

АКУСТИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

УДК 539.43+534.212

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ
В ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТАХ****А. А. Карабутов, И. М. Керштейн, И. М. Пеливанов, Н. В. Подымова***(кафедра общей физики и волновых процессов)*

Исследуется распространение акустических видеоимпульсов в однонаправленных волокнистых графито-эпоксидных композитах. Используется иммерсионная техника с термооптическим возбуждением ультразвука. Экспериментальные данные показали, что механические свойства таких сред могут быть описаны ортотропной моделью. Обнаружено, что в диапазоне частот $1 \div 15$ МГц во всех направлениях распространения ультразвука в композите частотная дисперсия фазовой скорости отсутствует.

Композиты представляют собой неоднородные, многокомпонентные и, вообще говоря, анизотропные среды. Упругие свойства композитов сложным образом зависят от механических характеристик их компонентов [1–5]. Поэтому определение полного набора упругих модулей композитных материалов является важной и актуальной задачей. Поскольку упругие модули твердых тел однозначно определяют фазовые скорости акустических волн, представляется перспективным исследование распространения ультразвуковых (УЗ) волн в таких материалах.

В анизотропных твердых телах в общем случае существуют три плоские волны, распространяющиеся в одном направлении с различными фазовыми скоростями и взаимно ортогональными поляризациями. Векторы поляризации этих волн, вообще говоря, не параллельны и не перпендикулярны направлению распространения \mathbf{k} . Лишь при распространении вдоль особых направлений, связанных с симметрией упругих свойств среды, волны являются чисто продольными или чисто поперечными (см., напр., [6, 7]).

В нашей статье рассматривается распространение акустических волн в однонаправленных (1-D) графито-эпоксидных (г/э) композитах. Такие композиты обычно представляются ортотропными анизотропными средами с осью симметрии, совпадающей с направлением волокон \mathbf{z}' (рис. 1, б). Следовательно, распространение ультразвука в 1-D г/э композитах должно сопровождаться эффектами, присущими анизотропным твердым телам (см., напр., [8]). Экспериментально такие исследования проводились неоднократно. В работах [9, 10] использовалась стандартная иммерсионная методика с пьезовозбуждением и регистрацией акустических волн. Было показано, что в композитах такой структуры при распространении акустической волны в направлении \mathbf{k} реально существуют одна квазипродольная и две квазипоперечные волны. Однако, как указано в работе [11], данная методика измерений, использующая пьезоэлектрические источники ультразвука, обладает существенными недостатками. В связи с тем, что отклонение волнового вектора акустической волны

от лучевого в 1-D г/э композитах может достигать $40\text{--}45^\circ$, данная схема измерений налагает существенные ограничения на максимальную толщину исследуемых образцов вследствие бокового сноса пучка.

Иммерсионная методика основана на измерении временной задержки между опорным УЗ-сигналом, прошедшим иммерсионную среду, и исследуемым сигналом, прошедшим образец. Поэтому необходимо, чтобы импульсы квазипродольной и квазипоперечной волн были разделены во времени, т.е. интервал между временами их прихода был больше длительности импульсов. Это обстоятельство налагает ограничения на минимальную толщину образцов. Как показано в работе [11], для образцов, имеющих форму пластин с размерами 10×10 см, допустимая толщина L может изменяться только в пределах нескольких миллиметров:

$$0,988 \text{ см} < L < 1,02 \text{ см}.$$

В работах [12–15] использовалась другая методика измерения фазовых скоростей акустических волн в 1-D г/э композитах. Акустическая волна направлялась на поверхность композита под некоторым углом, отраженная волна направлялась обратно цилиндрическим отражателем и повторно отражалась от поверхности композита. Результаты экспериментов были представлены в виде зависимостей коэффициентов отражения от угла падения акустических волн на поверхность образцов в различных сечениях композита и пересчитанных по этим данным зависимостей фазовых скоростей УЗ-волн в тех же осях и в тех же сечениях. Полученные зависимости коэффициентов отражения имели сильно изрезанную структуру, что можно было объяснить только большой ошибкой проводимых экспериментов. Кроме того, изменение углового спектра при отражении от цилиндрического отражателя делает интерпретацию измерений неоднозначной.

