

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН SV-ПОЛЯРИЗАЦИИ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА

Н.П. Алешин<sup>1</sup>

А.А. Дерябин<sup>1</sup>

Н.А. Щипаков<sup>1</sup>

Д.М. Козлов<sup>2</sup>

aad@bmstu.ru

shchipak@bmstu.ru

denvwb5@mail.ru

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана», Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

На основе результатов анализа существующих работ показано, что метод моделирования движения нормальных волн с SV-поляризацией с использованием классической теории деформации является перспективным для моделирования их распространения в слоистых полимерных композиционных материалах, а также изучения влияния наличия несплошностей в таких материалах на параметры рассмотренных волн. Создана модель для анализа особенностей распространения описанных волн в полимерных композиционных материалах на основе углеродного волокна, получены формулы для расчета амплитудных коэффициентов в уравнениях движения, которые учитывают акустические характеристики слоев полимерных композиционных материалов и позволяют вычислить компоненты смещения или распределение энергии в любой точке слоистой среды. Определены значения фазовых скоростей и построены дисперсионные кривые для различных мод нормальных волн с SV-поляризацией. Рассмотрено влияние слоистой структуры материала на затухание указанных волн и изложен принцип корректировки формул для расчета коэффициентов затухания с учетом числа слоев и их акустических свойств. Проведена экспериментальная проверка значений фазовых скоростей нормальных волн с SV-поляризацией на образце из полимерных композиционных материалов, подтвердившая правильность подходов моделирования

### Ключевые слова

*Полимерный композиционный материал, неразрушающий контроль, нормальная волна с SV-поляризацией, дисперсионные кривые, фазовая скорость, затухание*

Поступила 05.06.2022

Принята 30.01.2023

© Автор(ы), 2023

**Введение.** В современном машиностроении при изготовлении изделий различного назначения все чаще применяют полимерные композиционные материалы (ПКМ). Эти материалы обладают следующими преимуществами по сравнению с металлами: имеют меньшую плотность, большую жесткость и прочность на растяжение. Наиболее часто их применяют в авиации, космонавтике и ОПК. В изделиях из ПКМ могут образовываться как производственные, так и эксплуатационные дефекты, своевременное выявление которых является условием безопасной эксплуатации конечного изделия. Характерные дефекты при производстве изделий из ПКМ: дефекты волокна (разрывы и искривленность); дефекты в матрице (пористость, участки с повышенным или пониженным содержанием матрицы); дефекты на границе раздела (участки сухого волокна, расслоения). Особую сложность для обнаружения представляют эксплуатационные трещины, которые могут иметь минимальную высоту и располагаться под произвольным углом. Такие трещины могут формироваться при наличии двух и более расслоений, которые провоцируют повреждение композиционного материала в промежутке между расслоениями под действием внешних циклических нагрузок.

Результаты анализа существующих методов неразрушающего контроля показывают, что целесообразно применять ультразвуковой контроль [1], причем наиболее эффективен контроль нормальными волнами с SV-поляризацией [2–5]. Это обуславливается тем, что при прозвучивании нормальными волнами могут быть обнаружены сложно ориентированные дефекты, которые трудно установить другими типами упругих волн [6, 7].

Процессам распространения нормальных волн в твердых телах посвящены работы [6, 7], распространению ультразвуковых волн в слоистых средах — [8, 9]. Вопросы влияния производственных дефектов сварного шва термопластического композиционного материала на распространение волны Лэмба рассмотрены в [10]. В результате выполненной работы авторы пришли к выводу, что наличие несплавления проявляется увеличением времени прохождения волны Лэмба с максимальной амплитудой, т. е. изменением фазовой скорости. Это обусловлено результатами, представленными в [11], где получено аналитическое решение для расчета изменения фазовой скорости от угла наклона плоскостного дефекта (включая расслоение) для изотропного материала. Новый метод контроля с использованием волн Лэмба для обнаружения вызванного ударом расслоения в композитных слоистых материалах предложен в [12]. Показано, что при наличии рассло-

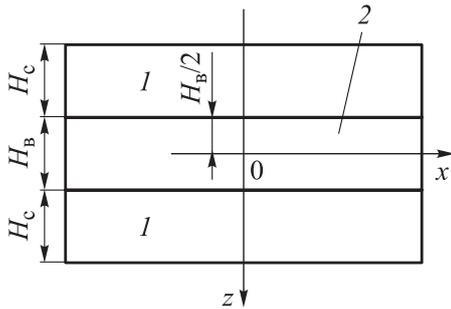
ения меняется время прихода сигнала моды, что соответствует результатам, полученным в [11].

