

## Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

УДК 620.179.16:678.5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

© В. В. Мурашов<sup>1</sup>*Статья поступила 29 апреля 2015 г.*

Описана методика определения механических свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ) ультразвуковым методом по комплексному параметру, включающему значения скорости распространения импульса УЗК в плоскости изделия, а также частоты основной составляющей спектра импульса УЗК, прошедшего контролируемое изделие по толщине в прямом и обратном направлениях. Предложено оценивать степень накопления микроповреждений в ПКМ по их механическим характеристикам (например, прочности при межслойном сдвиге и прочности при сжатии), определяемым неразрушающим методом. Предложен принципиально новый информативный параметр диагностики, характеризующий затухание УЗК в материале, — частота основной составляющей спектра импульса УЗК, прошедшего изделие по толщине в прямом и обратном направлениях. Показано, что для диагностики материала изделия без его разрушения целесообразно возбуждать продольную волну и волну, подобную симметричной волне нулевого порядка.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы (ПКМ); физико-механические свойства; ультразвуковой метод; комплексный параметр диагностики; скорость распространения импульса; симметричная волна нулевого порядка; частота основной составляющей спектра; степень накопления микроповреждений.

При длительном воздействии на детали или конструкции из ПКМ температуры, влажности, механических нагрузок и других факторов появляются микроповреждения структуры материала, которые вызывают изменение его физико-механических свойств [1–3]. Микроповреждения структуры, так же как и пористость, способствуют нарушению сплошности материала. Однако если пористость ПКМ оценивают величиной объемной пористости, то степень накопления микроповреждений оценить аналогичной характеристикой не представляется возможным, так как микроповреждения обычно не имеют раскрытия и не заполнены каким-либо газом.

Степень накопления микроповреждений ПКМ, работающих в условиях температурно-силового нагружения, целесообразно оценивать через прочностные характеристики материала [4–6]. Очевидно, что по мере накопления микроповреждений структуры материала его прочностные характеристики изменяются, что может быть критерием степени накопления повреждений [7, 8].

Для определения физико-механических характеристик ПКМ необходимо найти такие оптимальные критерии, которые выражаются через параметры

диагностики, полученные при неразрушающем контроле изделия [9, 10]. Прочностные характеристики могут быть найдены по параметрам, находящимся с ними в корреляционной зависимости [11].

Для индикации повреждений при деформировании гибридных композитов [12] использован комплекс различных методов: измерение электропроводности материала в процессе нагружения, акустической эмиссии, тепловых эффектов; определение модуля упругости на разных уровнях нагружения материала; обследование с помощью микроскопа раздробленных волокон после удаления полимерной матрицы. Уже на начальной стадии деформирования происходит накопление повреждений в материале, которое приводит к значительному уменьшению модуля упругости. При растяжении исследованного гибридного композита (органоборопластика) интенсивное дробление борных волокон происходит в диапазоне напряжений от 0,3 до 0,7 от прочности материала.

Главным физико-механическим свойством ПКМ, применяемого в качестве конструкционного, является прочность, которая определяет качество и надежность всего изделия в целом [13–20]. Исследованиями взаимосвязи между прочностными характеристиками полимерных композитов и их акустическими свойствами занимаются и в США (фирма Boeing) и в европейских странах (фирма Airbus). Как показали послед-

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ), Москва, Россия;  
e-mail: admin@viam.ru

ние европейская и всемирная конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике, этому направлению уделено особое внимание.

В литературе [21 – 25] приведено большое количество корреляционных уравнений для определения упругих свойств (модуля Юнга, модуля межслойного сдвига), прочностных характеристик (прочности при растяжении, сжатии, изгибе, межслойном сдвиге), плотности и пористости материала, состава (содержания наполнителя и связующего), ориентации наполнителя и др. В качестве параметров диагностики при этом используют скорости распространения продольных и поперечных волн, затухание УЗК, тепло- и температуропроводность, диэлектрическую проницаемость (определенную как радиоволновым, так и емкостным методами), тангенс угла диэлектрических потерь, электропроводность, электросопротивление и др. Имеются сообщения об успешном применении метода акустической эмиссии для оценки прочности изделий из ПКМ.

Наиболее широкое применение получил акустический импульсный метод, основанный на определении скорости распространения импульсов упругих колебаний как в плоскости изделия (листа), так и в направлении, перпендикулярном этой плоскости. Так, еще в 1972 г. разработан отраслевой стандарт [26], предусматривающий оценку модуля упругости и значений прочности при растяжении, сжатии и изгибе полиэфирных стеклопластиков в изделиях по скорости распространения УЗК при известной плотности материала (определенной радиометрическим методом или по скорости распространения УЗК в трех различных направлениях).

Многими исследователями получены эмпирические уравнения парной корреляционной связи между физико-механическими характеристиками и каким-либо одним параметром диагностики. Однако зачастую определение физико-механических свойств ПКМ по одному параметру недостоверно, так как в этом случае наблюдаются сравнительно низкое значение коэффициента корреляции или корреляционного отношения и значительные отклонения фактических значений характеристик материала от рассчитанных по корреляционному уравнению. Это существенно огра-

ничивает практическое применение таких однопараметровых корреляционных уравнений.

В работе [28] приведена таблица, анализ которой позволяет сделать вывод о целесообразности использования уравнений многопараметровых корреляционных связей между какой-либо характеристикой (например, пределом прочности  $\sigma_n$  при изгибе) и параметрами диагностики (скоростью  $c_i$  распространения УЗК, диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ , теплопроводностью  $\lambda$ ).

Данные таблицы также показывают преимущество использования комплексного параметра диагностики, что позволяет повысить точность определения искомой физической или механической характеристики материала. Однако это справедливо лишь в том случае, когда все параметры диагностики находятся в достаточно тесной корреляционной связи с искомой характеристикой. В противном случае коэффициент корреляции и, соответственно, точность диагностики не повысятся.

Основными критериями выбора одиночного или комплексного параметра диагностики при оценке физико-механических характеристик ПКМ являются коэффициент корреляции (или корреляционного отношения) и надежность этого коэффициента. Достоверность результатов контроля можно считать приемлемой при значениях критерия надежности коэффициента корреляции  $M > 3$ .