Таким образом, задача получения полного набора упругих констант и построения адекватной механической модели таких сред продолжает оставаться актуальной. Для решения ее необходимо более точное измерение угловых зависимостей фазовых скоростей УЗ-волн

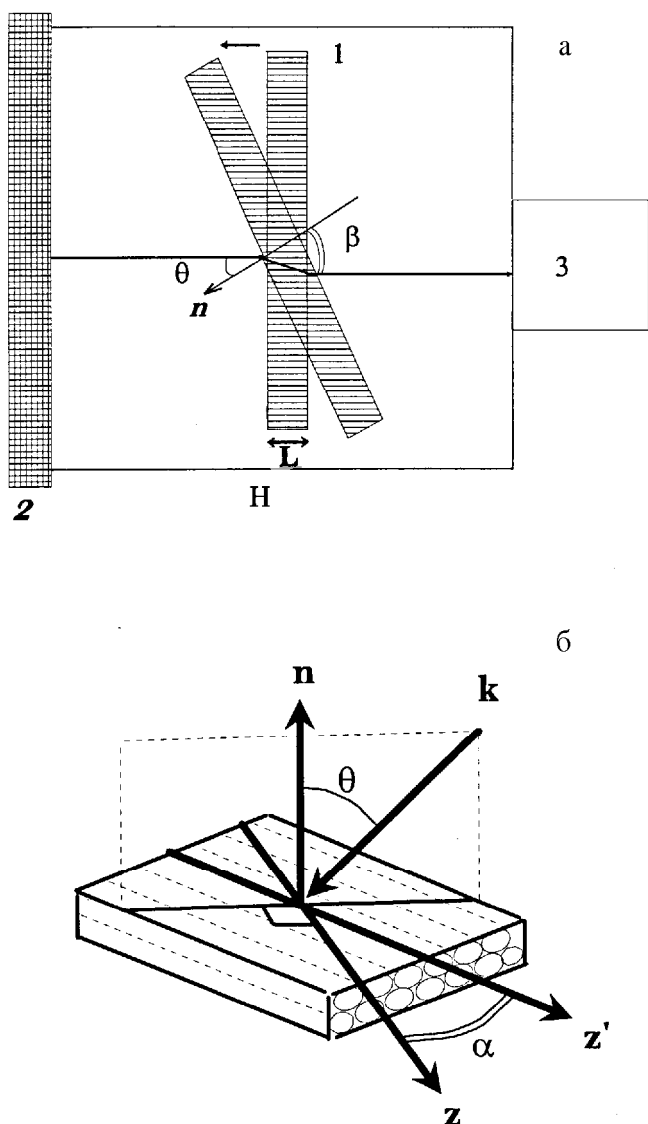


Рис. 1. Принципиальная схема эксперимента (а): 1 — образец, 2 — оптико-акустический излучатель, 3 — широкополосный пьезоприемник; ориентация образца (б): \mathbf{n} — нормаль к поверхности образца, \mathbf{k} — волновой вектор падающей волны, \mathbf{z}' — направление волокон, \mathbf{z} — нормаль к плоскости падения

в широком диапазоне частот излучаемых сигналов для образцов произвольной толщины.

С этой целью, на наш взгляд, представляется наиболее целесообразным использовать термооптические источники ультразвука, позволяющие получать мощные, короткие (10 ÷ 300 нс) акустические видеоимпульсы с близким к плоскому фазовым фронтом [16, 17]. Исследуя распространение УЗ-импульса в композите при различных углах падения его из иммерсионной жидкости, можно определить анизотропию фазовой скорости и затухания УЗ-волн в 1-D г/э композитах. Кроме того, данная методика позволяет исследовать и частотную дисперсию фазовой скорости УЗ, данные о которой необходимы для уточнения картины распространения акустических волн в таких средах. В отличие от упомянутых выше экспериментов [12–15] широкополосность

и малая длительность сигналов снимают жесткие требования [11] к толщине образцов.

Принципиальная схема эксперимента приведена на рис. 1. Исследуемый образец композита 1 размещался в кювете с иммерсионной жидкостью (этанол, дистиллированная вода). На стенках кюветы жестко закреплялись оптико-акустический излучатель 2 и широкополосный пьезоприемник 3 (расстояние между последними определялось размером кюветы и составляло 14,8 см). Юстировка параллельности плоскостей излучателя и приемника осуществлялась в отсутствие образца. Система позиционирования образца (рис. 1) позволяла варьировать угол падения УЗ-импульса на образец θ и угол α между направлением волокон \mathbf{z}' и нормалью \mathbf{z} к плоскости падения (\mathbf{nk}).

