

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ТРЕЩИН В ПОЛИМЕРНОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ

П.Г. Елизаров<sup>1</sup>  
А.А. Дерябин<sup>1</sup>  
М.Н. Дегтярев<sup>1</sup>  
Д.М. Козлов<sup>2</sup>

pelizarov@emtc.ru  
aad@bmstu.ru  
maxim-degtyarev@mail.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

Проведенный анализ работ по неразрушающему контролю полимерных композиционных материалов на основе углеродного волокна показал, что основными и опасными дефектами конструкций из этих материалов являются деформация и разрыв волокон, несплавления и вызванные ударом расслоения, а также усталостные трещины, возникающие под действием циклических нагрузок. Подобные дефекты наиболее сложно обнаружить методами неразрушающего контроля. Сделан вывод, что указанные сложно диагностируемые дефекты можно обнаруживать нормальными волнами SV-поляризации. Согласно результатам анализа имеющихся данных по моделированию распространения нормальных волн SV-поляризации, для решения задачи моделирования влияния геометрии дефекта на параметры нормальных волн актуально применение классической теории деформации. В результате моделирования влияния наличия плоскостного дефекта (трещины) на распространение нормальных волн SV-поляризации предложен критерий оценки угла наклона трещины в материале, выявлены диапазоны изменения фазовых скоростей, которые позволяют определить угол наклона трещины, расслоение и вертикальную трещину. Экспериментальная проверка образцов, изготовленных из полимерного композиционного материала на основе углеродного волокна с плоскостными трещинами, заложенными в толщине пластин, подтвердила результаты моделирования влияния указанных трещин на параметры распространения нормальной волны SV-поляризации

### Ключевые слова

*Полимерный композиционный материал, неразрушающий контроль, нормальные волны SV-поляризации, фазовая скорость, затухание, трещина, расслоение*

Поступила 12.11.2022

Принята 01.02.2023

© Автор(ы), 2023

**Введение.** Современные высокотехнологичные конструкции имеют множество узлов, изготовленных из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Прочность, превышающая прочность металлов, малый вес по сравнению с металлическими конструкциями — вот основные преимущества ПКМ. Однако возможные нарушения сплошности этих материалов негативно влияют на прочностные характеристики и ресурс конструкций. Согласно [1, 2], наиболее распространенными дефектами ПКМ являются деформации и разрыв волокон, непроклеи и расслоения, вызванные ударом. Кроме того, в многослойных конструкциях, которыми являются ПКМ, могут присутствовать усталостные трещины [3]. Наличие двух и более расслоений под действием циклических нагрузок приводит к образованию эксплуатационных трещин, имеющих минимальный размер и произвольный угол наклона. Подобные трещины наиболее сложно обнаружить существующими методами неразрушающего контроля. Результаты анализа научных работ отечественных и зарубежных ученых показали, что сложно ориентированные несплошности могут быть обнаружены нормальными волнами SV-поляризации.

Вопросы использования волн Лэмба в технике детально рассмотрены в [4, 5], в частности описано их применение для контроля листового материала и конструкций различной толщины. Подтверждена эффективность контроля нормальными волнами для выявления разнообразных дефектов материала: трещин, полостей, инородных включений, расслоений и пр. Был исследован исключительно изотропный материал и отсутствовали решения для слоистых сред.

Вопросы распространения упругих волн в слоистых средах рассмотрены в [6, 7], однако нормальные волны SV-поляризации не были исследованы. Тем не менее решения и научные подходы, представленные в перечисленных работах, могут быть использованы для моделирования распространения нормальных волн и их взаимодействия с несплошностями в ПКМ.

Результаты анализа существующих работ по вопросам моделирования влияния геометрии несплошности на параметры распространения нормальных волн SV-поляризации [8–14] показали, что указанная задача решена для случая изотропной среды, но остаются не решенными вопросы взаимодействия нормальных волн с несплошностями в случае распространения их в слоистых средах.

Так, в [8] решена двумерная задача о дифракции волн Лэмба на дефекте типа прямоугольной риски в пластине, выполнен анализ результатов численных расчетов коэффициентов отражения и прохождения мод нулевого порядка для различных значений глубины и ширины риски.

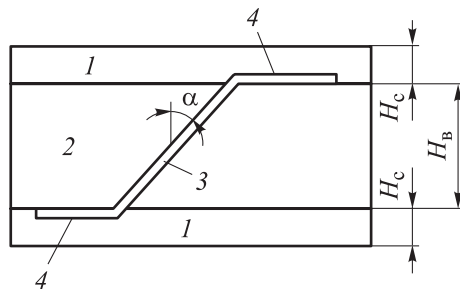
Приближенно решена трехмерная задача о рассеянии фокусированных пучков волн Лэмба и сдвиговых нормальных волн на дефекте типа круглого отверстия. Изучение угловых диаграмм направленности подтверждает возможность использования для обнаружения сквозных дефектов не только рассеянных, но и трансформированных нормальных волн.

