

ную поляризацию возбуждаемой сдвиговой волны. Уровень сигнала ортогонально поляризованной сдвиговой компоненты не превышал -30 дБ, а продольной компоненты -60 дБ от уровня основного сигнала. Динамический диапазон описанного устройства ограничивался электрическими шумами системы и составлял в нашем случае $55-60$ дБ.

Большой динамический диапазон, широкая полоса частот (в нашем случае вплоть до 15 МГц) и линейная поляризация излучения термооптического генератора сдвиговых волн дает возможность эффективно использовать его в задачах дефектоскопии и широкополосной акустической спектроскопии на сдвиговых волнах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Felix M.P. Laser-generated ultrasonic beams // Rev. Sci. Instr. 1974. V. 45. № 9. P. 1106.
2. Карабутов А.А., Руденко О.В., Черепецкая Е.Б. К теории термооптической генерации нестационарных акустических полей // Акуст. журн. 1979. Т. 25. № 3, С. 383-394.
3. Hutchins D.A., Dewhurst R.J., Palmer S.B. Laser generation as a standard acoustic source in metals // Appl. Phys. Lett. 1981. V. 38. № 9. P. 677-679.
4. Карабутов А.А., Омельчук Н.Н., Руденко О.В., Чупрына В.А. Количественное исследование нелинейной трансформации звуковых импульсов в жидкости при термооптическом возбуждении // Вестн. МГУ. Сер. 3. 1985. Т. 26. № 3. С. 62-66.
5. Овчинников О.Б., Пашин А.Е., Пученков О.В., Расторгуев Д.Л. К вопросу о регистрации пространственно-временных характеристик коротких акустических импульсов, возбуждаемых оптическим излучением // Акуст. журн. 1987. Т. 33. № 2. С. 312-316.
6. Vary A. Ultrasonic measurement of material properties / Ed. Sharpe R.S. // Research techniques in nondestructive testing. 1980. V. 4. P. 160-204.
7. Карабутов А.А., Матросов М.П., Подымова Н.Б., Пыж В.А. Импульсная акустическая спектроскопия с лазерным источником звука // Акуст. журн. 1991. Т. 37. № 2. С. 311-323.
8. Карабутов А.А., Матросов М.П., Подымова Н.Б., Пыж В.А. Широкополосная ультразвуковая спектроскопия коллоидных сред на основе термооптического генератора звука // Вестн. МГУ. Сер. 3. 1990. Т. 31. № 4. С. 60-65.
9. Трузл Р., Эльбаун Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 288 с.
10. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 306 с.
11. Scruby C.V. Some applications of laser ultrasound // Ultrasonics 1989. V. 27. № 4. P. 195-209.

Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в редакцию
17.06.92

УДК 534.6

© 1993 г. И.И. Крюков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА В ТВЕРДЫХ ПЕНАХ РАЗНОЙ ПЛОТНОСТИ

В [1-3] рассматриваются вопросы, связанные с распространением звука в газожидкостных пенах разной плотности (кратности), структура которых состоит из газовых ячеек, разделенных пленками жидкости [4]. Твердые пены представляют собой структуру, состоящую из газовых ячеек, разделенных пленками твердого полимера. Этот жесткий полимерный каркас, разделяющий газовые ячейки, является основой пенопластов [4, 5]. Параметры ячеистой структуры (размер ячеек, толщина их стенок) во многом зависят от состава исходной композиции и режима пенообразования и оказывают большое влияние на распространение акустических импульсов в объеме пенополимера.

Экспериментально исследовались пеноблоки (толщина $5,6$ см, ширина 25 см и длина 600 см) из жестких пенополиуретанов марки ППУ-3Ф, получаемых методом заливки и предназначенных для изготовления теплоизоляционно-силового слоя трехслойных конструкций [6, 7]. Плотность пенополиуретанов (ППУ), называемая также относительной [5] или кажущейся [6], изменялась в диапазоне $60-260$ кг/м³. Средний размер ячеек в зависимости от плотности меняется от $2,5$ до $0,1$ мм, а толщина стенок от 5 до 120 мкм [5].

Измерения скорости распространения ультразвука проводились в направлении вспенивания вдоль толщины пеноблока с помощью ультразвуковой механизированной установки, использующей 11 пар катящихся цилиндрических пьезопреобразователей (рабочая частота $40-60$ кГц) с эластичными полиуретановыми протекторами толщиной 4 мм для создания надежного акустического контакта [6, 7]. Пьезопреобразователи располагались попарно по обе стороны пеноблока таким образом,