Результаты анализа данных из упомянутых работ показали, что описание процесса распространения ультразвуковых колебаний в многослойных композитных структурах является гораздо более сложной задачей по сравнению с описанием этого процесса в изотропных материалах. Это связано с присущей многослойным структурам анизотропией и неоднородностью, что приводит к сложному характеру распространения волны. Моделирование процесса распространения ультразвуковой волны в композиционном материале на основе полимеров должно учитывать отражение и рассеяние волны, которые могут возникать на границе раздела матрицы и армирующих волокон. В настоящее время существуют методы контроля нормальными волнами SV-поляризации, которые позволяют обнаруживать сложно ориентированные дефекты как в металлических сварных соединениях, так и в основном металле, измерять толщину металла, исследовать механические характеристики материалов. Однако остается нерешенным вопрос об обнаружении и идентификации внутренних дефектов, таких, как вертикальные или наклонные трещины в композиционных материалах. Для решения поставленной задачи необходимо на первом этапе изучить особенности распространения нормальных волн SV-поляризации в структурах, характерных для ПКМ.

Результаты анализа различных подходов к моделированию процесса распространения нормальных волн с SV-поляризацией в различных средах приведены в [13]. На основе теории деформации сдвига пятого порядка (5-SDT) выполнено моделирование распространения нормальных волн в вязкоупругом композиционном материале. Указанный метод моделирования, как и метод конечных элементов, требует при расчетах задания точности (приближения). Чем выше точность, тем больше вычислительной мощности необходимо, при этом после расчетов требуется верификация, т. е. дополнительные экспериментальные исследования для подтверждения результатов моделирования, что добавляет трудоемкость проведения работ. Моделирование с использованием классической теории деформации, которая является частным случаем 5-SDT и более простым методом моделирования процессов распространения волн и, следовательно, требует меньше вычислительных мощностей, проведено в [11]. Такой подход позволяет получить аналитические решения поставленных задач. Результаты работы [11] подтверждены результатами, представленными в [10, 12].

Изложенное дает возможность утверждать, что метод моделирования движения нормальных волн с SV-поляризацией с использованием классической теории деформации [11] перспективен для задач моделирования движения этих волн и в ПКМ.

**Формирование нормальных волн с SV-поляризацией в слоистой среде. Уравнения движения. Граничные условия.** На распространение нормальной волны в материале будет оказывать влияние наличие внутри этого материала границ раздела сред (связующего и волокна), отличающихся как плотностью, так и скоростью распространения в них упругих колебаний.



**Рис. 1.** Схема для описания граничных условий:  
1 — связующее; 2 — волокно

В качестве примера для описания распространения нормальных волн с SV-поляризацией в ПКМ рассмотрим трехслойную систему слоев с началом системы координат, расположенной в середине пластины (рис. 1).

Компоненты вектора смещения для рассматриваемых волн имеют вид [8]:

симметричные моды

$$\begin{aligned} U_x &= (i\xi C_1 \cos(k_3 z) - \chi_3 D_2 \cos(\chi_3 z)) \exp[i(\xi x - \omega t)], \\ U_z &= (-k_3 C_1 \sin(k_3 z) + i\xi D_2 \sin(\chi_3 z)) \exp[i(\xi x - \omega t)], \\ \varphi &= C_1 \cos(k_3 x); \end{aligned} \quad (1)$$

асимметричные моды

$$\begin{aligned} U_x &= (i\xi C_2 \sin(k_3 z) + \chi_3 D_1 \sin(\chi_3 z)) \exp[i(\xi x - \omega t)], \\ U_z &= (k_3 C_2 \cos(k_3 z) + i\xi D_1 \cos(\chi_3 z)) \exp[i(\xi x - \omega t)], \\ \varphi &= C_2 \sin(k_3 x). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\xi = k_l \sin \gamma_l = k_t \sin \gamma_t$ ,  $k_3 = \sqrt{k_l^2 - \xi^2}$ ,  $\chi_3 = \sqrt{k_t^2 - \xi^2}$  — волновые числа,  $k_l = \omega/c_l$ ,  $k_t = \omega/c_t$ ,  $\gamma_l$ ,  $\gamma_t$  — углы распространения продольных и поперечных волн по оси  $z$ ,  $c_l$ ,  $c_t$  — скорости продольной и поперечной волн;  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  — амплитудные коэффициенты;  $\omega$  — частота ультразвуковых колебаний;  $\varphi$  — скалярный потенциал.

Уравнения смещения (1) и (2) описывают движение нормальной волны в изотропной среде. В случае ПКМ имеем дело со слоистой средой, поэтому уравнения (1) и (2) необходимо адаптировать для условий распространения указанных волн в этой среде. Для этого определим значения амплитудных коэффициентов  $C_1, C_2, D_1, D_2$  с учетом наличия слоистости с использованием метода моделирования, описанного в [11]. Рассмотрим граничные условия для слоистой среды.

