

УДК 678.8:620.179

В.В. Мурашов¹**ОЦЕНКА СТЕПЕНИ НАКОПЛЕНИЯ МИКРОПОВРЕЖДЕНИЙ СТРУКТУРЫ ПКМ В ДЕТАЛЯХ И КОНСТРУКЦИЯХ НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-73-81

Предложено оценивать степень накопления микрповреждений в полимерных композиционных материалах по их прочностным характеристикам, определяемым неразрушающим методом по комплексному параметру, включающему значения скорости распространения импульса УЗК в плоскости изделия и значения частоты основной составляющей спектра импульса УЗК, прошедшего изделие по толщине в прямом и обратном направлениях.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.3. «Методы неразрушающих исследований и контроля» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: неразрушающий контроль, полимерные композиционные материалы, микрповреждения, прочностные характеристики.

It is suggested to assess the micro-damage accumulation degree in polymer composites by their strength characteristics determined by the nondestructive method using the integrated parameter that contains the ultrasonic testing pulse velocity values in the product plane and the main ultrasonic testing impulse spectral component frequency values that got through the product dimension direct and reverse.

The work is executed within implementation of the complex scientific direction 2.3 «Methods of nondestructive research and control» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: non-destructive testing, polymer composite materials, micro-damages, strength characteristics.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Необходимость разработки перспективной технологии оперативной диагностики полимерных композиционных материалов (ПКМ) непосредственно в деталях и конструкциях без их разрушения и создание новых методик для оценки изменений состава и физико-механических свойств материалов в процессе длительной эксплуатации авиационно-космической техники с целью обеспечения ее надежности и безопасности эксплуатации в последнее время приобрели значительную актуальность [1–9].

При длительном воздействии на ПКМ температуры, влажности, механических нагрузок и других климатических факторов в процессе эксплуатации изделий появляются микрповреждения структуры, которые вызывают изменение физико-механических свойств материала детали или конструкции [10–20] и существенно ухудшают эксплуатационные характеристики изделий.

Основное направление исследований в данной работе – выбор и обоснование информативных параметров диагностики, т. е. тех акустических характеристик материала, которые могут нахо-

диться в достаточно тесной корреляционной связи со степенью накопления микрповреждений, т. е. с физико-механическими характеристиками ПКМ. Другим важным направлением является изучение вопроса изменения структуры материала, определяющей уровень физико-механических свойств, по мере накопления микрповреждений и прежде всего прочностных характеристик.

Материалы и методы

Микрповреждения структуры, как и пористость материала, вызывают нарушение его сплошности. Однако если пористость ПКМ оценивать величиной объемной пористости, то оценить степень накопления микрповреждений аналогичной характеристикой не представляется возможным, так как микрповреждения обычно не имеют раскрытия и не заполнены каким-либо газом.

Оценивать степень накопления микрповреждений ПКМ, работающих в условиях температурно-силового нагружения, целесообразно с помощью прочностных характеристик материала [21–23]. Очевидно, что по мере накопления мик-

роповреждений структуры материала его прочностные характеристики изменяются, и их изменение может быть критерием степени накопления повреждений в материале [24, 25].

Для неразрушающей оценки физико-механических характеристик ПКМ необходимо найти такие оптимальные критерии, которые выражаются через параметры диагностики, определяемые непосредственно в изделии при одностороннем доступе без его разрушения [26]. Прочностные характеристики могут быть определены неразрушающим методом по параметрам диагностики (акустическим характеристикам материала), находящимся в корреляционной связи с искомыми прочностными характеристиками материала [27].

Модуль упругости, как и прочностные характеристики, определяется структурой материала. Существует довольно тесная корреляционная связь модуля упругости, скорости ультразвуковых (УЗ) колебаний и прочности материала. Однако микротрещины, не влияющие на скорость УЗ колебаний (упругая волна, имеющая длину волны, равную ~20 мм, свободно «огibtает» препятствия меньшего размера), значительно ухудшают (уменьшают) прочностные характеристики материала. Поэтому при определении скорости УЗ колебаний целесообразно выбирать максимально высокие частоты, верхний порог которых ограничивается затуханием УЗ колебаний в материале на контролируемом участке объекта контроля (ОК).

В настоящее время существует два подхода к вопросу неразрушающего контроля физико-механических свойств ПКМ.

Первый подход основан на использовании функциональных зависимостей между механическими и физическими характеристиками материала (например, между модулем упругости и скоростью распространения УЗ колебаний). При этом исследование ведутся в двух направлениях.

В работах первого направления ПКМ рассматриваются как неоднородные составные материалы, представляющие собой регулярную многослойную среду из чередующихся слоев армирующего материала и слоев полимерного связующего.

В работах второго направления ПКМ рассматриваются как однородные ортотропные упругие тела, к которым применимы известные теории упругости анизотропных сред. При этом ПКМ рассматривается как сплошная однородная среда, упругие, прочностные и другие физико-механические свойства которой анизотропны. Второе направление является более перспективным, так как позволяет в некоторой степени учесть технологические дефекты изготовления, дефекты структуры и прочие дефекты.

Второй подход к определению физико-механических свойств основан на использовании корреляционных связей между физико-механическими и другими характеристиками ПКМ и параметрами диагностики.