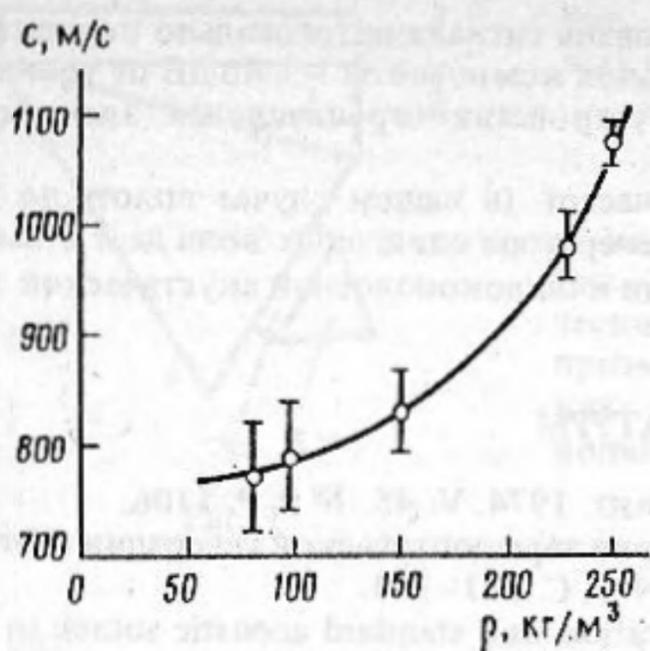


Рис. 1

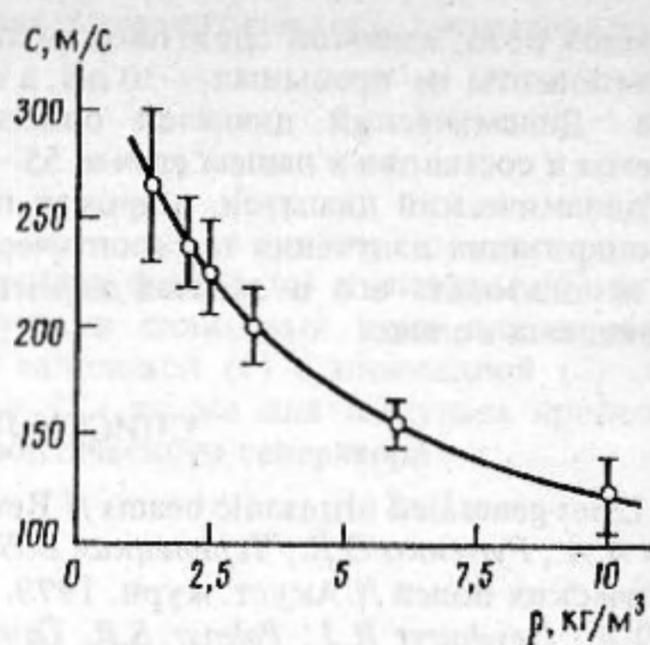


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость скорости ультразвука в твердой пене от плотности

Рис. 2. Зависимость скорости звука в жидкостной пене от плотности [3]

чтобы контролировалась вся его площадь. Скорость ультразвука определялась временем прихода переднего фронта импульсов при распространении по материалу ППУ от излучателя к приемнику. Из разных участков исследованных пеноблоков вырезались образцы цилиндрической формы диаметром 3 см, для которых путем взвешивания и обмера геометрии определялась плотность ППУ и оценивалась степень отличия ее от средней интегральной плотности материала пеноблока. Дополнительно на вырезанных образцах контролировалась и сравнивалась с механизированными измерениями скорость ультразвука с помощью стандартных у.з. пьезопреобразователей (рабочая частота 60 кГц) на у.з. приборе УК-10 ПМС.

Результаты измерения скорости ультразвука в твердых пенах типа ППУ-3Ф в зависимости от плотности приведены на рис. 1. ППУ-3Ф является структурно-неоднородным материалом. Для пеноблоков из них характерно, например, изменение плотности по толщине в направлении вспенивания, наличие на поверхностях твердых корочек повышенной плотности, разброс средних размеров ячеек и их ориентации и др. [5, 6]. С уменьшением плотности характер вспенивания усложняется. Было установлено, что разброс плотности по площади пеноблоков, как правило, не превышает $\pm 2-3\%$ от среднего. Большой разброс свойственен более легким пенополиуретанам. Скорость ультразвука очень чувствительна ко всем неоднородностям каркасной структуры ППУ-блоков. Чем меньше плотность и соответственно больше средний размер ячеек в пенопластах, тем более они неоднородны, и тем больше разброс значений скорости ультразвука на считающихся бездефектными участках ППУ (без больших протяженных несплошностей). Для примерно 90% всех измерений среднеквадратичное отклонение скорости ультразвука от среднего значения составляет $\pm 2,5\%$ в пеноблоках большей плотности и $\pm 5\%$ — меньшей плотности. (Следует отметить, что для почти 5-10% измерений на ППУ-блоках плотностью 60-100 кг/м³ это отклонение значительно больше и может достигать $\pm 20-25\%$.)

На рис. 2 для сравнения приведена зависимость скорости звука от плотности газожидкостной пены, построенная на основании результатов [3]. Несмотря на различие в частотном диапазоне и размерах газовых ячеек, отношение размера ячеек к длине волны у них одного порядка ($D/\lambda \approx 0,01$), соответствующее области релеевского рассеяния. Как следует из рис. 1 и 2, характер изменения скорости ультразвука с изменением кажущейся плотности в твердых и жидкостных пенах различен. Это говорит о разных механизмах распространения ультразвука (звука) в них. Если в газожидкостных пенах с ростом плотности скорость падает, то в твердых — возрастает.

