# ВЫЯВЛЕНИЕ НАРУШЕНИЙ УКЛАДКИ СЛОЕВ ВОЛОКОН В УГЛЕПЛАСТИКАХ МЕТОДОМ ШИРОКОПОЛОСНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

© 2022 г. Ю.Г. Соколовская<sup>1,\*</sup>, Н.Б. Подымова<sup>1,\*\*</sup>, А.А. Карабутов<sup>1,2,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Россия 119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр.2

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия 119991 Москва, ул. Вавилова, 38 E-mail: \*yu.sokolovskaya@mail.ru; \*\*\*npodymova@mail.ru; \*\*\*aak@optoacoustic.ru

Поступила в редакцию 11.07.2022; после доработки 02.09.2022 Принята к публикации 09.09.2022

Показана возможность обнаружения нарушений укладки слоев армирующей ткани в углепластиках, представляющих собой зазоры между лентами углеродных волокон. Для этой задачи использовалась широкополосная акустическая спектроскопия с лазерным источником ультразвука. Широкая полоса частот зондирующего сигнала позволяет получить частотные зависимости для коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн в углепластике в спектральном диапазоне 1—11 МГц. На примере исследованной стрингерной панели показано, что в областях с наличием зазоров наблюдается локальный минимум внутри резонансного максимума коэффициента затухания, вызванный нарушением периодичности структуры. Сканирование объекта вдоль поверхности позволяет определять направление данных зазоров в плоскости укладки углеродной ткани.

*Ключевые слова*: лазерный ультразвук, коэффициент затухания ультразвука, продольные акустические волны, углепластики, полимерные композиты.

DOI: 10.31857/S0130308222100037, EDN: BTCPZH

## введение

Разработка методов неразрушающего контроля структуры углепластиков является в настоящее время актуальной задачей вследствие их широкого применения во многих отраслях производства. Так, например, они используются в авиации, ракетостроении, судостроении, атомной промышленности [1—4]. Углепластики представляют собой материал со слоистой периодической структурой, образованной слоями углеродной ткани и полимерной матрицы [5]. Конструкции из углепластика обладают высокой прочностью и жесткостью, однако их прочность может значительно ухудшаться из-за нарушений структуры, возникающих на этапе изготовления. Обнаружение структурных нарушений в углепластиках может осуществляться с помощью ультразвуковых методов (традиционных [4, 6] и лазерно-ультразвуковых [7]), инфракрасной термографии [8], акустико-эмиссионных методик [3], а также рентгеновской томографии [4]).

В современной промышленности для изготовления углепластиковых деталей и конструкций часто применяются методы автоматизированной выкладки углеродных лент [9—11]. Эти методы имеют важное преимущество — сокращение времени изготовления для крупногабаритных конструкций. Однако все же остается проблема возникновения производственных дефектов структуры материала. Типичным примером таких дефектов являются зазоры в слоях углеродной ткани, которые возникают между соседними лентами углеродных волокон вследствие неточности их выкладки [10—13]. Размеры таких зазоров составляют порядка миллиметра в направлении. Известно, что их наличие может приводить к существенному уменьшению прочности композитной конструкции. Так, например, в [14] проводилось численное моделирование поведения углепластика при прочностных испытаниях методом конечных элементов и было показано снижение прочности при наличии зазоров в слоях углеродной ткани. Проведенные в работах [11, 12] испытания также подтверждают уменьшение прочности на сжатие и сдвиг для углепластика с зазорами. Таким образом, необходима разработка методов неразрушающего контроля, позволяющих выявить данные нарушения структуры.