Излучателем служил термооптический источник ультразвука — светофильтр СЗС-22 со свободной поверхностью или ртуть в кварцевой кювете (импедансная граница) [18]. УЗ-импульсы возбуждались при поглощении в этих источниках импульсов Nd³⁺:YAG лазера (длительность импульса 12 нс по уровню 1/e), диаметр лазерного пучка и соответственно акустического пучка на поверхности термооптического источника — 20 мм (по уровню 1/e). Широкополосный пьезоприемник изготавливался из ПВДФ-пленки (резонансная частота 10 МГц, диаметр 26 мм) или из ниобата лития (резонансная частота 120 МГц). Чувствительность приемника на основе ПВДФ-пленки имела порядок 10 мкВ/Па, для приемника из ниобата лития — 0,5 мкВ/Па, что позволяло проводить измерения при амплитуде сигнала вплоть до 10⁻³ атм.

Акустический импульс, излучаемый термооптическим источником, преломлялся на входной поверхности образца и после преломления на выходной поверхности распространялся в направлении, параллельном первоначальному. Регистрировалась временная форма акустических импульсов, прошедших образец композита и иммерсионную жидкость или иммерсионную жидкость в отсутствие образца. Сравнение фазовых спектров этих импульсов позволяет измерить разность фаз $\delta\varphi$ между гармониками частоты f сигналов, прошедших через образец, и через иммерсионную среду (в отсутствие образца). Эта величина используется для нахождения фазовой скорости УЗ-волны в композите в широкой полосе частот:

$$c_l = \frac{c_0}{\sqrt{\sin^2 \theta + (\Delta - \cos \theta)^2}},$$

где $\Delta = \frac{c_0 \delta\varphi}{L \cdot 2\pi f}$, L — толщина образца, c_0 — фазовая скорость УЗ в иммерсионной среде. Угол преломления акустической волны в образце может быть определен по формуле

$$\beta = \arcsin \left(\frac{c_l}{c_0} \sin \theta \right).$$

Этот угол, вообще говоря, может быть различен для различных спектральных компонент УЗ-сигнала из-за дисперсии.

Исследовались образцы изотропного композита (ударопрочный полистирол), состоящего из каучуковых шариков диаметром 30 мкм, равномерно распределенных в полистирольной матрице, и 1-D г/э композита, состоящего из графитовых волокон толщиной 5 мкм, упакованных в одном направлении в эпоксидную основу. Образцы имели вид пластин диаметром 100 мм и толщиной 3–6 мм.

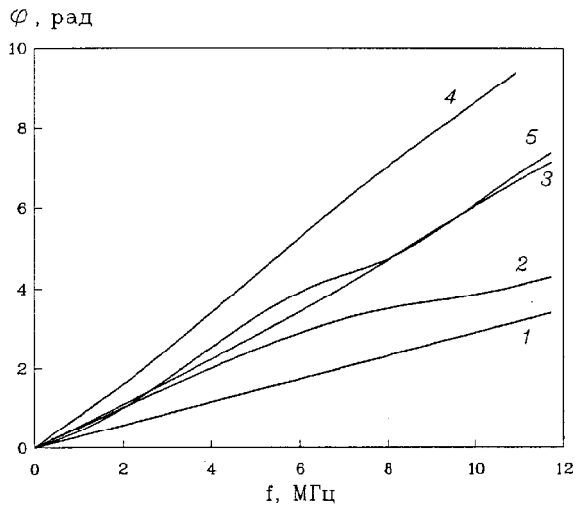


Рис. 2. Фаза гармоник ультразвукового сигнала: 1 — прошедшего иммерсионную среду (дистиллированная вода), 2 — квазипоперечной волны в однонаправленном графито-эпоксидном композите ($\alpha = 90^\circ$, $\theta = 30^\circ$), 3 — квазипродольной волны в однонаправленном графито-эпоксидном композите ($\alpha = 90^\circ$, $\theta = 4^\circ$), 4 — продольной волны в этом же образце ($\alpha = 0^\circ$, $\theta = 20^\circ$), 5 — продольной волны в полистироле

