

УДК 534.222

АКУСТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ И ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ В УПРОЧЕННЫХ СТЕКЛОВОЛОКНОМ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

© 2002 г. Г. Буссе*, И. Ю. Солодов, Р. Штоссель*, Ю. Шютс*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет
119899 Москва, Воробьевы горы
E-mail: solodov@acs465a.phys.msu.ru

*Department of Non-Destructive Testing, Institute for Polymer Testing and Science, University of Stuttgart, Pfaffenwaldring
32, Stuttgart 70563, Germany

Поступила в редакцию 15.03.2001 г.

По измерениям скоростей объемных акустических волн вдоль определенных направлений в плоскостях симметрии определены величины всех 9 модулей упругостей ортотропного композитного материала – полипропилена, упроченного стекловолокном (ПУС). По этим данным рассчитаны угловые зависимости фазовых скоростей, векторов поляризации и направлений лучевых скоростей объемных волн в композите. Показано, что различие фазовых скоростей сдвиговых волн, поляризованных вдоль и поперек направления стекловолокна, обуславливает эффект акустического двулучепреломления и может приводить к эллиптической поляризации волн. Измерения фазовых скоростей сдвиговых волн в зависимости от их поляризации предлагается использовать для определения ориентации упрочняющего волокна в композитных материалах.

Анизотропия распространения акустических волн в композитах с волоконным упрочением открывает возможность диагностики важных структурных параметров материалов (содержание волокна, его ориентация и т.д.) по измерениям характеристик объемных волн. Эти характеристики должны включать не только традиционную анизотропию скорости распространения [1, 2], но также и другие параметры акустических волн (скорость и направление переноса энергии, поляризации и т.д.), которые сильно зависят от направления распространения как в монокристаллах, так и в композитных материалах. При этом важное значение могут иметь акустические поляризационные измерения на сдвиговых волнах, которые активно развиваются в последние годы [3, 4, 5], однако, в отличие от оптики, пока не нашли широкого применения в неразрушающем контроле. Это, в частности, относится к эффекту двулучепреломления сдвиговых акустических волн [6], который может служить источником информации о структурной анизотропии полимеров и композитов.

В настоящей работе экспериментальные возможности поляризационной методики двулучепреломления анализируются на примере широко распространенного композитного материала – листового полипропилена, упроченного стекловолокном (ПУС). Анализ предваряют расчеты анизотропии распространения акустических волн, выполненные на основе величин упругих модулей

материала, определенных из измерений фазовых скоростей объемных волн.

Исследуемый композит представляет собой ортотропный материал с тремя взаимно ортогональными плоскостями симметрии нормальными к осям x , y и z , который характеризуется набором 9 независимых модулей упругости c_{ijkl} ($i, j, k, l = 1, 2, 3$). Характеристики распространения акустических волн находятся решением уравнений Кристоффеля [7]:

$$(c_{ijkl}n_jn_l - \rho c^2\delta_{ik})u_k = 0, \quad (1)$$

где n_j, n_l – компоненты единичного вектора вдоль направления распространения; ρ – плотность материала; c – фазовая скорость; δ_{ik} – символ Кронекера. Нетривиальное решение системы (1) существует при условии:

$$|c_{ijkl}n_jn_l - \rho c^2\delta_{ik}| = 0 \quad (2)$$

и имеет вид

$$u_k = U_0 p_k, \quad (3)$$

где компоненты вектора поляризации p_k представляют собой соответствующие миноры матрицы (2), а U_0 – амплитуда акустической волны.

Анализ уравнения (2) показывает, что значениях всех 6 диагональных компонент матрицы упругих модулей ($c_{11}, c_{22}, c_{33}, c_{44}, c_{55}, c_{66}$) можно определить по измерениям фазовых скоростей продольных и поперечных волн, соответствующих