Анализ зависимостей (рис. 1 и 2) показывает следующее. Для жидкостной пены скорость звука $c_{ж.п}$ пропорциональна $1/\sqrt{\rho}$ и соответствует известной формуле для скорости звука в жидкостях и газах [8]

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (1)$$

где модуль всестороннего сжатия K мало меняется с изменением плотности ρ .

Для твердой пены скорость распространения продольной волны определяется как

$$c = \sqrt{\frac{K + 4/3 G}{\rho}}, \quad (2)$$

где K — модуль объемного сжатия, G — модуль сдвига.

В этом случае модули K и G сами являются величинами, зависящими от изменения плотности. И поэтому, как показывает анализ зависимости, скорость ультразвука в твердой пене $c_{т.п.}$ пропорциональна $\sim \rho^3$

Несмотря на относительно большой разброс измеряемых значений скорости ультразвука c_i , возможна реализация обратной задачи — определение плотности пенополиуретана данной марки по результатам измерения скорости ультразвука. В этом случае с помощью механизированной у.з. установки с катящимися преобразователями [7] средняя плотность пеноблока или его отдельной части определяется следующим образом. Путем измерений значений скорости ультразвука c_i в N отдельных точках ППУ вычисляется среднее значение скорости для ППУ:

$$c_{\text{ср.}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i. \quad (3)$$

И затем по вычисленному значению $c_{\text{ср.}}$ определяется значение плотности ППУ в соответствии с зависимостью $\rho = f(c_{\text{ср.}})$ (рис. 1). Число измеряемых точек N выбирается большим (50–100), чтобы исключить влияние разброса измеряемых значений скорости на отдельных участках ППУ-блока. По измерению c_i в отдельной i -й точке из-за большого разброса можно получить ошибочное значение плотности, не соответствующее действительному.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Оренбах З.М., Шушков Г.А.* Экспериментальное определение скорости и коэффициента затухания акустического возмущения в газожидкостной пене // *Акуст. журн.* 1991. Т. 37. № 2. С. 403–405.
2. *Вафина Ф.И., Гольдфарб И.И., Шрейбер И.Р.* Модель распространения нелинейного звука в пене // *Акуст. журн.* 1991. Т. 37. № 2. С. 251–258.
3. *Замашников В.В., Какуткина Н.А.* Экспериментальные исследования акустических свойств пены // *Акуст. журн.* 1991. Т. 37. № 3. С. 484–489.
4. *Тихомиров В.К.* Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1983. 264 с.
5. *Горлов Ю.П.* Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий. М.: Высшая школа, 1989. 384 с.
6. *Карпетян О.О., Гнубкин В.П., Дронов Ю.В.* Контроль качества конструкций с наполнителем из пенопласта. Л.: Стройиздат, 1986. 199 с.
7. *Крюков И.И., Агузумцян В.Г., Дронов Ю.В., Карпетян О.О.* Ультразвуковая дефектоскопия пенопластов // *Дефектоскопия.* 1989. № 6. С. 79–83.
8. *Ультразвук.* Маленькая энциклопедия // Под ред. Голяминой И.П. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.

Санкт-Петербургский технологический институт им. Ленсовета

Поступило в реакцию
07.05.92

УДК 534.642:536.641

© 1993 г. В.М. Крячко, Н.П. Тихомиров

ИЗМЕРЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ИМПЕДАНСОВ НАГРУЗКИ СТЕРЖНЕВОГО ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРА

Высокочастотные пьезорезонаторы с успехом применяются в измерительной технике, в том числе при точных измерениях [1], для определения величины механических параметров среды или для контроля ее состояния. В основу измерения закладывается обычно связь между электропроводностью резонатора и действующими на него механическими нагрузками. Имеющиеся многочисленные работы по пьезоэлектрикам [2, 3], как правило, нельзя использовать для решения обратной задачи: нахождения компонент механических импедансов нагрузок по измеренной комплексной электропроводности резонатора. В них анализ ведется либо на основе эквивалентных схем, либо решаются уравнения колебаний резонатора, не учитывающие такую важную характеристику как собственные потери. Как показывает практика, учет собственных потерь в большинстве случаев необходим.

Поскольку в каждом конкретном случае связь между электропроводностью и механическими импедансами нагрузок зависит от таких факторов как форма резонатора, способ крепления его в конструкции, тип колебаний, место и способ приложения нагрузки, то представляется целесообразным получить точное решение для ряда типовых задач при условиях, легко реализуемых на практике.

В данной работе рассматривается задача о колебаниях пьезоэлектрического стержня с нагрузкой, приложенной к его торцу, либо распределенной вдоль какой-либо грани. Рассматриваются продольные колебания стержня.