

Оценка геометрических и акустических параметров тонкостенных объектов с использованием волн Лэмба

Д. В. Перов,* А. Б. Ринкевич, О. В. Немытова
Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН
Россия, 620990, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д. 18
(Статья поступила 29.06.2017; Подписана в печать 12.09.2017)

В работе предложен алгоритм локализации дефектов в тонкостенных объектах на основе анализа дисперсионных характеристик волн Лэмба. Показано, что использование методики определения мгновенной частоты сигнала с использованием вейвлетного преобразования позволяет восстановить протяженные участки зависимостей времени групповой задержки от частоты для различных мод волн Лэмба. Дополнительным преимуществом предлагаемого метода является его высокая помехоустойчивость.

PACS: 43.35.Уь, 43.60.Нj

УДК: 620.179.16

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, тонкостенные объекты, пластины, волны Лэмба, дисперсионные характеристики, мгновенная частота, вейвлетное преобразование, эхо-сигнал.

ВВЕДЕНИЕ

Реализация ультразвукового контроля тонкостенных объектов типа пластин или труб большого диаметра, которые являются акустическими волноводами, поскольку их толщина сравнима с длиной акустической волны, проводится с использованием собственных волн этих волноводов. Один из классов таких волн образуют волны Лэмба [1], которые наиболее часто используются на практике, поскольку их проще всего возбудить с использованием пьезоэлектрических преобразователей. Локализация дефектов с использованием этих волн имеет специфику, вызванную возможным присутствием в образце нескольких мод и их дисперсией. Для определения местоположения дефекта необходимо, во-первых, определить каким модам соответствуют наблюдаемые импульсы и, во-вторых, по групповой скорости этих мод рассчитать местоположение дефекта. Импульсы сигналов от разных мод могут накладываться друг на друга, существенно затрудняя локализацию отражателя. Поэтому возникает необходимость выполнения процедуры декомпозиции мод.

В ходе выполнения данной работы предполагалось решить следующие задачи:

1. на основе использования непрерывного вейвлетного преобразования создать математический алгоритм, который позволяет восстанавливать фрагменты дисперсионных характеристик различных мод по принятому сигналу и обеспечивает максимальное подавление шумов;
2. выполнить экспериментальные исследования с целью получить несколько серий эхо-сигналов от различных отражателей, соответствующих различным модам волн Лэмба;

3. с использованием предложенного алгоритма выполнить исследование полученных эхо-сигналов, произвести идентификацию мод и выполнить локализацию отражателей, то есть определить расстояния между преобразователями и отражателями, а также оценить соответствующие погрешности.

1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Ультразвуковые измерения

Ультразвуковые исследования выполнены с применением системы PCUS-10. Она представляет собой электронное устройство, предназначенное для формирования лабораторного исследовательского комплекса для акустических измерений. Плата PCUS-10/11 была разработана для автоматизированного ручного ультразвукового детектирования. Эта плата может быть использована с портативным или стационарным компьютером. Технические возможности PCUS 10/11 сопоставимы с возможностями современных цифровых детекторов для ультразвукового контроля. Диапазон частот от 0.5 МГц до 20.0 МГц. Коэффициент усиления изменяется от 20 до 90 дБ с шагом 0.1 дБ. Встроенная система временной регулировки чувствительности с настройкой по 256 точкам имеет диапазон 40 дБ. Один широкополосный фильтр и три узкополосного фильтра позволяет настраивать генератор импульсов на точную частоту поиска. Генератор зондирующих импульсов с двумя значениями амплитуды обеспечивает время нарастания импульса менее 20 нс. В системе предусмотрена возможность усреднения изображения развёртки по 2, 4, 8, 16, 32 периодам. Ультразвуковая система работает в сочетании с PcusWare IZFP — программным обеспечением, работающим под управлением OS Windows.

Для возбуждения и приема сигналов, соответствующих определенным модам волн Лэмба на разных

*E-mail: peroff@imp.uran.ru

частотах в пластинах различной толщины необходимо реализовать определенные значения угла ввода для наклонных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) [2, 3].

1.2. Применение вейвлетного преобразования

Локализация дефектов в пластине посредством волн Лэмба осуществляется с помощью восстановления зависимости времени групповой задержки волн от частоты и осуществляется подбором расстояния до отражателя. В данной работе для восстановления зависимости времени групповой задержки от частоты и локализации дефектов в пластинах используются теория вейвлетного анализа и методы оптимизации. Рассмотрим основные определения, которые потребуются в дальнейшем.

Вейвлет-спектр функции $u(t)$, удовлетворяющей условию конечности энергии сигнала, определяется соотношением [4, 5]

$$W(s, \theta) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) \psi^* \left(\frac{t - \theta}{s} \right) dt, \quad (1)$$

где $\psi_{s\theta}(t)$ — семейство вейвлетов или базисных функций вейвлетного преобразования, причем норма функции $\|\psi(t)\| = 1$, s — масштабный коэффициент, θ — параметр сдвига. Масштабный коэффициент задает ширину базисной функции $\psi(t)$ на временной оси, а параметр сдвига задает время, на которое базисная функция сдвинута на временной оси от начала координат.