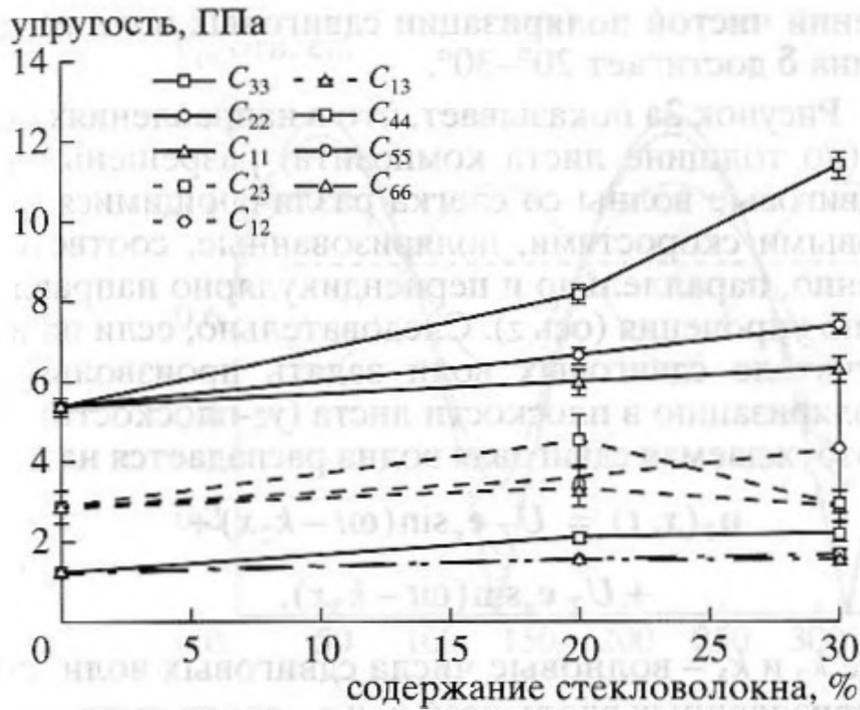


Рис. 1. Зависимость величин упругих модулей ПУС от содержания стекловолокна.

поляризации, распространяющихся вдоль основных направлений (x , y и z (ориентация волокна)). Для расчета остальных трех независимых компонент матрицы c_{ijkl} (c_{12} , c_{13} , c_{23}) можно воспользоваться измерениями фазовой скорости только продольных волн вдоль диагональных направлений в плоскости симметрии композита.

Измерения фазовых скоростей объемных акустических волн проводились в образцах листового ПУС (толщина ≈ 4 мм) с содержанием стекловолокна от 0 до 30%. Для определения всех 9 упругих модулей приготавливались 6 срезов композита: три вдоль основных направлений (x , y , z) и три 45°-среза в плоскостях симметрии. Стандартная импульсная методика на прохождение и отраже-

ние использовалась для измерений задержки ВЧ-импульса в диапазоне 2–10 МГц. В этом частотном диапазоне дисперсия акустических волн, связанная с молекулярной структурой полимерной матрицы, отсутствует и величины фазовой скорости не зависят от частоты [1]. Погрешность измерений времени задержки импульсов с помощью цифрового осциллографа не превышала 10 нс. Возбуждение продольных волн проводилось с помощью керамических преобразователей ЦТС (фирма Крауткрамер); для генерации сдвиговых волн использовались пластины кварца УХ-среза. Контакт между преобразователем и поверхностью образца осуществлялся с помощью слоя эпоксидной смолы, что позволяло изменять (и анализировать) поляризацию сдвиговых волн путем поворота излучающего (или приемного) преобразователя. Для каждой ориентации композита проводилось значительное количество измерений, чтобы ошибка определения фазовой скорости не превышала $\approx 1\%$. Результаты расчетов упругих модулей согласно выражению (2) по данным измерений фазовых скоростей акустических волн для образцов ПУС с различным содержанием стекловолокна показаны на рис. 1. Видно, что упругая матрица без стекловолокна практически изотропна: $c_{11} = c_{22} = c_{33}$; $c_{44} = c_{55} = c_{66}$; $c_{12} = c_{23} = c_{13} \approx c_{11} - 2c_{44}$. Внедрение стекловолокна приводит к образованию ортотропного композита, продольная и сдвиговая упругость (диагональные компоненты c_{ijkl}) которого увеличиваются с ростом содержания волокна. Наибольшее возрастание упругости (c_{33}) естественно наблюдается по направлению стекловолокна (ось z). В то же время величины недиагональных компонент (c_{13} и c_{23}) уменьшаются при увеличении содержания волокна от 20 до 30% (рис. 1). Такое поведение физически аналогично уменьшению коэффици-