На границе слоев должны быть равны векторы смещения и одноименные компоненты тензора напряжений, соответствующего площадке на границе:

$$\sigma_{z1} = \sigma_{z2}, \quad \tau_{xz1} = \tau_{xz2}, \quad U_{z1} = U_{z2}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{z1}, \sigma_{z2}$  — нормальные напряжения на границе сред 1 и 2;  $\tau_{xz1}, \tau_{xz2}$  — касательные напряжения на границе сред 1 и 2;  $U_{z1}, U_{z2}$  — смещения на границе сред 1 и 2.

*Первое условие:* равенство напряжений  $\sigma_{z1} = \sigma_{z2}$  на границе волокно-связующее с координатой  $z = H_B / 2$ , где среда 1 — связующее, среда 2 — волокно.

Используем закон Гука

$$\sigma_z = \lambda \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) + 2\mu \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} \right),$$

где

$$\varphi = (C_1 \cos(k_3 z) + C_2 \sin(k_3 z)) \exp[i(\xi x - \omega t)];$$

$$\psi = (D_1 \cos(\chi_3 z) + D_2 \sin(\chi_3 z)) \exp[i(\xi x - \omega t)].$$

Значения волновых чисел для каждой среды вычисляются по приведенным выше формулам. Тогда запишем

$$\sigma_{z1} = (\lambda_1 + 2\mu_1) \left[ -k_{31}^2 C_1 \cos(k_{31} z) - k_{31}^2 C_2 \sin(k_{31} z) \right], \quad (4)$$

$$\sigma_{z2} = (\lambda_2 + 2\mu_2) \left[ -k_{32}^2 C_1 \cos(k_{32} z) - k_{32}^2 C_2 \sin(k_{32} z) \right]. \quad (5)$$

Здесь  $\lambda_1, \mu_1, \lambda_2, \mu_2$  — постоянные Ламе для сред 1 и 2;  $k_{31} = \sqrt{k_{l1}^2 - \xi^2}$ ,  $k_{l1} = \omega/c_{l1}$ ,  $\chi_{31} = \sqrt{k_{t1}^2 - \xi^2}$ ,  $k_{t1} = \omega/c_{t1}$ ,  $k_{32} = \sqrt{k_{l2}^2 - \xi^2}$ ,  $k_{l2} = \omega/c_{l2}$ ,  $\chi_{32} = \sqrt{k_{t2}^2 - \xi^2}$ ,  $k_{t2} = \omega/c_{t2}$ ,  $\xi = k_{l2} \sin \gamma_{l2} = k_{t2} \sin \gamma_{t2}$ ,  $c_{l1}, c_{t1}, c_{l2}, c_{t2}$  — скорости продольной и поперечной волн в средах 1 и 2,  $\gamma_{l1}, \gamma_{t1}, \gamma_{l2}, \gamma_{t2}$  — углы распространения продольных и поперечных волн с осью  $z$  в средах 1 и 2.

Приравнивая уравнения (4) и (5), получаем соотношение между амплитудными коэффициентами  $C_1$  и  $C_2$  при  $z = H_B / 2$ :

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{k_{31}^2 (\lambda_1 + 2\mu_1) \sin(k_{31}z) - k_{32}^2 (\lambda_2 + 2\mu_2) \sin(k_{32}z)}{-k_{31}^2 (\lambda_1 + 2\mu_1) \cos(k_{31}z) + k_{32}^2 (\lambda_2 + 2\mu_2) \cos(k_{32}z)}. \quad (6)$$

*Второе условие:* равенство касательных напряжений  $\tau_{xz1} = \tau_{xz2}$  на границе волокно–связующее с координатой  $z = H_B / 2$ .

С учетом закона Гука

$$\tau_{xz} = \lambda \left( 2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right),$$

получаем

$$\tau_{xz1} = \lambda_1 \left( -\chi_{31}^2 D_1 \cos(\chi_{31}z) - \chi_{31}^2 D_2 \sin(\chi_{31}z) \right), \quad (7)$$

$$\tau_{xz2} = \lambda_2 \left( -\chi_{32}^2 D_1 \cos(\chi_{32}z) - \chi_{32}^2 D_2 \sin(\chi_{32}z) \right). \quad (8)$$

Приравнивая (7) и (8), запишем соотношение между амплитудными коэффициентами  $D_1$  и  $D_2$  при  $z = H_B / 2$ :

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{\lambda_1 \chi_{31}^2 \sin(\chi_{31}z) - \lambda_2 \chi_{32}^2 \sin(\chi_{32}z)}{-\lambda_1 \chi_{31}^2 \cos(\chi_{31}z) + \lambda_2 \chi_{32}^2 \cos(\chi_{32}z)}. \quad (9)$$

