

С. В. Бочкарев^{а}, А. Ф. Сальников^а, А. Л. Галиновский^б*

*^аПермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ),
Россия*

^бМГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

**МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ АКУСТИЧЕСКОЙ
ПРОВОДИМОСТИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ
ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИ АНАЛИЗЕ ДЕФЕКТОВ
В ПОЛИМЕРНОМ КОМПОЗИТНОМ МАТЕРИАЛЕ**

S. V. Bochkarev^{}, A. F. Salnikov, and A. L. Galinovsky*

**MATHEMATICAL ALGORITHM FOR ESTIMATING THE ACOUSTIC
CONDUCTIVITY OF THE WAVEFRONT FOR VERIFICATION
OF A DIAGNOSTIC MODEL IN AN ANALYSIS OF DEFECTS
IN A POLYMER COMPOSITE MATERIAL**

Keywords: control, defect, model, wave diagnostics, laser

The modal analysis is considered as one of the lines of technical diagnostics for evaluating the quality of polymer composite materials (PCMs). It allows one to link the structure of modal characteristics of PCM element base in the amplitude-frequency domain. In the course of modal analysis, the complex construction of PCM as a heterogeneous material is transformed into a set of easy-to-understand independent systems with one degree of freedom. This structural approach is used to analyze the structure of PCM components. A laser is used to form an external action, with the help of which PCM components can form a wave field when vibrations pass through its thickness. Vibrations and deformations of PCM structural elements under a mechanical excitation are considered as the intrinsic vibration forms (vibration modes) of PCM elements — the filler and matrices. High-frequency laser actions extracts a constant wavefront, which is used for constructing an algorithm for recognition of the structure of PCM, including the detection of possible defects, such as changes in its density and various stratifications. To assess

*Автор, с которым следует вести переписку: bochkarev@msa.pstu.ru
Corresponding author: bochkarev@msa.pstu.ru

the technical condition of structural elements of PCM, a mathematical model was developed to assess the effect of defects on passage of a wave and the excitation of modal vibrations by the element base of PCM. The mathematical algorithm for estimating the acoustic conductivity of the wavefront, together with experimental data, was used for constructing a wave diagnostics algorithm. It made it possible to create an algorithm for technical diagnostics of PCM elements. An experiment was conducted on the laser action on a carbon fiber panel with specially created defects. The frequency values found in various zones of carbon fiber showed a qualitative and quantitative change in the structure of PCM. It is shown that, to construct an effective model for diagnosing the technical condition of PCM elements, more experimental are required studies.

Ключевые слова: контроль, дефект, модель, диагностика волновая, лазер

Рассмотрен модальный анализ как одно из направлений технической диагностики для оценки качества полимерных композитных материалов, позволяющий связать структуру модальных характеристик элементной базы полимерного композитного материала (ПКМ) в амплитудно-частотной области. В ходе модального анализа сложная конструкция ПКМ как гетерогенного материала преобразуется в набор простых для понимания независимых систем с одной степенью свободы. Такой подход использован при анализе структуры компонентов ПКМ. Для формирования внешнего воздействия, с помощью которого компоненты ПКМ дают возможность формировать волновое поле при прохождении колебаний по его толщине, применен лазер. Вибрация и деформации элементов конструкций ПКМ при механическом возбуждении рассмотрены как собственные формы (моды) колебаний элементов ПКМ — наполнителя и связующего. Высокочастотное лазерное воздействие извлекает постоянный волновой фронт, необходимый при построении алгоритма распознавания структуры ПКМ, в том числе и при определении возможных дефектов (изменение плотности, различные расслоения). Для оценки технического состояния конструктивных элементов из ПКМ разработана математическая модель, позволяющая определить влияние дефектов нахождение волны и возбуждения модальных колебаний элементной базой ПКМ. Математический алгоритм оценки акустической проводимости волнового фронта применен в построении алгоритма волновой диагностики; в совокупности с экспериментальными данными это дает возможность построить алгоритм технической диагностики элементов из ПКМ. Проведен эксперимент по лазерному воздействию на углепластиковую панель со специально нанесенными дефектами. Полученные значения частотных проявлений в различных зонах углепластика

свидетельствуют о качественном и количественном изменении в структуре ПКМ. Для построения эффективной модели диагностирования технического состояния элементов из ПКМ необходимо проведение большого количества экспериментальных исследований.

Введение

Сложность проблемы гарантированного определения качества и надежности изделий из полимерных композитных материалов (ПКМ) определяется не только тем, что они являются сложными объектами для контроля вследствие неоднородности структуры, анизотропии как гетерогенного материала, но и технологией их производства с учетом специфических физических свойств матрицы и армирующего материала.