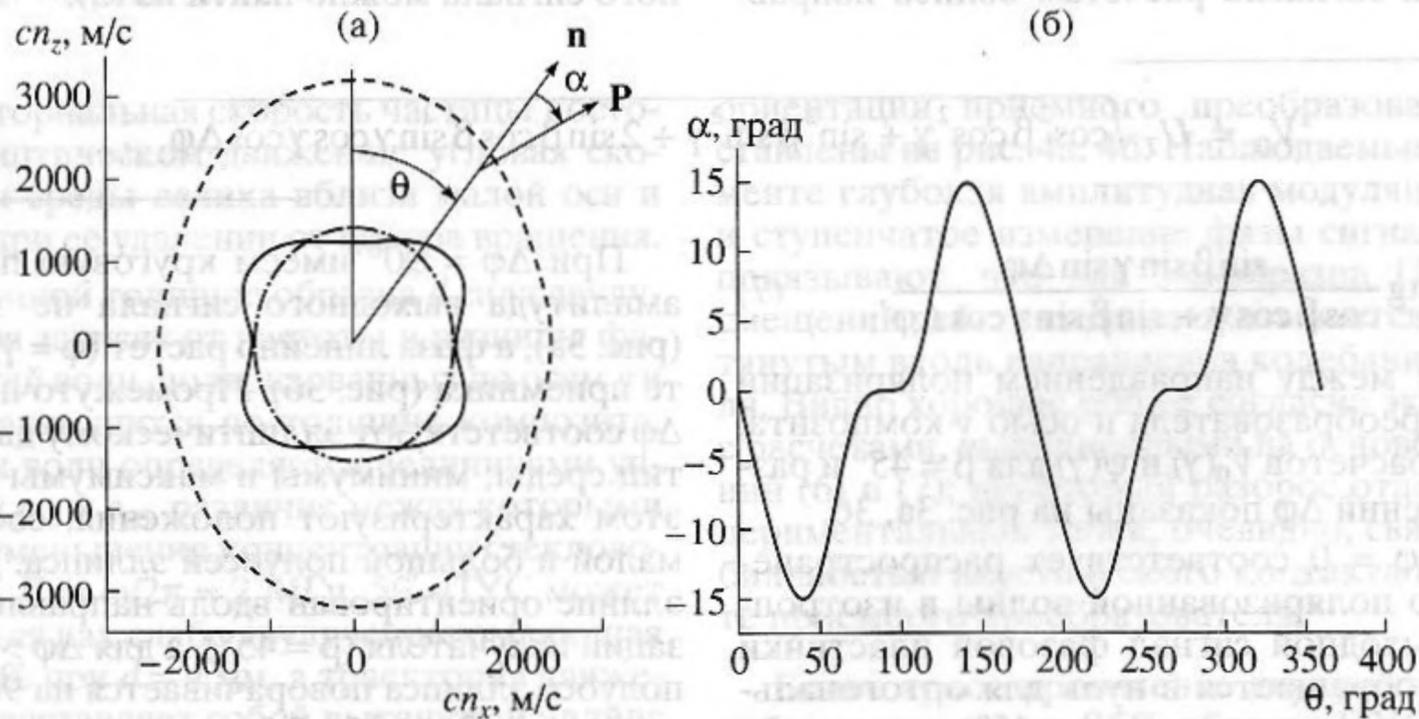


Рис. 2. а – Анизотропия фазовой скорости в xz -плоскости 30%-ПУС: ---- КП-волна; — КС-волна; - - - - ЧС-волна с поляризацией по оси y . б – Величина угла отклонения поляризации КП-волн от направления распространения в плоскости xz 30%-ПУС.

ента Пуассона при возрастании жесткости материала, что обычно имеет место для твердых тел.

Полученные выше значения упругих модулей ПУС использовались нами для расчетов фазовых скоростей и поляризации акустических волн в плоскостях симметрии ПУС на основе соотношений (2) и (3). Результаты расчетов для плоскости xz (ось x по толщине листа ПУС) 30%-образца представлены на рис. 2.

В произвольном направлении плоскости симметрии могут существовать чисто сдвиговая (ЧС) волна (поляризованная нормально к плоскости распространения), а также квази-продольная (КП) и квази-сдвиговая (КС) (поляризованная в плоскости распространения) волны. Согласно рис. 2а сильная анизотропия фазовой скорости ($\cong 50\%$) имеет место для КП-волны; для сдвиговых волн в этой плоскости имеются две акустические оси вблизи направлении упрочнения. Поскольку векторы поляризации для КП- и КС-волн взаимно ортогональны, то из данных рис. 2б можно заключить, что векторы поляризации обеих волн могут отклоняться от направления распространения на углы до 15° . Сильная акустическая анизотропия ПУС также подтверждается расчетами анизотропии лучевой скорости: величины углов отклонения лучевой скорости от направления распространения (δ) для КП-волн превышают 20° , а для КС-волн – даже 30° , что может приводить к заметному смещению пучков объемных волн в несимметричных направлениях композита. Характерно, что при этом зависимость $\delta(\theta)$ для КП-волн полностью аналогична зависимости, показанной на рис. 2б, что типично для всех анизотропных сред [7]: для КП-волн в направлениях чистой поляризации лучевая скорость совпадает с волновой нормалью ($\delta = 0$). Это правило не выполняется для КС-волн: согласно расчетам вблизи направ-

лений чистой поляризации сдвиговых волн величина δ достигает 20° – 30° .

