь.

Анализ спектров отражения показывает, что наличие дефекта дает эффект полного внутреннего отражения – для всех частот из рассматриваемого диапазона энергетический коэффициент отражения равен 1, соответственно, коэффициент прохождения равен 0. Поэтому его легко обнаружить экспериментально.

На рис. 5 и 6 приведены графики зависимостей фазы отраженной волны. Последний рисунок относится к случаю, когда биметаллический слой содержит дефект в виде тонкого воздушного слоя. Из этого графика видно, что, хотя энергетический коэффициент отражения равен 1,



Рис. 3. Частотные спектры отражения и прохождения для параметров иммерсионного слоя c = 4000 м/с, $\rho = 3000$ кг/м³



фаза продолжает сохранять чувствительность к наличию границ многослойной системы.

Были проведены эксперименты по диагностике дефектов в биметаллах с использованием результатов теоретического анализа и найдены оптимальные параметры для обнаружения дефектов слоистой структуры.

Таким образом, в работе проведен теоретический и экспериментальный анализ отражения УЗ-акустической волны для слоистой системы. Полученные результаты показывают эффективность данного подхода при диагностике слоистых систем, содержащих биметаллические слои.





Рис. 6. Частотная зависимость фазы отраженной волны. Случай биметаллического слоя с дефектом в виде тонкого воздушного слоя

Список литературы

- Бреховских Л.М., Гончаров В.В. Введение в механику сплошных сред. М.: Наука, 1982. 336 с.
- Хоружий Д.Н., Яцышен В.В. Применение метода характеристических матриц при расчете оптических свойств диэлектрика с учетом температурных эффектов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2005. Т. 8. № 2. С. 22-25.
- Слюсарев М.В., Яцышен В.В. Исследование рассеяния ультразвукового поля на дефектах сферической формы // VI Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов». Казань, 2007. С. 35–36.
- Слюсарев М.В., Яцышен В.В. Акустическая диагностика напряженно-деформированного состояния металлических стержней с использованием коаксиальных волн // VIII Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов». СПб., 2009. С. 12–13.

Ultrasonic diagnostic for a layered composite materials with defect in the alloying zone

V.V. Yatsishen, M.V. Sluysarev

Acoustic diagnostic for a layered system with bimetal specimens has been considered in this paper. The optimal parameters for the diagnostic have been found. The total reflection for the all frequencies is observed in the presence of defect. Our results indicate on the efficiency of such approach to the diagnostic for a layered system with bimetal layers. *Keywords*: ultrasonic diagnostics, layered composites, plane harmonic acoustic wave, bimetallic layer, defects of layered structure.