Так как при пропитке зазоры заполняются связующим, то при отверждении между лентами волокон образуются каналы из полимерной матрицы. Фактически, в местах их нахождения возникает локальное нарушение чередования слоев (углеродная ткань—полимерная матрица—углеродная ткань), и данный дефект можно рассматривать как локальное нарушение периодичности слоистого материала. Параметры слоистой периодической структуры (толщины и последовательность слоев, их акустические импедансы) оказывают влияние на характер частотной зависимости коэффициентов пропускания и коэффициентов затухания продольных акустических волн в такой структуре [15—19]. При этом в спектрах пропускания акустических волн такими структурами будут наблюдаться полосы прозрачности и непрозрачности, и вблизи полос непрозрачности величина коэффициента затухания ультразвука резко возрастает [17, 20]. Так, например, в работе [15] существование полос прозрачности и непрозрачности в спектре пропускания периодической структуры было показано на примере модельных структур из чередующихся металлических пластин с различным акустическим импедансом, а в [17, 18] — на примере структур из чередующихся слоев стеклянных пластин и слоев воды. Присутствие в структуре дефектов, нарушающих ее периодичность, приводит к возникновению пиков пропускания внутри полос непрозрачности [15, 17] —локальных экстремумов в частотных зависимостях коэффициентов затухания и пропускания.

Для выявления зазоров в слоях углеродной ткани в данной работе предлагается использовать метод широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником зондирующих импульсов продольных акустических волн (см., напр., [21]). Преимуществами метода являются большая амплитуда и малая длительность зондирующих ультразвуковых сигналов. Это позволяет применять его для исследования сильно поглощающих и рассеивающих ультразвук композитных материалов [16, 21]. Подбор параметров лазерного излучения и материала для оптико-акустического источника позволяет создавать зондирующие импульсы с заданной полосой частот, необходимой для конкретной задачи.

Таким образом, цель настоящей работы состоит в обнаружении зазоров между лентами углеродной ткани в углепластиках с использованием метода широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником. Основная идея состоит в том, что данный метод позволяет получать зависимости коэффициента затухания продольных акустических волн  $\alpha(f)$  в широком частотном диапазоне от долей до десятков мегагерц, при этом характер частотных зависимостей коэффициента затухания продольных акустических волн несет в себе информацию об особенностях структуры исследуемого композита. Это позволит выявить области с нарушением периодичности структуры углепластика.

## ИССЛЕДУЕМЫЙ ОБЪЕКТ

Схема структуры углепластика показана на рис. 1*а*. На рис. 1*б* приведено схематическое изображение зазоров между лентами углеродной ткани (в слоях под углами 0 и 45°). Фото зазоров (на примере полуфабриката препрега из нескольких слоев) представлено на рис. 1*в*. После отверждения материала на местах таких зазоров присутствуют каналы, заполненные полимерной матрицей, размер данных каналов для исследуемого материала составлял в среднем от 0,5 до 1,5 мм в направлении, перпендикулярном волокнам. В направлении вдоль волокон размер каналов может составлять до нескольких сантиметров или десятков сантиметров в зависимости от степени отклонения волоконной ленты от заданного положения при укладке материала, а также от размера конструкции. Отметим, что в углепластиках с перекрестным армированием данный дефект наблюдается чаще, чем в однонаправленном материале. В данной работе исследовалась углепластиковая конструкция – трехстрингерная панель, схема которой показана на рис. 1 *г*. Панель имела перекрестную структуру армирования: слои углеродной ткани в материале были уложены под углами 0,  $\pm 45$ , 90°. Пунктиром на рис. 1*г* выделена область толщиной 6 мм, состоящая из 32 слоев углеродной ткани, внутри этой области было выбрано несколько участков для ультразвукового исследования.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема широкополосного акустического спектрометра с лазерным источником показана на рис. 2a. Для возбуждения акустических зондирующих импульсов использовался Nd:YAG-лазер с диодной накачкой и модуляцией добротности, длина волны 1064 нм, длительность импульса 10 нс, энергия в импульсе 300 мкДж, частота следования импульсов 500 Гц. Излучение лазера с помощью оптического волокна доставлялось в оптико-акустический преобразователь, схема преобразователя показана на рис. 26. Оптико-акустический источник (ОАИ) представляет собой плоскопараллельную пластину из черного пластика. Такой источник обеспечивает полосу частот зондирующего сигнала от 1 до 12—15 МГц. Прозрачная призма находится в акустическом контакте с ОАИ и одновременно является звукопроводом широкополосного пьезоэлектрического приемника. Рабочая полоса частот используемого пьезоприемника с зарядовым предусилителем



Рис. 1. Схема структуры углепластика (*a*), схематичное изображение зазоров в слоях углеродной ткани (*б*), фото зазоров (*в*) и схема исследованной стрингерной панели (*г*).