Особенность технологии производства изделий из ПКМ заключается в принципе технологического “совмещения” — совмещения процессов получения композитного материала и конструкции, так как они протекают одновременно, что приводит к неравномерному армированию, скрытым структурным неоднородностям, обуславливающим в конечном итоге отклонение физико-механических характеристик материала от закладываемых в технических требованиях. Вследствие этого вопрос контроля ПКМ очень актуален, особенно для изделий ответственного назначения в ракетной, авиационной и космической технике.

Существующие средства технической диагностики используют различные методы контроля. При неразрушающем контроле ПКМ применяют метод на основе контроля теплового поля [1—3], создавая его статической нагрузкой [4], а также тепловизионный метод [5] как в процессе производства, так и в процессе эксплуатации отсеков космических аппаратов, ракетных двигателей и т.п. Такие методы позволяют обнаруживать только нарушения сплошности достаточно больших размеров, но не позволяют выявлять микротрещины, пересекающиеся дефекты, дефекты малых размеров, микропоры, и поэтому существует сложность интерпретации полученных результатов.

Используя ультразвуковой способ [6—8], можно определять физические параметры композита: массовую долю волокон, модуль Юнга, модуль сдвига и коэффициент Пуассона, расслоения [9, 10], площадь и размеры дефектов [11], прочностные характеристики, пористость [12, 13]. Для контроля пористости, неоднородности структуры использовали метод лазерно-ультразвуковой дефектоскопии [14, 15], для анализа дефектов элементов конструкций [16—18] — акустическую эмиссию или ультразвуковой метод [19].

В [20] для оценки структурных параметров углеродных КМ по ультразвуковым эхограммам предложен метод обработки нейронной сети, который менее вычислительно интенсивен по сравнению с методами обработки ультразвукового сигнала.

Для повышения точности и достоверности определения расслоения [21], прочности при сдвиге и сжатии предложено размещать оптические волокна с брэгговскими решетками послойно в слоях конструкции из ПКМ в процессе их изготовления [22—24], а в [25] — для измерения деформаций элементов анизотропной сетчатой конструкции. В [26] показано, что интегрированная волоконно-оптическая система диагностики может успешно применяться для контроля технического состояния конструкций из ПКМ при эксплуатации в режиме реального времени.

Задачей мониторинга состояния конструкции (SHM, structural health monitoring), является сбор (с помощью датчиков) данных по критическим конструктивным элементам, чтобы получать индикаторы обнаруживаемых в конструкции аномалий и тем самым следить за надежностью и безопасностью конструкции [27].

В последнее время в литературе большое внимание обращено на метод ультразвуковой диагностики [28, 29], который можно использовать для экспресс-диагностики материалов, выбора информативных признаков при решении конкретных задач диагностики и технологических режимов ультразвукового воздействия в ходе технологической подготовки производства изделий ракетно-космической техники.

Общий недостаток практически всех существующих методов и средств неразрушающего контроля заключается в следующем: методы позволяют осуществлять автоматизированный контроль изделий из ПКМ больших габаритов с обнаружением дефектов, но не определяют вид дефектов и их принадлежность к слоям изделия, т.е. не позволяют определять глубину залегания дефектов.

Таким образом, необходимо решить задачу выбора контрольно-диагностических средств, базирующуюся на технико-экономических показателях, в зависимости от их разрешающей способности и технологической себестоимости реализации. Возможность достижения необходимого уровня надежности отдельного контрольно-технологического элемента изделия может быть достигнута путем реализации трехкратного анализа качества и устранения последствий возможного брака в ходе выполнения рассматриваемой технологической операции.

Применяемые методы, основанные на волновых процессах в ПКМ, являются косвенными и основаны на установлении корреляционных связей между параметрами диагностики (акустическими характеристиками материала) и физико-механическими характеристиками полимерных композитных материалов путем сопоставления результатов неразрушающих и разрушающих испытаний [30]. Собственно, и акустические, и физико-механические характеристики материала обусловлены структурой и составом материала, поэтому между ними существует корреляционная связь. Однако при использовании традиционных волновых методов диагностики эта связь не всегда достаточно корректна в оценке структуры композитных материалов, поскольку нет обоснованных знаний о структурной комбинации матрицы и наполнителя, полученной в процессе изготовления изделия. Поэтому исследования и разработки проводятся в направлении изыскания

принципиально новых информативных параметров диагностики, притом таких, которые позволят определять свойства ПКМ с высокой точностью и достоверностью непосредственно в детали или конструкции без их разрушения, а также в направлении решения задачи сочетания параметров диагностики с определяемыми характеристиками ПКМ с целью установления их более тесных корреляционных связей [31, 32]. Для оценки эффективности того или иного метода контроля необходимо создать опытные образцы (образцы-свидетели), имитирующие различные виды дефектов: расслоения, неприклеи ПКМ к металлу и пр. [33].

Цель данной работы — разработка теоретических основ и волнового контроля диагностики технического состояния конструктивных элементов из ПКМ. Новизна заключается в разработке алгоритма определения собственных частот акустических колебаний панелей из ПКМ, основанного на оценке минимальных акустических потерь в частотной области.

