

Ультразвуковая автоматизированная установка для диагностики упругих свойств твердых тел

А.И. Кокшайский,* А.И. Коробов,† Н.И. Одина‡

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 13.11.2014; Подписана в печать 03.12.2014)

В работе приведены результаты бесконтактной диагностики материалов с низким акустическим импедансом и твердотельных пластин методом воздушного ультразвука. Для генерации и приема акустических волн в воздухе в диапазоне частот от 0,08 до 2 МГц была разработана автоматизированная ультразвуковая установка и методика измерений в импульсном режиме. Генерация и прием воздушного ультразвука осуществлялись фокусированными акустическими преобразователями. Определение упругих свойств тонких твердотельных пластин в работе проводилось с помощью нулевой антисимметричной моды волны Лэмба. Для диагностики материалов с малым акустическим импедансом использовались продольные акустические волны. В работе были измерены плотность пенополистирола и скорость продольных волн в нём, рассчитаны импеданс и коэффициент упругости этого материала. Проводится обсуждение экспериментальных результатов.

PACS: 46.80

УДК: 534-16

Ключевые слова: ультразвуковая диагностика, упругие волны Лэмба, низкоимпедансные материалы.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы для диагностики упругих свойств широкого ряда материалов и изделий используется так называемый воздушный ультразвук [1, 2]. В этом случае иммерсионной средой является воздух, а излучение и прием акустических волн производятся специально согласованными с воздушной средой преобразователями. Являясь бесконтактным, этот метод имеет и ряд других достоинств. В частности, он позволяет производить измерения упругих свойств низкоимпедансных материалов. Другим преимуществом воздушного ультразвука является возможность дефектоскопии материалов, разрушающихся (или изменяющих свои свойства) при контакте с водой и иными жидкостями, например, вспененных материалов, дерева, бумаги и их производных, пищевых продуктов и т. д.

Метод воздушного ультразвука позволяет производить исследования с помощью как продольных акустических волн, так и волн Лэмба (рис. 1). Первый вариант реализуется при нормальном падении, а второй — при падении под специально подобранным углом θ , определяемым условием синхронизма [3]:

$$\sin \theta = \frac{c_a}{c_L}, \quad (1)$$

где c_a — скорость звука в воздухе, c_L — скорость изгибной волны Лэмба в исследуемом материале (как следует из (1), должно выполняться условие $c_a < c_L$).

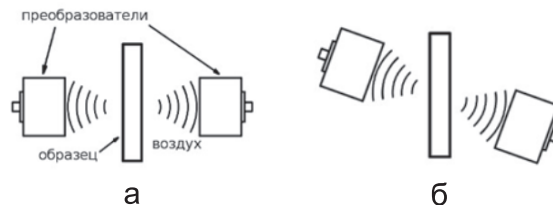


Рис. 1: Режим «на прохождение»: а) при нормальном падении; б) при падении под углом θ

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения экспериментальных исследований была разработана ультразвуковая измерительная установка, блок-схема которой показана на рис. 2. Установка была создана на базе импульсного приемопередатчика RPR-4000 фирмы RITEC (1). Он состоит из мощного генератора зондирующих радиоимпульсов (до 8 кВт в импульсе) в диапазоне от 0,05 до 20 МГц и широкополосного малозумящего усилителя с изменяемым коэффициентом усиления (от 20 до 100 дБ) со встроенными фильтрами низких и высоких частот. Для автоматизации эксперимента RPR-4000 посредством стандартного интерфейса RS-232 был соединен с персональным компьютером (ПК) (2). В слот ПК был вставлен отечественный двухканальный десятиразрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) LA-n20-PCI с частотой дискретизации 40 МГц. На входы АЦП с RPR-4000 поступали зондирующий и прошедший через образец импульсы, форма которых могла контролироваться с помощью цифрового осциллографа DSO 9104A фирмы Agilent Technologies (3). Для управления работой экспериментальной установки в среде LabWindows/CVI (C for Virtual Instrumentation) был разработан пакет про-

*E-mail: super_trouper@mail.ru

†E-mail: akor@acs465a.phys.msu.ru

‡E-mail: niolina@mail.ru

грамм с графическим интерфейсом. С помощью разработанного программного обеспечения квадратурным методом производилось определение амплитуды и фазы исследуемого сигнала.

Для излучения и приема ультразвуковых волн в воздухе использовались фокусированные широкополосные ультразвуковые преобразователи фирмы Ultrat Group (диаметр $\varnothing 25$ мм, фокусное расстояние 76 мм, резонансная частота 200 кГц) (4). Преобразователи были соосно закреплены в подвижных кронштейнах, что позволяло оптимально подбирать расстояния между ними при измерениях. На оси между преобразователями было расположено устройство (5) для крепления образца (6). Устройство (5) было соединено с шаговым двигателем (7), управляемым с помощью специального модуля (8). Это позволяло либо вращать образец вокруг вертикальной оси с шагом 0,167 градуса, либо производить его линейное перемещение с шагом 0,1 мм.