Рисунок 2а показывает, что в направлениях оси x (по толщине листа композита) разрешены две сдвиговые волны со слегка различающимися фазовыми скоростями, поляризованные, соответственно, параллельно и перпендикулярно направлению упрочнения (ось z). Следовательно, если на излучателе сдвиговых волн задать произвольную поляризацию в плоскости листа (yz -плоскость), то возбуждаемая сдвиговая волна распадается на две:

$$\mathbf{u}_T(x, t) = U_{T_y} \mathbf{e}_y \sin(\omega t - k_2 x) + U_{T_z} \mathbf{e}_z \sin(\omega t - k_3 x), \quad (4)$$

где k_2 и k_3 – волновые числа сдвиговых волн, поляризованных вдоль осей y - и z -, соответственно, \mathbf{e}_y , \mathbf{e}_z – единичные векторы поляризаций этих волн. Амплитуды волн в (4) зависят от ориентации излучающего преобразователя: $U_{T_y} = U_T \cos \beta$, $U_{T_z} = U_T \sin \beta$, где β – угол ориентации излучающего преобразователя, а U_T – амплитуда смещения на излучателе. Поскольку согласно рис. 2, k_2 и k_3 несколько различаются, то после прохождения образца толщиной d колебание в плоскости $x = d$ будет иметь вид:

$$\mathbf{u}_T(d, t) = (U_T \cos \beta) \mathbf{e}_y \sin \omega t + (U_T \sin \beta) \mathbf{e}_z \sin(\omega t + \Delta \varphi), \quad (5)$$

где фазовый сдвиг $\Delta \varphi = d(k_2 - k_3)$. Согласно (5), ПУС действует как поляризационная пластинка, которая изменяет поляризацию сдвиговых волн в зависимости от силы двулучепреломления ($\Delta \varphi$).

Если аналогичный сдвиговый преобразователь используется для приема результирующего смещения, то амплитуду (V_0) и фазу (ψ) его выходного сигнала можно найти из (5):

$$V_0 = U_T \sqrt{\cos^2 \beta \cos^2 \gamma + \sin^2 \beta \sin^2 \gamma + 2 \sin \beta \cos \beta \sin \gamma \cos \gamma \cos \Delta \varphi}, \quad (6)$$

$$\psi = \arctg \frac{\sin \beta \sin \gamma \sin \Delta \varphi}{\cos \beta \cos \gamma + \sin \beta \sin \gamma \cos \Delta \varphi}, \quad (7)$$

где γ – угол между направлением поляризации приемного преобразователя и осью y композита. Результаты расчетов $V_0(\gamma)$ и $\psi(\gamma)$ для $\beta = 45^\circ$ и различных значений $\Delta \varphi$ показаны на рис. 3а, 3б.

Случай $\Delta \varphi = 0$ соответствует распространению линейно поляризованной волны в изотропном теле: выходной сигнал фазовой пластинки естественно обращается в нуль для ортогонального положения излучателя ($\beta = 45^\circ$) и приемника ($\gamma = 135^\circ$) (рис. 3а), а его фаза скачком меняется на 180° при переходе через это положение (рис. 3б).

При $\Delta \varphi = 90^\circ$ имеем круговую поляризацию: амплитуда выходного сигнала не зависит от γ (рис. 3а), а фаза линейно растет ($\varphi = \gamma$) при повороте приемника (рис. 3б). Промежуточные значения $\Delta \varphi$ соответствуют эллиптическому движению частиц среды; минимумы и максимумы (рис. 3а) при этом характеризуют положения, соответственно малой и большой полуосей эллипса. Для $\Delta \varphi < 90^\circ$ эллипс ориентирован вдоль направления поляризации излучателя ($\beta = 45^\circ$), а для $\Delta \varphi > 90^\circ$ большая полуось эллипса поворачивается на 90° . При сравнении рис. 3а и 3б обнаруживается, что наиболее крутые участки фазовой характеристики ($\gamma \cong 135^\circ$) соответствуют положению малой оси эллипса. Это подтверждает теоретическое предсказание [7]