Теоретическая часть

Одно из направлений технической диагностики, использующее модальный анализ, — связь модальных характеристик элементов ПКМ в амплитудно-частотной области как один из возможных способов рассмотрения возбуждаемых вибраций в конструкции ПКМ. Вибрация и деформации элементов конструкций ПКМ при механическом возбуждении на собственных (парциальных) частотах этих элементов характеризуются конкретными формами, которые можно рассматривать как собственные формы (моды) колебаний элементов ПКМ — наполнителя и матрицы. В типовых условиях эксплуатации характер вибрации будет сложным, включающим все собственные формы. Но изучив каждую собственную форму отдельно, можно будет анализировать все имеющиеся типы вибрации. Кроме того, в ходе модального анализа сложная конструкция, трудно воспринимаемая в своей целостности, преобразуется в набор простых для понимания независимых систем с одной степенью свободы. Это очень важный подход, который может быть использован при анализе структуры компонентов ПКМ. С помощью лазера можно формировать внешнее воздействие, которое даст возможность элементам ПКМ формировать волновое поле при прохождении колебаний по их толщине. В данном случае высокочастотное лазерное воздействие, подобно смычку скрипки, извлекает постоянный волновой фронт. Этот фронт может быть использован в построении алгоритма распознавания структуры ПКМ, в том числе в определении возможных дефектов, поскольку собственная частота элементной базы (наполнителя и матрицы и их парциальные частоты) будут четко формировать либо гармонию колебаний ПКМ, либо какофонию — как следствие физических причин нарушения связей в ПКМ: изменение плотности, различные расслоения и тому подобные отклонения от рабочей структуры ПКМ.

Для формирования оценки технического состояния конструктивных элементов из ПКМ наряду с физическим моделированием влияния определенных дефектов на волновое поле необходима разработка математической модели, позволяющей оценить влияние этих дефектов на прохождение волны и возбуждение модальных колебаний элементной базой ПКМ.

Математическая модель в этом случае должна строиться на уравнениях совместного движения упругой и вязкоупругой части композита [32]

$$\rho_s \frac{\partial^2 u_i^\varepsilon}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}^{s\varepsilon}}{\partial x_j} + f_i(x, t), \quad x \in \Omega_{s\varepsilon}, \quad s=1, 2, \quad (1)$$

$$\left[\mathbf{u}^\varepsilon \right]_{S_\varepsilon} = 0, \quad \left[\sigma_{ij}^\varepsilon n_j \right]_{S_\varepsilon} = 0, \quad (2)$$

где $f(x, t)$ — вектор объемной силы; x — координата-направление движения волны; t — время; \mathbf{u} — вектор перемещений; σ_{ij} — компоненты тензора напряжений волнового поля; ε — относительная толщина вязкоупругого слоя; ρ_s — плотность среды; n_j — количество слоев в направлении распространения акустической волны; $\Omega_{s\varepsilon}$ ($s = 1, 2$) n — единичный вектор нормали к поверхности $S_\varepsilon = \partial\Omega_{1\varepsilon} \cap \partial\Omega_{2\varepsilon}$; квадратные скобки означают скачок заключенной в них величины при переходе через S_ε .

Усредненная модель углепластика, соответствующая модели (1) и (2), построена при условии $\varepsilon \rightarrow 0$

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i(x, t), \quad x \in \Omega, \quad (3)$$

и описывает поведение сплошного вязкоупругого материала плотностью $\rho_0 = \rho_1(1-d) + \rho_2d$ определяющим соотношением

$$\sigma_{ij} = \alpha_{ijkh} e_{kh}(\mathbf{u}) + g_{ijkh}(t) \cdot e_{kh}(\mathbf{u}). \quad (4)$$

Здесь ρ_1, ρ_2 — плотность упругих и вязкоупругих слоев; d — относительный параметр толщины слоя ($0 < d < 1$); e_{kh} — компоненты тензора деформаций; kh — ортогональное направление деформаций; $\alpha_{ijkh}, g_{ijkh}(t)$ — постоянные коэффициенты свертков и ядра свертков соответственно (находим с помощью решения вспомогательных периодических задач).

Взяв за основу условия прохождения акустической волны через слоистый материал ПКМ, используем частотные зависимости, значения импеданса и жесткости, рассмотренные в [32] для вязкоупругого слоистого материала, а также полученные амплитудные зависимости и значения проводимости волнового фронта по телу панели ПКМ в виде

$$A_1(\omega) = \frac{(\eta_1^2(\omega) + \rho^2 c^2)(-1 + \exp[-2\beta(\omega)h])}{(\eta(\omega) - i\rho c)^2 - (\eta(\omega) + i\rho c)^2 \exp[-2\beta(\omega)h]}, \quad (5)$$

$$A_4(\omega) = -\frac{4i\rho c\eta(\omega)\exp[-\beta(\omega)h]}{(\eta(\omega) - i\rho c)^2 - (\eta(\omega) + i\rho c)^2 \exp[-2\beta(\omega)h]}, \quad (5)$$