составляла 0,5—25 МГц. При поглощении лазерного излучения в ОАИ происходит неоднородный нестационарный нагрев его приповерхностного слоя. Последующее тепловое расширение этого слоя приводит к возникновению в нем механического напряжения, формирующего два импульса продольных акустических волн на границе раздела между призмой и ОАИ. Один из них сразу проходит через призму на приемник (зондирующий сигнал показан на рис. 2 цифрой 8), другой проходит через слой ОА-источника и частично отражается на границах раздела источник—вода и вода—образец из-за рассогласования величин их акустических импедансов (показан цифрой 9). Оставшаяся часть этого импульса проходит через толщину исследуемого образца, отражается от его тыльной стороны и регистрируется пьезоприемником с временной задержкой относительно импульсов 1 и 2, зависящей от скорости звука и толщины образца (показан цифрой 10).





I — Nd:YAG-лазер; 2 — осциллограф; 3 — оптоволоконный кабель; 4, 5 — соединительные кабели для передачи сигнала с пьзеоприемника и синхронизации; 6 — оптико-акустический преобразователь; 7 — образец. Оптико-акустический преобразователь в увеличенном масштабе (б) (пояснение нумерации сигналов приведено в тексте).

На рис 3 a,  $\delta$  приведены временная форма и амплитудный спектр зондирующего акустического импульса, а на рис. 3e — временной трек сигнала, регистрируемого пьезоприемником при прохождении зондирующего импульса через исследуемый слоистый композит. Цифра 1 на рис. 3e соответствует зондирующему импульсу, возбуждаемому в ОА-источнике (что соответствует импульсу, обозначенному номером 8 на рис. 2). Под номером 2 показана суперпозиция импульсов, отраженных от границ раздела ОАИ—вода и вода—композит, наблюдаемая форма этих импульсов вызвана тем, что из-за шероховатости поверхности композитного образца и некоторой неравномерности



Рис. 3. Временная форма (*a*) и амплитудный спектр зондирующего акустического импульса (*б*), полный трек зарегистрированного сигнала для углепластика (*в*).

его толщины слой воды между образцом и ОАИ не будет идеально равномерным и тонким. Так как величина акустического импеданса воды меньше импеданса источника, то импульс от границы источник—вода будет приходить в противофазе относительно зондирующего. Импеданс образца, напротив, больше импеданса воды, и импульс от границы вода—образец приходит уже в фазе с зондирующим. Далее цифрой 3 обозначена совокупность импульсов, отраженных от периодически чередующихся слоев полимерной матрицы и углеродной ткани, также имеющих различные импедансы. Наконец, цифрой 4 показан импульс, отраженный от тыльной поверхности образца и дважды прошедший его толщину. Этот импульс несет информацию о затухании и скорости звука в исследуемом образце.

Динамический диапазон системы регистрации составлял около 50—60 дБ, максимальная низкочастотная чувствительность для данной установки составляет около 3 В/бар. Сигналы с пьезоприемника передавались на цифровой двухканальный запоминающий осциллограф Tektronix с аналоговой полосой частот 200 МГц и максимальной чувствительностью 2 мВ/дел. Далее расчет спектров сигналов проводился на персональном компьютере. Максимальное соотношение сигналшум регистрируемых электрических сигналов составляло порядка 2000.