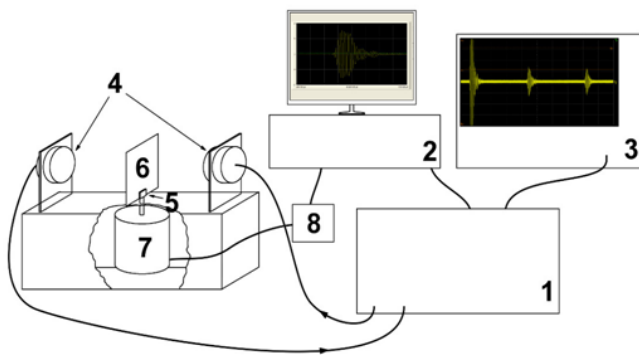


Рис. 2: Блок-схема экспериментальной установки: 1 — RPR-4000, 2 — ПК, 3 — осциллограф DSO 9104A, 4 — преобразователи, 5 — устройство для крепления образца, 6 — образец, 7 — шаговый двигатель, 8 — модуль управления шаговым двигателем

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Диагностика функционирования экспериментальной установки была проведена в режиме измерения скорости волн Лэмба в тонких образцах из текстолита и гетинакса. Использовался импульсный режим на «прохождение». Для этих материалов была измерена зависимость амплитуды прошедшей через образец продольной упругой волны от угла сканирования. Результаты измерений для текстолита приведены на рис. 3.

Максимальное значение амплитуды прошедшей через образец упругой волны наблюдается при угле ϑ , удовлетворяющем условию синхронизма (1). Результаты измерений приведены в табл. 1.

По измеренным углам синхронизма для этих материалов была рассчитана скорость нулевой антисимметричной моды волны Лэмба $c_L = c_a / \sin \vartheta$. Воспользовавшись известной формулой для скорости нулевой из-

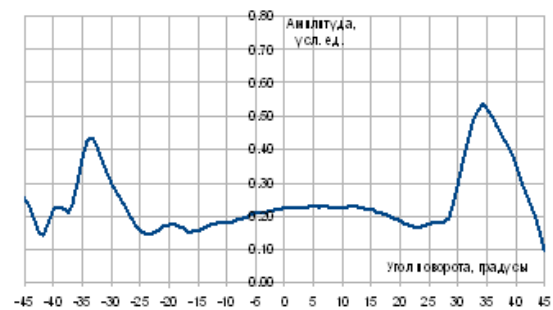


Рис. 3: Зависимость амплитуды прошедшей волны от угла сканирования ϑ в текстолите

гибной моды волны Лэмба [3], мы рассчитали модуль Юнга для исследованных образцов:

$$c_L = \sqrt[4]{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \sqrt{\omega d},$$

где ν — коэффициент Пуассона, ρ — плотность, d — толщина образца. Коэффициент Пуассона ν был положен равным 0,3.

Измеренные и табличные значения модуля Юнга находятся в хорошем соответствии (см. табл. 1) с их табличными значениями [4].

Для исследования в качестве низкоимпедансного материала был выбран пенополистирол. Из него было изготовлено несколько образцов в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами сторон $50 \times 100 \times 250$ мм. Измерения скорости и поглощения упругих волн в этом материале проводилось импульсным методом на частоте 200 кГц в режиме «нахождение». Ультразвуковые волны распространялись вдоль стороны, равной 50 мм. Типичный вид наблюдаемой в образце серии акустических импульсов приведён на рис. 4. Время прохождения волны через образец измерялось с помощью осциллографа.

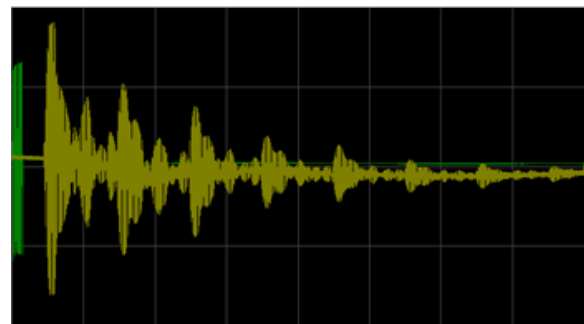


Рис. 4: Серия акустических импульсов в образце из пенополистирола

В исследуемом образце пенополистирола были получены значения скорости продольных волн

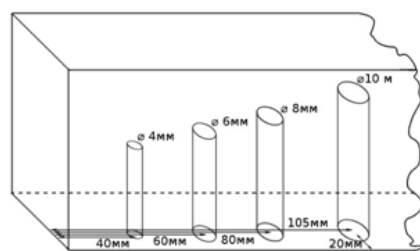
Таблица I: Результаты измерения упругих свойств текстолита и гетинакса