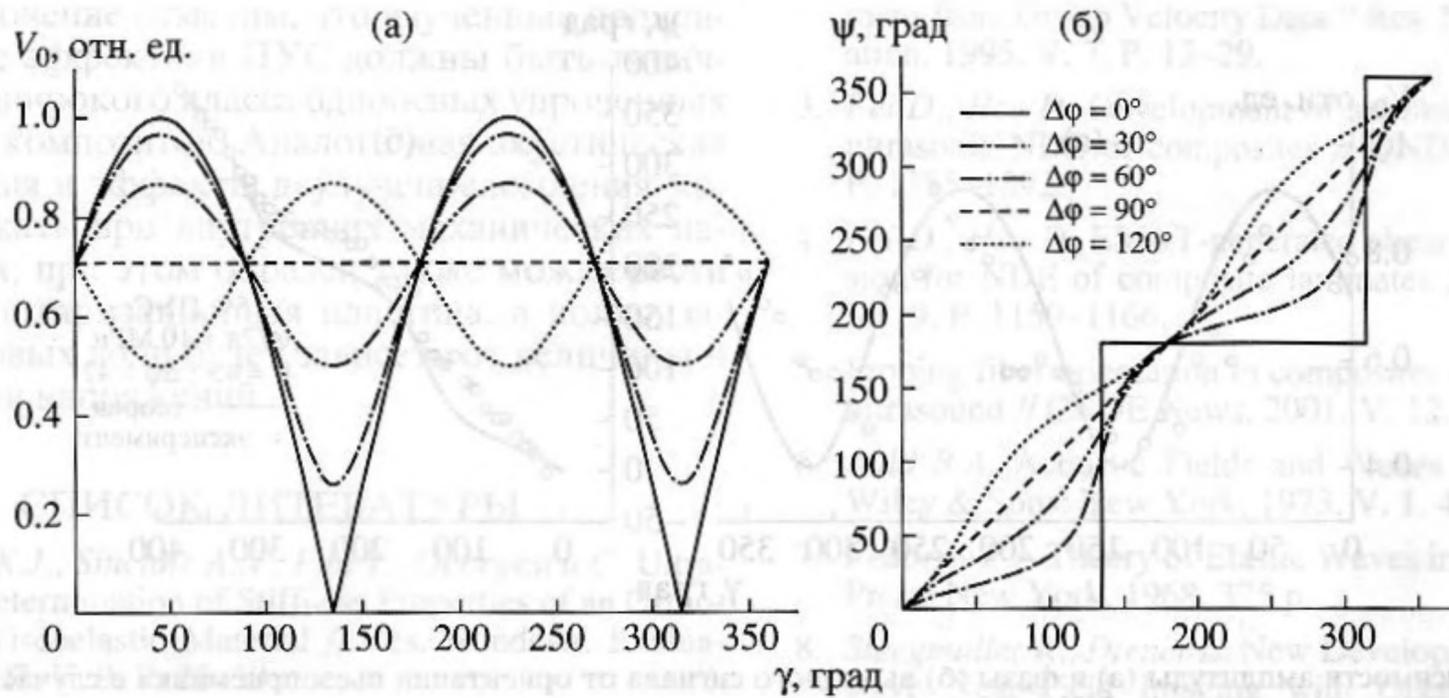


Рис. 3. Зависимости амплитуды (а) и фазы (б) выходного сигнала от ориентации пьезоприемника для различных величин "силы" двулучепреломления.