Для восстановления зависимости времени групповой задержки от частоты воспользуемся методом определения мгновенной частоты сигнала с использованием вейвлетного преобразования. Распространяющиеся в тонкостенных объектах импульсы волн Лэмба имеют различные нестационарные характеристики: их доминирующая частота изменяется во времени, то есть значение мгновенной частоты может быть различным на фронте, на срезе и в середине импульса, а огибающая может иметь сложную форму.

Алгоритм нахождения мгновенной частоты с использованием вейвлетного преобразования способен воспроизвести сложный закон частотной модуляции в пределах длительности импульса [6]. Выражение для мгновенной частоты сигнала $u(t)$ будет иметь вид

$$\tilde{f}(t) = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Im} \left[\frac{1}{\dot{W}_z(s, \theta)} \cdot \frac{d\dot{W}_z(s, \theta)}{d\theta} \right] \Bigg|_{s=s^*(\theta); \theta=t}, \quad (2)$$

где $s^*(\theta)$ — значение масштабного коэффициента s ,

соответствующее условию

$$\left| \dot{W}_z(s^*, \theta) \right| = \max_{s=s^*(\theta)} \left\{ \left| \dot{W}_z(s, \theta) \right| \right\}.$$

Вейвлетный спектр $\dot{W}_z(s, \theta)$ соответствует комплексному аналитическому сигналу [7] $\dot{z}(t) = u(t) + iv(t)$, где $v(t) = \frac{1}{\pi} \cdot \text{v.p.} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u(\tau)}{t - \tau} d\tau$ — сопряженный сигнал, который является преобразованием Гильберта исходного сигнала $u(t)$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве образца была использована стальная пластина толщиной $b = 0.5$ мм. Основные акустические параметры: скорость продольных волн $c_l = 5929$ м/с; скорость поперечных волн $c_t = 3308$ м/с; коэффициент Пуассона $\sigma = 0.274$. В пластине просверлено отверстие диаметром $D = 2$ мм. Расположение ультразвукового преобразователя на пластине с отверстием показано на рис. 1, а. В качестве совмещенного излучающего и приемного преобразователя используется ПЭП с номинальной частотой преобразователя $f_0 = 2.5$ МГц и углом ввода $\alpha = 50^\circ$. Удвоенная задержка в призме ПЭП $2\tau_p = 18.06$ мкс, удвоенная стрела ПЭП $2L = 18$ мм.

Рассмотрим отражение от торца пластины и отверстия. Расстояние между торцом пластины и центром отверстия $d = 20$ мм. Расстояние между торцом преобразователя и торцом полосы $H = 60$ мм. Расстояние между торцом преобразователя и ближней точкой отверстия $H_d = H - d - D/2$ мм. Следовательно, пройденные волной расстояния: при отражении от отверстия $h_d = 2H_d + 2L = 2H - 2d - D + 2L = 96$ мм, от торца пластины $h = 2H + 2L = 138$ мм. А-скан с принятыми ультразвуковыми импульсами показан на рис. 1, б. Истинное время задержки эхо-сигнала: $t = \tau - 2\tau_p$, где τ — время задержки по принятому А-скану.

Данная серия моделирует ситуацию контроля пластины волнами Лэмба. На рис. 1, б мы видим два отраженных импульса: от отверстия, что моделирует выявление дефекта, и от торца, что моделирует контроль размеров образца. Вейвлетный спектр и восстановленные участки дисперсионных характеристик показаны на рис. 1, из которого видно, что в образце возбуждена мода S_0 , и контроль проводится с использованием этой моды как для отражения от отверстия, так и для отражения от торца. Протяженность восстановленных участков дисперсионных характеристик определяется шириной спектра сигнала, возбуждаемого в образце.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной работы было построение алгоритма локализации дефектов в тонкостенных объектах на ос-

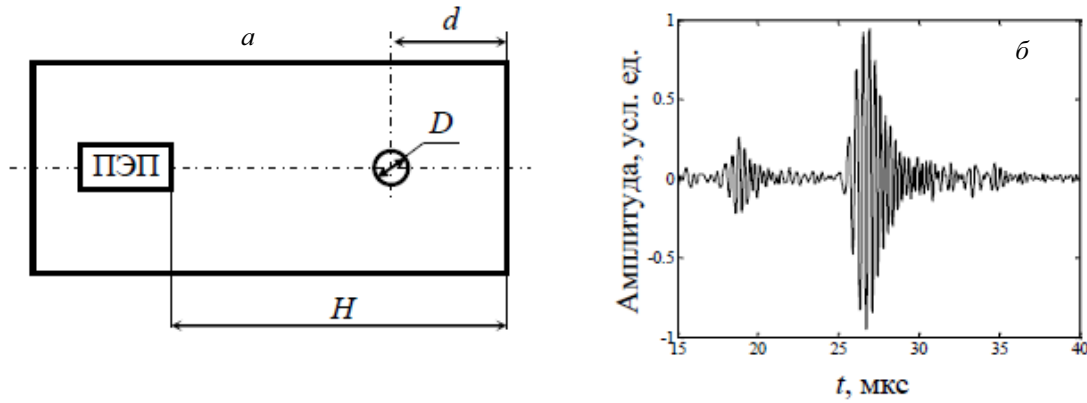


Рис. 1: Исследование распространения волн Лэмба в стальном образце: a — расположение ультразвукового преобразователя на пластине с отверстием; b — сигнал на выходе приемного преобразователя