Материал	Текстолит	Гетинакс
Измеренный угол синхронизма, градусы	33 ± 1	$34,5 \pm 1$
Скорость изгибной моды, м/с	630 ± 20	600 ± 20
Плотность [4], кг/м ³	1300	1350
Коэффициент Пуассона	0,3	0,3
Модуль Юнга, определенный в работе, ГПа	$6,1 \pm 0,5$	$11,3 \pm 0,7$
Модуль Юнга по данным [4–5], ГПа	$5,9 \div 10$	$9,8 \div 17,1$

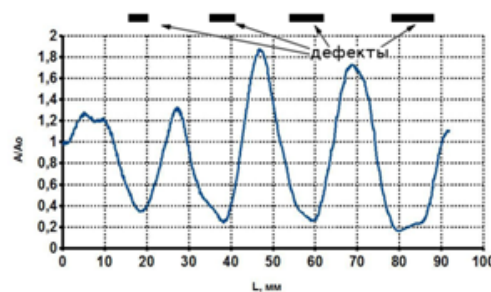
$c_{\text{пр}} = 970 \pm 20$ м/с и коэффициента поглощения $\alpha = 4,52 \text{ м}^{-1}$. Дополнительно измеренная плотность $\rho = 28,3 \text{ кг/м}^3$ позволила рассчитать для пенополистирола акустический импеданс $\rho \cdot c_{\text{пр}} = 27,4 \text{ кПа} \cdot \text{с/м}$, а также коэффициент продольной упругости $\rho \cdot c_{\text{пр}}^2 = 26,6 \text{ МПа}$.

Далее в образцах пенополистирола нами была проведена ультразвуковая диагностика ряда искусственно созданных подповерхностных дефектов. Измерения производились в режиме «на прохождение» при нормальном падении упругой волны на образец. В первом случае образцы представляли собой прямоугольные параллелепипеды размерами $50 \times 100 \times 250$ мм, в которых были просверлены подповерхностные отверстия различного диаметра и различной глубины залегания.

Один из исследуемых образцов (№1) и результаты его сканирования (поперек дефектов) представлены на рис. 5. Как видно на рис. 5, амплитуда акустической волны при прохождении образца в области дефекта значительно уменьшается. На рабочей частоте 200 кГц длина волны в исследуемом материале составляла $4,8 \pm 0,1$ мм. Видно, что все 4 отверстия диаметрами (слева направо) — 4, 6, 8, 10 мм надежно диагностируются (координаты минимумов соответствуют координатам дефектов). При этом ширина минимумов на половине глубины возрастает с ростом диаметра отверстия: слева направо по мере увеличения диаметра отверстия — 10, 12, 13, 15 мм, и примерно соответствует ожидаемому.



а



б

Рис. 5: а) Схема расположения дефектов в образце №1 из пенополистирола. б) График зависимости амплитуды сигнала, прошедшего через образец, от координаты

Для второго образца диаметр просверленных отверстий был выбран меньшим длины волны и одинаковым (2 мм), а глубина залегания различной (10 и 20 мм соответственно). Схема расположения дефектов и зависимость амплитуды прошедшего импульса от координаты сканирования для второго образца (№2) показаны на рис. 6. Видно, что и в этом случае оба отверстия диагностируются, хотя поперечные размеры дефектов меньше длины упругой волны в исследуемом материале.

Второй тип дефектов представлял собой щель с раз-

личным заполнением и имитировал различные виды расслоения. Было исследовано три вида щелей. Сначала диагностировался обычный надрез с расстоянием между границами менее 0,2 мм. Далее в надрез была помещена бумага с плотным прилеганием к границам щели. И в последнем случае в щель был залит клей. Все три графика получились похожими с небольшими отличиями, график для обычного разреза представлен на рис. 7. Во всех случаях амплитуда акустического сигнала в области дефекта (20–65 мм) сильно уменьшалась, и дефект хорошо диагностировался.