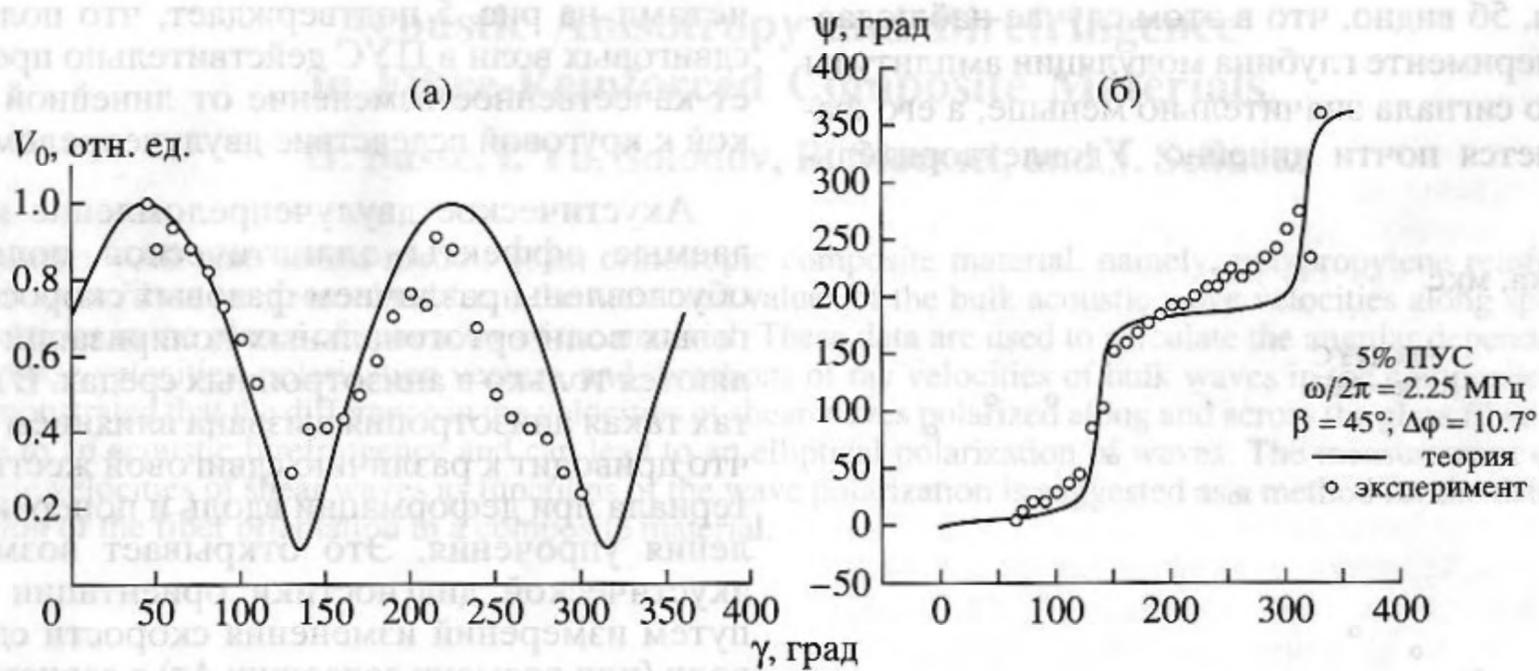


Рис. 4. Зависимости амплитуды (а) и фазы (б) выходного сигнала от ориентации пьезоприемника для слабо двулучепреломляющего образца 5%-ПУС.

о том, что секториальная скорость частицы постоянна при эллиптическом движении: угловая скорость частицы среды велика вблизи малой оси и уменьшается при ее удалении от центра вращения.

При постоянной толщине образца d сила двулучепреломления зависит от частоты и разницы фазовых скоростей волн, поляризованных по осям u и z и распространяющихся по толщине композита. Скорость этих волн определяется величинами упругих модулей c_{55} и c_{66} , различие между которыми исчезает при уменьшении концентрации стекловолокна (рис. 1). Для $\omega/2\pi \approx 2$ МГц, 5%-ПУС может рассматриваться как слабо двулучепреломляющая среда: $\Delta\phi \approx 11\%$ при $d = 4$ мм, а траектория движения частиц представляет собой вытянутый эллипс с отношением полуосей $\approx 1/10$.

Полученные экспериментально зависимости амплитуды и фазы выходного сигнала от угла

ориентации приемного преобразователя представлены на рис. 4а, 4б. Наблюдаемые в эксперименте глубокая амплитудная модуляция (рис. 4а) и ступенчатое изменение фазы сигнала (рис. 4б) показывают, что для 5%-образца ПУС эллипс смещений действительно оказывается сильно вытянутым вдоль направления колебаний излучателя. Видно хорошее общее согласие эксперимента с расчетами, выполненными на основе соотношений (6) и (7); некоторый разброс отдельных экспериментальных точек, очевидно, связан с нестабильностью акустического контакта при повороте приемного преобразователя.

Более яркое проявление двулучепреломления наблюдалось нами в 5%-образце ПУС на частоте 10 МГц. Действительно, в этом случае лист композита является сильной двулучепреломляющей средой: расчетное значение $\Delta\phi \approx 48^\circ$, а ожидаемое