*Третье условие:* равенство смещений  $U_{z1} = U_{z2}$  на границе волокно–связующее с координатой  $z = H_B / 2$ . С использованием уравнения (1) для  $U_z$  получаем следующее решение для  $z = H_B / 2$ :

$$\frac{C_1}{D_2} = \frac{i\xi [\sin(\chi_{32}z) - \sin(\chi_{31}z)]}{k_{32} \sin(k_{32}z) - k_{31} \sin(k_{31}z)}. \quad (10)$$

Соотношения (6), (9), (10) позволяют адаптировать уравнения (1) и (2) для слоистой среды (в рассматриваемом случае — трехслойной). Например, если на ПКМ падает продольная волна, которая описывается скалярным потенциалом  $\varphi = (C_1 \cos(k_3z) + C_2 \sin(k_3z)) \exp[i(\xi x - \omega t)]$ , то, задавая коэффициент  $C_1$ , соотношения (6), (9), (10) дают возможность рассчитать значения всех компонентов смещения или распределение энергии по глубине для слоистой среды, что будет необходимо при разработке методики контроля ПКМ.

**Формирование нормальной волны с SV-поляризацией в слоистой среде. Затухание.** В случае армированного волокном ПКМ одной из основных сложностей, связанных с распространением нормальных волн, является эффект затухания, механизм и причины которого подробно описаны в [14].

Согласно [7], коэффициенты затухания нормальных волн SV-поляризации можно записать в виде

$$\gamma_{sn} = A_{sn}\alpha + B_{sn}\beta A_{sn}, \quad (11)$$

$$\gamma_{an} = A_{an}\alpha + B_{an}\beta, \quad (12)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  — коэффициенты затухания продольной и поперечной волн;  $B_{sn}$  — коэффициент уравнения для расчета затухания симметричной моды;  $A_{an}$ ,  $B_{an}$  — коэффициенты уравнения для расчета затухания асимметричной моды.

По формулам (11), (12) можно рассчитать значения коэффициентов затухания для мод нормальных волн, распространяющихся в изотропной среде. Коэффициенты  $A_{sn}$ ,  $B_{sn}$ ,  $A_{an}$ ,  $B_{an}$ , согласно [7], относятся только к типу волны и не зависят от структуры материала, поэтому для расчета коэффициента затухания слоистой среды необходимо провести перерасчет коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , учитывая затухание волн в средах и отражение на границах сред:

$$\alpha_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i}{n} + (20 \log D) / \sum_{i=1}^n h_i, \quad (13)$$

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i}{n} + (20 \log D) / \sum_{i=1}^n h_i. \quad (14)$$

Здесь  $\alpha_i$  — коэффициент затухания продольной волны в  $i$ -м слое;  $\beta_i$  — коэффициент затухания поперечной волны в  $i$ -м слое;  $n$  — число слоев;  $D$  — коэффициент прозрачности границ;  $h_i$  — толщина  $i$ -го слоя. Первыми слагаемыми в (13) и (14) являются средние значения коэффициентов затухания в слоях ПКМ для продольной и поперечной волн соответственно, вторым слагаемым — ослабление амплитуды за счет отражения от границ, отнесенное к суммарной толщине пластины.

Коэффициент прозрачности границ для трехслойной структуры рассчитывается по формуле [9]:

$$D = \frac{4Z_3Z_2}{(Z_3 + Z_2)(Z_2 + Z_1)e^{-ik_2zd} + (Z_3 + Z_2)(Z_2 - Z_1)e^{-ik_2d}}, \quad (15)$$

где  $Z_i = \rho_i c_i$  — акустический импеданс,  $\rho_i$  — плотность материала  $i$ -го слоя,  $c_i$  — скорость волны в  $i$ -м слое;  $d$  — толщина слоя;  $k_2$  — волновое число в среде 2 волны, для которой рассчитывается коэффициент прозрачности.

Пересчитанные значения коэффициентов затухания  $\alpha$ ,  $\beta$  будут использованы для расчета коэффициентов затухания нормальных волн SV-поляризации в (13) и (14).