Для контроля физико-механических свойств стеклопластиков рекомендованы для практического применения многопараметровые корреляционные связи различного вида (линейные, параболические и др.), включающие в качестве параметров диагностики скорость продольных волн, диэлектрическую проницаемость и коэффициент теплопроводности, определяемые непосредственно на изделии. Многопараметровая корреляция, как правило, значительно повышает надежность корреляционной связи, что подтверждается высоким коэффициентом корреляции (при линейном уравнении корреляции) или корреляционным отношением (при нелинейном корреляционном уравнении) и снижает ошибку аппроксимации.

В результате обоснования связи прочности и акустических параметров материалов установлены функциональные взаимосвязи [22] между прочностью при растяжении  $\sigma_p$ , модулем Юнга  $E$ , коэффициентом затухания  $\delta$  и скоростью продольных волн  $c$ :

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

где  $E$  — модуль Юнга, определенный по полученным значениям скорости распространения УЗК с помощью специальной номограммы [22] при известной плотности материала (определенной радиометрическим методом или по скоростям распространения УЗК в трех различных направлениях);  $a$  и  $b$  — коэффициенты, по-

Связь относительной ошибки диагностики с количеством информативных параметров

| Корреляция                                | Коэффициент корреляции | Относительная ошибка диагностики, % |
|-------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| $\sigma_n \sim c_i$                       | 0,601                  | 13                                  |
| $\sigma_n \sim \varepsilon$               | 0,645                  | 10                                  |
| $\sigma_n \sim \lambda$                   | 0,876                  | 9                                   |
| $\sigma_n \sim c_i, \varepsilon$          | 0,915                  | 8                                   |
| $\sigma_n \sim c_i, \lambda$              | 0,932                  | 8                                   |
| $\sigma_n \sim c_i, \varepsilon, \lambda$ | 0,943                  | 5                                   |

лученные экспериментально по результатам разрушающих испытаний образцов данной марки материала с данной структурой армирования, на которых предварительно измерены  $c$  и  $\delta$ . Уравнение (1) является эмпирическим, поскольку в него входят коэффициенты  $a$  и  $b$ , установленные 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 УЗК оценивают 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).

В данной работе исследована возможность использования лишь таких параметров неразрушающего контроля, которые могут быть измерены непосредственно в изделиях с достаточной точностью. Предельная точность измерения скорости соответствует погрешности 0,001 – 0,01 %, точность измерения затухания значительно ниже; погрешность в 10 % считается хорошим результатом [27]. Цель исследования — разработка способа повышения точности оценки затухания УЗК в материале детали или конструкции из ПКМ без их разрушения. Рассмотрен способ оценки затухания УЗК в материале по частоте основной составляющей спектра сигнала, прошедшего материал по толщине в прямом и обратном направлениях.

При реализации акустических методов контроля в контролируемой детали в форме пластины или обечайки толщиной до 3 – 5 мм при прозвучивании в направлении нормали к ее поверхности возбуждали 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 [29]: 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).

Для определения скорости УЗК в материале необходимо в детали возбуждать волну, подобную симметричной волне нулевого порядка  $s_0$ , групповая скорость которой при значениях объединенного параметра  $fh \geq 5 - 10$  МГц · мм (произведения частоты УЗК на толщину данной детали) не зависит от изменения этого параметра (рис. 1).

Групповая скорость  $c_{gr}$  волны  $s_0$  в тонкостенных изделиях при сравнительно низких частотах УЗК

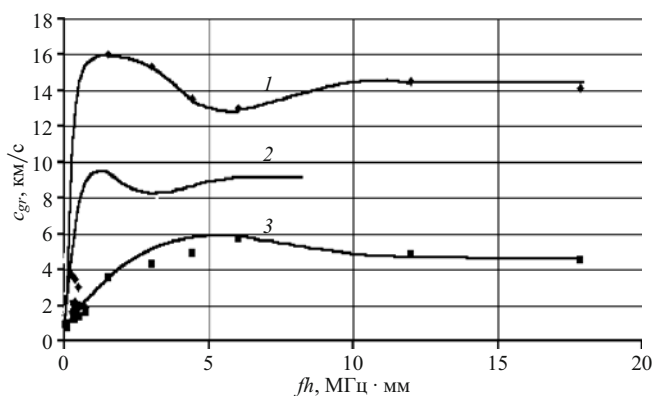


Рис. 1. Зависимости групповой скорости  $c_{gr}$  распространения импульсов ультразвуковых колебаний в углепластике ВК-36РТ от обобщенного параметра  $fh$ : 1 и 3 — вдоль волокон; 2 — поперек волокон; структура армирования: 1 и 2 — [0]; 3 — [0/90]

близка к скорости продольной волны  $c_{пл}$  в пластине, поэтому можно считать, что

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

где  $E$  — модуль нормальной упругости;  $\rho$  — плотность материала;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Известно [30], 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

$$\frac{\partial \sigma_{iR}}{\partial x_i} = \rho \frac{\partial^2 U_R}{\partial t^2}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{iR}$  — компоненты симметричного тензора напряжений;  $\rho$  — плотность;  $U_R$  — составляющая смещения в волне.

Из рассмотрения напряженного состояния и уравнения (3) движения упругих волн в ортотропной пластине, когда длина волны значительно больше толщины пластины, получим следующие выражения:

для модулей Юнга в направлении осей упругой симметрии —

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

$$E_y = C_y^2 \rho - \frac{(4C_{x(45)}^2 - C_x^2 - C_y^2 - 4C_{xy}^2)^2}{4C_x^2} \rho; \quad (5)$$

для модуля сдвига —

$$G_{xy} = C_{xy}^2 \rho; \quad (6)$$

для коэффициентов Пуассона —

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

$$\mu_{yx} = \frac{4C_{x(45)}^2 - C_x^2 - C_y^2 - 4C_{xy}^2}{2C_x^2}, \quad (8)$$

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

Используя формулы (4)–(8), можно определить характеристики ПКМ в пластине по измеренным значениям скорости упругих волн в направлении осей упругой симметрии.