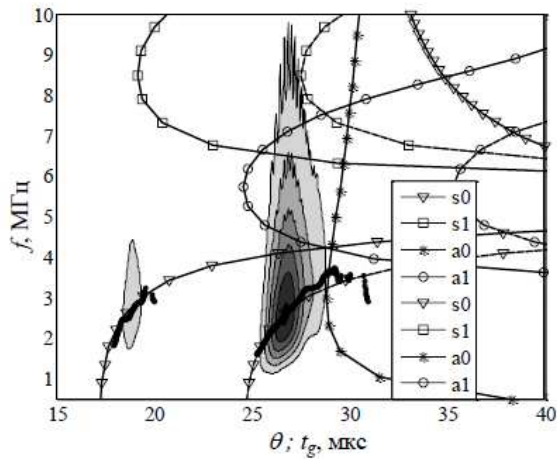


Рис. 2: Вейвлетный спектр сигнала при отражении от отверстия в стальной пластине и от ее торца. Сплошные линии соответствуют отражению от отверстия: $h_d = 96$ мм, пунктирные — отражению от торца полосы: $h = 138$ мм

нове анализа дисперсионных характеристик волн Лэмба. Показано, что использование методики определения мгновенной частоты сигнала с использованием

вейвлетного преобразования позволяет восстановить протяженные участки зависимостей времени групповой задержки от частоты для различных мод волн Лэмба. Дополнительным преимуществом предлагаемого метода является его высокая помехоустойчивость.

Показано, что для минимизации экспериментальной погрешности необходимо оптимальным образом выбрать рабочую моду волн Лэмба и диапазон частот для анализа, а именно: для минимизации погрешности определения расстояния следует выбирать участок дисперсионной характеристики, где групповое время задержки велико по номинальному значению и его изменение по частоте максимально.

Основным преимуществом метода, основанного на количественном анализе законов дисперсии волн Лэмба, является то, что он позволяет локализовать дефект в пластине по результатам одного измерения, используя при этом стандартный импульсный ультразвуковой дефектоскоп.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Спин» № 01201463330) при частичной поддержке проекта УрО РАН № 15-17-2-54 и гранта РФФИ № 16-32-00219 мол_а.

[1] Клюев В.В. Неразрушающий контроль: справочник. 2. М., 2004.
 [2] Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М., 1966.
 [3] Егоров Н.Н., Тоом К.Э. Контроль. Диагностика. 2004. № 6. С. 56.
 [4] Перов Д.В., Ринкевич А.Б. Дефектоскопия. 2001. № 12. С. 55.

[5] Перов Д.В., Ринкевич А.Б., Смородинский Я.Г., Келлер Б. Дефектоскопия. 2001. № 12. С. 67.
 [6] Немытова О.В., Ринкевич А.Б., Перов Д.В. Дефектоскопия. 2012. № 11. С. 46.
 [7] Вайнштейн Л.А., Вакман Д.Е. Разделение частот в теории колебаний и волн. М., 1983.

Estimation of geometrical and acoustical parameters of thin-walled objects using the Lamb waves

D. V. Perov^a, A. B. Rinkevich, O. V. Nemytova

¹*M. N. Miheev Institute of Metal Physics. Ekaterinburg 620990 Russia
E-mail: ^aperoff@imp.uran.ru*

The algorithm of flaw localization in thin-walled objects, based on the analysis of the dispersive characteristics of Lamb waves, is proposed in this work. It is shown that application of the instantaneous frequency estimation method with the use of wavelet transform makes it possible to reconstruct extensive parts of frequency dependencies of group delay time for different modes of Lamb waves. An additional advantage of proposed method is high noise immunity.

PACS: 43.35.Yb, 43.60.Hj.

Keywords: ultrasonic nondestructive testing, thin-walled objects, plates, Lamb waves, dispersive characteristics, instantaneous frequency, wavelet transform, echo signal.

Received 29 June 2017.

Сведения об авторах

1. Перов Дмитрий Владимирович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (343) 378-36-97; e-mail: peroff@imp.uran.ru.
2. Ринкевич Анатолий Брониславович — доктор физ.-мат. наук, член-корр. РАН, зам. директора института; тел.: (343) 378-38-95; e-mail: rin@imp.uran.ru.
3. Немытова Ольга Владимировна — канд, техн. наук, науч. сотрудник; тел.: (343) 378-36-97; e-mail: mif-83@mail.ru.