Возможности нормальных волн исследованы в [9, 10], предложена теория возбуждения, распространения и дифракции нормальных и поверхностных волн на различных неоднородностях в тонких листах металла. Аналитическое решение для расчета изменения фазовых скоростей мод нормальной волны SV-поляризации в зависимости от угла наклона трещиноподобного дефекта (включая расслоение) для изотропного материала, а также критерий оценки типов дефектов, разработанный на основе данного аналитического решения, представлены в [11–14].

Результаты расчетов [11–14] подтверждены данными, приведенными в [1, 2], где рассмотрены вопросы влияния расслоения на фазовые скорости мод нормальной волны SV-поляризации. Этот факт подтверждает правильность применения методов моделирования с использованием классической теории деформации, что является частным случаем методики моделирования 5-SDT, которая в настоящее время применяется для моделирования распространения нормальных волн SV-поляризации [15].

С учетом изложенного нормальными волнами SV-поляризации можно обнаруживать сложно ориентированные дефекты, такая задача решена и для изотропных сред. Остается нерешенным вопрос о моделировании влияния геометрии несплошности слоистой среды на параметры нормальных волн SV-поляризации. Решение этого вопроса и является целью настоящей работы.

**Влияние несплошности в виде трещины (плоскостной дефект) на параметры распространения нормальных волн SV-поляризации.** Для моделирования наклонной трещины, образующейся под действием циклических нагрузок между двумя расслоениями, используем расчетную схему, представленную на рис. 1.

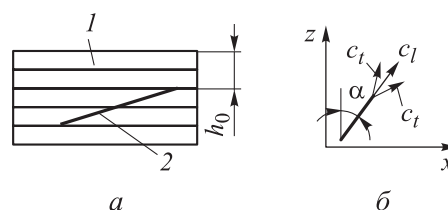


**Рис. 1.** Схема расположения плоскостного дефекта:  
 1 — связующее; 2 — волокно;  
 3 — трещина в волокне;  
 4 — расслоение

Согласно [6], нормальную волну SV-поляризации можно представить как комбинацию продольных и поперечных волн, поэтому на процесс распространения нормальных волн будут влиять дифрагированные волны. Схему распространения дифрагированных волн на трещине можно представить как поле продольных и поперечных колебаний на вершинах трещин, поле поперечных волн, переизлучаемых продольными дифрагированными лучами, распространяющимися вдоль поверхности трещины, и волн Рэлея, возбуждаемых на поверхностях трещины от ее острия.

Дифракцию на вершине трещины представим в виде полей продольной и поперечной волн, где продольная волна распространяется по направлению оси трещины (рис. 2).

**Рис. 2.** Схемы для расчета начальных условий координаты вершины трещины (а) и краевых волн (б):  
1 — композит; 2 — трещина



По отношению к системе координат  $Oxz$  эти углы можно рассчитать в зависимости от угла наклона трещины  $\alpha$ :

- для продольной волны угол распространения  $\alpha_l = \alpha$ , т. е. угол равен углу наклона трещины;
- для поперечной волны угол распространения равен третьему критическому углу относительно направления распространения продольной волны.

Согласно расчетам коэффициентов трансформации, представленных в [11–14], амплитуда поперечной волны в 10 раз меньше амплитуды продольной волны (например, при угле падения  $60^\circ$  амплитуда продольной краевой волны в 30 раз выше амплитуды поперечной краевой волны). Учитывая, что амплитуды боковых волн имеют еще более низкое значение, при расчете нормальной волны SV-поляризации, возникающей в результате дифракции, будем иметь в виду только краевые продольные волны.

Согласно [7] и результатам из [11–14], уравнения для нормальной волны SV-поляризации можно представить в виде

для симметричных мод

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

для асимметричных мод

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

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

В соответствии с результатами, взятыми из [11–14]:

$$\begin{aligned} \frac{C_1}{C_2} &= \frac{k_{31}^2 (\lambda_1 + 2\mu_1) \sin(k_{31} z) - k_{32}^2 (\lambda_2 + 2\mu_2) \sin(k_{32} z)}{-k_{31}^2 (\lambda_1 + 2\mu_1) \cos(k_{31} z) + k_{32}^2 (\lambda_2 + 2\mu_2) \cos(k_{32} z)}, \\ \frac{D_1}{D_2} &= \frac{\lambda_1 \chi_{31}^2 \sin(\chi_{31} z) - \lambda_2 \chi_{32}^2 \sin(\chi_{32} z)}{-\lambda_1 \chi_{31}^2 \cos(\chi_{31} z) + \lambda_2 \chi_{32}^2 \cos(\chi_{32} z)}, \\ \frac{C_1}{D_2} &= \frac{i\xi [\sin(\chi_{32} z) - \sin(\chi_{31} z)]}{k_{32} \sin(k_{32} z) - k_{31} \sin(k_{31} z)}. \end{aligned}$$

