

УДК 620.179:678.747.2

DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-81-85

В.В. Мурашов¹, К.С. Мишуров¹**ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕПЛАСТИКОВ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Рассмотрена связь механических характеристик полимерного композиционного материала (прочности при сдвиге и сжатии) и акустических характеристик (скорость и затухание ультразвуковых колебаний при их распространении в материале) образцов из углепластика. Показано, что и прочностные и акустические характеристики материала зависят как от соотношения основных компонентов пластика, так и от пористости материала, т. е. от микро- и макроструктуры углепластика. Показано также, что между механическими и акустическими характеристиками существует довольно тесная корреляционная связь, которая использована для неразрушающей оценки прочности углепластика.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, углепластик, прочностные характеристики, прочность при сдвиге, прочность при сжатии, акустические характеристики, пористость материала, корреляционная связь, методы неразрушающего контроля.

The article dwells upon a dependence of mechanical characteristics of polymer composite material (shear strength and compression strength) and acoustic characteristics (speed and attenuation of ultrasonic vibrations at their distribution in material) of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) specimens. It is shown that both strength and acoustic characteristics of material depend on ratio of basic components of plastic and on material porosity, i.e. CFRP micro- and macrostructure. It is also shown that there is a quite close correlation between mechanical and acoustic characteristics, which was used for nondestructive testing of CFRP strength.

Keywords: polymer composite material, carbon fiber reinforced plastics (CFRP), strength characteristics, shear strength, compression strength, acoustic characteristics, porosity of material, correlation, methods of non-destructive testing.

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

Наиболее часто встречающимися опасными макродефектами монолитных деталей и конструкций из углепластиков (УП) являются дефекты типа нарушения сплошности, например, расслоения, непроклеи, трещины, крупные воздушные или газовые раковины, инородные включения, прочность в зоне которых равна или близка к нулю. Кроме того, в УП возможны также дефекты на уровне микроструктуры: зоны повышенной пористости, отклонения от оптимального соотношения матрицы и армирующего наполнителя, низкая степень отверждения связующего при формовании, нарушения ориентации волокон, складки, свили, поверхностные подмятия и царапины и т. п., в зоне которых отмечается пониженная прочность материала [1–4].

Техническая диагностика позволяет определить состояние объектов путем определения физико-механических свойств и состава ПКМ непосредственно в деталях и конструкциях без их разрушения. Оценка прочностных характеристик полимерных композиционных материалов неразрушающими методами является наиболее трудной задачей, до сих пор не решенной в удовлетворительном виде учеными разных стран, хотя работы в этом направлении ведутся давно.

Механические характеристики углепластика, также как и физические, в основном зависят от механических и физических характеристик компонентов, их соотношения, пористости материала. Этими факторами, являющимися параметрами диагностики, обусловлены и основные акустические характеристики материала – скорость и затухание ультразвуковых колебаний (УЗК) при прохождении в материале. Поэтому механические характеристики углепластика могут быть определены по установленной корреляционной (статистической) связи их с параметрами диагностики, которые могут быть получены в процессе неразрушающих испытаний конструкции. Способы определения физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов в конструкциях ультразвуковым методом и устройством для осуществления этих способов защищены несколькими патентами РФ [5–9].

В данной работе используется лазерное возбуждение упругих колебаний в объекте контроля (ОК), позволяющее получить очень короткий импульс (длительность импульса – не более 0,05 мкс), что дает преимущества при спектральном анализе, так как в ОК формируется акустический сигнал с очень широким спектром (в диапазоне 0,1–10 МГц).

Основное направление исследований в данной работе – уточнение информативных параметров диагностики, т. е. тех параметров, которые находятся в наиболее тесной корреляционной связи с прочностью при сдвиге и сжатии углепластика. Другим важным направлением была разработка технологии изготовления объектов исследования из углепластика ВКУ-17КЭ0,1, которые обеспечивали бы необходимый диапазон прочностных характеристик материала.

Материалы и методы

При выполнении работы ставилась задача – получить образцы с разбросом значений по прочности при сдвиге в диапазоне 60–90 МПа и прочности при сжатии в диапазоне 300–1200 МПа. При отработке технологии изготовления объектов исследования использовали специальные технологические приемы для получения экспериментальных плит-образцов из углепластика ВКУ-17КЭ0,1 с разбросом значений по прочности при сдвиге в пределах 60–90 МПа и прочности при сжатии в пределах 300–1200 МПа путем изменения наноса связующего при изготовлении препрегов и давления формования образцов.