Упругие характеристики в пластине из ПКМ в произвольном направлении рекомендуется находить по следующим уравнениям:

$$E_\varphi = \frac{C_x^2 \rho - C_y^2 \mu_{xy}^2 \rho}{\cos^4 \varphi + b \sin^2 2\varphi + \lambda \sin^4 \varphi}, \quad (9)$$

$$\mu_\varphi = \frac{\mu_{xy} - \frac{1}{4}(1 + \lambda - 4b) \sin^2 2\varphi}{\cos^4 \varphi + b \sin^2 2\varphi + \lambda \sin^4 \varphi}, \quad (10)$$

$$G_\varphi = \frac{C_{xy}^2 \rho}{1 - (1 - \alpha) \sin^2 2\varphi}, \quad (11)$$

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

$$\alpha = \frac{1 + \lambda + 2\mu_{xy}}{4b + 2\mu_{xy}}.$$

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

По аналогии с анизотропией упругих характеристик в работе [31] предложены выражения, описывающие анизотропию прочностных свойств:

$$\sigma_\varphi = \frac{\sigma_0}{\cos^4 \varphi + \alpha \sin^2 2\varphi + \sigma_0 \frac{\sin^4 \varphi}{\sigma_{90}}}, \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_0}{\sigma_{45}} - \frac{1 + \sigma_0/\sigma_{90}}{4}, \quad (13)$$

$$\tau_\varphi = \frac{\tau_0}{\cos^2 2\varphi + \frac{\tau_0 \sin^2 2\varphi}{\tau_{45}}}, \quad (14)$$

где  $\sigma_\varphi$  — предел прочности при растяжении или сжатии в направлении под углом  $\varphi$  к осям упругой симметрии;  $\sigma_0$ ,  $\sigma_{90}$ ,  $\sigma_{45}$  — пределы прочности при растяжении или сжатии вдоль оси  $X$ , вдоль оси  $Y$  и под

углом 45° к осям упругой симметрии;  $\tau_\varphi$  — предел прочности при сдвиге в направлении под углом  $\varphi$  к осям упругой симметрии;  $\tau_0$  — предел прочности при чистом сдвиге в произвольном направлении в плоскости  $XY$ .

Следовательно, для описания анизотропии прочности необходимо определить экспериментальным путем три значения  $\sigma$  ( $\sigma_0$ ,  $\sigma_{90}$ ,  $\sigma_{45}$ ) и два значения  $\tau$  ( $\tau_0$  и  $\tau_{45}$ ).

В работе [32] проведено теоретическое исследование спектральной плотности последовательности эхосигналов и дана методика расшифровки информативных параметров каждого из эхосигналов (амплитуды, времени сдвига и начальной фазы) путем спектрального анализа. В работе [33] 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.

Рассмотрим в соответствии с [32, 33] изменение спектральной плотности импульса при его распространении в объекте контроля под влиянием частотной зависимости затухания. Спектральная плотность эхо-сигнала  $S(j\beta)$  в общем виде определяется выражением

$$S(j\beta) = S_0(j\beta) K_1^2(j\beta) K_2(j\beta), \quad (15)$$

где  $S_0(j\beta)$  — спектральная плотность электрического импульса возбуждения;  $K_1(j\beta)$  — коэффициент передачи нагруженного преобразователя;  $K_2(j\beta)$  — коэффициент передачи акустического тракта;  $\beta = f/f_0$  ( $f$  — частота,  $f_0$  — частота основной гармоники);  $j = \sqrt{-1}$ .

Рассматривая амплитудные спектры отдельных импульсов, отраженных от поверхности контролируемого изделия и прошедших по толщине изделия в прямом и обратном направлениях [34], можно сделать вывод о значительном влиянии затухания на спектральный состав эхо-импульсов. Вклад различных гармонических составляющих меняется, высоко-частотные 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 выяснить частотную характеристику затухания УЗК в материале.

Если отношение амплитудных спектров первого и второго отраженных импульсов [34]

$$\frac{S_1(j\beta)}{S_2(j\beta)} = \frac{e^{\delta(\beta)}}{K_0^2}, \quad (16)$$

где  $S_1(j\beta)$  — спектр первого импульса от задней поверхности;  $S_2(j\beta)$  — спектр второго импульса от зад-



ней поверхности;  $\delta(\beta) = \delta_1(f_0)c/f_1$  — нормированный коэффициент затухания;  $\delta_1(f_0)$  — коэффициент затухания на несущей частоте;  $c$  — скорость распространения УЗК;  $f_1$  — резонансная частота по толщине стенки изделия;  $K_0$  — коэффициент отражения на границах раздела сред, то

$$\delta(\beta) = \ln \frac{S_1(j\beta)}{S_2(j\beta)} + 2 \ln K_0. \quad (17)$$

Следовательно, анализ спектрального состава двух эхо-импульсов позволяет определить частотную зависимость коэффициента затухания, по которой можно судить о структуре материала. Характеристики ПКМ определяют также путем анализа спектрального состава суммы эхо-сигналов (оценки изменениягибающей амплитудного спектра, частоты и амплитуды основной составляющей).

Для исследования распространения ультразвуковых волн в ПКМ были изготовлены пять пластин из углепластика КМУ-3Л (лента углеродная ЛУ-3, эпоксидное анилино-формальдегидное связующее 5-211-Б) методом прямого прессования из предварительно пропитанных связующим полуфабрикатов (препрегов). Формование пластин проводили по следующему режиму: температура 150° С; выдержка 4 ч; давление формования — 0,1, 0,3, 0,5, 0,75, 1,0 и 1,5 МПа.

Для изготовления пластин при давлении формования 0,1 и 0,3 МПа использовали пропитанную углеродную ленту с содержанием связующего 53 – 55 %, а при давлении формования 0,5, 0,75, 1,0 и 1,5 МПа — с содержанием связующего 34 – 35 %. Большое содержание связующего позволило уменьшить и (с целью сокращения количества переменных параметров) выровнять пористость пластиков, изготовленных при давлении 0,1 и 0,3 МПа, меньшем обычно применяемого при формовании.

Укладка слоев во всех пластинах — однонаправленная, структура армирования углепластика [0<sub>20</sub>] (количество слоев в пластинах — 20); размеры изготовленных пластин — 240 × 330 × 3 мм.

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

Известен способ [35] определения физико-механических характеристик, включающий излучение импульсов ультразвуковых колебаний излучателем, прием импульсов, прошедших в конструкции, приемником, измерение скорости их распространения в плоскости конструкции и затухания путем измерения сдвига основных составляющих спектра принятых импульсов, многократно прошедших по толщине, относительно излученных. По этим данным, исполь-

зуя ранее полученные уравнения регрессии или тарировочные графики, можно определить искомые характеристики.