где

$$\eta(\omega) = \sqrt{\frac{\rho}{2} \left(\sqrt{|C(\omega)| - C_1(\omega)} \right) - i\sqrt{|C(\omega)| + C_1(\omega)}},$$

$$\beta(\omega) = \frac{\omega}{|C(\omega)|} \sqrt{\frac{\rho}{2} \left(\sqrt{|C(\omega)| - C_1(\omega)} \right) + i\sqrt{|C(\omega)| + C_1(\omega)}},$$

ω — круговая частота; $\omega = 2\pi f$; f — частота волны при возбуждении колебаний; c — скорость звука в элементах панели; $C_1(\omega)$ и $C(\omega)$ — жесткость материала элементов панели матрицы и наполнителя соответственно.

Приняв, что $g(t) = 0$, а $C_0 = \text{const}$ — осреднённая жёсткость панели по толщине, $\beta = \omega / c_0$ — коэффициент отражения от элементов панели, $\eta = i\rho_0 c_0$, получим известные выражения для прохождения акустической волны для однородного слоя:

— давление в волне p и перемещения u будут связаны зависимостями

$$p_0(x_1, t) = \rho c \omega \exp(\pi / 2) u_0(x_1, t),$$

$$p_1(x_1, t) = \rho c \omega \exp(\pi / 2) u_1(x_1, t),$$

$$p_4(x_1, t) = \rho c \omega \exp(\pi / 2) u_4(x_1, t);$$

— коэффициенты отражения от слоя и коэффициенты прозрачности (проводимости) по давлению будут равны

$$V(\omega) = A_1(\omega) \exp(i\pi), W(\omega) = A_4(\omega);$$

— интенсивность волны при прохождении по толщине композитной панели будет определяться зависимостью

$$I_0 = \frac{|p_0|^2}{2\rho c}, \quad I_h = \frac{|p_4|^2}{2\rho c}.$$

Для нахождения модальной частоты панели из ПКМ необходимо определить максимальное значение амплитуды волнового фронта $A_1(\omega)$, $A_4(\omega)$ для наполнителя и для матрицы (минимум потерь). Для этого необходимо найти точки перегиба производной амплитуды по частоте. Используя аппарат математического анализа, необходимо взять первую производную по частоте от амплитудных зависимостей и значения проводимости волнового фронта по телу панели (система уравнений (5)). После определенных математи-

ческих преобразований модальная частота в первом приближении будет сведена к известной формуле

$$f = \frac{an}{2l},$$

где a — приведенная скорость звука в материале панели; $n = 1, 2$ — целые числа, соответствующие моде колебаний; l — характерная длина формирования стоячей волны в материале. Приведенные параметры скорости звука зависят от физико-механических свойств материалов, формирующих ПКМ.

При толщине пластины 2 мм и соотношении (%) наполнитель (углеволокно)/матрица 55/45 при плотности углепластика 1450 кг/м³ значение собственной частоты для углеволокна будет равно 175 Гц, а для матрицы — 150 Гц.

Приведенный математический алгоритм оценки акустической проводимости волнового фронта может быть использован в построении алгоритма волновой диагностики и в совокупности с экспериментальными данными — в построении алгоритма технической диагностики элементов из ПКМ.

Экспериментальная часть

Основная проблема в построении математической модели — создание априорного временного сигнала бездефектной структуры образца пластины по толщине.

Для оценки эффективности того или иного метода контроля необходимо создать опытные образцы (образцы-свидетели), имитирующие различные виды дефектов: расслоения, неприклеи ПКМ к металлу и пр. [33].

Зона генерирования акустической сферической волны с определенной амплитудой и частотой может быть сформирована облучением лазером в локальной точке композитного образца. Поскольку характеристики наполнителя и матрицы разные, то частотную составляющую композитного материала будем искать через осредненное значение скорости звука в данном материале в зависимости от количества слоев и различных дефектов, возникающих в ходе технологического процесса изготовления ПКМ и изделия. В зависимости от геометрии панели будет устанавливаться определенное волновое поле на частоте собственных (модальных) колебаний панели, т. е. на определённой осредненной скорости звука будет формироваться парциальная (собственная) частота по толщине панели. При наличии дефекта в структуре материала акустическая волна будет его огибать и проходить через него в зависимости от ориентации этого дефекта по отношению к фронту волны, тем самым меняя амплитудную и частотную составляющие волны, смещая или размывая частоту модальной характеристики. Геометрия и величина дефекта будут влиять на уровень “размыва” спектральной линии, огибающей спектр полученного сигнала.

Алгоритм модального анализа предполагает возбуждение колебаний и отклик конструкции на это возбуждение в частотном диапазоне импульса.