Спектр ультразвукового импульса S(f), дважды прошедшего через объект известной толщины *h* при используемой косвенной схеме измерений (при которой излучатель и приемник находятся с одной и той же стороны от исследуемого объекта, аналогично ультразвуковому эхометоду), будет определяться следующим образом [22]:

$$S(f) = S_0(f)T_1T_2\exp[-\alpha(f)2H] = S_0(f)T_{\text{trans}}\exp[-\alpha(f)2H],$$
(1)

где  $S_0(f)$  — амплитудный спектр зондирующего сигнала;  $\alpha(f)$  — коэффициент затухания ультразвука;  $T_1 = 2Z_s/(Z_s + Z_{liq})$  — амплитудный коэффициент прохождения волны из ОА-источника в слой иммерсионной жидкости (воды);  $T_2 = 2Z_{liq}/(Z_{liq} + Z_c)$  — коэффициент прохождения из воды в образец;  $Z_s, Z_{liq}$  и  $Z_c$  — значения акустических импедансов ОА-источника, воды и композита. Из (1) можно вычислить коэффициент затухания продольных акустических волн в материале:

$$\alpha(f) = \frac{1}{2H} \ln \frac{S_0(f)}{S(f)} + \frac{1}{2H} \ln T_{\text{trans}}.$$
(2)

Локальность тестирования материала в поперечном направлении (в плоскости укладки углеродных волокон) составляла 1,5—2 мм и определялась диаметром ультразвукового зондирующего пучка, который, в свою очередь, определялся диаметром лазерного пучка, попадающего на поверхность ОАИ. При этом локальность будет такой при условии, что толщина образца меньше, чем дифракционная длина для акустической волны в образце. Для исследованных углепластиков величина дифракционной длины составляет около 15—16 мм, что больше, чем толщина исследованного участка конструкции. Поэтому можно считать, что локальность сохраняется в пределах 1,5—2 мм по всей толщине исследованного участка. При увеличении толщины материала свыше 15 мм локальность измерения коэффициента затухания будет ухудшаться из-за дифракционной расходимости ультразвукового пучка.

Временной профиль регистрируемого акустического сигнала представляет собой свертку функции импульсного отклика материала образца на опорный (зондирующий) сигнал и импульсной переходной характеристики лазерно-ультразвукового преобразователя, которая представляет собой временной профиль опорного акустического сигнала, возбуждаемого при поглощении лазерного импульса в ОАИ и зарегистрированного пьезоприемником. Этот профиль определяется временной зависимостью интенсивности поглощенного лазерного импульса, коэффициентом поглощения света в материале ОАИ, затуханием и дифракцией ультразвука в призме-звукопроводе и ограниченностью рабочей полосы частот пьезоприемника. Чтобы учесть это влияние, необходимо произвести обратную операцию — т. н. «деконволюцию» регистрируемого сигнала с импульсной переходной характеристикой лазерно-ультразвукового преобразователя. Эта операция производится в спектральном представлении и сводится к делению комплексных спектров регистрируемого сигнала и импульсной переходной характеристики лазерно-ультразвукового преобразователя и обратному преобразованию Фурье от результата деления.

Спектры ультразвуковых импульсов рассчитывались с использованием стандартного программного пакета быстрого преобразования Фурье с учетом амплитудных коэффициентов отражения акустической волны на каждой границе раздела в оптико-акустической ячейке (см. (1)). Также для спектров всех импульсов применялась процедура численного расчета компенсации частотнозависимого дифракционного искажения широкополосных ультразвуковых импульсов [23, 24]. Если при проведении измерений исследуемый углепластиковый образец располагается так, что зондирующий акустический импульс будет распространяться перпендикулярно слоям углеродной ткани (направлению выкладки лент углеродных волокон), то можно считать, что импульс распространяется в плоскости изотропии материала. В такой конфигурации исследуемый образец можно считать одномерной периодической структурой, и в спектре ультразвукового импульса, прошедшего через углепластик, должны существовать полосы прозрачности и непрозрачности. При этом период слоев композита, а также соотношение акустических импедансов углеродной ткани и полимерной матрицы будут определять частоту, соответствующую центру полосы непрозрачности.