Здесь  $\lambda_1, \mu_1$  — постоянные Ламе для среды 1 (связующее);  $\lambda_2, \mu_2$  — постоянные Ламе для среды 2 (волокно); волновые числа:

$$\begin{aligned} k_{31} &= \sqrt{k_{l1}^2 - \xi^2}, \quad k_{l1} = \omega / c_{l1}, \quad \chi_{31} = \sqrt{k_{t1}^2 - \xi^2}, \quad k_{t1} = \omega / c_{t1}, \\ k_{32} &= \sqrt{k_{l2}^2 - \xi^2}, \quad k_{l2} = \omega / c_{l2}, \quad \chi_{32} = \sqrt{k_{t2}^2 - \xi^2}, \\ k_{t2} &= \omega / c_{t2}, \quad \xi = k_{l2} \sin \gamma_{l2} = k_{t2} \sin \gamma_{t2}, \end{aligned}$$

$c_{l1}, c_{t1}, c_{l2}, c_{t2}$  — скорости продольной и поперечной волн в средах 1 и 2;  $\gamma_{l1}, \gamma_{t1}, \gamma_{l2}, \gamma_{t2}$  — углы распространения продольных и поперечных волн по оси  $z$  в средах 1 и 2.

Для нахождения амплитудных коэффициентов  $C_1, C_2, D_1, D_2$  необходимо задать начальные условия (см. рис. 2): на вершине трещины ( $z = h_0$ ) амплитудные значения уравнений смещений (1), (2) для нормальных волн SV-поляризации равны соответствующим значениям краевой продольной волны  $U_x = U_{xl}$ ,  $U_z = U_{zl}$ ,  $h_0$  — координата вершины трещины;  $U_{xl}$ ,  $U_{zl}$  — проекции амплитуды продольной краевой волны на оси  $x, z$ .

Решая системы соответствующих уравнений (1), (2), с учетом начальных условий получаем

$$C_1 = \frac{U_{zl} - i\xi W \sin(\chi_{31}h_0)}{-k_{31}\sin(k_{31}h_0)},$$

где

$$W = \frac{\frac{U_{xl}}{i\xi \cos(k_{31}h_0)} + \frac{U_{zl}}{-k_{31}\sin(k_{31}h_0)}}{\frac{i\xi \sin(\chi_{31}h_0)}{-k_{31}\sin(k_{31}h_0)} + \frac{\chi_{31}\cos(\chi_{31}h_0)}{i\xi \cos(k_{31}h_0)}}.$$

Кроме амплитуды сигнала, еще одним важным параметром нормальной волны SV-поляризации, на который влияет геометрия несплошности в слоистой среде, является фазовая скорость. Здесь следует рассмотреть два случая.

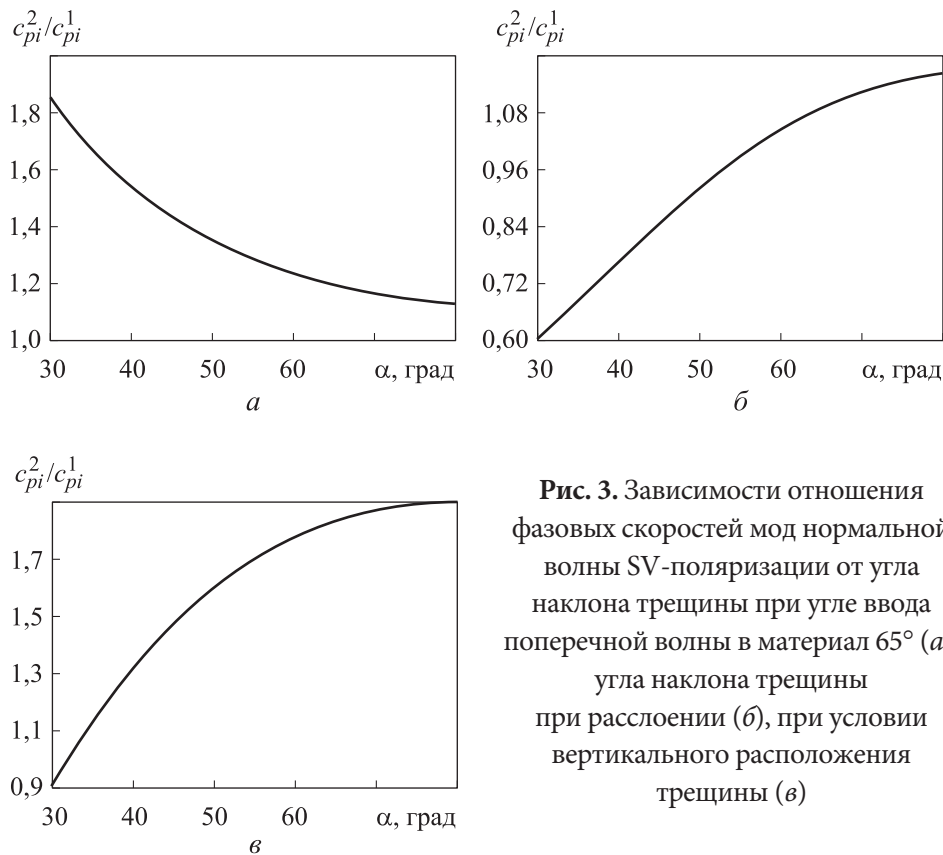
*Первый случай* — значение фазовой скорости стремится к значению скорости волны Рэлея. Согласно [7, 14], смещения  $U_x$ ,  $U_z$  становятся локализованными вблизи свободных границ пластины, что исключает влияние наличия внутренней несплошности на фазовые скорости мод. Например, в соответствии с дисперсионными кривыми для частоты 2,5 МГц и толщины пластины 4,0 мм такими являются моды нулевого порядка.