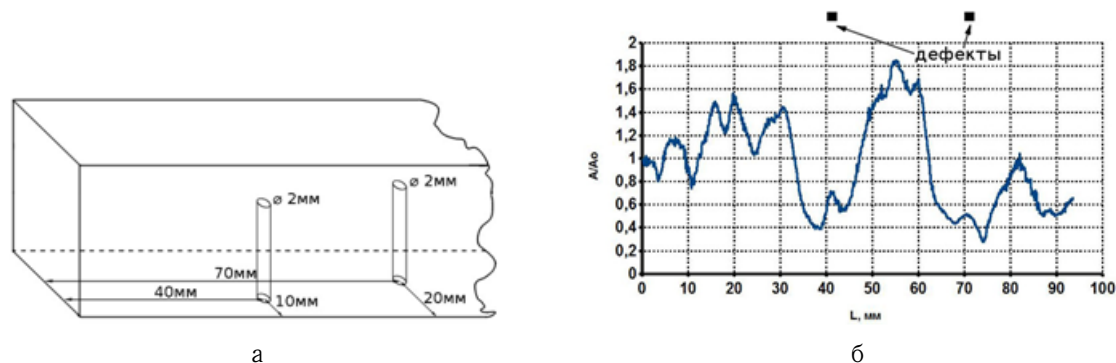


Рис. 6: а) Схема расположения дефектов в образце №2 из пенополистирола. б) График зависимости амплитуды сигнала, прошедшего через образец, от координаты

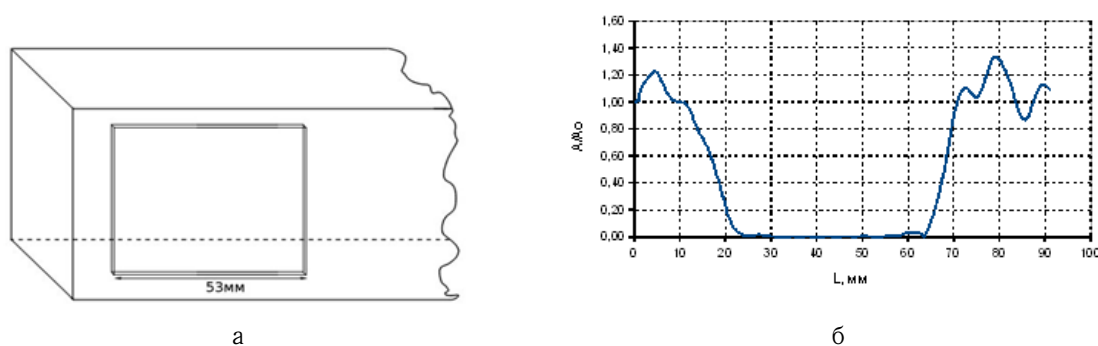


Рис. 7: График зависимости амплитуды сигнала, прошедшего через образец со щелью, от координаты

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные измерения показали, что разработанная экспериментальная автоматизированная установка позволяет производить диагностику как низкоимпедансных, так и высокоимпедансных твердотельных материалов.

Работа была выполнена в Центре коллективного пользования физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова по нелинейной акустической диагностике и неразрушающему контролю при поддержке гранта Президента Российской Федерации № 283.2014.2, гранта правительства Российской Федерации № 11.G34.31.0066 и грантов РФФИ.

- [1] Rogovsky A.I. Material evaluation. **50**. P. 1491. (1991).
 [2] Коробов А.И., Одина Н.И., Семенов Д.Н. Бесконтактное возбуждение и прием волн Лэмба в тонких пластинах. Труды XV сессии Российского акустического общества. **1**. С. 83. (2004).
 [3] Викторов И.А. Физические основы применения ультра-

звуковых волн. (М.: Наука, 1966). 168 с.

- [4] Физические величины. Справочник (под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. и др.). (М.: Энергоатомиздат, 1991). 1232 с.

Ultrasound automated system for diagnosis of the elastic properties of solids

A.I. Kokshayskiy^a, A.I. Korobov^b, N.I. Odina^c

Department of acoustics, Faculty of Physics, PlaceNameplace M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
 E-mail: ^asuper_trouper@mail.ru, ^bakor@acs465a.phys.msu.ru, ^cniodina@mail.ru

This paper presents the results of a non-contact diagnostics of materials with low acoustic impedance and solid plates with air ultrasound. For generating and receiving acoustic waves in the air in the frequency range from 0.08 to 2 MHz ultrasound was developed automated measuring system and measurement technique in pulse mode. Generating and receiving ultrasound air carried with focused acoustic transducer. Determination of elastic properties of thin plates of solid work was carried out using a zero anti-symmetric Lamb wave modes. For diagnostic materials with low acoustic impedance used longitudinal acoustic wave. Was measured density expanded polystyrene and the velocity of longitudinal waves in it, calculated impedance and coefficient of elasticity of the material.

PACS: 46.80

Keywords: ultrasonic diagnostics, Lamb wave.

Received 13.11.2014.

Сведения об авторах

1. Кокшайский Алексей Иванович — физик 2-ой категории; тел.: (495) 939-18-21, e-mail: super_trouper@mail.ru.
2. Коробов Александр Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры акустики; тел.: (495) 939-18-21, e-mail: akor@acs465a.phys.msu.ru.
3. Одина Наталья Ивановна — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (495) 939-18-21, e-mail: niolina@mail.ru.