



УДК 535.36
ББК 22

РАЗРАБОТКА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ ЗОНЫ СПЛАВЛЕНИЯ В СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

В.В. Яцышен, М.В. Слюсарев

В работе построена ультразвуковая измерительная система для диагностики слоистых металлических образцов (сталь + сталь, медь + сталь), изготовленных методом сварки взрывом, 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 металлических слоистых образцов.

Ключевые слова: ультразвуковая измерительная система, диагностика слоистых металлических образцов, анализ спектров отражения, эффект полного внутреннего отражения, характеристическая матрица слоя, дефекты в металле.

Введение

Акустические волны ультразвукового диапазона широко используются в диагностике металлов (см.: [4; 6]). В настоящей работе рассматривается ультразвуковая измерительная система для диагностики слоистых металлических образцов, изготовленных методом сварки взрывом, с использованием оптимальных параметров диагностики. Слоистые металлические структуры находят широкое применение в тяжелом машиностроении, нефтяной, газовой и атомной промышленности, а также других отраслях народного хозяйства.

Покажем теоретический механизм распространения ультразвуковой волны в слоистых металлических структурах, изготовленных методом сварки взрывом. Рассмотрим распространение плоской гармонической акустической волны с частотой ω в неоднородной по координате z среде.

Решение уравнения Гельмгольца для давления:

$$\Delta\psi + k^2\psi = 0 \quad (1)$$

ищем в виде:

$$\psi(x, z) = \varphi(z) \exp(ik_{\parallel}z). \quad (2)$$

Здесь k_{\parallel} – проекция волнового вектора на ось x .

Для зависящей от z функции получаем уравнение:

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

где

$$k_z = \sqrt{k^2 - k_{\parallel}^2}, \quad k = \frac{\omega}{c_l}, \quad (4)$$

c_l – скорость звука в среде.

Для проекции скорости [2] получаем:

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

Здесь ρ_0 – плотность среды.

Вводим обозначения:

$$\vec{Q}(z) = \begin{pmatrix} \varphi(z) \\ v_z(z) \end{pmatrix}, \quad \hat{A} = \begin{pmatrix} 0 & \omega\rho_0 \\ k_z^2 & 0 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

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

$$\frac{d\vec{Q}}{dz} = i\hat{A} \cdot \vec{Q}. \quad (7)$$

Для этого уравнения по методу, изложенному в работе авторов [5], получаем следующую характеристическую матрицу:

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

Здесь

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

Рассмотрим теперь систему, состоящую из n -слоев.

Для характеристической матрицы многослойной системы получаем следующий результат:

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

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

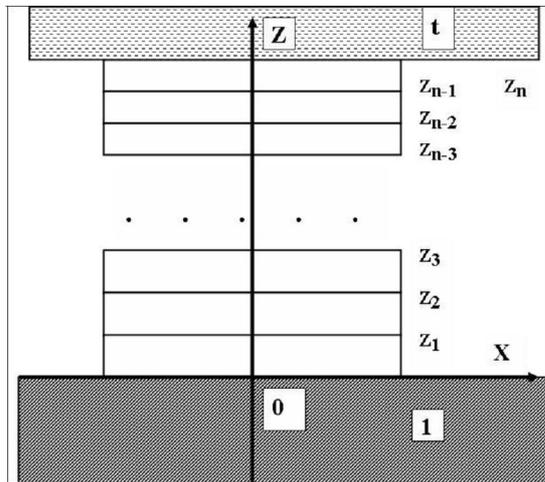


Рис. 1. Многослойная система из n -слоев:
 1 – область пространства, откуда приходит волна;
 t – подложка;
 z_j – координаты границ слоев;
 $d_j = z_j - z_{j-1}$ – толщина слоя

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

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

$$\begin{aligned} \varphi_i &= A_0 \exp(ik_{1z}z), & \varphi_R &= A, \\ \varphi_T &= A_T \exp(ik_{tz}(z - z_n)) \\ v_z^i &= A_0 \frac{k_{1z}}{\omega \rho_1} \exp(ik_{1z}z) \\ v_z^R &= -A_R \frac{k_{1z}}{\omega \rho_1} \exp(ik_{1z}z) \\ v_z^T &= A_T \frac{k_{tz}}{\omega \rho_t} \exp(ik_{tz}(z - z_n)) \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь индексы l и t относятся к первой среде и подложке соответственно (рис. 2).