Вопросами оценки физико-механических характеристик неметаллических конструкционных материалов (в основном стеклопластиков) в нашей стране занимаются уже свыше тридцати лет, однако широкого внедрения этих методов не наблюдается. Такое же положение в этой области и за рубежом. Связано это с невысокой точностью оценки физико-механических характеристик акустическими методами и нестабильностью получаемых результатов ввиду того, что затухание УЗ колебаний, а это наиболее информативный параметр диагностики, определяется с низкой точностью. Так, погрешности в 10% при определении затухания УЗ колебаний в материале считаются хорошим результатом [28].

На рис. 1 представлены корреляционные связи прочности при межслойном сдвиге и прочности при сжатии углепластика марки КМУ-4лт с удельным затуханием импульса УЗ колебаний, прошедшего в материале по толщине ОК в прямом и обратном направлениях, определенного по амплитуде донного сигнала. Обращает на себя внимание низкий коэффициент корреляции представленных однопараметровых корреляционных связей.

В результате теоретического обоснования связи прочности и акустических параметров материалов установлены функциональные взаимосвязи [28] между прочностью при растяжении σ_p , модулем упругости E , коэффициентом затухания δ и скоростью продольных волн c :

$$\sigma_p = E \left(a + \frac{b}{\delta \cdot c} \right), \quad (1)$$

где E – модуль упругости, определенный по полученным значениям скорости распространения УЗ колебаний с помощью специальной номограммы [22] при известной плотности материала (определенной радиометрическим методом или по скоростям распространения УЗ колебаний в трех различных направлениях); a и b – коэффициенты, установленные экспериментально по результатам разрушающих испытаний образцов данной марки материала с данной структурой армирования, на которых предварительно измерены c и δ .

Уравнение (1) является эмпирическим, так как в него входят коэффициенты a и b , определенные экспериментально.

Основным недостатком этого метода является малая точность определения физико-механических характеристик ПКМ, в частности модулей упругости и прочности. Это связано с тем, что коэффициент затухания УЗ колебаний определяют по изменению амплитуды принятого сигнала (первой полуволны) при изменении расстояния между излучающим и приемным преобразователями, а величина амплитуды в значительной степени зависит от условий контакта преобразователей с изделием (силы прижатия, вязкости контактной жидкости, шероховатости, кривизны поверхности изделия).

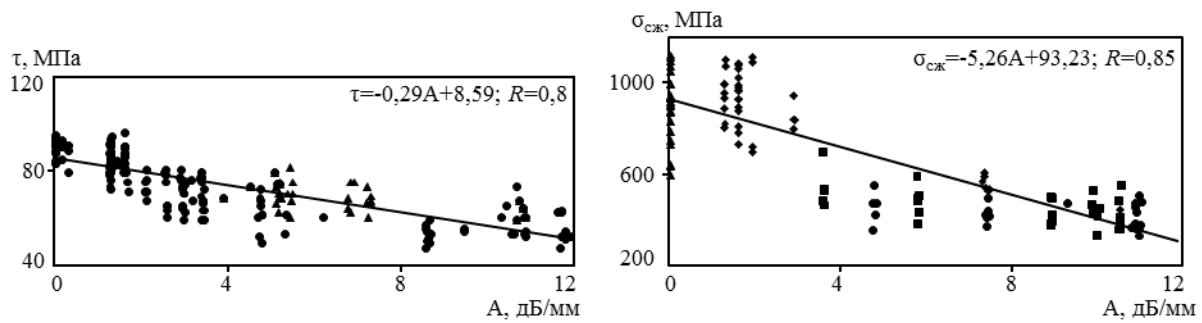


Рис. 1. Корреляционные связи (R – коэффициент корреляции) механических свойств (τ – предел прочности при межслойном сдвиге; $\sigma_{сж}$ – предел прочности при сжатии) углепластика КМУ-4лт с акустическими характеристиками материала (A – удельное затухание импульса)

В данной работе исследована возможность использования лишь таких параметров неразрушающего контроля, которые могут быть измерены непосредственно в изделиях с достаточной точностью.

Физические основы метода оценки физико-механических свойств ПКМ

Известно [29], что параметры распространения упругих волн (например, скорость) находятся в функциональной зависимости от упругих свойств материала. При воздействии переменной силы на анизотропную среду в ней возникнут упругие возмущения – волны. Уравнение движения этих волн в тензорной форме имеет вид:

$$\frac{\partial \sigma_{iR}}{\partial x_i} = \rho \frac{\partial^2 U_R}{\partial t^2}, \tag{2}$$

где σ_{iR} – компоненты симметричного тензора напряжений; ρ – плотность; U_R – составляющая смещения в волне.

При рассмотрении напряженного состояния и уравнения (2) движения упругих волн в ортотропной пластине, когда длина волны значительно больше толщины пластины, получаем следующие выражения:

– для модулей упругости в направлении осей упругой симметрии

$$E_x = C_x^2 \rho - \frac{(4 C_{x(45)}^2 - C_x^2 - C_y^2 - 4 C_{xy}^2)^2}{4 C_y^2} \cdot \rho, \tag{3}$$

$$E_y = C_y^2 \rho - \frac{(4 C_{x(45)}^2 - C_x^2 - C_y^2 - 4 C_{xy}^2)^2}{4 C_x^2} \cdot \rho; \tag{4}$$

– для модуля сдвига

$$G_{xy} = C_{xy}^2 \rho; \tag{5}$$

– для коэффициентов Пуассона

$$\mu_{xy} = \frac{4 C_{x(45)}^2 - C_x^2 - C_y^2 - 4 C_{xy}^2}{2 C_y^2}, \tag{6}$$

$$\mu_{yx} = \frac{4 C_{x(45)}^2 - C_x^2 - C_y^2 - 4 C_{xy}^2}{2 C_x^2}, \tag{7}$$

где C_x, C_y – скорости продольных волн; $C_{x(45)}$ – скорость квазипродольных волн в пластине; C_{xy} – скорость сдвиговых волн.