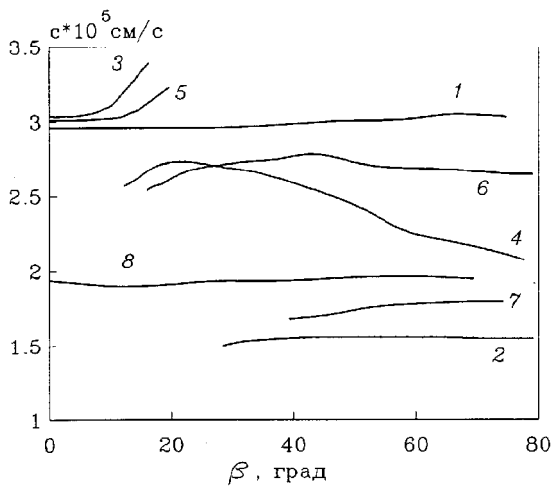


Рис. 3. Зависимость фазовой скорости ультразвука от направления распространения волны в однонаправленном графито-эпоксидном композите: 1 — $\alpha = 0^\circ$ — продольная волна, 2 — $\alpha = 0^\circ$ — медленная поперечная волна, 3 — $\alpha = 90^\circ$ — квазипродольная волна, 4 — $\alpha = 90^\circ$ — быстрая квазипоперечная волна, 5 — $\alpha = 45^\circ$ — квазипродольная волна, 6 — $\alpha = 45^\circ$ — быстрая квазипоперечная волна, 7 — $\alpha = 45^\circ$ — медленная квазипоперечная волна, 8 — продольная волна в полистироле

Измерения показали, что в образце полистирола фаза гармоник сигнала, прошедшего образец, изменялась линейно с изменением частоты, что свидетельствовало об отсутствии частотной дисперсии фазовой скорости ультразвука в таких средах (рис. 2, кривая 5). Кроме того, фазовая скорость была постоянна во всем диапазоне углов распространения УЗ в образце (рис. 3, кривая 8). Полученные данные говорят о том, что в изотропном композите в области относительно низких частот ($1 \div 15$ МГц), когда размер неоднородностей (каучуковых шариков) много меньше длины УЗ-волны (характерная длина УЗ-волны $\sim 0,5$ мм), частотная дисперсия фазовой скорости ультразвука не проявляется и распространение акустических волн происходит изотропно.

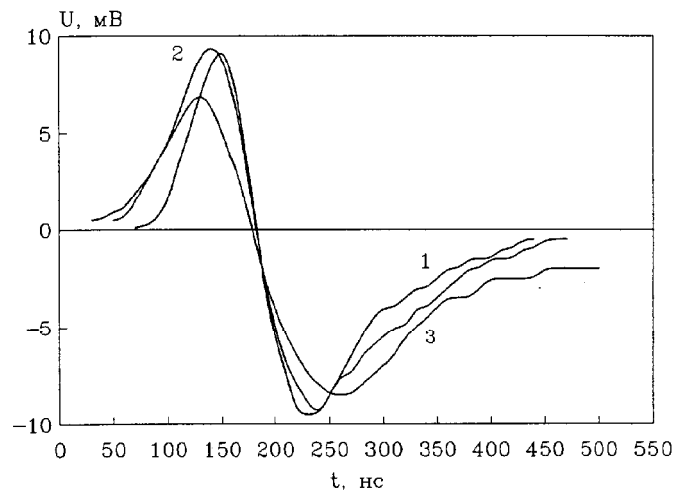


Рис. 4. Форма ультразвуковых импульсов: 1 — продольной волны в иммерсионной среде (дистиллированная вода), 2 — квазипродольной волны в однонаправленном графито-эпоксидном композите ($\alpha = 90^\circ$, $\theta = 4, 8^\circ$), 3 — квазипоперечной волны в этом же образце ($\alpha = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$)

На рис. 4 приведены формы акустического импульса, прошедшего иммерсионную среду в отсутствие композита (кривая 1), а также квазипродольного (QL) (кривая 2) и квазипоперечного (QT) (кривая 3) сигналов, прошедших композит при распространении в плоскости волокон ($\alpha = 90^\circ$, рис. 1.). Импульсы, прошедшие композит, имеют большую длительность по сравнению с импульсом, прошедшим иммерсионную среду, что объясняется сильным рассеянием ультразвука в 1-D г/э композите. Близость временной формы QL и QT сигналов с сигналом в иммерсионной среде говорит об отсутствии дисперсии УЗ-волн в 1-D г/э композите. Это подтверждают практически линейные частотные зависимости фазы гармоник исследуемых сигналов (рис. 2), свидетельствующие о частотной независимости фазовой скорости волны: вариации расчетной фазовой скорости не превышали 0,5%, что меньше погрешности измерений (в нашем случае она определялась ошибками измерения толщины образца, угла падения и фазового сдвига и не превышала 1,5%). Проведенные измерения

на более тонких образцах 1-D г/э композитов показали, что частотная дисперсия фазовой скорости УЗ не наблюдается в диапазоне вплоть до 15 МГц.