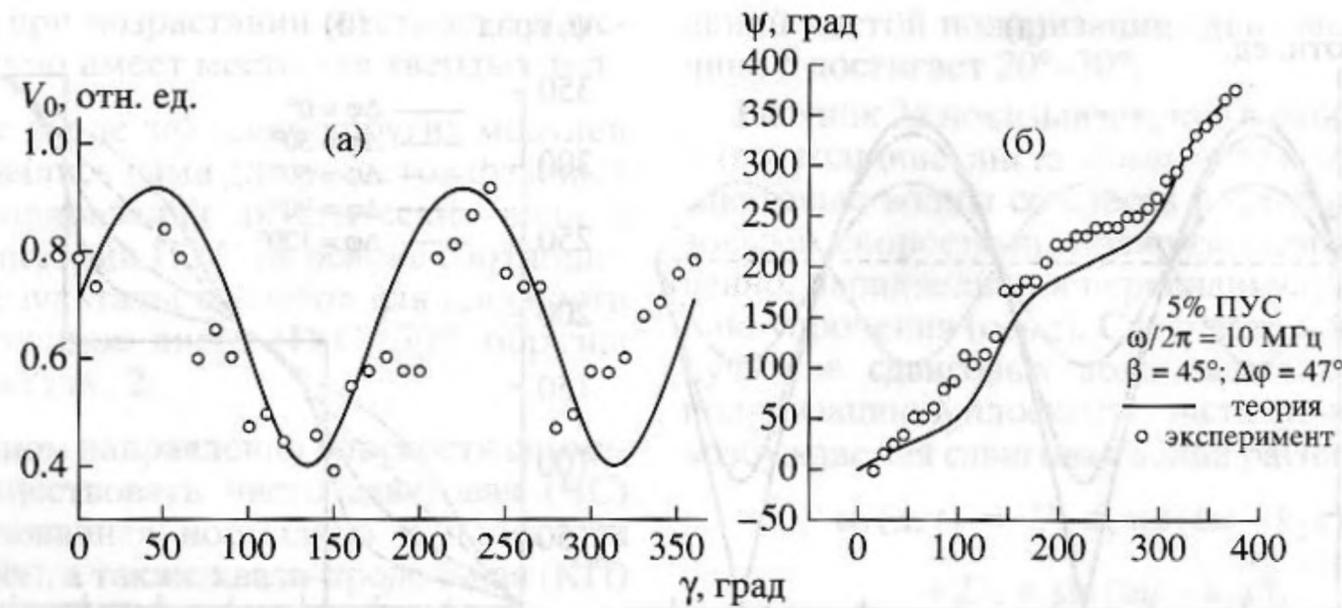


Рис. 5. Зависимости амплитуды (а) и фазы (б) выходного сигнала от ориентации пьезоприемника в случае сильного двулучепреломления.

отношение полуосей эллипса согласно (5) $\approx 1/2$. Из рис. 5а, 5б видно, что в этом случае наблюдаемая в эксперименте глубина модуляции амплитуды выходного сигнала значительно меньше, а его фаза изменяется почти линейно. Удовлетворитель-

ное согласие экспериментальных данных с расчетами на рис. 5 подтверждает, что поляризация сдвиговых волн в ПУС действительно претерпевает качественное изменение от линейной до близкой к круговой вследствие двулучепреломления.

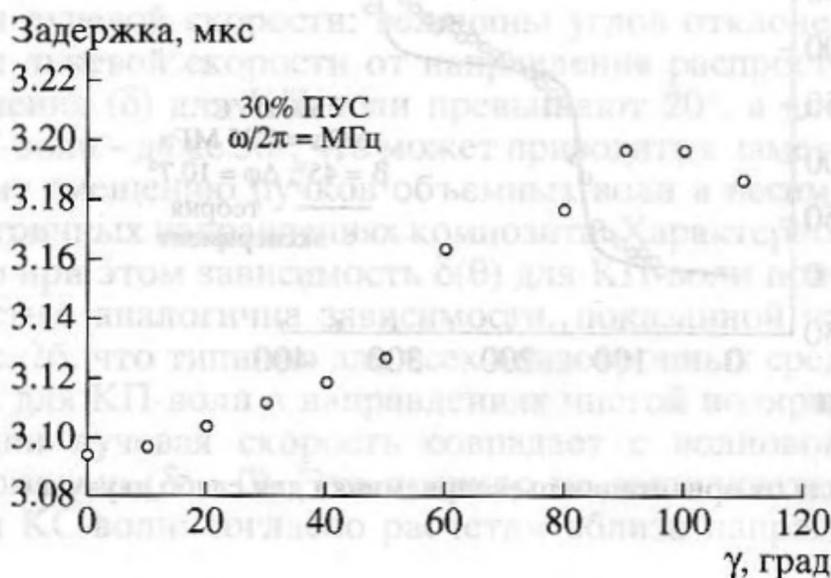


Рис. 6. Зависимость времени задержки выходного сигнала пьезоприемника от поляризации сдвиговых волн.

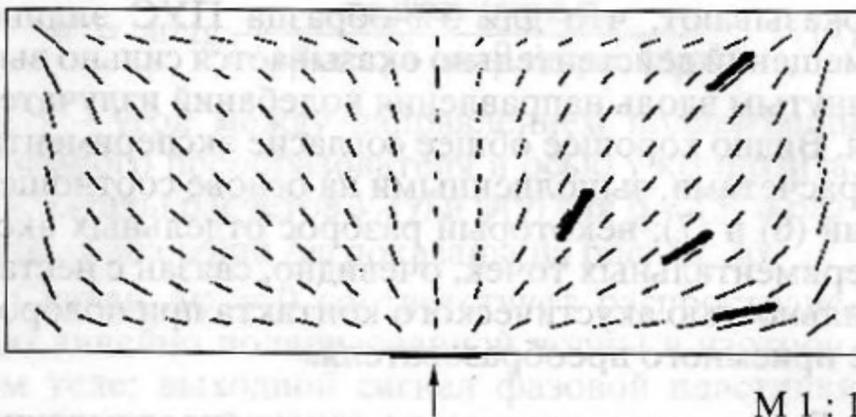


Рис. 7. Определение локальной ориентации стекловолокна в образце полиамида: — акустические измерения; ---- измерения электромагнитным поляризационным методом.