Используя приведенные формулы (3)–(7), можно определить характеристики ПКМ в пластине по измеренным значениям скорости упругих волн в направлении осей упругой симметрии.

Определение упругих характеристик в пластине из ПКМ в произвольном направлении рекомендуется проводить по следующим уравнениям:

$$E_\varphi = \frac{C_x^2 \rho - C_y^2 \mu_{xy}^2 \rho}{\cos^4 \varphi + b \sin^2 2\varphi + \lambda \sin^4 \varphi}, \tag{8}$$

$$\mu_\varphi = \frac{\mu_{xy} - \frac{1}{4}(1 + \lambda - 4b) \sin^2 2\varphi}{\cos^4 \varphi + b \sin^2 2\varphi + \lambda \sin^4 \varphi}, \tag{9}$$

$$G_\varphi = \frac{C_{xy}^2 \rho}{1 - (1 - a) \sin^2 2\varphi}, \tag{10}$$

где $\lambda = \frac{E_x}{E_y} = \frac{C_x^2}{C_y^2}$; $b = \frac{C_x^2 - C_y^2 \mu_{xy}}{C_{x(45)}^2} - \frac{\lambda + 1}{4}$; $a = \frac{1 + \lambda + 2\mu_{xy}}{4b + 2\mu_{xy}}$.

Таким образом, все упругие постоянные в пластине из ПКМ можно определить, измерив скорость продольных волн в трех направлениях (0, 45 и 90 град) по отношению к осям упругой симметрии, а скорость сдвиговых волн – вдоль любой из осей.

По аналогии с анизотропией упругих характеристик в работе [30] предложены выражения, описывающие анизотропию прочностных свойств:

$$\sigma_\varphi = \frac{\sigma_0}{\cos^4 \varphi + a \sin^2 2\varphi + \frac{\sigma_0 \sin^4 \varphi}{\sigma_{90}}}, \tag{11}$$

$$\alpha = \frac{\sigma_0}{\sigma_{45}} - \frac{1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_{90}}}{4}, \tag{12}$$

$$\tau_{\varphi} = \frac{\tau_0}{\cos^2 2\varphi + \frac{\tau_0 \sin^2 2\varphi}{\tau_{45}}}, \quad (13)$$

где σ_{φ} – предел прочности при растяжении или сжатии в направлении под углом φ к осям упругой симметрии; σ_0 – предел прочности при растяжении или сжатии вдоль оси x ; σ_{90} – то же вдоль оси y ; σ_{45} – то же под углом 45 град к осям упругой симметрии; τ_{φ} – предел прочности при сдвиге в направлении под углом φ к осям упругой симметрии; τ_0 – предел прочности при чистом сдвиге в произвольном направлении в плоскости xy .

Следовательно, для описания анизотропии прочности необходимо определить экспериментальным путем три значения предела прочности при растяжении ($\sigma_0, \sigma_{90}, \sigma_{45}$) и два значения предела прочности при сдвиге (τ_0 и τ_{45}).

В работе [31] проведено теоретическое исследование спектральной плотности последовательности эхо-сигналов и дана методика расшифровки информативных параметров каждого из эхо-сигналов (амплитуды, времени сдвига и начальной фазы) путем спектрального анализа. В работе [32] рассмотрены физические основы спектрального метода измерения коэффициента затухания ультразвуковых волн в материалах, основанного на частотном анализе амплитудных спектров для проходящего и отраженного образцом импульсного сигнала.

Рассматривая амплитудные спектры отдельных импульсов, отраженных от поверхности кон-

тролируемого изделия и прошедших по толщине изделия в прямом и обратном направлениях [33], можно сделать вывод о значительном влиянии затухания на спектральный состав эхо-импульсов. Вклад различных гармонических составляющих меняется, высокочастотные составляющие подавляются в большей степени и максимум огибающей амплитудного спектра при повышении затухания смещается в область низких частот. Зная спектральный состав зондирующего сигнала и его преобразования после прохождения через испытуемый материал, можно выявить частотную характеристику затухания УЗ колебаний в материале.

Анализ спектрального состава двух эхо-импульсов позволяет определить частотную зависимость коэффициента затухания, по которой можно судить о структуре материала. Путем анализа спектрального состава суммы эхо-сигналов (оценки изменения огибающей амплитудного спектра, частоты и амплитуды основной составляющей) можно определить также характеристики ПКМ.

Для исследования распространения ультразвуковых волн в ПКМ изготовлены шесть пластин из углепластика КМУ-3л (лента углеродная ЛУ-3, эпоксидно-анилино-формальдегидное связующее 5-211-Б) методом прямого прессования из предварительно пропитанных связующим полуфабрикатов (препрегов).

Графики зависимостей физико-механических характеристик материала от давления прессования и процентного содержания наполнителя показаны на рис. 2.