Диагностику по модальным характеристикам строили с использованием лазера в качестве нагрузочного элемента панели и сравнительного анализа

возникающего при этом нагружении волнового поля в композитном образце, что позволит провести оценку его технического состояния и определить зоны с локальными отклонениями (дефектами) в структуре материала.

Для эксперимента по лазерному воздействию в МИЦ МГТУ им. Н. Э. Баумана “Композиты России” методом вакуумной инфузии была вручную послойно выложена панель ПКМ ($500 \times 250 \times 2$ мм) из восьми слоев углеродного волокна с зонами дефектов диаметром 26—28 мм [34]: зона (образец) 1 — бездефектная (своеобразный эталон); зона 2 — нанесено машинное полусинтетическое масло марки ЛУКОЙЛ люкс SAE 5W-40, API SJ/CF вместо связующего; зона 3 — нанесена водоотталкивающая универсальная смазка WD-40; зона 4 — подвергнута механическому воздействию глубокими надрезами. В образцах 2, 3 имитировали межслойное расслоение, в образце 4 — разрыв волокон с нарушением адгезии. Панель укладывали на стол лазерного гравера на вибропоглощающий пакет, состоящий из войлока и двух слоев плотной бумаги, прижимали грузом, на датчик перед его установкой на панель наносили ультразвуковой гель.

Лазерное воздействие оказывали с помощью лазера Perfect laser pedb-400 мощностью 30 Вт с длиной волны 1060 нм: размер пятна 50 мкм, длительность импульса 200 нс в центр каждой из четырех областей панели. Датчик акустической эмиссии устанавливали на расстоянии 100 мм от места воздействия лазерного луча на поверхность панели на бездефектную область, перемещая каждый раз при изменении зоны воздействия лазера с целью сохранения неизменного расстояния от точки воздействия до датчика акустической эмиссии. Для рассматриваемого режима лазерного воздействия минимальный размер дефекта в ПКМ может быть 1,5—2,0 мм.

Сигнал акустической эмиссии регистрировали с помощью системы “Малахит АС-15А/2” с активными преобразователями ДР15И АТ с приме-

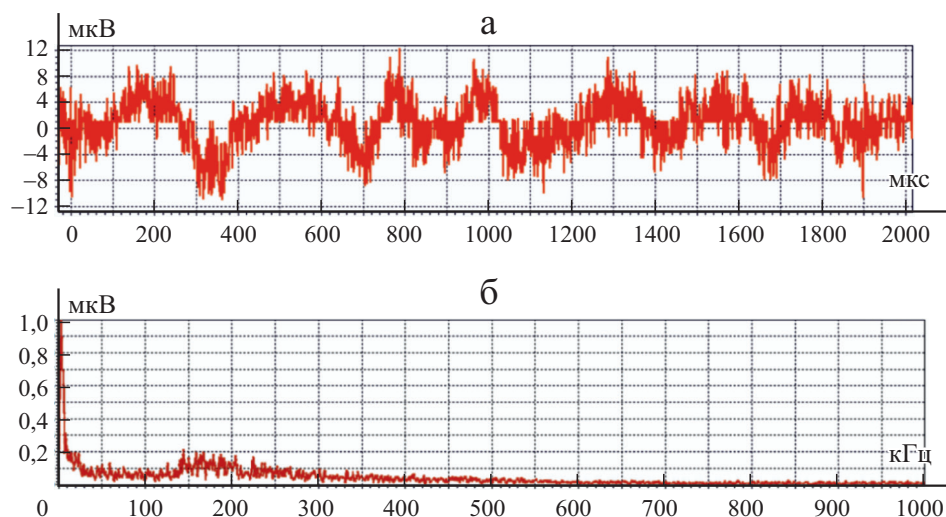


Рис. 1. Временной сигнал (а) и спектр сигнала (б) возбужденной волны в зоне 1.

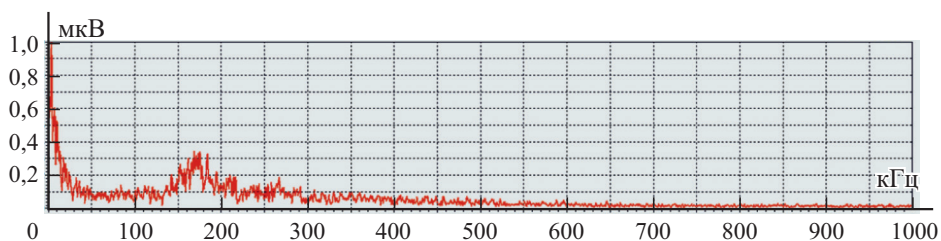


Рис. 2. Спектр сигнала возбужденной волны в зоне 2.

нением программного комплекса AEstudio. Регистрировали форму волны и спектр сигнала. Запись сигнала начиналась по достижении порогового значения амплитуды сигнала.