Отметим, что влияние на затухание ультразвука в углепластиках также может оказывать и пористость материала [16]. Однако в данной панели пористость составляла менее 0,1 %, что подтверждается результатами рентгеновской томографии. Поэтому ее влияние на затухание можно не учитывать.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Частотные зависимости коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн были получены в частотном диапазоне от 1 до 11 МГц. Для f < 1 МГц коэффициент затухания не определялся из-за его малости и достаточно большой погрешности, возникающей из-за дифракции низкочастотных составляющих сигнала в материале. Для f > 11 МГц амплитуда прошедшего импульса достаточно мала и сравнима с уровнем шума (вследствие сильного затухания высоких частот в углепластике), поэтому на частотах выше 11 МГц коэффициент затухания также не определялся. Точность измерения коэффициента затухания акустических волн определяется погрешностью измерения толщины исследуемого образца, а также соотношением сигнал—шум для спектральной амплитуды каждой гармоники сигнала (около 8—10 %).

Данный экспериментальный диапазон позволяет выявить частоты, характеризующие периодичность материала. Примеры нормированных амплитудных спектров зарегистрированных сигналов S(f) для четырех участков (по два участка с дефектом и без дефекта) конструкции приведены на рис. 4. Видно, что в области 7—9 МГц характер этих зависимостей для участков с наличием и отсутствием зазоров будет отличаться, и поведение частотной зависимости коэффициента затухания  $\alpha(f)$  в этом диапазоне также будет различным.



Рис. 4. Примеры амплитудных спектров сигналов для участков панели с наличием и отсутствием нарушения укладки слоев.

Рассмотрим экспериментально полученные с использованием формулы (2) зависимости  $\alpha(f)$  для десяти различных участков стрингерной панели. На рис. 5*а* приведены  $\alpha(f)$  для пяти выбранных участков без зазоров (обозначим их № 1—5). Видно, что для бездефектной области наблюдается одиночный резонансный пик затухания. Возрастание  $\alpha(f)$  на частотах  $f_{res}$  соответствует так называемому «толщинному» резонансу затухания, вызванному периодичностью структуры углепластика. Значение  $f_{res}$  и максимума  $\alpha_{max}$  зависит от пространственного периода слоистой структуры и соотношения величин акустических импедансов чередующихся слоев. Отметим, в случае очень близких импедансов слоев и высокой адгезии выраженного максимума может и не наблюдаться. Для бездефектной области величина  $f_{res} \approx 8$  МГц при скорости звука на данной частоте  $C = 3015 \pm \pm 10$  м/с и при известном периоде слоев  $h_0 \approx 190$  мкм дают соотношение  $h_0 = C/2f_{res}$ . Это означа-



Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента затухания ультразвука в углепластиковой панели: бездефектные участки (*a*), участки с зазорами (*б*).

ет, что на частоте  $f_{res}$  длина волны ультразвука будет соответствовать удвоенному периоду слоев углепластика, что может быть использовано для измерения периода слоев  $h_0$  по измеренным C и  $f_{res}$ . Отметим, что для беспористых углепластиков дисперсия скорости ультразвука в исследуемом частотном диапазоне несущественна.

Теоретическая зависимость коэффициента затухания от частоты может быть получена моделированием распространения продольных акустических волн в многослойной периодической структуре с использованием широко известного метода передаточных матриц (см. напр., [15, 25, 26]). В этом методе используется связь комплексных амплитуд волн в соседних слоях периодической структуры через матрицу, элементы которой определяются акустическими импедансами слоев структуры (произведение плотности слоя на скорость звука в нем) и их толщинами. Рассматривалась среда из чередующихся слоев углеродных волокон и полимерной матрицы, при этом считаем, что для каждого слоя имеется как падающая, так и отраженная волна (частичное отражение происходит в каждом слое). Для связи комплексных амплитуд падающей и отраженной волны до и после прохождения *N* слоев будет справедливо соотношение:

$$\begin{pmatrix} P_0^+ \\ P_0^- \end{pmatrix} = \hat{A} \times \begin{pmatrix} P_N^+ \\ P_N^- \end{pmatrix}.$$
 (3)