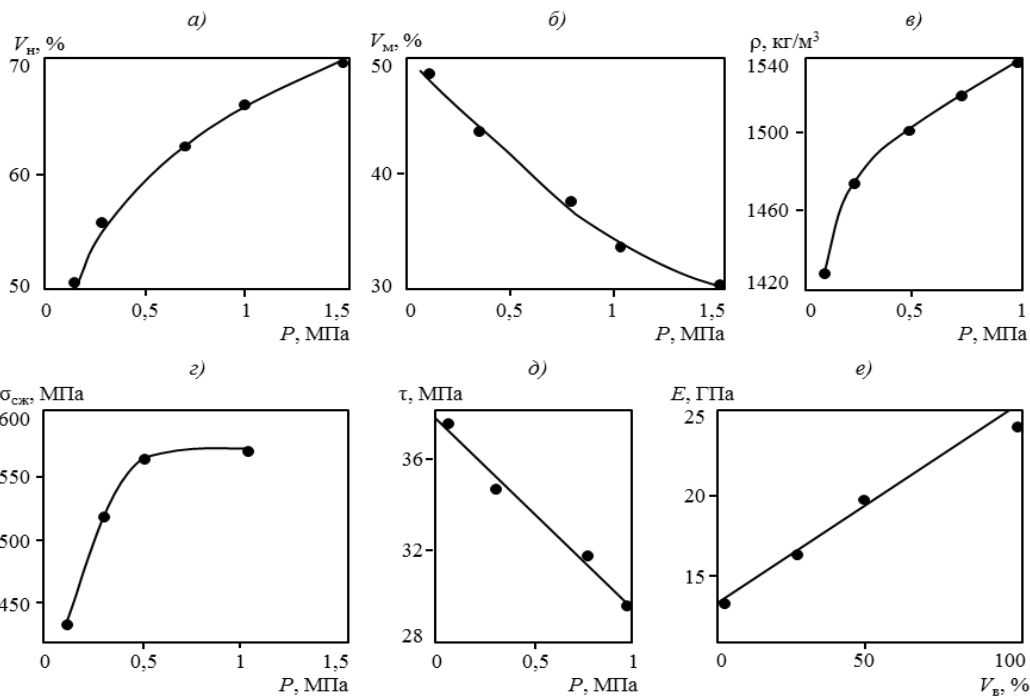


Рис. 2. Зависимости объемных содержаний наполнителя (а) и матрицы (б), плотности (в), пределов прочности при испытании на сжатие (г) и межслойный сдвиг (д) от давления прессования P , а также модуля упругости при растяжении (е) от содержания V_B ленты «Кулон» в углепластике марки КМУ-3л

При изготовлении пластин с давлением формования 0,1 и 0,3 МПа использовали пропитанную углеродную ленту с содержанием связующего 53–55%, а с давлением формования 0,5; 0,75; 1,0 и 1,5 МПа – с содержанием связующего 34–35%. Использование пропитанной углеродной ленты с большим содержанием связующего позволило уменьшить и, с целью сокращения количества переменных параметров, выровнять пористость пластиков, изготовленных при давлении 0,1 и 0,3 МПа, что ниже значений обычно применяемых давлений формования.

Укладка слоев во всех пластинах – однонаправленная, структура армирования углепластика [0₂₀] (количество слоев в пластинах составляло 20). Размеры изготовленных пластин 240×330×3 мм.

Технология изготовления пластин из углепластика для исследования связи модуля упругости при растяжении с параметрами диагностики аналогична предыдущей. Удельное давление формования составляло 0,5 МПа.

Особенностью изготовления пластин является применение двух типов разномодульных углеродных лент (ЛУ-3 и «Кулон») с различным их соотношением. Укладка слоев – однонаправленная, структура армирования [0₈], размеры пластин в плане – 800×420 мм.

Таким образом, состав углепластика и технология изготовления варьировались, что обеспечило получение пластин из композиционного материала с различными физико-механическими свойствами, в частности с различной прочностью при испытании на межслойный сдвиг и сжатие.

Способ контроля степени накопления микроповреждений

Рассматриваемый в данной статье способ оценки степени накопления микроповреждений структуры материала [34] представляет собой комбинацию

двух методов ультразвукового контроля – метода прохождения и метода отражения. Первый метод позволяет определить скорость распространения УЗ колебаний в материале конструкции в плоскости листа, обечайки и т. п. Вторым методом может быть оценено с достаточно высокой точностью затухание упругих колебаний в материале при прозвучивании в направлении нормали к поверхности контролируемой конструкции.

Параметры диагностики в пластинах из ПКМ определяли на стенде, структурная схема которого показана на рис. 3. Скорость распространения импульса УЗ колебаний определяют на низких частотах (60–150 кГц), что обеспечивает прохождение импульсов на базе 50–150 мм, а частоту основной составляющей спектра импульса УЗ колебаний – в высокочастотном диапазоне (2–3 МГц).

При реализации акустических методов контроля в контролируемой детали в форме пластины или обечайки толщиной до 3–5 мм при прозвучивании в направлении нормали к поверхности детали возбуждаются продольные волны, а при прозвучивании вдоль плоскости детали – нормальные волны (например, волны Лэмба). В плоскости пластины могут распространяться независимо друг от друга две группы волн Лэмба [35]: симметричные – *s* (волны, в которых движение происходит симметрично относительно середины пластины, т. е. в верхней и нижней половинах пластины смещение имеет одинаковые знаки), и антисимметричные – *a* (волны, в которых движение происходит антисимметрично относительно середины пластины, т. е. в верхней и нижней половинах пластины смещение имеет противоположные знаки).