На рис. 1 приведены волновое поле бездефектного образца, зафиксированное при прохождении возбужденных колебаний при лазерном облучении, и спектр сигнала. Анализ временного и спектрального сигналов этой области указывает на деструктивную зону частотной области практически с постоянным значением амплитуд на частотах 140 и 168 Гц и “размыв” на частоте 170 Гц, но меньшей амплитуды. Можно предположить, что модальные характеристики этих частот связаны с конструктивной структурой матрицы и наполнителя ПКМ. А характер размыва временного сигнала с определенной последовательностью изменения амплитуды во времени подтверждает наличие определенной неравномерной по толщине плотности материала, обусловленной разным значением физико-механических свойств наполнителя и матрицы. “Размыв” в спектре сигнала на частоте 170 Гц показывает эту зону границы наполнителя и матрицы. В первом приближении данный сигнал может быть принят за условно “идеальную” укладку наполнителя в теле матрицы ПКМ.

На рис. 2 приведен спектр волнового сигнала зоны 2. Наличие полусинтетического масла в матрице ПКМ привело к существенному размыву парциальных частот матрицы в диапазоне от 140 до 165 Гц, при этом парциальная частота наполнителя 170 Гц практически не “размыта”.

Наличие водоотталкивающей универсальной смазки привело к изменению парциальной частоты наполнителя до 190 Гц (рис. 3), а существенно изменило парциальные частоты связующего на частоте 165 Гц.

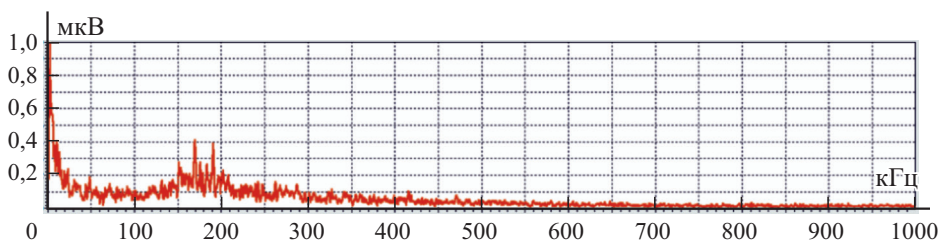


Рис. 3. Спектр сигнала возбужденной волны в зоне 3.

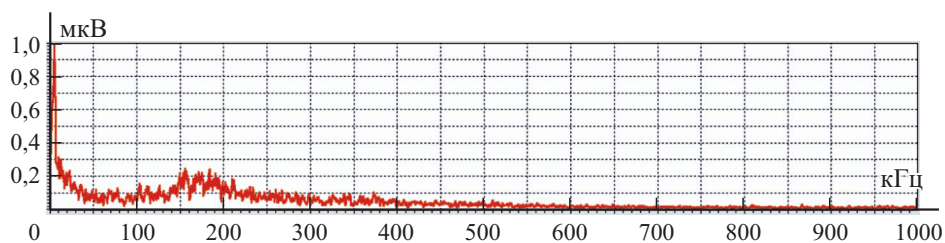


Рис. 4. Спектр сигнала возбужденной волны в зоне 4.

Механическое воздействие обусловило существенное разделение зоны парциальных частот ПКМ, появилась дополнительная частотная область от 165 до 180 Гц. На рис. 4 можно выделить смещение частот связующего в более низкую область 155 Гц, а парциальная частота наполнителя практически осталась в границах частот “идеального” образца.

Приведенные примеры частотных проявлений в различных зонах свидетельствуют о том, что влияние того или иного изменения в структуре ПКМ может быть выявлено качественно и количественно. Для построения достаточно эффективной модели диагностирования технического состояния элементов из ПКМ необходимо проведение значительного объема экспериментальных исследований с целью накопления априорной информации по влиянию конкретных физических отклонений при изготовлении изделий или получении повреждений в процессе их эксплуатации.

Заключение

На основе доработанной теории прохождения акустической волны через композитный материал получен новый алгоритм определения собственных (модальных) частот акустических колебаний панелей из ПКМ, основанный на оценке минимальных акустических потерь в частотной области, что является новым теоретическим вкладом в разработку диагностических моделей по анализу технического состояния композитных конструкций.

Положенная в основу теоретическая модель определения модальных частот позволила разработать волновой метод диагностирования для ПКМ, основанный на прохождении акустических волн через ПКМ и возможность их анализа по измененным модальным частотам при возбуждении этих колебаний в структуре материала по направлению распространения волнового фронта акустической волны, позволило разработать новый подход в оценке технического состояния по структурному анализу изменения этих частот при прохождении акустических и генерируемых волн элементной базой материала изделия.

Математический аппарат, используемый в структуре диагностической модели, позволяет в зависимости от геометрии изделия, процентных соотношений наполнителя и матрицы, а также учитывая имеющиеся микропоры в структуре самого углеродного волокна и в слоях матрицы, получить

диапазон собственных частот элементной базы ПКМ, анализ которых в сочетании с экспериментальными данными даст возможность проводить классификацию возможных дефектов по толщине ПКМ.