Здесь  $P_0^+$  и  $P_0^-$  — падающая и отраженная волна на поверхности материала (при падении на первый слой);  $P_N^+$  и  $P_N^-$  — падающая и отраженная волны для *N*-го (последнего) слоя структуры. Матрица  $\hat{A}$  соответствует произведению матриц перехода для всех пар соседних слоев:  $\hat{A} = \hat{A}_{0,1} \times \hat{A}_{1,2} \times \ldots \times \hat{A}_{N-2,N-1} \times \hat{A}_{N-1,N}$  при этом для любой пары слоев:

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} \frac{z_n + z_{n-1}}{2z_n} e^{-ik_n l_n} & \frac{z_n - z_{n-1}}{2z_n} e^{ik_n l_n} \\ \frac{z_n - z_{n-1}}{2z_n} e^{-ik_n l_n} & \frac{z_n + z_{n-1}}{2z_n} e^{ik_n l_n} \end{pmatrix},$$
(4)

где  $z_n$  — акустический импеданс (произведение плотности слоя на скорость звука в нем);  $k_n$  — волновое число;  $l_n$  — толщина (все параметры для *n*-го слоя). Используя такой подход, можно рассчитать коэффициент затухания волны в слоистом материале. Рассчитанная таким способом зависимость  $\alpha(f)$  также приведена на рис. 5*a*.

На рис. 56 приведены экспериментальные зависимости  $\alpha(f)$  для пяти выбранных участков панели, содержащих зазоры (№ 6—10). Видно, что в таких участках резонансный пик содержит два локальных максимума (на частотах  $f_1 \approx 7,2$  и  $f_2 \approx 8,8$  МГц) и один локальный минимум (на частоте  $f \approx 8$  МГц). Таким образом, вследствие локального нарушения периодичности структуры углепластика действительно возникает локальный минимум внутри резонансного пика затухания  $\alpha(f)$ . Следовательно, характер частотной зависимости коэффициента затухания продольных акустических

волн в диапазоне 7—9 МГц несет информацию о наличии или отсутствии заполненных связующим зазоров в слоях углеродной ткани углепластика.

С целью построения ультразвуковых изображений структуры панели было проведено ее автоматизированное сканирование ОА-преобразователем. При этом можно получить изображения как в плоскости укладки слоев углеродных волокон, так и в перпендикулярной ей плоскости. Изображения формируются путем сбора треков сигналов в каждом исследованном участке композита (т.н. А-сканы, рис. Зв). Рис. 6а соответствует плоскости, перпендикулярной слоям углеродной ткани. Первая (верхняя) светлая полоса на этом рисунке представляет собой зондирующий сигнал, возбуждающийся в приповерхностном слое оптико-акустического источника (показано стрелкой). Так как акустический импеданс воды меньше акустического импеданса источника, то отражение от слоя воды происходит в противофазе (следующая темная полоса). Далее светлой линией представлена поверхность образца (так как импеданс верхнего слоя — углеродной ткани — больше импеданса воды). Под поверхностью материала видно чередование слоев углеродной ткани (более светлые полосы) и слоев матрицы (темные полосы). Цвет изображения будет соответствовать амплитуде сигнала в данной точке, при этом амплитуды могут иметь как положительное, так и отрицательное значение. В градациях серого белый цвет соответствует максимальному положительному значению амплитуды (амплитуды зондирующего сигнала на рис. 3в), а черный цвет — максимальному отрицательному (отражение от слоя воды), промежуточные амплитуды имеют серый оттенок, шкала амплитуд в относительных единицах также приведена на рис. 6а.



Рис. 6. Ультразвуковые изображения структуры углепластиковой панели (шкала соответствует амплитуде сигнала в относительных единицах) (*a*) и зазоров в слоях углеродной ткани (б).