В связи с этим для обеспечения образцами экспериментальной части работы по оценке прочности при сдвиге признано целесообразным изготовить три партии образцов. Первая – по штатной технологии при схеме укладки $[0, 90]_{20}$ и удельном давлении прессования 10 ат. Вторая – с выкладкой слоев сухого наполнителя (не пропитанного клеом), между которыми помещается препрег по схеме укладки $[0, 90]_9 [0_c/90/0_c]_2 [0, 90]_9$ при удельном давлении прессования 1 и 3 ат. Третья – с закладкой только четырех слоев сухого наполнителя по схеме укладки $[0, 90]_9 [0_c, 90_c]_2 [0, 90]_9$ при давлении прессования 3 и 5 ат. Такие вариации состава и давления формования позволили получить образцы с номинальной прочностью при сдвиге и с различными значениями пониженной прочности.

Для обеспечения образцами экспериментальной части работы по оценке прочности при сжатии признано целесообразным изготовить также несколько партий образцов с различными схемами укладки наполнителей (препрега и сухого наполнителя). Образцы с пониженной прочностью при сжатии изготовлены при удельном давлении прессования 1–10 ат. Такие вариации состава и давления формования позволили получить образцы с номинальной прочностью при сжатии и с различными значениями пониженной прочности.

Для решения задач основного направления исследований выбран ультразвуковой метод и современное эффективное средство неразрушающего контроля – лазерно-ультразвуковой прибор УДЛ-2М. На этом приборе отработана методика неразрушающих испытаний, успешно решены вопросы ввода и приема УЗК и изучены различные факторы, влияющие на точность измерения

параметров диагностики углепластика ВКУ-17КЭ0,1.

Для определения акустических характеристик углепластика применен лазерно-акустический способ ультразвукового метода отражения [10–23]. Этот метод неразрушающего контроля основан на возбуждении импульсов упругих колебаний в объекте контроля с помощью луча лазера, приеме импульсов, прошедших контролируемый объект и отраженных от поверхности раздела двух сред, отличающихся волновыми сопротивлениями (от границ объекта контроля или неоднородностей), приеме отраженных импульсов и анализе параметров принятых сигналов.

Использованный при неразрушающих испытаниях способ основан на измерении акустических и временных характеристик импульсов УЗК в контролируемом материале при определении прочности при сдвиге и сжатии. Пористость материала оценивалась по энергии структурного шума.

На рис. 1 показана развертка типа *A* – временной трек сигналов, прошедших по толщине ОК в прямом и обратном направлениях. Здесь $2\Delta t = t_1 - t_0$, где t_1 – время индикации первого донного импульса; t_0 – время индикации импульса, отраженного от поверхности ОК.

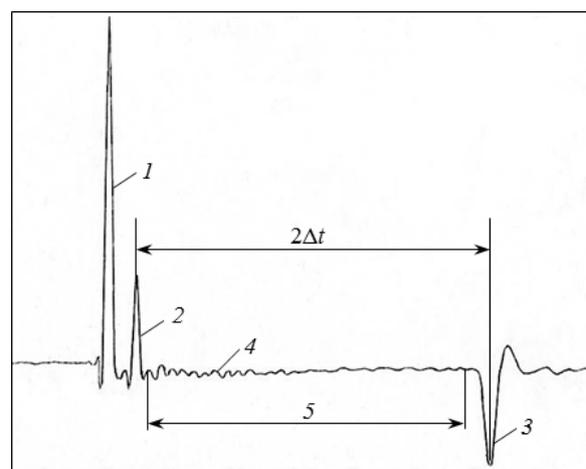


Рис. 1. Временной трек сигналов (импульсов) при их прохождении по материалу детали или конструкции: 1 – сигнал оптико-акустического генератора (имеет амплитуду A); 2 – сигнал, отраженный от поверхности объекта контроля (ОК) (имеет амплитуду A_0); 3 – донный импульс – сигнал, отраженный от противоположной стороны ОК (имеет амплитуду A_1); $2\Delta t$ (мкс) – время прохождения сигнала по толщине материала в прямом и обратном направлениях; 4 – структурный шум, возникающий при отражении от неоднородностей структуры материала и преимущественно от пор; 5 – рабочий участок временного трека, на котором определяют нормированную энергию W_n структурного шума

Сигнал оптико-акустического генератора частично отражается от верхней поверхности ОК, а