Диапазон произведений частоты колебаний на толщину изделия $f \cdot h$, применимый для диагностики ПКМ, определяется по кривой групповой скорости $c_{gr} = \varphi(f \cdot h)$ и должен характеризоваться прак-

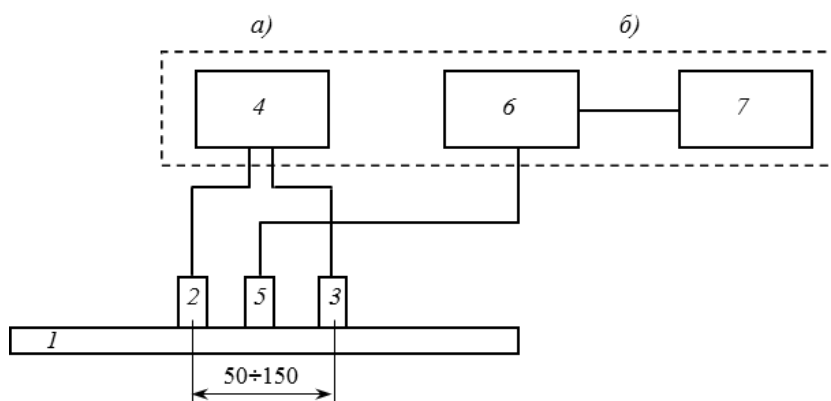


Рис. 3. Структурная схема стенда для определения параметров диагностики:

а – определение времени прохождения сигнала от излучателя к приемнику; *б* – определение частоты основной составляющей спектра импульса УЗ колебаний; 1 – пластина из ПКМ; 2 – излучатель на 60 кГц; 3 – приемник на 60 кГц; 4 – низкочастотный ультразвуковой импульсный прибор; 5 – прямой преобразователь на 2,5 МГц; 6 – высокочастотный ультразвуковой импульсный прибор; 7 – анализатор спектра

тическим отсутствием дисперсии скорости УЗ колебаний (рис. 4). В этом случае при изменении толщины контролируемого изделия (или частоты УЗ колебаний) групповая скорость волны не будет меняться и, следовательно, исключается погрешность, обусловленная дисперсией групповой скорости. Для определения скорости УЗ колебаний в материале необходимо возбуждать в детали волну, подобную симметричной волне нулевого порядка s_0 , групповая скорость которой при значениях объединенного параметра $f \cdot h \geq 5-10$ МГц·мм (произведения частоты УЗ колебаний на толщину данной детали) не зависит от изменения этого параметра.

Групповая скорость c волны s_0 в тонкостенных изделиях при сравнительно низких частотах УЗ колебаний близка к скорости продольной волны $c_{пл}$ в пластине

$$c_{пл} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}, \quad (14)$$

где E – модуль нормальной упругости; ρ – плотность материала; μ – коэффициент Пуассона.

Результаты и их обсуждение

На рис. 5 показаны спектрограммы эхоимпульсов при контроле пластин из углепластика марки КМУ-3л толщиной 3 мм, изготовленных при различных удельных давлениях. При повышении давления прессования с 0,1 до 1,0 МПа частота основной составляющей смещается в область более высоких частот – с 1,25 до 1,95 МГц.

Механические испытания проводили на универсальной машине «Инстрон» в соответствии с принятыми стандартами. На межслойный сдвиг по схеме трехточечного изгиба испытывали плоские образцы шириной 10 мм с длиной рабочей части (база) 15 мм. Соотношение между длиной образца и базой составляло 1:5. Скорость приложения усилия (движения плунжера) составляла 0,25 см/мин. Испытания на сжатие (образцы размером 130×10×3 мм) и растяжение (образцы размером 220×10×1,3 мм) со скоростью 0,5 см/мин проводили вдоль направления армирования. Объемное содержание компонентов определяли методом выжигания.

Результаты испытаний на сжатие показали, что изменение давления формования с 0,1 до 1,5 МПа приводит к увеличению прочности при сжатии на 30%. Это вызвано увеличением объемной доли волокна.

Результаты испытаний на межслойный сдвиг показали, что изменения давления формования с 0,1 до 1,5 МПа приводят к уменьшению прочности при межслойном сдвиге на 29%. Это вызвано большей дефектностью и напряженностью матрицы для пластиков с большим содержанием волокна.

Обработку данных технической диагностики (акустических характеристик материала – c и f_0) и механических испытаний (пределов прочности при межслойном сдвиге τ и сжатии $\sigma_{сж}$) выполня-

ли с помощью пакета программы Microsoft Excel. Корреляционно-регрессионный анализ статистических данных проводили по схеме, приведенной в работах [36, 37]:

- составление таблиц всех статистических данных;
- расчет статистических параметров (n – число измерений, y – значение физико-механической характеристики, x_1 и x_2 – значения параметров диагностики):

$$\left. \begin{aligned} \bar{y} &= \frac{\sum y}{n}; \quad \bar{x}_1 = \frac{\sum x_1}{n}; \quad \bar{x}_2 = \frac{\sum x_2}{n}; \\ \Sigma(y-\bar{y})^2; \quad \Sigma(x_1-\bar{x}_1)^2; \quad \Sigma(x_2-\bar{x}_2)^2; \\ \Sigma(y-\bar{y})(x_1-\bar{x}_1); \quad \Sigma(y-\bar{y})(x_2-\bar{x}_2); \quad \Sigma(x_1-\bar{x}_1)(x_2-\bar{x}_2); \\ \bar{y}^2 &= \frac{\Sigma(y-\bar{y})^2}{n}; \quad \bar{x}_1^2 = \frac{\Sigma(x_1-\bar{x}_1)^2}{n}; \quad \bar{x}_2^2 = \frac{\Sigma(x_2-\bar{x}_2)^2}{n}; \\ \bar{y}\bar{x}_1 &= \frac{\Sigma(y-\bar{y})(x_1-\bar{x}_1)}{n}; \quad \bar{y}\bar{x}_2 = \frac{\Sigma(y-\bar{y})(x_2-\bar{x}_2)}{n}; \\ \bar{x}_1\bar{x}_2 &= \frac{\Sigma(x_1-\bar{x}_1)(x_2-\bar{x}_2)}{n}; \\ \sigma_y &= \sqrt{\bar{y}^2}; \quad \sigma_{x_1} = \sqrt{\bar{x}_1^2}; \quad \sigma_{x_2} = \sqrt{\bar{x}_2^2}; \end{aligned} \right\} (15)$$

- расчет коэффициентов частной корреляции для нахождения коэффициентов линейного уравнения множественной корреляции вида:

$$y = \theta_0 + \theta_1 x_1 + \theta_2 x_2. \quad (16)$$

$$\text{Здесь } \theta_1 = \frac{r_{yx_1} - r_{yx_2} r_{x_1 x_2}}{1 - r_{x_1 x_2}^2} \frac{\sigma_y}{\sigma_{x_1}}, \quad \theta_2 = \frac{r_{yx_2} - r_{yx_1} r_{x_1 x_2}}{1 - r_{x_1 x_2}^2} \frac{\sigma_y}{\sigma_{x_2}},$$

$$\text{где } r_{yx_1} = \frac{\bar{y}\bar{x}_1}{\sigma_y \sigma_{x_1}}, \quad r_{yx_2} = \frac{\bar{y}\bar{x}_2}{\sigma_y \sigma_{x_2}}, \quad r_{x_1 x_2} = \frac{\bar{x}_1\bar{x}_2}{\sigma_{x_1} \sigma_{x_2}}, \quad \theta_0 = \bar{y} - \theta_1 \bar{x}_1 - \theta_2 \bar{x}_2.$$

Общий коэффициент множественной корреляции определяли по формуле:

$$R_{yx_1 x_2} = \sqrt{\frac{r_{yx_1}^2 + r_{yx_2}^2 - 2r_{yx_1} r_{yx_2} r_{x_1 x_2}}{1 - r_{x_1 x_2}^2}}. \quad (17)$$

На основании результатов статистического анализа определены корреляционные связи: $\tau = \varphi_1(c)$, $\tau = \varphi_2(f_0)$, $\sigma = \varphi_3(c)$ и $\sigma = \varphi_4(f_0)$. Корреляционно-регрессионный анализ экспериментальных данных позволил получить следующие линейные уравнения корреляционных связей упругих и прочностных характеристик углепластика марки КМУ-3л с параметрами диагностики:

$$\tau = 65,47 - 2,37 \cdot 10^{-3} c - 10,29 f_0; \quad (18)$$

$$\sigma = -331,16 + 131,62 \cdot 10^{-3} c - 57,44 f_0; \quad (19)$$

где τ – прочность при межслойном сдвиге, МПа; σ – прочность при сжатии, МПа; c – скорость распространения УЗ колебаний в материале, м/с; f_0 – частота основной составляющей спектра ультразвукового импульса, прошедшего по толщине объекта контроля в прямом и обратном направлениях, МГц.

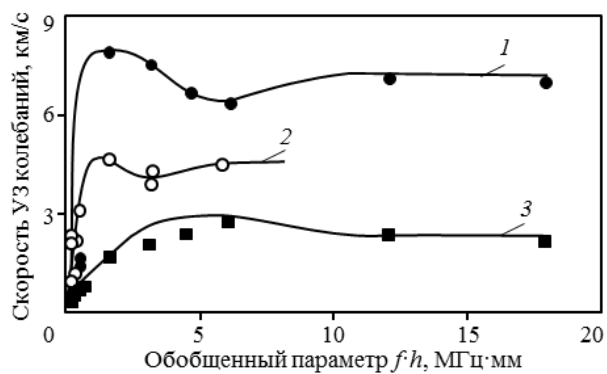


Рис. 4. Дисперсионные кривые зависимости групповой скорости c_{gr} распространения импульсов УЗ колебаний в углепластике марки ВК-36РТ от обобщенного параметра fh (произведения частоты колебаний на толщину изделия) вдоль (1, 3) и поперек волокон (2) при структуре армирования [0] (1, 2) и [0/90] (3)