На рис.  $6\delta$  приведены три примера ультразвуковых изображений структуры углепластиковой панели в плоскости слоев углеродной ткани (для участков с нарушением структуры). Размер приведенных участков панели составлял около 8×6 см. Здесь наблюдаются темные полосы, направление которых совпадает с направлением укладки наполнителя в данном слое композита (0 и 45°), которые и представляют собой искомые зазоры между лентами углеродной ткани (зазоры заполняются эпоксидной смолой, чей акустический импеданс ниже, чем импеданс волокна). Переход темной полосы в более светлую на некоторых изображениях связан с небольшой неравномерностью толщины слоя. Путем такого сканирования было выявлено полное соответствие между участками, в которых происходит изменение структуры резонансного пика коэффициента затухания, и участками, в которых наличие зазоров было выявлено по полученному ультразвуковому изображению.

Таким образом, характер  $\alpha(f)$  в исследуемом участке композитной панели действительно несет информацию о наличии или отсутствии нарушений укладки лент в слоях углеродной ткани.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе продемонстрирована возможность обнаружения нарушений структуры углепластика — зазоров в слоях углеродной ткани. Для этой цели использована методика широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником зондирующих ультразвуковых импульсов. Получены частотные зависимости коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн в диапазоне 1—11 МГц для нескольких участков исследуемой углепластиковой стрингерной панели. Показано, что в бездефектной области наблюдается резонансный максимум, частота которого зависит от периода слоев композита. Также показано совпадение экспериментальной частотной зависимости коэффициента затухания в бездефектном участке конструкции с расчетом, выполненным методом передаточных матриц. Продемонстрировано, что в данной панели существуют области, в которых резонансный максимум коэффициента затухания ультразвука имеет внутри себя локальный минимум, вызванный дефектом структуры материала. Получены ультразвуковые изображения зазоров между лентами волокон в слоях углеродной ткани и выявлено совпадение их расположения с областями, в которых наблюдается локальный минимум внутри резонансного максимума затухания. Предложенный метод может быть использован в промышленности как для контроля тестовых образцов углепластиков с целью усовершенствования условий и методик производства, так и для исследования особенностей структуры готовых композитных конструкций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зорин В.А. Опыт применения композиционных материалов в изделиях авиационной и ракетнокосмической техники (обзор) // Конструкции из композиционных материалов. 2011. № 4. С. 44—59.

2. *Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Григорьева Л.Н.* Трансмиссионные валы из углепластика. Матери-алы и технологии (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 8 (90). С 46—53.

3. Ser'eznov A.N., Stepanova L.N., Laznenko A.S., Kabanov S.I., Kozhemyakin V.L., Chernova V.V. Static Tests of Wing Box of Composite Aircraft Wing Using Acoustic Emission and Strain Gaging // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 8. Р. 611-619. [Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Лазненко А.С., Кабанов С.И., Кожемякин В.Л., Чернова В.В. Статические испытания кессона композиционного крыла самолета с использованием акустической эмиссии и тензометрии // Дефектоскопия. 2020. № 8. C. 12–21.]

4. Бойчук А.С., Диков И.А., Чертищев В.Ю., Генералов А.С. Определение пористости монолитных зон деталей и агрегатов самолета, изготавливаемых из пкм, с применением ультразвукового эхоимпульсного метода // Дефектоскопия. 2019. № 1. С. 3-9.

5. Тарнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А. Пространственно-армированные композиционные материалы. Справочник. М.: Машиностроение, 1987. 224 с.

6. Kachanov V.K., Sokolov I.V., Karavaev M.A., Kontsov R.V. Selecting Optimum Parameters of Ultrasonic Noncontact Shadow Method for Testing Products Made of Polymer Composite Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 10. P. 831—842. [Качанов В.К., Соколов И.В., Караваев М.А., Концов Р.В. Выбор оптимальных параметров ультразвукового теневого бесконтактного способа контроля изделий из полимерных композитных материалов // Дефектоскопия. 2020. № 10. С. 60-70.]

7. Sokolovskaya Yu.G., Podymova N.B., Karabutov A.A. Quantitative Evaluation of Porosity in Unidirectional CFRPs Using Laser Ultrasonic Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 3. Р. 201—208. [Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Количественная оценка пористости однонаправленных углепластиков с использованием лазерно-ультразвукового метода // Дефектоскопия. 2020. Nº 3. C. 14-22.]