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

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

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

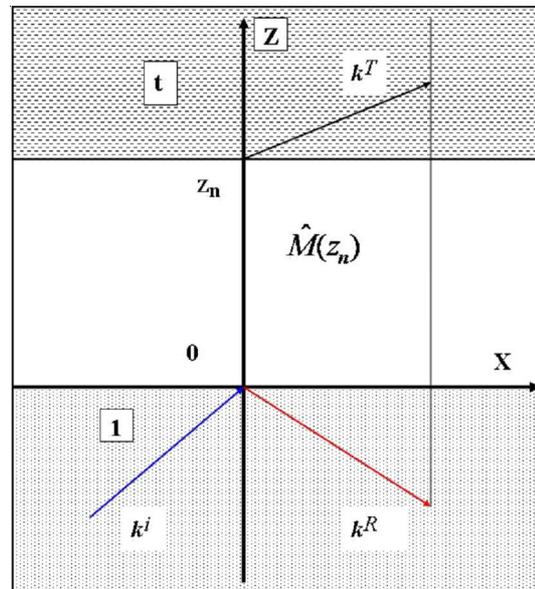


Рис. 2. Геометрия отражения звуковой волны на границе раздела 2 сред:
 волновые векторы волн давления падающей (i),
 отраженной (R), прошедшей (T);
 $\hat{M}(z_n)$ – характеристическая матрица многослойной структуры

Здесь m_{ij} – элементы характеристической матрицы слоистой системы, $b_i = \frac{k_{iz}}{\omega \rho_i}$.

Для энергетических коэффициентов отражения и прохождения получаем:

$$\mathfrak{R} = |R|^2, \quad (14)$$

$$\mathfrak{T} = \frac{\rho_i}{\rho_t} \cdot \frac{\operatorname{Re} k_{iz}}{\operatorname{Re} k_{tz}} \cdot |T|. \quad (15)$$

На рисунках 3 и 4 представлены частотные спектры отражения и прохождения для различных случаев при нормальном падении. Видно, что частота 2,5 МГц попадает в область минимального отражения для параметров рисунка 3, что является приемлемым. При другом значении параметров иммерсионного слоя отражение будет гораздо более значительным – 75 % (рис. 4), что значительно затрудняет диагностику дефекта. Таким образом можно подобрать оптимальные параметры

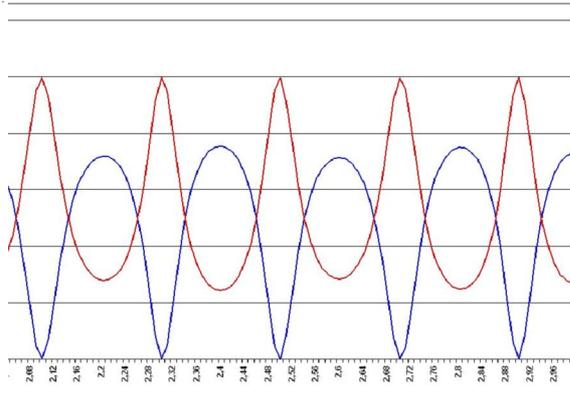


Рис. 3. Частотные спектры энергетического коэффициента отражения (синий) и прохождения (красный) для параметров иммерсионного слоя $c = 4000$ м/с, $\rho = 3000$ кг/куб.

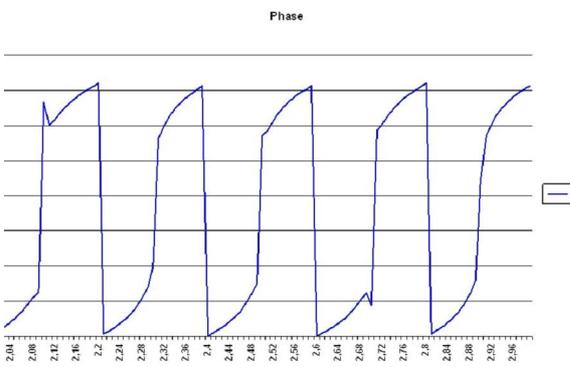


Рис. 5. Частотная зависимость фазы отраженной волны для параметров рис. 3

этого слоя. Из рисунков 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. Рассматривались случаи биметаллов сталь + сталь, 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 рисунках 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