Рассматриваемый здесь комплексный метод оценки упругих и прочностных характеристик [35] представляет собой комбинацию двух методов ультразвукового контроля — методов прохождения и отражения. Первый метод позволяет определить скорость распространения УЗК в материале конструкции в плоскости листа, обечайки и т.п. Вторым методом можно с достаточно высокой точностью оценить затухание упругих колебаний в материале при прозвучивании в направлении нормали к поверхности контролируемой конструкции.

Оба определяемых параметра диагностики информативны, но в комплексе они более тесно коррелируют с механической характеристикой материала, что, в свою очередь, позволяет повысить точность ее определения. При разработке предложенного метода необходимо было повысить точность оценки затухания УЗК в материале как наиболее информативного параметра диагностики.

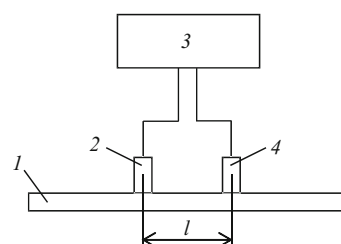
Известно, что при возрастании затухания УЗК в материале частота основной составляющей спектра импульса, прошедшего изделие по толщине в прямом и обратном направлениях, смещается в область более низких частот. Установлено, что частота этой составляющей может характеризовать затухание УЗК в материале.

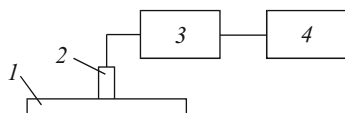
Поэтому для оценки упругих и прочностных свойств ПКМ предложено [35] определять в контролируемой детали два параметра — скорость распространения упругих волн в плоскости листа (нормальная волна) и частоту основной составляющей спектра импульса, прошедшего изделие по толщине в прямом и обратном направлениях (продольная волна).

Упругие и прочностные характеристики материала при этом определяли по комплексному параметру, включающему значения скорости распространения импульса и частоты основной составляющей спектра импульса [36]. Скорость распространения импульса УЗК находили на низких частотах (60 – 150 кГц), что обеспечивало прохождение импульсов на базе 50 – 100 мм, а частоту основной составляющей спектра импульса УЗК — в высокочастотном диапазоне (2 – 3 МГц).

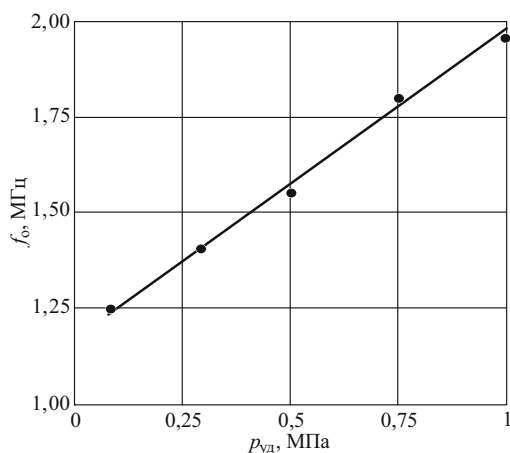
Скорость распространения импульса УЗК определяли с помощью ультразвукового прибора УК-10П с

**Рис. 2.** Схема расположения излучателя (2) и приемника (4) УЗК при прозвучивании образца (1) из ПКМ в плоскости пластины с помощью ультразвукового импульсного прибора (3)





**Рис. 3.** Структурная схема стенда для исследования спектра варианта акустического импульсного метода: 1 — пластина из ПКМ; 2 — прямой преобразователь на 2,5 МГц; 3 — ультразвуковой импульсный дефектоскоп; 4 — анализатор спектра



**Рис. 4.** Зависимость частоты основной составляющей спектра  $f_0$  от удельного давления прессования  $p_{уд}$  пластин из углепластика КМУ-3Л

использованием преобразователей на 60 кГц. Базу измерений  $l$  (расстояние между излучателем и приемником) выбирали минимально возможной (исходя из высокой точности определения времени прохождения импульса), она составляла 75 мм (рис. 2).

Методика измерения скорости распространения импульса УЗК в материале при поверхностном прозвучивании заключалась в установке приспособления, содержащего излучатель и приемник УЗК, через слой контактной жидкости на поверхность контролируемого материала, определении времени прохождения сигнала от излучателя к приемнику (по первому вступлению импульса) и расчете значения скорости.

Для определения частоты основной составляющей спектра импульса УЗК при его прохождении по толщине изделия использовали специальный комплекс, включающий ультразвуковой импульсный прибор УД2-12 с прямым преобразователем на 2,5 МГц и анализатор спектра С4-25 (рис. 3). На вход анализатора спектра подавали недетектированный сигнал от прибора [37]. Испытания проводили при одностороннем доступе. При этом в пластину прямым преобразователем излучали импульсы УЗК и тем же преобразователем принимали импульсы, отраженные от противоположной стороны пластины. Методика определения частоты основной составляющей спектра импульса УЗК при его прохождении по толщине изделия состояла в установке преобразователя прибора УД2-12 на поверхность контролируемой детали и

оценке с помощью анализатора С4-25 частоты наибольшей по абсолютной величине составляющей амплитудного спектра. Рабочая методика предусматривает обработку спектра принятого сигнала по компьютерной программе и нахождении значения  $f_0$  программным способом. Скорость  $c$  и частоту  $f_0$  определяли последовательно в одних и тех же зонах контролируемого материала.

На рис. 4 представлена зависимость частоты основной составляющей спектра  $f_0$  от удельного давления прессования  $p_{уд}$ , которая имеет прямо пропорциональный характер. Зависимость построена по данным, полученным при контроле пластин из углепластика КМУ-3Л толщиной 3 мм, изготовленных при различных удельных давлениях. При повышении давления прессования от 0,1 до 1,0 МПа частота основной составляющей смещается в область более высоких частот — от 1,25 до 1,95 МГц. Следует учитывать, что изменение удельного давления формования  $p_{уд}$  приводит к изменению соотношения объемного содержания наполнителя  $V_n$  и объемного содержания матрицы  $V_m$  полимерного композита. Так, при  $p_{уд} = 0,1$  МПа —  $V_n = 50$  и  $V_m = 50$  %; при  $p_{уд} = 0,3$  МПа —  $V_n = 55$  и  $V_m = 45$  %; при  $p_{уд} = 0,5$  МПа —  $V_n = 60$  и  $V_m = 40$  %; при  $p_{уд} = 0,75$  МПа —  $V_n = 63$  и  $V_m = 37$  %; при  $p_{уд} = 1,0$  МПа —  $V_n = 66$  и  $V_m = 34$  %.