*Второй случай* — значение фазовой скорости отлично от скорости волны Рэлея. Значения фазовых скоростей  $(c_p)_n = \omega / \xi$  ( $\xi$  — проекция волновых чисел на ось, вдоль которой распространяются волны) будут зависеть от угла наклона трещины [7, 14], так как вместе с углом наклона трещины будет меняться и проекция волнового числа поперечной краевой волны, которая формирует нормальную волну SV-поляризации. В результате отношение фазовых скоростей волны Лэмба до дефекта и после дифракции будет иметь вид

$$\frac{c_{pi}^2}{c_{pi}^1} = \frac{\sin \gamma_{t2}}{\sin \alpha} \frac{c_{l1}}{c_{t2}}, \quad (3)$$

где  $c_{pi}^1$  — фазовая скорость  $i$ -й моды нормальной волны SV-поляризации до дефекта;  $c_{pi}^2$  — фазовая скорость  $i$ -й моды нормальной волны SV-поляризации, образованной в результате влияния несплошности (после дефекта);  $\alpha$  — угол наклона трещины.

На кривой (рис. 3, а), полученной расчетом по (3), показано отношение фазовых скоростей мод нормальных волн SV-поляризации. Результаты анализа кривой показывают, что значение фазовой скорости  $c_{pi}^2$  нормальной волны SV-поляризации уменьшается с увеличением угла наклона трещины (с увеличением угла наклона трещины от  $30^\circ$  до  $80^\circ$  значение фазовой скорости снижается примерно на 80 %), причем значение изменения фазовой скорости будет зависеть от проекции волнового числа  $\xi$  и, следовательно, от угла распространения поперечной (вводящей) в материал волны (3).



**Рис. 3.** Зависимости отношения фазовых скоростей мод нормальной волны SV-поляризации от угла наклона трещины при угле ввода поперечной волны в материал  $65^\circ$  (а), угла наклона трещины при расслоении (б), при условии вертикального расположения трещины (в)

При угле наклона трещины  $90^\circ$  имеет место расслоение, расположенное в среде 1 (связующее).

Результаты расчетов, выполненные для задачи влияния расслоения на параметры нормальной волны SV-поляризации с учетом  $(c_p)_n = \omega / \xi$  и (3), представлены на рис. 3, б. В случае расслоения нормальная волна SV-поляризации будет формироваться за счет поля краевых волн поперечного типа, а фазовая скорость зависит от проекции волновых чисел



$\xi$  и, следовательно, от угла распространения вводимой в материал волны. С увеличением угла ввода волны в материал возрастает фазовая скорость  $c_{pi}^2$  (с увеличением угла ввода волны от  $30^\circ$  до  $80^\circ$  значение фазовой скорости растет примерно в 2 раза).

В случае вертикального расположения трещины нормальная волна SV-поляризации также формируется краевыми поперечными волнами. При этом изменяются фазовые скорости мод, так как меняется проекция волнового числа, причем угол распространения поперечной краевой волны относительно вертикали равен третьему критическому углу. С учетом зависимости  $(c_p)_n = \omega/\xi$  и (3) рассчитана зависимость изменения фазовых скоростей от угла ввода (распространения) поперечной волны при условии вертикального расположения трещины (рис. 3, в). С увеличением угла ввода волны в материал возрастает значение фазовых скоростей  $c_{pi}^2$  (с увеличением угла ввода волны от  $30^\circ$  до  $80^\circ$  значение фазовой скорости увеличивается примерно в 2 раза).

Результаты анализа зависимостей, полученных по (3) и представленных на рис. 3, показали следующее: значения фазовых скоростей можно рассчитать, зная угол наклона трещины и угол ввода поперечной волны в материал. Так, при угле ввода поперечной волны  $65^\circ$  четко просматриваются границы отношений: расслоение  $c_{pi}^2/c_{pi}^1 = 1,09$ , наклонная трещина  $1,09 < c_{pi}^2/c_{pi}^1 < 1,9$ , вертикальная трещина  $c_{pi}^2/c_{pi}^1 = 1,9$ . Зная значение отношения фазовых скоростей  $c_{pi}^2/c_{pi}^1$ , можно рассчитать угол наклона трещины.