**Формирование нормальных волн с SV-поляризацией в слоистой среде. Фазовая скорость.** Согласно [7], значения фазовых скоростей мод можно рассчитать, решив следующие уравнения для мод:

симметричной

$$\frac{\operatorname{tg} \sqrt{1-\zeta^2} d}{\operatorname{tg} \sqrt{\xi^2-\zeta^2} d} = -\frac{4\zeta^2 \sqrt{1-\zeta^2} \sqrt{\xi^2-\zeta^2}}{(2\zeta^2-1)^2}, \quad (16)$$

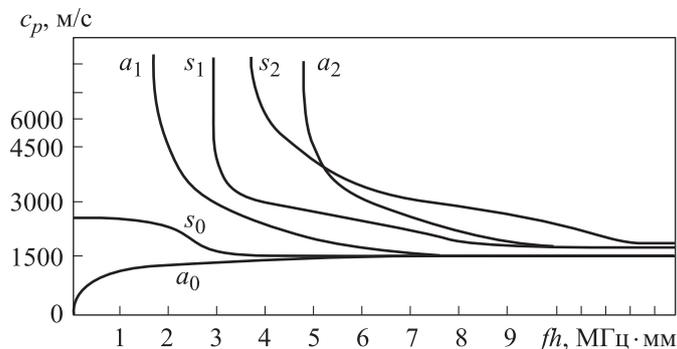
асимметричной

$$\frac{\operatorname{tg} \sqrt{1-\zeta^2} d}{\operatorname{tg} \sqrt{\xi^2-\zeta^2} d} = \left( -\frac{4\zeta^2 \sqrt{1-\zeta^2} \sqrt{\xi^2-\zeta^2}}{(2\zeta^2-1)^2} \right)^{-1}, \quad (17)$$

где  $d = k_t h$ ,  $h$  — толщина пластины;  $\zeta^2 = c_t^2 / c_p^2$ ,  $c_p$  — фазовая скорость моды;  $\xi^2 = c_t^2 / c_l^2$ ;  $k_t = 2\pi f / c_t$ ,  $f$  — частота.

Решением уравнений (16) и (17) является нахождение значений соотношения  $\zeta$ , т. е. фазовой скорости и скорости поперечной волны, что, в свою очередь, дает возможность вычислить фазовую скорость моды.

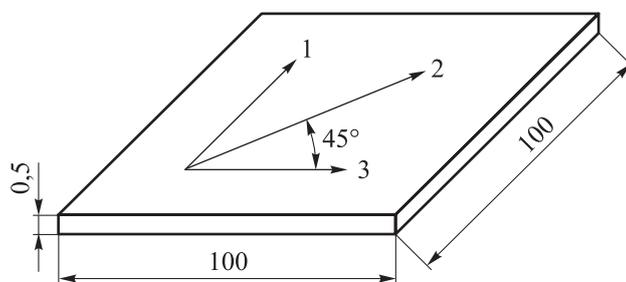
Для решения задачи расчета фазовых скоростей мод нормальной волны необходимо определиться со значениями скоростей продольных и поперечных волн в ПКМ. Экспериментально на образце из ПКМ с углеродными волокнами и связующим на основе эпоксидной смолы определены значения скоростей продольных и поперечных волн  $c_l = 2730$  м/с и  $c_t = 1500$  м/с. Решение уравнений (16) и (17) показано на рис. 2.



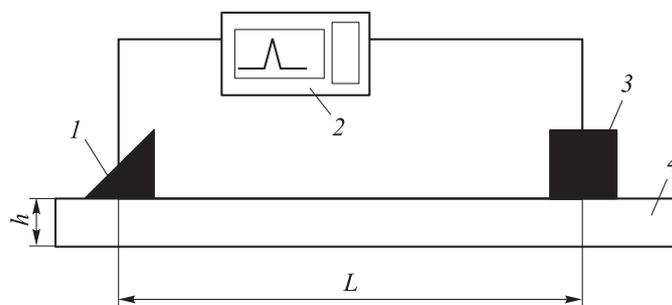
**Рис. 2.** Расчетные дисперсионные кривые для нормальных волн SV-поляризации

**Экспериментальная проверка результатов расчетов фазовых скоростей нулевых мод нормальной волны с SV-поляризацией.** Цель эксперимента — проверка правильности расчета скоростей нулевых мод нормальных волн с SV-поляризацией в ПКМ. Задачи эксперимента — измерение фазовых скоростей нулевых мод; изучение влияния направления движения волны в ПКМ на фазовые скорости нулевых мод.

В качестве образца для исследования выбрана пластина (рис. 3) из ПКМ толщиной 0,5 мм на основе углеродного волокна с укладкой 0/90. Состав исследуемого образца: эпоксидная смола ЭД-20; отвердитель изометилтетрагидрофталевого ангидрида (Китай); углеродная ткань на основе ровинга HTS 45 (TohoTenax®, Япония); тип плетения — полотно. Схема эксперимента представляла собой теневую схему контроля (рис. 4).