8. Chulkov A.O., Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Bedarev A.M., Yarkimbaev Sh., Shagdyrov B.I. Synthesizing Data of Active Infrared Thermography under Optical and Ultrasonic Stimulation of Products Made of Complex-Shaped CFRP // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 7. P. 595-602. [Чулков А.О., Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Бедарев А.М., Яркимбаев Ш., Шагдыров Б.И. Синтез данных активной инфракрасной термографии при оптической и ультразвуковой стимуляции изделий из углепластика сложной формы // Дефектоскопия. 2020. № 7. С. 54—60.] 9. Lukaszewicz D. H.-J.A., Carwyn W., Potter K. D. The engineering aspects of automated prepreg layup:

History, present and future // Composites: Part B. 2012. V. 43. P. 997-1009.

10. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Влияние зазоров и нахлестов при выкладке препрегов на механические свойства углепластиков (обзор) // Электронный научный журнал «Труды ВИАМ». 2018. № 12 (72). С. 71—78.

11. Croft K., Lessard L., Pasini D.a, Hojjati M., Chen J., Yousefpour A. Experimental study of the effect of automated fiber placement induced defects on performance of composite laminates // Comp. Part A. 2011. V. 42. P. 484—491.

12. *Cartié D., Lan M., Davies P., Baley C.* Influence of embedded gap and overlap fiber placement defects on interlaminar properties of high performance composites // Materials. 2021. V. 14. 5332.

13. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2007. № 4. С. 23—32.

14. *Li X., Hallett S. R., Wisnom M. R.* Modelling the effect of gaps and overlaps in automated fibre placement (AFP) manufactured laminates // Science and Engineering of Composite Materials. 2015. V. 22. No. 2. P. 115—129.

15. Zhang V. Y., Lefebvre J.E., Gryba T. Resonant transmission in stop bands of acoustic waves in periodic structures // Ultrasonics. 2006. V. 44. P. 899—904.

16. Карабутов А.А., Подымова Н.Б., Беляев И.О. Исследование влияния пористости на затухание ультразвука в углепластиковых композитах методом лазерно-ультразвуковой спектроскопии // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 6. С. 714—721.

17. James R., Woodley S.M., Dyer C.M., Humphrey V.F. Sonic bands, bandgaps, and defect states in layered structures — theory and experiment // J. Acoust. Soc. Am. 1995. V. 97. No. 4. P. 2041—2047.

18. Scott W.R., Gordon P.F. Ultrasonic spectrum analysis for nondestructive testing of layered composite materials // J. Acoust. Soc. Am. 1995. V. 62. No. 1. P. 108–116.

19. Diez A., Kakarantzas G., Birks T.A., Russell P.St. J. Acoustic stop-bands in periodically microtapered optical fibers // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. P. 3481-3483.

20. Карабутов А.А., Кожушко В.В., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б. Исследование оптико-акустическим методом прохождения широкополосных ультразвуковых сигналов через периодические одномерные структуры // Акуст. Журн. 2000. Т. 46. № 4. С. 509—514.

21. Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Исследование частотных зависимостей фазовой скорости продольных акустических волн в пористых углепластиках с использованием широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником ультразвука // Известия Российской академии наук. Серия физическая. Т. 85. № 1. С. 127—133.

22. *Fitting D.W., Adler L.* Ultrasonic spectral analysis for nondestructive evaluation. New York: Plenum Press, 1981. 354 p.

23. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.

24. Karabutov A.A., Šavateeva E.V., Podymova N.B., Oraevsky A.A. Backward mode detection of laserinduced wide-band ultrasonic transients with optoacoustic transducer // Journal of Applied Physics. 2003. V. 87. No. 4. P. 2003—2014.

25. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989. 416 с.

26. Карабутов А.А. (мл.), Косевич Ю.А., Сапожников О.А. Осцилляции Блоха акустического поля в слоистой структуре // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 2. С. 158—169.