Механические испытания проводили на универсальной машине «Инстрон» в соответствии с принятыми стандартами. На межслойный сдвиг по схеме трехточечного изгиба испытывали пятикратные плоские образцы шириной 10 мм с длиной рабочей части 15 мм. Скорость приложения усилия (движения плунжера) составляла 0,25 см/мин. Испытания на сжатие (образцы  $130 \times 10 \times 3$  мм) со скоростью 0,5 см/мин проводили вдоль направления армирования.

Объемное содержание компонентов определяли методом выжигания.

Результаты испытаний на сжатие и на межслойный сдвиг показали, что изменение давления формования от 0,1 до 1,5 МПа приводит к увеличению прочности на сжатие на 30 % и уменьшению прочности на межслойный сдвиг на 29 %. Первое вызвано увеличением объемной доли волокна, а второе — 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 (предела прочности при межслойном сдвиге  $\tau$  и предела прочности при сжатии  $\sigma$ ) выполняли с помощью пакета программы Microsoft Excel. Корреляционно-регрессионный анализ статистических данных проводили по схеме, изложенной в работах [38, 39].

На основании результатов статистического анализа определены корреляционные связи:  $\tau = \varphi_1(c)$ ,  $\tau = \sigma_2(f_0)$ ,  $\sigma = \varphi_3(c)$  и  $\sigma = \varphi_4(f_0)$ . Корреляционно-регрессионный анализ экспериментальных данных позволил

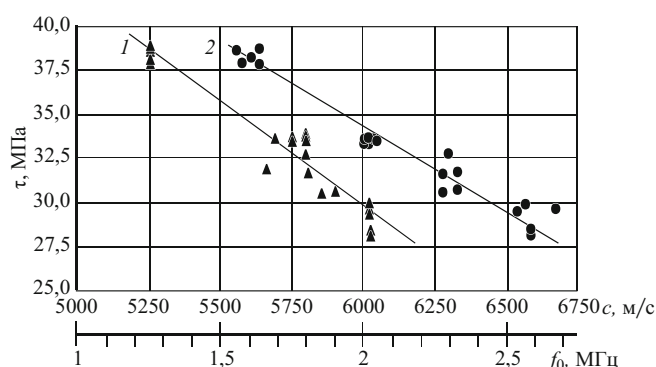


Рис. 5. Корреляционная связь скорости импульса УЗК с (1) и частоты основной составляющей спектра  $f_0$  (2) с прочностью на межслойный сдвиг  $\tau$  для углепластика КМУ-3Л

получить следующие линейные уравнения корреляционных связей упругих и прочностных характеристик углепластика КМУ-3Л с параметрами диагностики:

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

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

где  $\tau$  — прочность при межслойном сдвиге, МПа;  $\sigma$  — прочность при сжатии, МПа;  $c$  — скорость распространения УЗК в материале, м/с;  $f_0$  — частота основной составляющей спектра ультразвукового импульса, прошедшего по толщине объекта контроля в прямом и обратном направлениях, МГц.

На рис. 5 приведены корреляционные связи частоты основной составляющей спектра  $f_0$  и скорости  $c$  прохождения импульса упругих колебаний в зоне контроля с пределом прочности при межслойном сдвиге  $\tau$  углепластика КМУ-3Л.

Приемлемое значение коэффициента множественной корреляции определяется степенью ответственности и уровнем требуемой надежности конструкции [40]. Было принято, что для ответственных авиационных конструкций  $R \geq 0,9$ .

В решаемой задаче коэффициенты множественных корреляций  $R_{\tau c f_0} = 0,935$  и  $R_{\sigma c f_0} = 0,912$  при критериях надежности [38] коэффициентов корреляций, значительно больших трех, что позволяет считать вычисленные коэффициенты корреляций достоверными.

На рис. 6 приведен график в трехмерной системе координат, показывающий связь между прочностью при межслойном сдвиге  $\tau$ , скоростью УЗК  $c$  и частотой  $f_0$  основной составляющей спектра в углепластике КМУ-3Л. Однако следует заметить, что для практического применения интерес представляет только аналитическое выражение корреляционной связи, описываемое уравнением (18).

Таким образом, для оценки степени накопления микрповреждений в ПКМ предложен принципиально новый параметр диагностики, характеризующий затухание УЗК в материале, — частота основной составляющей спектра импульса УЗК, прошедшего из-

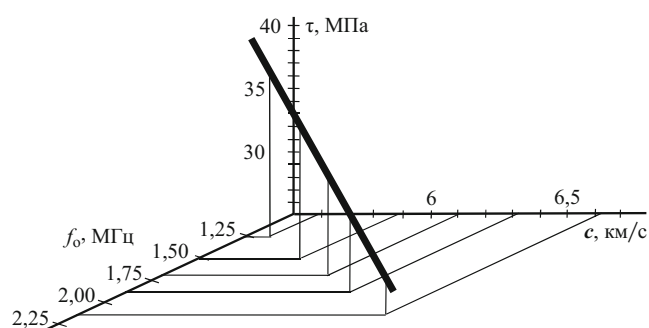


Рис. 6. Связь прочности  $\tau$  при межслойном сдвиге со скоростью УЗК  $c$  и частотой  $f_0$  основной составляющей спектра

делие по толщине в прямом и обратном направлениях. Данный параметр может быть определен с высокими точностью и достоверностью непосредственно в детали или конструкции из ПКМ без их разрушения при одностороннем доступе.

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 УЗК на толщину данной детали) выше  $5 - 10$  МГц · мм не зависит от изменения этого параметра.