**Рис. 3.** Исследуемый образец (1–3 — направления распространения ультразвуковых волн)



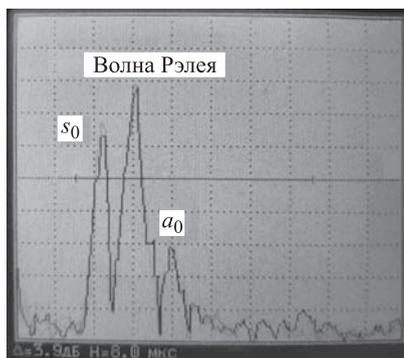
**Рис. 4.** Схема проведения эксперимента:

1 — ПЭП-источник; 2 — дефектоскоп; 3 — ПЭП-приемник; 4 — образец из ПКМ

В качестве оборудования применялись дефектоскоп УД 2-70 и комплект стандартных преобразователей. Расстояние  $L$  (см. рис. 4) от источника до приемника (между точками выхода преобразователей) 23...25 мм. Исследования проводились на частоте 1,25, 1,80, 2,50 МГц по направлениям распространения волны, соответствующим направлениям, которые показаны на рис. 3.

В процессе проведения эксперимента измерялось время прихода волны  $t$  (корректировалось с учетом времени задержки в призме источника и приемника) и проводился расчет фазовой скорости  $c_p = L / t$ .

Фотография экрана дефектоскопа с сигналами мод нулевого порядка нормальной волны представлена на рис. 5.



**Рис. 5.** Фотография экрана дефектоскопа при обнаружении сигналов мод нулевого порядка нормальной волны

На экране наблюдаются сигналы от мод нулевого порядка  $s_0$  (нулевая симметричная мода) и  $a_0$  (нулевая асимметричная мода) в ожидаемом временном диапазоне и сигнал от волны Рэлея, которая является «маяком» и позволяет подтвердить факт обнаружения сигналов от мод нулевого порядка (значения скоростей мод нулевого порядка близки и стремятся к значению скорости волны Рэлея [7]). Результаты эксперимента по измерению фазовых скоростей приведены в таблице.

**Расчетные и экспериментальные значения фазовых скоростей мод нулевого порядка нормальных волн SV-поляризации**

Мода	Частота, МГц	Произведение частоты колебаний и толщины материала $fh$ , МГц · мм	Фазовая скорость, м/с		Относительная погрешность, %
			Расчетная	Экспериментальная	
<i>Направление 1</i>					
$a_0$	1,25	0,62	1000	970	3,0
	1,80	0,90	1125	1190	5,8
	2,50	1,25	1150	1140	0,8
$s_0$	1,25	0,62	2410	2300	4,6
	1,80	0,90	2390	2300	3,7
	2,50	1,25	2373	2270	4,3
<i>Направление 2</i>					
$a_0$	1,25	0,62	1000	976	3,0
	1,80	0,90	1125	1180	6,0
	2,50	1,25	1150	1140	0,8
$s_0$	1,25	0,62	2410	2310	4,0
	1,80	0,90	2390	2300	3,7
	2,50	1,25	2373	2270	4,3

Мода	Частота, МГц	Произведение частоты колебаний и толщины материала $fh$ , МГц · мм	Фазовая скорость, м/с		Относительная погрешность, %
			Расчетная	Экспериментальная	
<i>Направление 3</i>					
$a_0$	1,25	0,62	1000	970	3,0
	1,80	0,90	1125	1190	5,8
	2,50	1,25	1150	1140	0,8
$s_0$	1,25	0,62	2410	2300	4,6
	1,80	0,90	2390	2300	3,7
	2,50	1,25	2373	2270	4,3

**Обсуждение полученных результатов.** Установлено, что в рассматриваемом случае значения фазовых скоростей нормальных волн, распространяющихся в различных направлениях относительно укладки углеродной ткани, оказались практически одинаковыми. Такой результат, скорее всего, является частным случаем. Например, в [15] показано, что для композиционных материалов на основе эпоксидной смолы и углеродного волокна параметры нормальных волн, распространяющихся в различных направлениях относительно плоскости изотропии, в общем случае будут отличаться. Здесь такой результат объясняется малой толщиной исследуемого образца.

Экспериментальные значения фазовых скоростей отличаются от расчетных незначительно. Максимальная относительная погрешность (отклонение экспериментального значения фазовой скорости от расчетного) определена при измерении фазовой скорости моды  $a_0$  на частоте 1,8 МГц и составила 6,0 %.