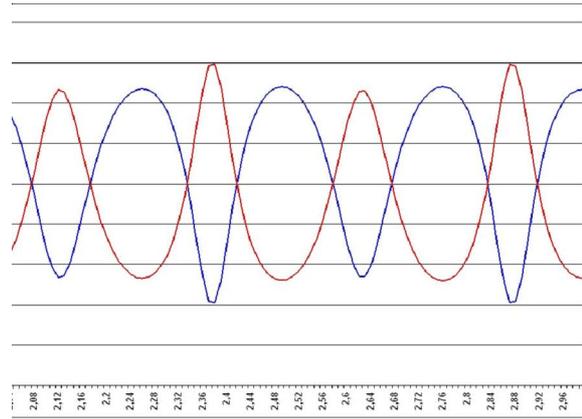


Рис. 4. Частотные спектры отражения и прохождения для параметров иммерсионного слоя $c = 5000$ м/с, $\rho = 4000$ кг/куб. м

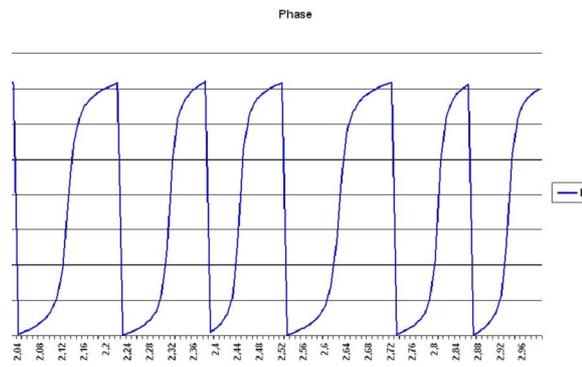


Рис. 6. Частотная зависимость фазы отраженной волны. Случай биметаллического слоя с дефектом в виде тонкого воздушного слоя

отражения равен 1, фаза продолжает сохранять чувствительность к наличию границ многослойной системы.

В настоящей работе были проведены эксперименты по диагностике дефектов в биметаллах с использованием результатов теоретического анализа и найдены оптимальные параметры для обнаружения дефектов слоистой структуры. Для этого нами была построена измерительная система для диагностики слоистых металлических образцов, изготовленных методом сварки взрывом, с использованием современных ультразвуковых дефектоскопов УД2-140 и УД2-70, в которых реализованы импульсные варианты эхо-метода и зеркально-теневого метода, с последующей обработкой полученных данных.

Для проведения ультразвуковой диагностики были разработаны и изготовлены наклонные пьезоэлектрические преобразователи с углами ввода в сталь 65° и 50° , с частотой ультразвукового импульса 2,5 МГц, для которых построены реверберационно-шумовые характеристики, сняты амплитудно-частотные характеристики, а также в работе использовались стандартные раздельно-совмещенные пьезоэлектрические преобразователи с частотами 2,5 и 5,0 МГц. Частота повторения ультразвуковых импульсов фиксирована и равна 1 кГц. На рисунках 7, 8 и 9 представлены дефектограммы, характерные для различных параметров дефекта в граничной зоне металлических слоев.

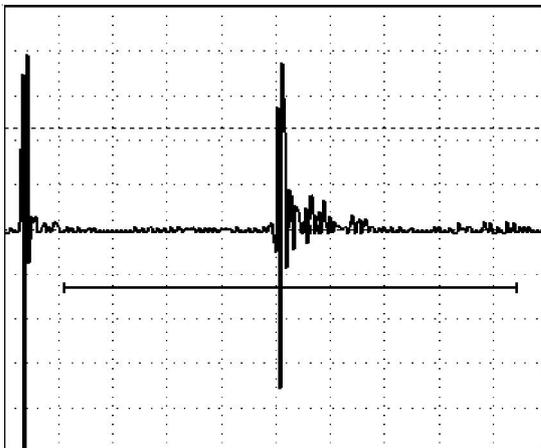


Рис. 7. Отражение импульса от зоны сплавления в отсутствие дефекта (слоистая металлическая структура сталь + сталь)