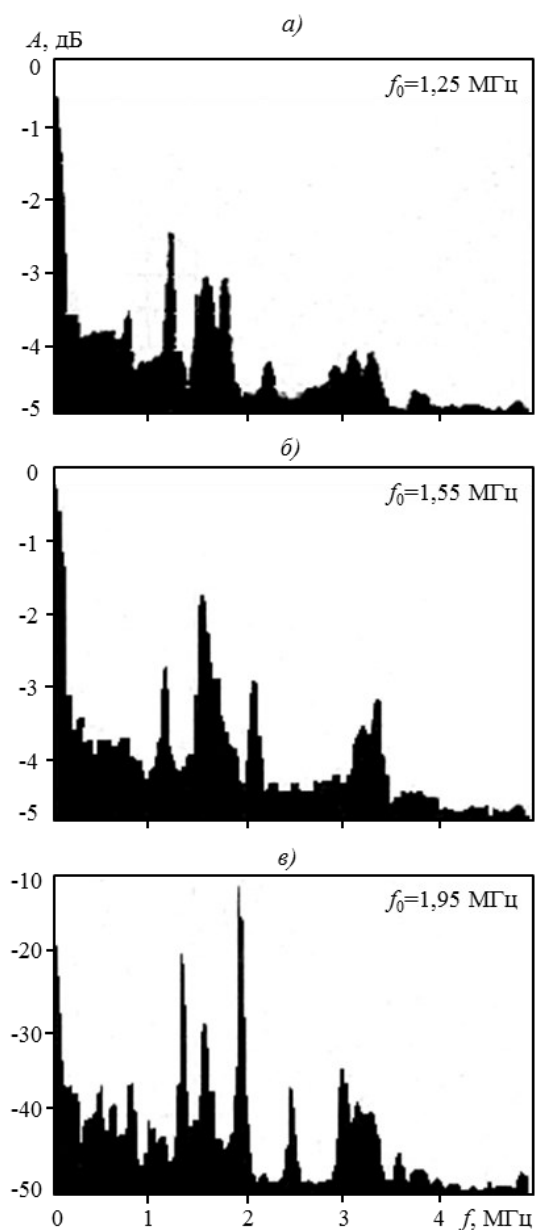


Рис. 5. Спектрограммы эхо-импульсов при контроле пластин из углепластика марки КМУ-3л, изготовленных при удельных давлениях 0,1 (а); 0,5 (б) и 10 МПа (в)

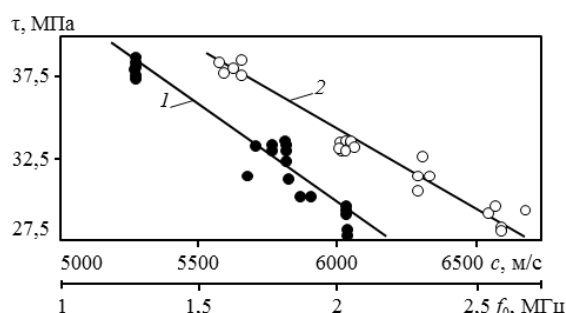


Рис. 6. Корреляционная связь частоты f_0 основной составляющей спектра (1) и скорости распространения импульса УЗ колебаний c (2) с прочностью τ при межслойном сдвиге углепластика марки КМУ-3л

На рис. 6 представлены корреляционные связи прочности при межслойном сдвиге τ с частотой f_0 основной составляющей спектра ультразвукового импульса и скоростью распространения УЗ колебаний в материале c для углепластика марки КМУ-3л. В данном случае имеет место линейная связь прочности с параметрами диагностики.

Коэффициенты множественных корреляций в решаемой задаче равны $R_{\tau c f_0} = 0,935$ и $R_{\tau f_0} = 0,912$ при критериях надежности [36] коэффициентов корреляций значительно больше 3, что позволяет считать вычисленные коэффициенты корреляций достоверными.

Заключение

1. Предложено оценивать степень накопления микрповреждений в ПКМ по их прочностным характеристикам, определяемым неразрушающим методом по комплексному параметру, включающему значения скорости распространения импульса УЗ колебаний в плоскости изделия и значения частоты основной составляющей спектра импульса УЗ колебаний, прошедшего изделие по толщине в прямом и обратном направлениях.

2. Для диагностики материала детали без ее разрушения предложено возбуждать продольную волну и волну, подобную симметричной волне нулевого порядка, групповая скорость которой

при значениях объединенного параметра (произведения частоты УЗ колебаний на толщину данной детали) выше 5–10 МГц·мм не зависит от изменения этого параметра.

3. Для оценки степени накопления микрповреждений в ПКМ предложен принципиально новый информативный параметр диагностики, характеризующий затухание УЗ колебаний в материале – частота основной составляющей спектра импульса УЗ колебаний, прошедшего изделие по толщине в прямом и обратном направлениях, который может быть определен с высокой точностью и достоверностью непосредственно в детали или конструкции из ПКМ без их разрушения при одностороннем доступе.

4. Проведенные экспериментальные исследования показали, что существует тесная корреляционная связь между прочностными характеристиками ПКМ с параметрами неразрушающего контроля, в качестве которых используются акустические характеристики материала, определяемые неразрушающими методами, что позволяет оценивать степень накопления повреждений структуры непосредственно в детали или конструкции без их разрушения методами технической диагностики и эксплуатировать изделия с учетом технического состояния материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // *Вестник Российской академии наук*. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
3. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. М.: ВИАМ, 2001. №1. С. 3–8.
4. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // *Наука и жизнь*. 2010. №4. С. 2–7.
5. Мурашов В.В., Мишуrow К.С. Оценка прочностных характеристик углепластиков акустическим методом // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 81–85.
6. Генералов А.С., Мурашов В.В., Косарина Е.И., Бойчук А.С. Построение и анализ корреляционных связей для оценки прочностных свойств углепластиков реверберационно-сквозным методом // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №1. С. 58–63.
7. Мурашов В.В., Косарина Е.И., Генералов А.С. Контроль качества авиационных деталей из полимерных композиционных материалов и многослойных клееных конструкций // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №3. С. 65–70.
8. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль заготовок и деталей из углерод-углеродного композиционного материала для многоразового космического корабля «Буран» // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-*