**Заключение.** В результате проведенного моделирования процесса распространения нормальной волны с SV-поляризацией в слоистой среде получены формулы для расчета амплитудных коэффициентов уравнений движения, которые позволяют вычислить все компоненты смещения или распределение энергии в любой точке слоистой среды. На примере трехслойной пластины показан принцип расчета коэффициентов затухания нормальной волны, распространяющейся в ПКМ. Теоретически получены и экспериментально подтверждены дисперсионные кривые для нормальных волн с SV-поляризацией на частотах 1,25; 1,80; 2,50 МГц, распространяющихся в армированном углеродным волокном ПКМ с матрицей на основе эпоксидной смолы.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бойчук А.С. Разработка технологий неразрушающего контроля монолитных конструкций из углепластика с использованием ультразвуковых антенных решеток. Дис. ... канд. техн. наук. М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.
- [2] Masserey B., Raemy C., Fromme P. High-frequency guided ultrasonic waves for hidden defect detection in multi-layered aircraft structures. *Ultrasonics*, 2014, vol. 54, iss. 7, pp. 1720–1728. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4716228>
- [3] Edalati K., Kermani A., Seiedi M., et al. Defect detection in thin plates by ultrasonic Lamb wave techniques. *Int. J. Mater. Prod. Technol.*, 2006, vol. 27, no. 3-4, pp. 156–172. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMPT.2006.011268>
- [4] Draudvilienė E.L., Raišutis R., Žukauskas E., et al. Validation of dispersion curve reconstruction techniques for the  $A_0$  and  $S_0$  modes of Lamb waves. *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, 2014, vol. 14, no. 7, art. 1450024. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219455414500242>
- [5] Жэн Б.-К., Лу Л. Нормальные волны в упругом слоистом полупространстве. *Акустический журнал*, 2003, т. 49, № 4, с. 501–513.
- [6] Rose J.L. *Ultrasonic guided waves in solid media*. Cambridge Univ. Press, 2014.
- [7] Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М., Наука, 1966.
- [8] Бреховских Л.М., Гончаров В.В. Введение в механику сплошных сред. М., Наука, 1982.
- [9] Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М., Наука, 1973.
- [10] Ochôa P., Villegas I.F., Groves R.M., et al. Diagnostic of manufacturing defects in ultrasonically welded thermoplastic composite joints using ultrasonic guided waves. *NDT E Int.*, 2019, vol. 107, art. 102126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.102126>
- [11] Алешин Н.П., Дерябин А.А. Разработка критериев оценки типов дефектов сварных соединений тонкостенных труб волнами Лэмба. *Контроль. Диагностика*, 2008, № 2, с. 30–33.
- [12] Toyama N., Takatsubo J. Lamb wave method for quick inspection of impact-induced delamination in composite laminates. *Compos. Sci. Technol.*, 2004, vol. 64, iss. 9, pp. 1293–1300. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9010046>
- [13] Orta A.H., Vandendriessche J., Kersemans M., et al. Modeling Lamb wave propagation in visco-elastic composite plates using a fifth-order plate theory. *Ultrasonics*, 2021, vol. 116, art. 106482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2021.106482>
- [14] Gresil M., Giurgiutiu V. Guided wave propagation in carbon composite laminate using piezoelectric wafer active sensors. *Proc. SPIE*, 2013, vol. 8695, art. 869525. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2009254>
- [15] Nayfeh A.H., Chimenti D.E. Free wave propagation in plates of general anisotropic media. *J. Appl. Mech.*, 1989, vol. 56, iss. 4, pp. 881–886. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3176186>

**Алешин Николай Павлович** (1941–2023) — академик РАН, д-р техн. наук, профессор, работал на кафедре «Сварка, диагностика и специальная робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Дерябин Алексей Александрович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Щипаков Никита Андреевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Козлов Денис Михайлович** — канд. техн. наук, начальник отдела ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана» (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Алешин Н.П., Дерябин А.А., Щипаков Н.А. и др. Особенности распространения нормальных волн SV-поляризации в полимерных композиционных материалах на основе углеродного волокна. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2023, № 3 (108), с. 85–99.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-3-85-99>

## FEATURES OF PROPAGATION OF THE SV-POLARIZED NORMAL WAVES IN THE COMPOSITE MATERIALS MADE OF CARBON FIBER

N.P. Aleshin<sup>1</sup>

A.A. Deryabin<sup>1</sup>

N.A. Shchipakov<sup>1</sup>

D.M. Kozlov<sup>2</sup>

aad@bmstu.ru

shchipak@bmstu.ru

denvwb5@mail.ru

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> “Welding and Testing” of MSTU n.a. Bauman, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

Based on analyzing results of the existing works, the paper demonstrates that the method of simulating motion of the SV-polarized normal waves using the classical theory of deformation appears promising in simulating their propagation in the layered polymer composite materials, as well as in studying the effect of discontinuities in such materials on the considered waves' parameters. A model was created to analyze specifics of the described waves' propagation in the