Исследования выполнены в рамках гранта РФФИ 18-29-18081.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент US № 7,829,855 Methods and apparatus for determining fibre orientation/ Reid Matthew E., Fedosejevs Robert. —2010.11.09.

2. Патент РФ №2 666 159 Устройство комплексного автоматизированного неразрушающего контроля качества многослойных изделий/ Шишкин С. Р., Архипенков О. А., Уланов А. С., Будадин О. Н., Рыков А. Н. — 2018.—№ 25. — С. 1—20.

3. Кузнецов А. О., Будадин О. Н., Монахова Е. Г., Гуськов А. В. Тепловой метод оценки стабильности технологий изготовления изделий из композитных материалов при их массовом производстве// Контроль. Диагностика. — 2017. — № 11. — С. 20—24.

4. Степанова Л. Н., Чернова В. В., Кабанов С. И. Анализ модового состава сигналов акустической эмиссии при одновременном тепловом и статическом нагружении образцов из углепластика Т800// Контроль. Диагностика. — 2018. — № 11. — С. 4—13.

5. Заец Н. П., Карпенко О. Н., Чижов И. А., Олешко В. С. Способ теплового контроля авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов// Конструкции из композиционных материалов. — 2018. — № 1. — С.62—68.

6. Патент РФ №2 473 894 Ультразвуковой способ контроля плотности в процессе эксплуатации деталей из высоконаполненных композитных материалов на основе октогена/ Костюков Е. Н., Вахмистров С. А., Михайлов А. Л., Колмаков О. В. — 2013. — № 3. — С. 1—5.

7. Патент US № 8236914 Self-assessing mechanochromic materials/ Stephanie L. Potisek, Douglas A. Davis, Scott R. White, Nancy R. Sottos, Jeffrey S. Moore. — 2012.08.07.

8. Патент РФ №2443975 Способ визуализации и контроля динамических деформаций поверхности и ударных нагрузок/ Банишев А. Ф., Банишев А. А.—2012. — № 6. — С. 1—7.

9. Imielińska K, Castaings M, Wojtyra R, Haras J, Le Clezio E, Hosten B. Air-coupled ultrasonic C-scan technique in impact response testing of carbon fibre and hybrid: Glass, non-destructive testing of low-velocity impacted composite material laminates. 21 carbon and Kevlar/epoxy composites// J. Mater. Proc. Technol.—2004. — No. 157—158. — P. 513—522.

10. Chiachio J, Bochud N, Chiachio M, Cantero S, Rus G. A multilevel Bayesian method for ultrasound-based damage identification in composite laminates// Mech. Systems Signal Proc.—2017.— No. 88.—P.462—477.

11. Рыков А. Н., Артемьев Б. В. Опыт практического определения погрешности суммарной площади дефектов при автоматизированном ультразвуковом контроле изделий из полимерных композиционных материалов// Контроль. Диагностика. — 2018. — № 1. — С. 18—24.

12. Бойчук А. С., Чертищев В. Ю., Диков И. А., Генералов А. С., Славин А. В. Влияние морфологии пор на ультразвуковой контроль пористости в углепластике эхоимпульсным методом// Контроль. Диагностика. — 2018. — № 8. — С. 22—29.