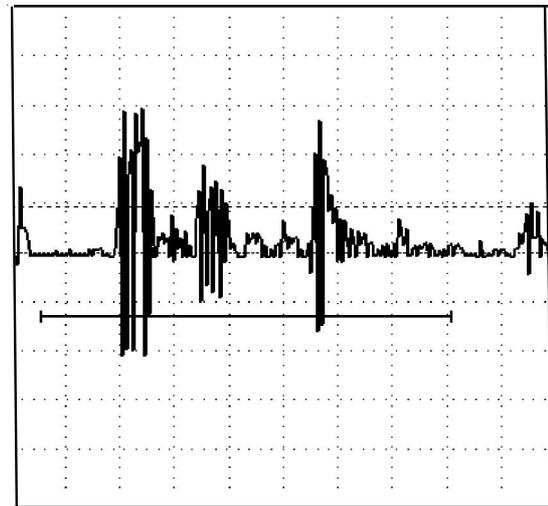


Рис. 8. Отражение импульса от дефекта размером 0,01 мм (слоистая металлическая структура сталь + сталь)

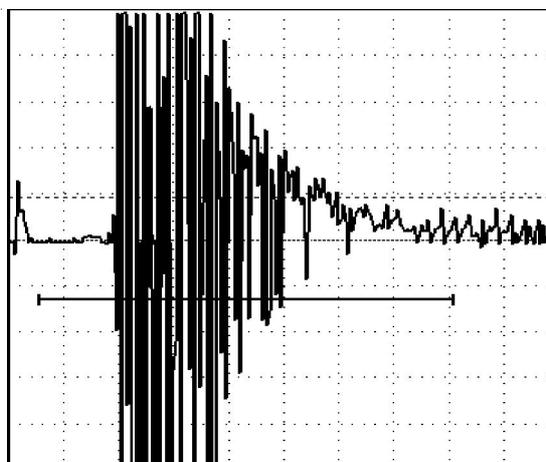


Рис. 9. Отражение импульса от дефекта размером 0,1 мм (слоистая металлическая структура сталь + сталь)

Таким образом, в работе построена ультразвуковая измерительная система для экспериментального анализа отражения ультразвуковой акустической волны для различных слоистых металлических образцов, изготовленных методом сварки взрывом. Одновременно построена математическая модель распространения ультразвуковой волны в слоистых металлических структурах. Полученные результаты показывают эффективность данного подхода при диагностике слоистых систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобренко, В. М. Ультразвуковой метод измерения напряжений в деталях резьбовых соединений / В. М. Бобренко // Дефектоскопия. – 1974. – № 1. – С. 72–81.
2. Бреховских, Л. М. Акустика слоистых сред / Л. М. Бреховских, О. А. Годин. – М. : Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 416 с.
3. Слюсарев, М. В. Анализ дефектов граничной зоны в двухслойной металлической структуре

/ М. В. Слюсарев // Вестник Волгоградского государственного университета. – 2007. – С. 78.

4. Хоружий, Д. Н. Применение метода характеристических матриц при расчете оптических свойств диэлектрика с учетом температурных эффектов / Д. Н. Хоружий, В. В. Яцышен // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2005. – Т. 8, № 2. – С. 22–25.

5. Яцышен, В. В. Акустическая диагностика напряженно-деформированного состояния металлических стержней с использованием коаксиальных волн / В. В. Яцышен, М. В. Слюсарев // VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Физика и технические приложения волновых процессов» : тез. докл. – Санкт-Петербург, 2009. – С. 57.

6. Яцышен, В. В. Рассеяние ультразвукового поля на дефектах сферической формы в металлических структурах / В. В. Яцышен, М. В. Слюсарев // VI Междунар. науч.-техн. конф. «Физика и технические приложения волновых процессов» : тез. докл. – Казань, 2007. – С. 53–54.

7. Яцышен, В. В. Ультразвуковая диагностика дефектов зоны сплавления в слоистых композиционных материалах / В. В. Яцышен, М. В. Слюсарев // Физика и технические приложения волновых процессов. – 2011. – № 4 (14). – С. 103–105.

CREATING THE ULTRASONIC MEASURING SYSTEM FOR THE DEFECT DIAGNOSTIC IN THE ALLOYING ZONE OF LAYERED METAL SAMPLES

V.V. Yatsyshen, M.V. Sluysarev

The ultrasonic measuring system for the layered metal samples diagnostic has been created. Layers steel+steel and copper+steel have been investigated. The method of welding by the explosion was used in preparation of the layered structures. If a defect is present the total reflection is observed for all frequencies used. Consequently, the energy transmission coefficient is equal zero. The efficiency of the developed method for a layered system with bimetal layers is thereby demonstrated.

Key words: *ultrasonic measurement system, diagnostics of layered metallic samples, analysis of reflection spectra, effect of total internal reflection, characteristic matrix of layer, defect in metal.*