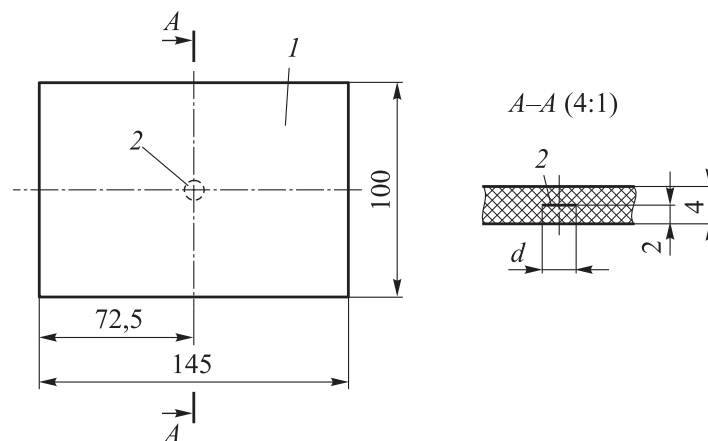
**Экспериментальная проверка расчетов влияния геометрических параметров плоскостного дефекта на фазовые скорости нормальной волны SV-поляризации.** Цель экспериментальных исследований — проверка правильности расчета скоростей и амплитуд нулевых мод и моды  $a_2$  нормальных волн SV-поляризации в ПКМ при наличии в образце плоскостного дефекта.

Задачи эксперимента — измерение амплитуд нулевых мод нормальных волн с SV-поляризацией в различных направлениях при отсутствии несплошности в объекте контроля и при ее наличии; измерение значений скорости моды  $a_2$  при отсутствии несплошности в объекте контроля и при ее наличии при угле ввода поперечной волны  $50^\circ$ .

Экспериментальные исследования проведены на образцах в виде пластин из ПКМ (рис. 4) толщиной 4,0 мм на основе углеродного волокна



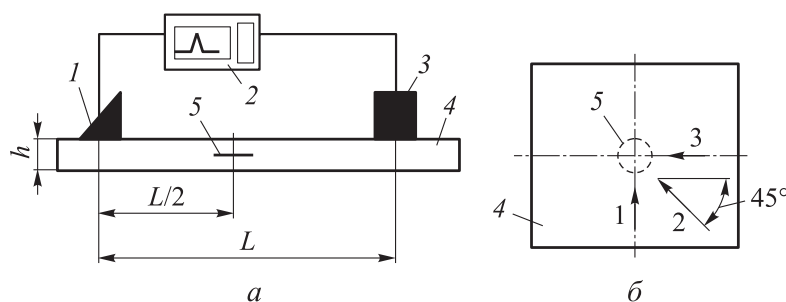
с укладкой 0/90 с плоскостными искусственными дефектами диаметром 4,0 и 8,0 мм, находящимися в середине толщины пластины. Эти плоскостные искусственные дефекты имитируют такие естественные дефекты, как горизонтальные трещины, расслоения или посторонние включения. Искусственные дефекты получены в процессе изготовления образцов путем закладки в середину фторопластовых пленок в виде дисков толщиной 0,4 мм.



**Рис. 4.** Схема образца из ПКМ:

1 — пластина; 2 — несплошность диаметром  $d$

Состав исследуемого образца: эпоксидная смола ЭД-20 (Россия); отвердитель изометилтетрагидрофталевый ангидрид (Китай); углеродная ткань на основе ровинга HTS 45 (TohoTenax®, Япония). Тип плетения — полотно. Схема эксперимента представляла собой теневую схему контроля (рис. 5).