Предложено оценивать степень накопления микрповреждений в ПКМ по их механическим характеристикам (например, прочности при межслойном сдвиге и прочность при сжатии), определяемым неразрушающим методом по комплексному параметру, включающему скорость распространения импульса УЗК в плоскости изделия и частоту основной составляющей спектра импульса УЗК, прошедшего изделие по толщине в прямом и обратном направлениях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мурашов В. В., Мишуров К. С. Оценка прочностных характеристик углепластиков акустическим методом / Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1. С. 81 – 85.
2. 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.
3. Каблов Е. Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы / Вестник РАН. 2002. Т. 72. № 1. С. 3 – 12.
4. 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.
5. Мурашов В. В. Неразрушающий контроль заготовок и деталей из углерод-углеродного композиционного материала для многоразового космического корабля «Буран» / Труды ВИАМ. 2013. № 4. С. 33 – 42. Ст. 06 (viam-works.ru).
6. Мурашов В. В., Генералов А. С. Контроль многослойных клееных конструкций низкочастотными акустическими методами / Авиационные материалы и технологии. 2014. № 2. С. 59 – 67.
7. Kablov E., Murashov V., Rumiyansev A. Diagnostics of Polymer Composites by Acoustic Methods / Ultrasound. 2006. N 2. P. 7 – 10.



8. Пат. 2214590 Российская Федерация. Способ определения физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов и устройство для его осуществления / Каблов Е. Н., Гуняев Г. М., Карабутов А. А. и др.; заявитель и патентообладатель ФГУП «ВИАМ». — 2001135020; заявл. 26.12.01; опубл. 20.10.2003. Бюл. № 29.
9. 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. С. 3 – 33.
10. Каблов Е. Н. Авиакосмическое материаловедение / Все материалы: Энциклопедический справочник. 2008. № 3. С. 2 – 14.
11. Латисенко В. А. Диагностика жесткости и прочности материалов. — Рига: Зинатне, 1968. — 329 с.
12. Максимов Р. Д., Пономарев В. М. Предпосылки комплексного диагностирования накопления повреждений при деформировании гибридного композита / Сб.: Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов. — Рига: Зинатне, 1983. С. 150 – 155.
13. 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.
14. 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 / Mater. Eval. 2000. Vol. 58. N 9. P. 1065 – 1074.
15. 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 / Mater. Eval. 2000. Vol. 58. N 11. P. 1310 – 1319.
16. Murashov V. V. Types of production and operational defects of the multilayer glued constructions and polymer composite materials products and methods to detect them / Proc. 5<sup>th</sup> European-American Workshop on Reliability of NDT (Berlin, Germany, Oct. 7 – 10, 2013). [Источник доступа <http://www.nde-reliability.de/Proceedings/Posters>].
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. 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.
20. Gunasekera A. M. Monitoring of impact damage products from PCM / Mater. Eval. 2010. Vol. 68. N 8. P. 880 – 887.
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. — 210 с.
23. Ашкенази Е. К., Гершберг М. В., Илюшин С. В. Косвенный способ оценки прочности стеклопластиков при сдвиге / Сб.: Свойства судостроительных стеклопластиков и методы их контроля. Вып. 3. — Л.: Судостроение. 1974. С. 198 – 202.
24. Гершберг М. В., Ланчин В. Ф., Ланчина Т. Н. Прочность стеклопластика и ее связь с параметрами импульсного метода / Сб.: Свойства судостроительных стеклопластиков и методы их контроля. Вып. 3. — Л.: Судостроение, 1974. С. 167 – 184.
25. 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.
26. ОСТ 5.9102–87. Стеклопластики конструкционные для судостроения. Методы неразрушающего контроля. — Л.: ЦНИИТС, 1987. — 43 с.
27. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Ультразвуковой контроль / Неразрушающий контроль: Справочник / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3. — М.: Машиностроение, 2006. — 864 с.
28. Latishenko V. A., Matiss J. G., Sandalov A. V. Diagnostics of load carrying capacity of composite structures / 10<sup>th</sup> World Conference on Non-Destructive Testing. Moscow. 1982. Rep. 5 – 3.
29. Викторов И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. — М.: Наука, 1966. С. 84 – 87.
30. Hand W. Testing reinforced plastics with ultrasonics / Plastics Technol. 1962. Feb. P. 62 – 67.
31. Ашкенази Е. К. Анизотропия машиностроительных материалов. — Л.: Машиностроение. 1969. С. 37 – 39.
32. Барышев С. Е. Спектральная плотность последовательности эхо-сигналов / Дефектоскопия. 1974. № 2. С. 19 – 25.
33. Меркулов Л. Г., Токарев В. А. Физические основы спектрального метода измерения затухания ультразвуковых волн в материалах / Дефектоскопия. 1970. № 4. С. 3 – 11.
34. Барышев С. Е. Влияние затухания на спектральную плотность эхо-сигналов / Дефектоскопия. 1978. № 1. С. 56 – 62.
35. А. с. 808930 СССР. Способ определения физико-механических характеристик материалов / В. В. Мурашев. — № 2724112; заявл. 12.02.79; опубл. 28.02.1981. Бюл. № 8.
36. Мурашов В. В., Румянцев А. Ф., Бузников Ю. Н. Акустический комплексный метод оценки физико-механических свойств полимерных композитных материалов / Сб.: Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов. — Рига: Зинатне, 1983. С. 165 – 170.
37. Мурашов В. В., Румянцев А. Ф., Бузников Ю. Н. Оценка физико-механических характеристик углепластиков комплексным акустическим методом / Сб.: Вопросы авиационной науки и техники. Авиационные материалы. Неметаллические композиционные материалы. — М.: ВИАМ, 1986. С. 105 – 111.
38. Алабин М. А., Ройтман А. Б. Корреляционно-регрессионный анализ статистических данных в двигателестроении. — М.: Машиностроение, 1974. — 124 с.
39. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. — М.: Наука, 1971. С. 87.
40. 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.