частично входит в ОК и распространяется в нем в виде продольной волны. Ультразвуковой сигнал, распространяющийся вглубь ОК, доходит до противоположной стороны ОК, отражается и регистрируется приемным преобразователем. Кроме того, при распространении в материале ОК сигнал претерпевает рассеяние на неоднородностях структуры. Часть этого сигнала, рассеянная в обратном направлении, попадает на приемник и тоже регистрируется с некоторой временной задержкой относительно поступления эталонного сигнала. Время поступления рассеянной волны соответствует определенной глубине залегания структурных неоднородностей в ОК (преимущественно пор). Частотный спектр акустических импульсов (спектральный диапазон 0,1–10 МГц), рассеянных назад всей толщиной контролируемой конструкции, несет информацию о неоднородностях структуры в целом, что позволяет проводить контроль готовых деталей и конструкций из углепластиков с целью диагностирования их свойств при одностороннем доступе.

Прочностные свойства углепластика в конструкции предложено определять по установленной корреляционной связи объединенного параметра b диагностики с прочностью материала при межслоевом сдвиге

$$\tau_{\text{сдв}} = \varphi_1(b) \quad (1)$$

и прочностью при сжатии

$$\sigma_{\text{сж}} = \varphi_2(b), \quad (2)$$

где b – объединенный параметр диагностики, равный отношению коэффициента k ко времени Δt его прохождения в направлении толщины стенки конструкции.

Коэффициент k определяется программным способом по амплитудным характеристикам сигналов и является величиной, обратной затуханию сигнала в материале при его прохождении по толщине ОК. Программа определяет коэффициент k как

$$k = A_1/A, \quad (3)$$

где A_1 – амплитуда донного сигнала, т. е. амплитуда сигнала, отраженного от противоположной поверхности стенки ОК; A – амплитуда сигнала, вошедшего в ОК.

Объединенный параметр b диагностики рассчитывается программным способом по первичным параметрам диагностики:

$$b = k/\Delta t = A_1/(A \cdot \Delta t), \quad (4)$$

где Δt – время прохождения сигнала по толщине стенки конструкции.

Рассмотрим пример изменения объединенного параметра b диагностики при изменении прочностных характеристик углепластика при постоянной и минимальной пористости материала. При увеличении прочности материала величина A_1/A будет возрастать, а время Δt прохождения сигнала по толщине стенки конструкции будет уменьшаться. В результате объединенный параметр диагностики будет увеличиваться. При уменьше-

нии прочности материала величина A_1/A будет уменьшаться, а время Δt прохождения сигнала по толщине стенки конструкции будет возрастать. В результате объединенный параметр диагностики будет уменьшаться.

При пористости материала $>1\%$ резко возрастает погрешность определения прочности углепластика, и при определении прочности углепластика при сдвиге и сжатии применение разрабатываемой методики становится некорректным. Поэтому для обеспечения высокой точности определения прочностных характеристик необходимо сначала оценить пористость материала по энергии структурного шума.

Энергия структурного шума W рассчитывается с помощью компьютерной программы путем обработки временного трека сигналов по спектру импульсов, рассеянных в обратном направлении $S(f)$, и спектру импульса $S_0(f)$, отраженного от верхней поверхности ОК:

$$W = \varphi(S(f), S_0(f)), \quad (5)$$

где f – частота.

Пористость углепластика определяется по ранее установленной корреляционной связи объемного содержания пор V_n с нормированной величиной энергии W структурного шума:

$$V_n = \varphi(W). \quad (6)$$

Энергия структурного шума W определяется для оценки пористости материала на первом этапе контроля. К определению прочностных характеристик углепластика в соответствии с корреляционными связями (1) и (2) можно переходить лишь в том случае, если пористость находится в интервале 0–1%.

Разрушающим методом определялась прочность при межслоевом сдвиге в образцах, предназначенных для испытаний на сдвиг на испытательной машине в соответствии с методикой, изложенной в Методических указаниях РД 50-675 [24].

Прочность при сжатии определялась разрушающим методом на испытательной машине (в образцах, предназначенных для испытаний на сжатие) в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 25.602А [25].

Для определения прочности углепластиков при межслоевом сдвиге и сжатии разрушающим методом использовалась испытательная машина с максимальным усилием – до 10 т, обеспечивающая нагружение образца с заданной скоростью перемещения активного захвата и измерение нагрузки с погрешностью не более $\pm 1\%$ от измеряемой величины.