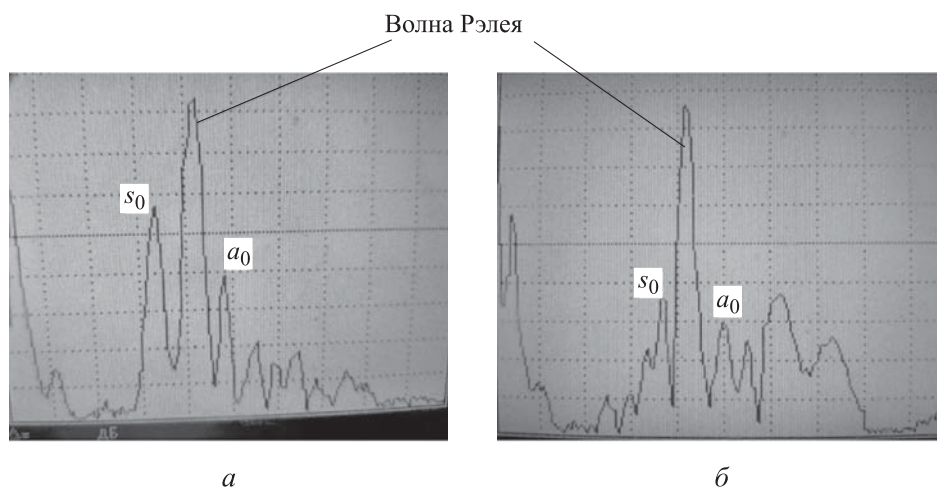


**Рис. 5.** Схемы установки ПЭП (а) и направлений (1–3) движения волны (б):

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

В качестве оборудования применялся дефектоскоп УД 2-70 и комплект стандартных преобразователей. Расстояние  $L$  (см. рис. 5) от источника до приемника (точками выхода преобразователей) находилось в диапазоне значений 23...25 мм. Исследования проводились на частоте 2,5 МГц с углом ввода поперечной волны  $50^\circ$ . Во время проведения эксперимента измерялась амплитуда сигналов мод нулевого порядка и время прихода моды  $a_2$ , проводился расчет фазовой скорости по формуле  $c_p = L/t$ ,  $t$  — измеренное время прихода волны (корректировалось с учетом времени задержки в призме источника и приемника).

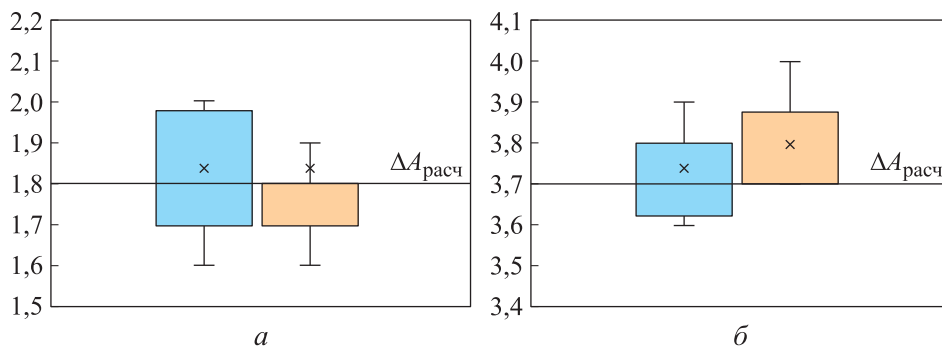
Сначала проводилось измерение амплитуды сигнала мод прошедших нормальных волн от источника к приемнику на бездефектных зонах образца (рис. 6, а), затем измерения амплитуд в зоне расположения искусственного дефекта (рис. 6, б).



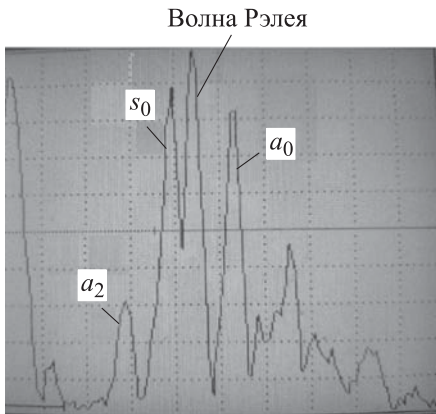
**Рис. 6.** Фотографии экрана дефектоскопа при обнаружении сигналов мод нулевого порядка нормальной волны SV-поляризации при отсутствии несплошности (а) и при ее наличии (б)

Измерение изменения амплитуды сигнала нулевых асимметричной ( $a_0$ ) и симметричной ( $s_0$ ) мод при прохождении нормальных волн в образце при отсутствии несплошности и при наличии искусственного дефекта проводилось 20 раз. Результаты измерений приведены на диаграммах (рис. 7).

Кроме того, проводилось измерение фазовых скоростей распространения моды  $a_2$  в зоне с наличием и отсутствием искусственного дефекта по трем направлениям (рис. 5, б). Фотография экрана дефектоскопа при обнаружении сигнала от моды  $a_2$  представлена на рис. 8. Результаты



**Рис. 7.** Результаты экспериментального определения изменения амплитуды сигнала нулевых асимметричной (а) и симметричной (б) мод при прохождении нормальной волны в образце при отсутствии и наличии искусственного дефекта диаметром 4 (■) и 8 мм (■)



**Рис. 8.** Фотография экрана дефектоскопа при обнаружении сигнала асимметричной моды нормальной волны SV-поляризации

измерения фазовых скоростей приведены в табл. 1, результаты расчета отношения фазовых скоростей моды  $a_2$  нормальной волны SV-поляризации после дефекта и до него — в табл. 2.