13. Батаев В. А., Степанова Л. Н., Лапердина Н. А., Чернова В. В. Акустико-эмиссионный контроль ранней стадии развития дефектов при статическом нагружении образцов из углепластика// Контроль. Диагностика. — 2018. — № 8. — С. 14—20.
14. Соколовская Ю. Г., Карабутов А. А. Лазерно-ультразвуковая дефектоскопия конструкций из мультиаксиальных полимерных композиционных материалов// Конструкции из композиционных материалов. — 2018. — № 1. — С. 56—61.
15. Соколовская Ю. Г., Жаринов А. Н., Карабутов А. А. Применение лазерно-ультразвукового метода для контроля неоднородностей распределения полимерной матрицы в углепластиковых конструкциях// Контроль. Диагностика. — 2018. — № 9. — С. 48—53.
16. Степанова Л. Н., Чернова В. В. Анализ структурных коэффициентов сигналов акустической эмиссии при статическом нагружении образцов из углепластика с ударными повреждениями// Контроль. Диагностика. — 2017. — № 6. — С. 34—41.
17. Барсук В. Е., Анохин Г. Г., Степанова Л. Н. Прочностные испытания элементов авиационных конструкций из углепластика с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии // Полет. — 2016. — № 7. — С. 53—60.
18. Башков О. В., Проценко А. Е., Брянский А. А., Ромашко Р. В. Диагностика полимерных композитных материалов и анализ технологий их изготовления с использованием метода акустической эмиссии//Механика композит. материалов. — 2017. — Т. 53, № 4. — С. 765—774.
19. Кумар М. Р., Гош А., Каруппанан Д. Численное и экспериментальное определение характеристик вторично склеенного композитного соединения внахлестку ультразвуковым методом// Механика композит. материалов. — 2018. — Т. 54, № 2. — С. 379—390.
20. Диков И. А., Бойчук А. С., Далин М. А., Чертищев В. Ю., Генералов А. С. Связь прочностных характеристик, пористости и данных ультразвукового контроля для образцов из ПКМ, полученных по автоклавной и инфузионной технологиям// Контроль. Диагностика. — 2018. — № 11. — С. 40—51.
21. Ковалев А., Ручевский С., Кулаков В., Весоловский М. Оптимальное расположение электродов для определения расслоения в композитном материале методом процентного изменения электрического сопротивления//Механика композит. материалов. — 2019. — Т. 55, № 6. — С. 1173—1184.
22. Федотов М. Ю., Будадин О. Н., Васильев С. А., Медведков О. И., Козельская С. О. Возможности контроля внешних механических воздействий волоконно-оптической системой диагностики, встроенной в углепластики различных типов// Контроль и диагностика. — 2019. — № 3. — С. 38—47.
23. Патент РФ № 2633288 Способ диагностики надежности и предельного ресурса эксплуатации многослойных конструкций из композитных материалов/ Будадин О. Н., Кульков А. А., Козельская С. О., Каледин В. О. — 2017. — № 29. — С. 1—27.
24. Патент РФ 2641638 Композитная конструкция со встроенной измерительной системой/Хант Дж. Х. (US), Белк Дж. Х. (US). — 2018. — № 2. — С.1—4.
25. Анискович В. А., Будадин О. Н., Заикина Н. Л., Кутюрин В. Ю., Муханова Т. А., Разин А. Ф., Соловей А. В., Водопьянов В. А. Измерение деформаций с использованием волоконно-оптических датчиков в процессе прочностных испытаний анизотропных конструкций из композиционных материалов// Контроль. Диагностика. — 2018. — № 7. — С. 44—49.
26. Федотов М. Ю., Будадин О. Н., Васильев С. А., Медведков О. И., Козельская С. О. Исследование интегрированной волоконно-оптической системы диагностики углепластика после воздействия теплового и тепловлажностного старения// Контроль. Диагностика. — 2018. — № 11. — С. 26—31.
27. Патент US № 20070118313 Systems and methods for detecting discontinuous fibers in composite laminates/Vaccaro Christopher M. — 2007. — May 24. — P. 1—11.

28. Барзов А. А., Галиновский А. Л., Голубев Е. С., Сысоев Н. Н., Федянин А. А., Филимонов А. С. Ультразвуковая экспресс-диагностика анизотропии поверхностного слоя материалов и изделий ракетно-космической техники // Инж. журн.: Наука и инновации. — 2018. — № 6(78). — С. 1—14.

29. Barzov A. A., Bochkarev S. V., Galinovski A. L. Functionally deterministic model of hydroerosion in studying the physically latent ability of a composite material to defect formation // Mech. Compos. Mater. — 2020. — Vol. 56, No. 4. (Russian Original Vol. 56, No. 4, July-August, 2020). — P. 497—504.

30. Сальников А. Ф. Диагностика технического состояния крупногабаритных деталей газотурбинных двигателей по модальным характеристикам // Вест. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Аэрокосм. техника. — 2018. — № 55. — С. 61—69.

31. Карабутов А. А., Подымова Н. Б., Соколовская Ю. Г. Локальные соотношения Крамерса—Кронига для коэффициента затухания и фазовой скорости продольных ультразвуковых волн в полимерных композитах // Акуст. журн. Физ. акустика. — 2019. — Т. 65, № 2. — С. 182—189.

32. Шамаев А. С., Шумилова В. В. Прохождение плоской звуковой волны через слоистый композит с компонентами из упругого и вязкоупругого материалов // Акуст. журн. — 2015. — Т. 61, № 1. — С. 10—20.

33. Соколовская Ю. Г., Подымова Н. Б., Карабутов А. А. Лазерный оптико-акустический метод количественной оценки пористости углепластиков на основе измерения их акустического импеданса // Акуст. журн. — 2020. — Т. 66, № 1. — С. 86—94.

34. Галиновский А. Л., Бочкарев С. В., Нелюб В. А. Технологии производства и диагностики композитных конструкций летательных аппаратов: учеб. пособие / А. Л. Галиновский, С. В. Бочкарев, В. А. Нелюб. — Старый Оскол: ТНТ, 2019. — 384 с.

35. Прохорова М. А., Юлиана Зонляйн, Цзя Чжэньюань. Создание дефектной композиционной панели для отработки методов диагностики // Политехн. молодеж. журн. — 2020. — № 06(47). — 10 с.

Поступила в редакцию 23.12.2020

Окончательный вариант поступил 24.03.2021

Received Dec. 23, 2020 (March 24, 2021)