### Keywords

*Polymer composite material, non-destructive testing, SV-polarized normal wave, dispersion curves, phase velocity, attenuation*

polymer composite materials based on the carbon fiber. Formulas were obtained to calculate the amplitude coefficients for the motion equations to take into account acoustic characteristics of the polymer composite material layers and make it possible to calculate the displacement components or the energy distribution at any point in the layered medium. Phase velocity values were determined, and dispersion curves were constructed for various modes of the SV-polarized normal waves. Influence of the material layered structure on attenuation of those waves was considered, and the principle of correcting the formulas for calculating the attenuation coefficients taking into account the number of layers and their acoustic properties was outlined. Phase velocity values of the SV-polarized normal waves was experimentally verified on the sample of polymer composite materials confirming correctness of the simulation approaches

Received 05.06.2022

Accepted 30.01.2023

© Author(s), 2023

## REFERENCES

- [1] Boychuk A.S. Razrabotka tekhnologiy nerazrushayushchego kontrolya monolitnykh konstruksiy iz ugleplastika s ispolzovaniem ultrazvukovykh antenykh reshetok. Dis. ... kand. tekhn. nauk [Development of technologies of nondestructive control of monolithic structures made of carbon plastics using ultrasonic antenna arrays. Cand. Sc. (Eng.) Diss.]. Moscow, BMSTU, 2016 (in Russ.).
- [2] Masserey B., Raemy C., Fromme P. High-frequency guided ultrasonic waves for hidden defect detection in multi-layered aircraft structures. *Ultrasonics*, 2014, vol. 54, iss. 7, pp. 1720–1728. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4716228>
- [3] Edalati K., Kermani A., Seiedi M., et al. Defect detection in thin plates by ultrasonic Lamb wave techniques. *Int. J. Mater. Prod. Technol.*, 2006, vol. 27, no. 3-4, pp. 156–172. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMPT.2006.011268>
- [4] Draudvilienė E.L., Raišutis R., Žukauskas E., et al. Validation of dispersion curve reconstruction techniques for the  $A_0$  and  $S_0$  modes of Lamb waves. *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, 2014, vol. 14, no. 7, art. 1450024. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219455414500242>
- [5] Zhen B.-K., Lu L. Guided waves in a stratified half-space. *Acoust. Phys.*, 2003, vol. 49, no. 4, pp. 420–430. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1591297>
- [6] Rose J.L. *Ultrasonic guided waves in solid media*. Cambridge Univ. Press, 2014.
- [7] Viktorov I.A. *Fizicheskie osnovy primeneniya ultrazvukovykh voln Releya i Lemba v tekhnike* [Physical bases of Rayleigh and Lamb ultrasonic waves application in engineering]. Moscow, Nauka Publ., 1966.
- [8] Brekhovskikh L.M., Goncharov V.V. *Vvedenie v mekhaniku sploshnykh sred* [Introduction into continuum mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1982.

[9] Brekhovskikh L.M. *Volny v sloistykh sredakh* [Waves in layered media]. Moscow, Nauka Publ., 1973.

[10] Ochôa P., Villegas I.F., Groves R.M., et al. Diagnostic of manufacturing defects in ultrasonically welded thermoplastic composite joints using ultrasonic guided waves. *NDT E Int.*, 2019, vol. 107, art. 102126.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.102126>

[11] Aleshin N.P., Deryabin A.A. Working out of evaluation criteria of welds of light-wall tubing detect types by Lamb's waves. *Kontrol. Diagnostika*, 2008, no. 2, pp. 30–33 (in Russ.).

[12] Toyama N., Takatsubo J. Lamb wave method for quick inspection of impact-induced delamination in composite laminates. *Compos. Sci. Technol.*, 2004, vol. 64, no. 9, pp. 1293–1300. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9010046>

[13] Orta A.H., Vandendriessche J., Kersemans M., et al. Modeling Lamb wave propagation in visco-elastic composite plates using a fifth-order plate theory. *Ultrasonics*, 2021, vol. 116, art. 106482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2021.106482>

[14] Gresil M., Giurgiutiu V. Guided wave propagation in carbon composite laminate using piezoelectric wafer active sensors. *Proc. SPIE*, 2013, vol. 8695, art. 869525.

DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2009254>

[15] Nayfeh A.H., Chimenti D.E. Free wave propagation in plates of general anisotropic media. *J. Appl. Mech.*, 1989, vol. 56, iss. 4, pp. 881–886.

DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3176186>

**Aleshin N.P.** (1941–2023) — Academician of Russian Academy of Sciences, Dr. Sc. (Eng.), Professor, worked at the Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Deryabin A.A.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Shchipakov N.A.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Kozlov D.M.** — Cand. Sc. (Eng.), Head of Department, “Welding and Testing” of MSTU n.a. Bauman (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Aleshin N.P., Deryabin A.A., Shchipakov N.A., et al. Features of propagation of the SV-polarized normal waves in the composite materials made of carbon fiber. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2023, no. 3 (108), pp. 85–99 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-3-85-99>