Таблица 1

**Значения фазовой скорости моды  $a_2$  при угле ввода поперечной волны  $50^\circ$**

Направление	Фазовая скорость, м/с		Относительная погрешность, %
	расчетная	измеренная	
<i>При отсутствии дефекта</i>			
1	1760	1805	2
2		1820	4
3		1810	3
<i>При наличии дефекта (расслоения)</i>			
1	1619	1640	1
2		1630	
3		1637	

Значения отношения  $c_{pa_2}^2 / c_{pa_2}^1$  при угле ввода поперечной волны  $50^\circ$ 

Направление	Отношение $c_{pa_2}^2 / c_{pa_2}^1$		Относительная погрешность, %
	расчетное	экспериментальное	
1	0,92	0,91	1
2		0,89	3
3		0,90	2

$c_{pa_2}^1$  — фазовая скорость моды  $a_2$  нормальной волны SV-поляризации до дефекта;  $c_{pa_2}^2$  — фазовая скорость моды  $a_2$  нормальной волны SV-поляризации, образованной в результате влияния несплошности.

**Обсуждение полученных результатов.** В результате экспериментальной проверки модели расчета изменения амплитуды сигнала нулевых мод при наличии дефектов максимальное значение относительной погрешности не превысило 11 % для асимметричной  $a_0$  моды и 8 % для симметричной моды  $s_0$ . Причем размер (протяженность вдоль направления распространения волны) дефекта не влияет на изменение амплитуды сигнала нулевых мод, что также согласуется с предложенной моделью.

Изменение времени прихода сигналов нулевых мод нормальной волны SV-поляризации не выявлено. Согласно [7, 14] при толщине объекта 4,0 мм фазовые и групповые скорости нулевых мод стремятся к фазовой скорости волны Рэлея, а смещения становятся локализованными вблизи свободных границ пластины, что исключает влияние расслоения на фазовые скорости нулевых мод. Относительная погрешность расчета отношения фазовых скоростей моды  $a_2$  нормальной волны SV-поляризации после дефекта и до него не превысила 4 %.

**Заключение.** В результате проведенного моделирования процесса распространения нормальной волны с SV-поляризацией в слоистой среде при наличии плоскостного дефекта типа трещины получены формулы для расчета амплитудных коэффициентов уравнений движения и изменения фазовых скоростей мод. Рассчитаны критерии, позволяющие определить тип плоскостного дефекта: вертикальная трещина, наклонная трещина и расслоение. Теоретические расчеты для расслоений различных диаметров (4 и 8 мм) подтверждены результатами экспериментов: для асимметричной нулевой моды максимальное отклонение результатов расчетов амплитуд от экспериментальных 11 % и для симметричной

нулевой моды 8 %. Относительная погрешность расчета  $c_{pa2}^2 / c_{pa2}^1$  моды  $a_2$  нормальной волны SV-поляризации после дефекта и до него не превышает 4 %.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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>
- [2] Toyama N., Takatsubo J. Lamb wave method for quick inspection of impact-induced delamination in composite laminate. *Compos. Sci. Technol.*, 2004, vol. 64, iss. 9, pp. 1293–1300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2003.10.011>
- [3] 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/10.1016/j.ultras.2014.04.023>
- [4] Rose J.L. *Ultrasonic guided waves in solid media*. Cambridge Univ. Press, 2014.
- [5] Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М., Наука, 1966.
- [6] Бреховских Л.М., Гончаров В.В. Введение в механику сплошных сред. М., Наука, 1982.
- [7] Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М., Наука, 1973.
- [8] Бобров В.Т., Лебедева Н.А. О характере отражения и трансформации импульса волн Лэмба на кромке и на дефекте типа риски. Ультразвуковые методы неразрушающего контроля. *Матер. Всесоюз. науч.-техн. конф.* Киев, 1970, с. 99.
- [9] Веревкин В.М., Паврос С.К. Развитие ультразвуковых методов и средств автоматизированного контроля листового проката. *Известия ГЭТУ*, 1997, № 505, с. 11–31.
- [10] Жэн Б.-К., Лу Л. Нормальные волны в упругом слоистом полупространстве. *Акустический журнал*, 2003, т. 49, № 4, с. 501–513.
- [11] Алешин Н.П., Дерябин А.А. Разработка критериев оценки типов дефектов сварных соединений тонкостенных труб волнами Лэмба. 1. Дифракция волн Лэмба. Плоскостной дефект. *Сварка и диагностика*, 2007, № 4, с. 24–26.
- [12] Алешин Н.П., Дерябин А.А. Разработка критериев оценки типов дефектов сварных соединений тонкостенных труб волнами Лэмба. 2. Дифракция волн Лэмба. Объемный дефект. *Сварка и диагностика*, 2007, № 4, с. 26–28.
- [13] Алешин Н.П., Дерябин А.А. Разработка критериев оценки типов дефектов сварных соединений тонкостенных труб волнами Лэмба. *Контроль. Диагностика*, 2008, № 2, с. 30–33.

[14] Дерябин А.А. Решение задачи дифракции волн Лэмба для объемных и плоскостных дефектов. *Известия вузов. Машиностроение*, 2008, № 7, с. 72–79.

[15] 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>

**Елизаров Павел Геннадиевич** — заместитель директора НОЦ «Композиты России» 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).