Определение пористости материала является задачей, которая должна быть решена в первую очередь. Следует иметь в виду, что общая или локальная повышенная пористость материала в значительной зоне является опасным дефектом, так как отрицательно влияет на механические

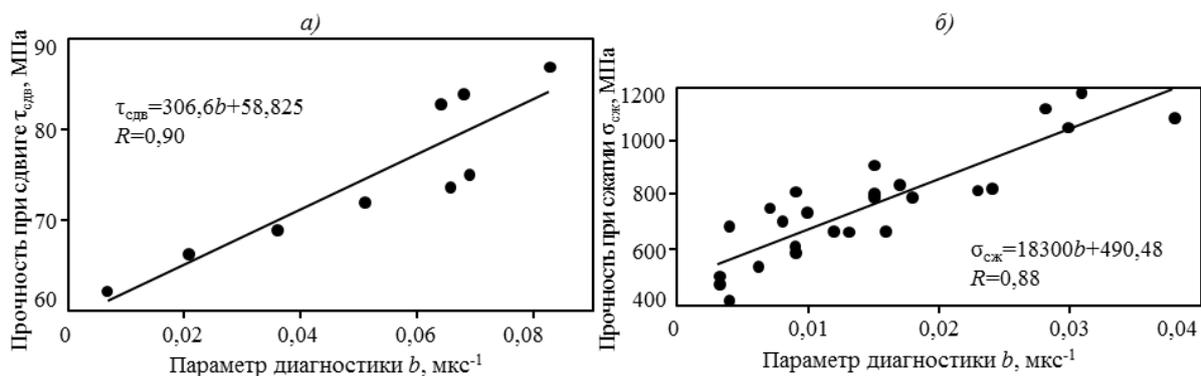


Рис. 2. Корреляционная связь объединенного параметра диагностики b с прочностью при сдвиге $\tau_{сдв}$ (а) и сжатии $\sigma_{сж}$ (б) углепластика ВКУ-17КЭ0,1

свойства материала (с точки зрения конструкционной прочности и эксплуатационной надежности).

Связь объемной пористости материала с энергией структурного шума определяется выражением $V_n = 290,66W^2 + 0,2934W$ (коэффициент корреляции $R=0,95$). Определение пористости материала по энергии шумовой компоненты на приборе УДЛ-2М проводится по специальной программе.

В процессе выполнения данной работы установлены корреляционные связи основного параметра диагностики с прочностью при сдвиге и сжатии углепластика ВКУ-17КЭ0,1. Проведена компьютерная обработка экспериментальных данных с целью установления степени взаимозависимости корреляционных связей параметра диагностики с прочностью при сдвиге и сжатии углепластика, и построены графики связи объединенного параметра b , определенного с помощью прибора УДЛ-2М, с прочностью при сдвиге и сжатии углепластика, определенных разрушающим методом (пористость материала $<1\%$).

На рис. 2, а представлена корреляционная связь параметра диагностики b с прочностью при сдвиге углепластика ВКУ-17КЭ0,1, построенная для образцов с низкой пористостью материала ($<1\%$), а на рис. 2, б представлена корреляционная связь параметра диагностики b с прочностью при сжатии углепластика ВКУ-17КЭ0,1, также построенная для образцов с низкой пористостью материала.

Получены следующие уравнения регрессии и коэффициенты корреляции для образцов с низкой пористостью (V_n – от 0 до 1%):

– для корреляционной связи параметра диагностики b с прочностью при сдвиге углепластика:

$$\tau_{сдв} = 306,6b + 58,825, \quad (7)$$

коэффициент корреляции $R=0,90$;

– для корреляционной связи параметра диагностики b с прочностью при сжатии углепластика:

$$\sigma_{сж} = 18300b + 490,48, \quad (8)$$

коэффициент корреляции $R=0,88$.

Результаты

Предложено определять прочностные свойства углепластика в конструкции по установленной корреляционной связи объединенного параметра диагностики с прочностью при межслоевом сдвиге $\tau_{сдв} = \varphi_1(b)$ и прочностью при сжатии $\sigma_{сж} = \varphi_2(b)$. Объединенный параметр диагностики b рассчитывается программным способом по первичным параметрам диагностики и равен отношению коэффициента k ко времени прохождения сигнала (Δt) по толщине стенки конструкции: $b = k / \Delta t = A_1 / A \cdot \Delta t$, где A_1 – амплитуда донного сигнала; A – амплитуда сигнала, вошедшего в ОК; Δt – время прохождения сигнала по толщине стенки конструкции.

Установлено, что прочностные свойства углепластиков могут быть определены только после определения объемной пористости V_n материала по энергии структурного шума $V_n = \varphi(W)$. Объемная пористость углепластика ВКУ-17КЭ0,1, определенная в ОК, не должна превышать 1%, иначе точность определения прочностных характеристик материала будет низкой. При пористости материала $<1\%$ относительная погрешность определения прочности при сдвиге и сжатии – не более $\pm 10\%$.