- технич. журн. 2013. №4. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.04.2015).
9. Мурашов В.В., Генералов А.С. Контроль многослойных клееных конструкций низкочастотными акустическими методами // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №2. С. 59–67.
 10. Максимов Р.Д., Пономарев В.М. Предпосылки комплексного диагностирования накопления повреждений при деформировании гибридного композита // *Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов*. Рига: Зинатне, 1983. С. 150–155.
 11. Сорокин К.В., Мурашов В.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Прогнозирование развития дефектов в конструкциях из ПКМ способом определения изменений жесткости при актировании материала // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №2. С. 20–22.
 12. Nagem R.J., Seng J.M., Williams J.H. Residual life predictions of composite aircraft structures via nondestructive testing. Part 1: Prediction methodology and via nondestructive // *Materials Evaluation*. 2000. V. 58. №9. P. 1065–1074.
 13. Nagem R.J., Seng J.M., Williams J.H. Residual life predictions of composite aircraft structures via nondestructive testing. Part 2: Degradation modeling and residual life prediction // *Materials Evaluation*. 2000. V. 58. №11. P. 1310–1319.
 14. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф., Бузников Ю.Н. Акустический комплексный метод оценки физико-механических свойств полимерных композитных материалов // *Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов*. Рига: Зинатне, 1983. С. 165–170.
 15. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф., Бузников Ю.Н. Оценка физико-механических характеристик углепластиков комплексным акустическим методом // *Вопросы авиационной науки и техники. Сер.: Авиационные материалы*. М.: ВИАМ, 1986. Вып.: Неметаллические композиционные материалы. С. 105–111.
 16. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К., Николаев Е.В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №4. С. 41–45.
 17. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения // *Деформация и разрушение материалов*. 2010. №11. С. 19–27.
 18. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения // *Деформация и разрушение материалов*. 2011. №1. С. 34–40.
 19. Gunasekera A.M. Monitoring of impact damage products from PCM // *Materials Evaluation*. 2010. V. 68. №8. P. 880–887.
 20. Мурашов В.В. К вопросу определения упругих и прочностных свойств полимерных композиционных материалов акустическим комплексным методом // *Деформация и разрушение материалов*. 2014. №11. С. 39–45.
 21. Потапов А.И., Пеккер Ф.П. Неразрушающий контроль конструкций из композиционных материалов. Л.: Машиностроение, 1977. 190 с.
 22. Гершберг М.В., Илюшин С.В., Смирнов В.Н. Неразрушающие методы контроля судостроительных стеклопластиков. Л.: Судостроение, 1971. 200 с.
 23. Ашкенази Е.К., Гершберг М.В., Илюшин С.В. Косвенный способ оценки прочности стеклопластиков при сдвиге // *Свойства судостроительных стеклопластиков и методы их контроля*. Л.: Судостроение, 1974. Вып. 3. С. 198–202.
 24. Мурашов В.В., Ильин В.М., Захарова Т.Т. Оценка прочностных свойств стеклопластика АП-66-151 в тонкостенных крупногабаритных деталях без их разрушения // *Автомобильная промышленность*. 1973. №9. С. 34–36.
 25. Гершберг М.В., Ланчин В.Ф., Ланчина Т.Н. Прочность стеклопластика и ее связь с параметрами импульсного метода // *Свойства судостроительных стеклопластиков и методы их контроля*. Л.: Судостроение, 1974. Вып. 3. С. 167–184.
 26. Kablov E., Murashov V., Rumyantsev A. Diagnostics of Polymer Composites by Acoustic Methods // *Ultrasound*. 2006. №2. P. 7–10.
 27. Латишенко В.А. Диагностика жесткости и прочности материалов. Рига: Зинатне, 1968. 329 с.
 28. Неразрушающий контроль: справочник / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2006. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. 864 с.
 29. Hand W. Testing reinforced plastics with ultrasonics // *Plastics Technology*. 1962. №2. P. 62–67.
 30. Ашкенази Е.К. Анизотропия машиностроительных материалов. Л.: Машиностроение, 1969. С. 37–39.
 31. Барышев С.Е. Спектральная плотность последовательности эхо-сигналов // *Дефектоскопия*. 1974. №2. С. 19–25.
 32. Меркулов Л.Г., Токарев В.А. Физические основы спектрального метода измерения затухания ультразвуковых волн в материалах // *Дефектоскопия*. 1970. №4. С. 3–11.
 33. Барышев С.Е. Влияние затухания на спектральную плотность эхо-сигналов // *Дефектоскопия*. 1978. №1. С. 56–62.
 34. Способ определения физико-механических характеристик материалов: а. с. 808930 СССР; опубл. 28.02.81 Бюл. №8.
 35. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. С. 84–87.
 36. Алабин М.А., Ройтман А.Б. Корреляционно-регрессионный анализ статистических данных в двигателестроении. М.: Машиностроение, 1974. 124 с.
 37. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. М.: Наука, 1971. 87 с.