**Дегтярев Максим Николаевич** — инженер, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Козлов Денис Михайлович** — канд. техн. наук, главный научный сотрудник 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:**

Елизаров П.Г., Дерябин А.А., Дегтярев М.Н. и др. Исследование возможности обнаружения трещин в полимерном композиционном материале. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2023, № 5 (110), с. 32–47. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-5-32-47>

## POSSIBILITY OF DETECTING CRACKS IN THE POLYMER COMPOSITE MATERIAL

P.G. Elizarov<sup>1</sup>

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

M.N. Degtyarev<sup>1</sup>

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

pelizarov@emtc.ru

aad@bmstu.ru

maxim-degtyarev@mail.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

Analysis of works on non-destructive testing of the polymer composite materials was based on the carbon fiber and showed main and dangerous defects in their design including fiber deformation and rupture, incomplete fusion and impact-induced delamination, as well as fatigue cracks occurring under action of the

### Keywords

*Polymer composite material, non-destructive testing, SV normal waves, phase rate, attenuation, crack, delamination*

cyclic loads. Such defects could hardly be detected by the non-destructive testing methods. The paper concludes that these difficult-to-diagnose defects could be identified by the SV polarization normal waves. According to results of analyzing the available data on simulation of the SV polarization normal waves propagation, it becomes important to introduce the classical deformation theory to solve the problem of simulating the defect geometry effect on the normal wave parameters. As a result of simulating influence of the planar defect (crack) on propagation of the normal waves with the SV polarization, the paper proposes a criterion for evaluating the crack inclination angle in the material. Besides, it identifies range alterations in the phase rates making it possible to determine the crack inclination, its delamination, and vertical orientation. Experimental verification of samples produced from polymer composite material based on the carbon fiber with the planar cracks embedded in the plate thickness confirmed results of simulating these cracks effect on propagation parameters of the SV polarization normal wave

Received 12.11.2022

Accepted 01.02.2023

© Author(s), 202

---

## REFERENCES

- [1] 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>
- [2] Toyama N., Takatsubo J. Lamb wave method for quick inspection of impact-induced delamination in composite laminate. *Compos. Sci. Technol.*, 2004, vol. 64, iss. 9, pp. 1293–1300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2003.10.011>
- [3] 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/10.1016/j.ultras.2014.04.023>
- [4] Rose J.L. *Ultrasonic guided waves in solid media*. Cambridge Univ. Press, 2014.
- [5] Viktorov I.A. *Fizicheskie osnovy primeneniya ultrazvukovykh voln Releya i Lemba v tekhnike* [Physical bases of application of Rayleigh and Lamb ultrasonic waves in engineering]. Moscow, Nauka Publ., 1966.
- [6] Brekhovskikh L.M., Goncharov V.V. *Vvedenie v mekhaniku sploshnykh sred* [Introduction to the mechanics of continuous media]. Moscow, Nauka Publ., 1982.
- [7] Brekhovskikh L.M. *Volny v sloistykh sredakh* [Waves in layered media]. Moscow, Nauka Publ., 1973.



- [8] Bobrov V.T., Lebedeva N.A. [About the character of reflection and transformation of Lamb wave impulse on the edge and on the defect of the risk type]. *Ultrazvukovye metody nerazrushayushchego kontrolya. Mater. Vsesoyuz. nauch.-tekh. konf.* [Ultrasonic methods of nondestructive testing. Proc. All-Union Sci.-Pract. Conf.]. Kiev, 1970, p. 99 (in Russ.).
- [9] Verevkin V.M., Pavros S.K. Development of ultrasonic methods and means of the automated control of sheet rolling. *Izvestiya GETU*, 1997, no. 505, pp. 11–31 (in Russ.).
- [10] 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>
- [11] Aleshin N.P., Deryabin A.A. Working out of evaluation criteria of welds of light-wall tubing detect types by Lamb's waves. 1. Diffraction of Lamb waves. Planar defect. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], 2007, no. 4, pp. 24–26 (in Russ.).
- [12] Aleshin N.P., Deryabin A.A. Working out of evaluation criteria of welds of light-wall tubing detect types by Lamb's waves. 2. Diffraction of Lamb waves. Volumetric defect. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], 2007, no. 4, pp. 26–28 (in Russ.).
- [13] 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* [Welding and Diagnostics], 2008, no. 2, pp. 30–33 (in Russ.).
- [14] Deryabin A.A. Solution of the Lamb wave diffraction problem for volumetric and planar defects. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2008, no. 7, pp. 72–79 (in Russ.).
- [15] 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>

**Elizarov P.G.** — Deputy Director, REC Composites of Russia, 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).

**Degtyarev M.N.** — engineer, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Kozlov D.M.** — Cand. Sc. (Eng.), Chief Researcher, “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:**

Elizarov P.G., Deryabin A.A., Degtyarev M.N., et al. Possibility of detecting cracks in the polymer composite material. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2023, no. 5 (110), pp. 32–47 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-5-32-47>