По результатам работы разработана производственная инструкция ПИ1.2.777–2009, которая содержит методические указания по оценке прочностных свойств углепластика ВКУ-17КЭ0,1, состоящего из полимерной матрицы (модификация клея марки ВК) и углеродного армирующего наполнителя (лента ЭЛУР-П).

Заключение

Таким образом, лазерно-акустический способ ультразвукового контроля позволяет с достаточно высокой точностью определять прочностные характеристики ПКМ непосредственно в деталях и конструкциях без их разрушения. Сопоставление результатов определения прочностных характеристик материала предложенными неразрушающим и разрушающим способами показало их достаточно высокое соответствие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Ч. 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов //Контроль. Диагностика. 2007. №4. С. 23–31.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. /Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение. 2006. С. 129–140.
3. Cawley P., Adams R. Defect types and NDT for composites and bonded joints //Materials Science and Technology. 1989. V. 5. P. 406–447.
4. Круглянский И.М., Алексеенко А.А. и др. Классификатор методов и средств неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов //Научные труды МАТИ им. К.Э. Циолковского. 2003. Вып. 6 (78). С. 222–226.
5. Способ определения физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов в конструкциях ультразвуковым методом: пат. 2196982. Рос. Федерация; опубл. 20.01.2003 Бюл. №2.
6. Способ определения физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов и устройство для его осуществления: пат. 2214590 Рос. Федерация; опубл. 20.10.2003 Бюл. №29.
7. Способ определения степени полимеризации композиционных материалов: пат. 2231054 Рос. Федерация; опубл. 20.06.2004 Бюл. №17.
8. Способ определения прочности соединения деталей интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов: пат. 2262099 Рос. Федерация; опубл. 10.10.2005 Бюл. №28.
9. Способ определения степени полимеризации композиционных материалов: пат. 2274856 Рос. Федерация; опубл. 20.04.2006 Бюл. №11.
10. Карабутов А.А., Мурашов В.В., Подымова Н.Б. Диагностика слоистых композитов с помощью лазерного оптико-акустического преобразователя //Механика композитных материалов. 1999. Т. 35. №1. С. 125–134.
11. Karabutov A.A., Murashov V.V., Oraevsky A.A., Podymova N.B. Nondestructive characterization of layered composite materials with a laser optoacoustic sensor /In: Nondestructive Evaluation of Materials and Composites II. San Antonio: Published by SPIE – The International Society for Optical Engineering. 1998. V. 3396. P. 103–111.
12. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Ч. 2. Методы выявления дефектов монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов //Контроль. Диагностика. 2007. №5. С. 31–36, 41–42.
13. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф., Иванова Г.А., Файзрахманов Н.Г. Диагностика структуры, состава и свойств полимерных композиционных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2008. №1. С. 17–24.
14. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Диагностика состава и свойств полимерных композитов в деталях и конструкциях //Контроль. Диагностика. 2008. №8. С. 13–17.
15. Мурашов В.В. Определение физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов акустическими методами //Авиационные материалы и технологии. 2012. №8. С. 465–475.
16. Генералов А.С., Мурашов В.В., Далин М.А., Бойчук А.С. Диагностика полимерных композитов ультразвуковым реверберационно-сквозным методом //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 42–47.
17. Петрова А.П., Лукина Н.Ф. Клеи для многоразовой космической системы //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 04 (viam-works.ru).
18. Rose J. Achievements and prospects of development of the ultrasonic waveguide method of control //Materials Evaluation. 2010. V. 68. №5. P. 494–500.
19. Мурашов В.В., Косарина Е.И., Генералов А.С. Контроль качества авиационных деталей из полимерных композиционных материалов и многослойных конструкций //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 65–70.
20. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль заготовок и деталей из углерод-углеродного композиционного материала для многоразового космического корабля «Буран» //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 05 (viam-works.ru).
21. Murashov V.V. Glued Joint Strength Diagnostics //Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials. 2009. V. 2. №1. P. 64–70.
22. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическим импедансным методом без применения контрольных образцов для настройки приборов //Новости материаловедения. Наука и техника. 2014. №1. Ст. 6 (materialsnews.ru).
23. 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.
24. РД 50-675–88. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Материалы композиционные. Методы испытаний на межслойный сдвиг //Государственный комитет СССР по стандартам. Москва. 1989.
25. ГОСТ 25.602А–83. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах //Государственный комитет СССР по стандартам. Москва. 1984.