## REFERENCES

1. Murashov V. V., Mishurov K. S. Otsenka prochnostnykh kharakteristik ugleplastikov akusticheskim metodom [Assessment of strength characteristics CFRPs acoustic method] / Aviats. Mater. Tekhnol. 2015. N 1. P. 81 – 85 [in Russian].
2. Generalov A. S., Murashov V. V., Kosarina E. I., Boichuk A. S. Postroenie i analiz korrelyatsionnykh svyazei dlya otsenki prochnostnykh svoystv ugleplastikov reverberatsionno-skvoznyim metodom [Creation and the analysis of correlation communications for assessment of strength properties CFRPs by acousto-ultrasonic technique] / Aviats. Mater. Tekhnol. 2014. N 1. P. 58 – 63 [in Russian].
3. Kablov E. N. Aviatcionnoe materialovedenie: itogi i perspektivy [Aviation materials science: results and perspectives] / Vestnik RAN. 2002. Vol. 72. N 1. P. 3 – 12 [in Russian].
4. Murashov V. V., Kosarina E. I., Generalov A. S. Kontrol' kachestva aviatsionnykh detalei iz polimernykh kompozitsionnykh materialov i mnogoslownykh kleenykh konstruksii [Quality control of aviation details from polymeric composite materials and of multilayer glued constructions] / Aviats. Mater. Tekhnol. 2013. N 3. P. 65 – 70 [in Russian].
5. Murashov V. V. Nerazrushayushchii kontrol' zagotovok i detalei iz uglepod-uglerodnogo kompozitsionnogo materiala dlya mnogorazovogo kosmicheskogo korablya «Buran» [Non-destructive testing of preparations and details from carbon-carbon composite material for the reusable spacecraft «Buran»] / Trudy VIAM. 2013. N 4. P. 33 – 42. Art. 06 (viam-works.ru) [in Russian].
6. Murashov V. V., Generalov A. S. Kontrol' mnogoslownykh kleenykh konstruksii nizkочастотными акустическими методами [Control of multilayer glued constructions by low-frequency acoustic methods] / Aviats. Mater. Tekhnol. 2014. N 2. P. 59 – 67 [in Russian].
7. Kablov E., Murashov V., Rumyantsev A. Diagnostics of Polymer Composites by Acoustic Methods / Ultrasound. 2006. N 2. P. 7 – 10.
8. RF Pat. 2214590. Sposob opredeleniya fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik polimernykh kompozitsionnykh materialov i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Technique of definition of physicomachanical characteristics of polymeric composite materials and the device for its implementation] / Kablov E. N., Gunyaev G. M., Karabutov A. A., et al.; ap-