Зависимость фазовых скоростей УЗ-волн от угла распространения в 1-D г/э композите приведена на рис. 3 (кривые 1–7). В таких средах существуют три типа упругих волн (одна квазипродольная и две квазипоперечные), которые отчетливо разделяются при распространении ультразвука под углом к плоскости волокон, отличным от 90° (например, для $\alpha = 45^\circ$ кривые 5, 6, 7 на рис. 3). При $\alpha = 90^\circ$ (волокна лежат в плоскости падения — кривые 3, 4), вторая квазипоперечная волна не возбуждается при преломлении на границе раздела иммерсионная среда–композит. Это объясняется тем, что вектор ее поляризации совпадает с одной из главных осей и перпендикулярен плоскости падения (\mathbf{nk}). Кривые 3, 5 показывают, что при приближении направления распространения УЗ к направлению волокон \mathbf{z}' фазовая скорость QL-волн увеличивается. Прямые измерения скорости продольных волн в направлении волокон дали величину $(9 \pm 0,2) \cdot 10^5$ см/с, что в три раза превышает скорость волн в направлении, перпендикулярном волокнам. Скорость первой QT-волны зависит от угла между направлением распространения \mathbf{k} и направлением волокон \mathbf{z}' не так сильно (см. кривые 4, 6), а при приближении \mathbf{k} к \mathbf{z}' — уменьшается. Скорость второй квазипоперечной волны (кривая 7) монотонно увеличивается при приближении \mathbf{k} к \mathbf{z}' и достигает максимума при распространении УЗ вдоль волокон. При распространении акустических волн в плоскости изотропии ($\alpha = 0^\circ$) квазипродольная (рис. 3, кривая 1) и вторая квазипоперечная (рис. 3, кривая 2) волны вырождаются в чисто продольную и в чисто поперечную, а первая квазипоперечная волна не возбуждается (см. выше). Скорости обеих волн (при $\alpha = 0^\circ$) не зависят от угла преломления β , т.е. распространение ультразвука в этой плоскости происходит изотропно.

Приведенные данные показывают, что акустические свойства 1-D г/э композитов могут быть описаны мо-

делью ортотропной упругой среды; фазовая скорость продольной акустической волны вдоль волокон много больше фазовых скоростей УЗ в других направлениях; свойства композита по отношению к распространению ультразвука в плоскости, перпендикулярной волокнам, изотропны. Показано отсутствие частотной дисперсии фазовой скорости УЗ-волн как для изотропного (полистирол), так и для 1-D графито-эпоксидного композита в диапазоне частот $1 \div 15$ МГц.

Авторы выражают глубокую благодарность И. А. Кудинову за помощь в подготовке эксперимента.

Литература

1. Hashin Z. // J. Appl. Mech. 1962. **29**. P. 143.
2. Hashin Z., Rosen B.W. // J. Appl. Mech. 1964. **31**. P. 223.
3. Hashin Z. // AIAA J. 1966. **4**. P. 1411.
4. Rassel W.B. // Angew. Z. Math. und Phys. 1973. **24**. P. 581.
5. Nayfeh A.H., Crane R.L. // J. Appl. Phys. 1984. **55**, N 3. P. 685.
6. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. М., 1982.
7. Пентраиень Г.И. Распространение волн в анизотропных упругих средах. Л., 1980.
8. Кристенсен П. Введение в механику композитов. М., 1982.
9. Hosten B., Deschamps M. // J. Acoust. Soc. Am. 1987. **82**, N 5. P. 1763.
10. Hosten B. // Ibid. 1991. **89**, N 6. P. 2745.
11. Kriz R.D., Stinchcomb W.W. // Exp. Mech. 1979. **19**, N 1. P. 41.
12. Rokhlin S.I., Wang W. // J. Acoust. Soc. Am. 1989. **86**, N 5. P. 1876.
13. Chu Y.C., Degtyar A.D., Rokhlin S.I. // Ibid. 1994. **95**, N 6. P. 3191.
14. Chu Y.C., Rokhlin S.I. // Ibid. 1994. **95**, N 6. P. 3204.
15. Degtyar A.D., Rokhlin S.I. // J. Appl. Phys. 1995. **78**, N 3. P. 1547.
16. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М., 1991.
17. Карабутов А.А., Кононец К.В., Подымова Н.Б. // Акуст. журн. 1995. **41**, № 1. С. 95.
18. Карабутов А.А., Матросов М.П., Подымова Н.Б., Пьюэ В.А. // Акуст. журн. 1991. **37**, № 2. С. 311.

Поступила в редакцию
25.10.96