Акустическое двулучепреломление и наблюдаемые эффекты эллиптической поляризации обусловлены различием фазовых скоростей сдвиговых волн ортогональных поляризаций и проявляются только в анизотропных средах. В композитах такая анизотропия вызвана влиянием волокна, что приводит к различию сдвиговой жесткости материала при деформации вдоль и поперек направления упрочения. Это открывает возможность акустической диагностики ориентации волокна путем измерений изменения скорости сдвиговых волн (или времени задержки Δt) в зависимости от их поляризации. Результаты таких измерений для 30%-ПУС приведены на рис. 6. Для получения этих данных излучатель и приемник устанавливались соосно ($\gamma = \beta$) и синхронно поворачивались в плоскости образца. Угловое положение минимума кривой рис. 6 (максимум скорости) показывает направление волокна, а максимум кривой соответствует ортогональному направлению.

Аналогичные измерения $\Delta t(\gamma)$ были выполнены для композитного материала, полиамида, укрепленного стекловолокном, локальная ориентация которого предварительно определялась электромагнитным поляризационным методом [8] и сильно отличалась в различных точках образца (рис. 7). Приведенные на этом рисунке данные акустических измерений показывают, что методика акустического двулучепреломления обладает достаточно высокой точностью определения локальной ориентации волокна. Пространственное разрешение измерений определяется размером преобразователей и в наших экспериментах составляла ≈ 1 см.

В заключение отметим, что изученные поляризационные эффекты в ПУС должны быть типичными для широкого класса одноосных упроченных волокном композитов. Аналогичная акустическая анизотропия и эффекты двулучепреломления могут возникать при внутренних механических напряжениях; при этом образец также может вести себя как поляризационная пластина, а поляризация сдвиговых волн будет зависеть от величины и ориентации напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Newell K.J., Sinclair A.N., Fan Y., Georgescu C.* Ultrasonic Determination of Stiffness Properties of an Orthotropic Viscoelastic Material // *Res. Nondestr. Evaluation*. 1997. V. 9. P. 25–39.
2. *Kim K.Y., Ohtani T., Baker A.R., Sachse W.* Determination of all Elastic Constants of Orthotropic Plate Specimens from Group Velocity Data // *Res. Nondestr. Evaluation*. 1995. V. 7. P. 13–29.

3. *Fei D., Hsu D.* Development of azimuthal scanners for ultrasonic NDE of composites // *QNDE*. 1999. V. 18. P. 1385–1392.
4. *Fei D., Hsu D.* EMAT-generated shear wave transmission for NDE of composite laminates // *QNDE*. 2000. V. 19. P. 1159–1166.
5. Probing fiber orientation in composites using transverse ultrasound // *CNDE News*. 2001. V. 12. № 1. P. 3–5.
6. *Auld B.A.* Acoustic Fields and Waves in Solids. John Wiley & Sons: New York, 1973. V. 1. 424 p.
7. *Fedorov F.I.* Theory of Elastic Waves in Solids. Plenum Press: New York, 1968. 375 p.
8. *Steegmuller R., Diener L.* New Developments of Microwave Near-Field Imaging with Open-Ended Waveguides // *Nondestr. Testing and Evaluation*. 1997. V. 13. P. 203–213.

Acoustic Anisotropy and Birefringence in Fibre-Reinforced Composite Materials

G. Busse, I. Yu. Solodov, R. Stoessel, and J. Schuetz

Abstract—All nine elastic moduli of an orthotropic composite material, namely, polypropylene reinforced with glass fiber, are determined from the measured values of the bulk acoustic wave velocities along specific directions in the planes of symmetry of the material. These data are used to calculate the angular dependences of phase velocities, polarization vectors, and directions of ray velocities of bulk waves in the composite. It is demonstrated that the difference in the velocities of shear waves polarized along and across the glass fiber gives rise to an acoustic birefringence and can lead to an elliptical polarization of waves. The measurement of the phase velocities of shear waves as functions of the wave polarization is suggested as a method for the determination of the fiber orientation in a composite material.