- plicant and owner FGUP «VIAM». — 2001135020; appl. 26.12.01; publ. 20.10.2003. Byull. Otkryt. Izobret. N 29 [in Russian].
9. **Kablov E. N.** Innovatsionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNTs RF po realizatsii «Strategicheskikh napravlenii razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of FSUE «VIAM» of SRC RF on implementation «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030»] / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2015. N 1. P. 3 – 33 [in Russian].
  10. **Kablov E. N.** Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials science] / *Vse materialy: Éntsiklopedicheskiy spravochnik* [All materials: encyclopedic reference]. 2008. N 3. P. 2 – 14 [in Russian].
  11. **Latishenko V. A.** Diagnostika zhestkosti i prochnosti materialov [Diagnostics of rigidity and Strength of materials]. — Riga: Zinatne, 1968. — 329 p. [in Russian].
  12. **Maksimov R. D., Ponomarev V. M.** Predposylki kompleksnogo diagnostirovaniya nakopleniya povrezhdenii pri deformirovani gibrinidnoy kompozita [Premises of complex diagnosing of accumulation of damages at deformation of hybrid composite] / *Sb.: Metody i sredstva diagnostiki nesushchei sposobnosti izdelii iz kompozitov* [Methods and tools for the diagnosis of bearing capacity of composite products]. — Riga: Zinatne, 1983. P. 150 – 155 [in Russian].
  13. **Sorokin K. V., Murashov V. V., Fedotov M. Yu., Goncharov V. A.** Prognozirovaniye razvitiya defektov v konstruktivnykh izdeliyakh iz PKM sposobom opredeleniya izmenenii zhestkosti pri aktyuirovani materiala [Forecasting of development of defects in designs from PCM in the technique of definition of changes of rigidity at materials aktyuiring] / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2011. N 2. P. 20 – 22 [in Russian].
  14. **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 / *Mater. Eval.* 2000. Vol. 58. N 9. P. 1065 – 1074.
  15. **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 / *Mater. Eval.* 2000. Vol. 58. N 11. P. 1310 – 1319.
  16. **Murashov V. V.** Types of production and operational defects of the multilayer glued constructions and polymer composite materials products and methods to detect them / *Proc. 5<sup>th</sup> European-American Workshop on Reliability of NDT* (Berlin, Germany, Oct. 7 – 10, 2013). [online: <http://www.nde-reliability.de/Proceedings/Posters/>].
  17. **Kablov E. N., Startsev O. V., Krotov A. S., Kirillov V. N.** Klimaticheskoe starenie kompozitsionnykh materialov aviatsionnogo naznacheniya. I. Mekhanizmy starenia [Climatic aging of composite materials of aviation assignment. I. Aging mechanisms] / *Deform. Razrush. Mater.* 2010. N 11. P. 19 – 27 [in Russian].
  18. **Kablov E. N., Startsev O. V., Krotov A. S., Kirillov V. N.** Klimaticheskoe starenie kompozitsionnykh materialov aviatsionnogo naznacheniya. III. Znachimye faktory starenia [Climatic aging of composite materials of aviation assignment. III. Significant factors of aging] / *Deform. Razrush. Mater.* 2011. N 1. P. 34 – 40 [in Russian].
  19. **Kirillov V. N., Efimov V. A., Shvedkova A. K., Nikolaev E. V.** Issledovanie vliyaniya klimaticheskikh faktorov i mekhanicheskogo nagruzheniya na strukturu i mekhanicheskie svoystva PKM [Research of influence of climatic factors and mechanical loading on structure and the PCM mechanical properties] / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2011. N 4. P. 41 – 45 [in Russian].
  20. **Gunasekera A. M.** Monitoring of impact damage products from PCM / *Mater. Eval.* 2010. Vol. 68. N 8. P. 880 – 887.
  21. **Potapov A. I., Pekker F. P.** Nerazrushayushchii kontrol' konstruktivnykh kompozitsionnykh materialov [Non-destructive testing of constructions from composite materials]. — Leningrad: Mashinostroenie, 1977. — 190 p. [in Russian].
  22. **Gershberg M. V., Ilyushin S. V., Smirnov V. N.** Nerazrushayushchie metody kontrolya sudostroitel'nykh stekloplastikov [Nondestructive control methods of shipbuilding GFRPs]. — Leningrad: Sudostroenie, 1971. — 210 p. [in Russian].
  23. **Ashkenazi E. K., Gershberg M. V., Ilyushin S. V.** Kosvennyi sposob otsenki prochnosti stekloplastikov pri sdvige [Indirect technique of assessment of strength of GFRPs at shift] / *Sb.: Svoystva sudostroitel'nykh stekloplastikov i metody ikh kontrolya* [Properties of shipbuilding fiberglass and methods of control]. Issue 3. — Leningrad: Sudostroenie, 1974. P. 198 – 202 [in Russian].
  24. **Gershberg M. V., Lanchin V. F., Lanchina T. N.** Prochnost' stekloplastika i ee svyaz' s parametrami impul'snogo metoda [Strength of GFRP and its communication with parameters of pulse method] / *Sb.: Svoystva sudostroitel'nykh stekloplastikov i metody ikh kontrolya* [Properties of shipbuilding fiberglass and methods of control]. Issue 3. — Leningrad: Sudostroenie, 1974. P. 167 – 184 [in Russian].
  25. **Murashov V. V., Il'in V. M., Zakharova T. T.** Otsenka prochnostnykh svoystv stekloplastika AP-66-151 v tonkostennykh krupnogabaritnykh detal'yakh bez ikh razrusheniya [Assessment of strength properties of GFRPs AP-66-151 in thin-walled large-size details without their destruction] / *Avtomobil'. Promyshl.* 1973. N 9. P. 34 – 36 [in Russian].
  26. Industry standard OST 5.9102–87. Stekloplastiki konstruktivnyye dlya sudostroeniya. Metody nerazrushayushchego kontrolya [GFRPs constructional for shipbuilding. Methods of non-destructive testing]. — Leningrad: Izd. TsNIIT-S, 1987. — 43 p. [in Russian].
  27. **Ermolov I. N., Lange Yu. V.** Ul'trazvukovoi kontrol' [Ultrasonic control] / *Klyuev V. V. (ed.). Nerazrushayushchii kontrol': Spravochnik* [Non-destructive testing: reference book]. Vol. 3. — Moscow: Mashinostroenie, 2006. — 864 p. [in Russian].
  28. **Latishenko V. A., Matiss J. G., Sandalov A. V.** Diagnostics of load carrying capacity of composite structures / 10<sup>th</sup> World Conference on Non-Destructive Testing. Moscow. 1982. Rep. 5 – 3.
  29. **Viktorov I. A.** Fizicheskie osnovy primeneniya ul'trazvukovykh voln Réleya i Lémbya v tekhnike [Physical bases of application of ultrasonic waves of Rayley and Lamb in equipment]. — Moscow: Nauka, 1966. P. 84 – 87 [in Russian].
  30. **Hand W.** Testing reinforced plastics with ultrasonics / *Plastics Technol.* 1962. Feb. P. 62 – 67.
  31. **Ashkenazi E. K.** Anizotropiya mashinostroitel'nykh materialov [Anisotropy of machine-building materials]. — Leningrad: Mashinostroenie, 1969. P. 37 – 39 [in Russian].
  32. **Baryshev S. E.** Spektral'naya plotnost' posledovatel'nosti ékho-signalov [Spectral density of sequence echo signals] / *Defektoskopiya.* 1974. N 2. P. 19 – 25 [in Russian].
  33. **Merkulov L. G., Tokarev V. A.** Fizicheskie osnovy spektral'nogo metoda izmereniya zatukhaniya ul'trazvukovykh voln v materialakh [Physical bases of spectral method of measurement of attenuation of ultrasonic waves in materials] / *Defektoskopiya.* 1970. N 4. P. 3 – 11 [in Russian].
  34. **Baryshev S. E.** Vliyaniye zatukhaniya na spektral'nyu plotnost' ékho-signalov [Influence of attenuation on spectral density echo signals] / *Defektoskopiya.* 1978. N 1. P. 56 – 62 [in Russian].
  35. USSR Invenor's Certificate No. 808930. **Murashov V. V.** Sposob opredeleniya fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik kompozitsionnykh materialov [Technique of definition of physicomechanical characteristics of materials]. — N 2724112; appl. 12.02.79; publ. 28.02.1981. Byull. Otkryt. Izobret. N 8 [in Russian].
  36. **Murashov V. V., Remyantsev A. F., Nuznikov Yu. N.** Akusticheskii kompleksnyi metod otsenki fiziko-mekhanicheskikh svoystv polimernykh kompozitsionnykh materialov [Acoustic complex method of assessment of physicomechanical properties of polymeric composite materials] / *Sb.: Metody i sredstva diagnostiki nesushchei sposobnosti izdelii iz kompozitov* [Methods and tools for the diagnosis of bearing capacity of composite products]. — Riga: Zinatne, 1983. P. 165 – 170 [in Russian].
  37. **Murashov V. V., Remyantsev A. F., Buznikov Yu. N.** Otsenka fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik ugleplastikov kompleksnym akusticheskim metodom [Assessment of physicomechanical characteristics CFRPs by complex acoustic method] / *Sb.: Voprosy aviatsionnoi nauki i tekhniki. Aviatsionnye materialy. Nemetallicheskie kompozitsionnye materialy* [Coll.: Questions of aviation science and technology. Aviation materials. Non-metallic composite materials]. — Moscow: Izd. VIAM, 1986. P. 105 – 111 [in Russian].
  38. **Alabin M. A., Roitman A. B.** Korrelyatsionno-regressionnyi analiz statisticheskikh dannykh v dvigatelestroenii [The correlation and regression analysis of statistical data in engine building]. — Moscow: Mashinostroenie, 1974. — 124 p. [in Russian].
  39. **Mitropol'skii A. K.** Tekhnika statisticheskikh vychislenii [Equipment of statistical calculations]. — Moscow: Nauka, 1971. P. 87 [in Russian].
  40. **Murashov V. V.** K voprosu opredeleniya uprugikh i prochnostnykh svoystv polimernykh kompozitsionnykh materialov akusticheskim kompleksnym metodom [On the question of identification of elastic and strength properties of polymer composite materials by acoustic complex method] / *Deform. Razrush. Mater.* 2014. N 11. P. 39 – 45 [in Russian].