

УДК 678.747.2:620.165.79

DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-88-92

В.В. Мурашов¹, К.С. Мишуров¹**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРИСТОСТИ УГЛЕПЛАСТИКОВ
В АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ**

Установлено, что нормированная энергия шумовой компоненты рассеянного назад акустического сигнала наилучшим образом коррелирует с пористостью материала. Предложено пористость углепластика определять по ранее установленной корреляционной связи объемного содержания пор с нормированной величиной энергии структурного шума.

Ключевые слова: углепластик, пористость материала, авиационные конструкции, лазерно-акустический способ, ультразвуковой контроль.

It is established that the standardized energy of the sound constituent of the acoustic signal dispersed back correlates with the material porosity in the best way. It is offered the carbon fiber reinforced plastics (CFRP) porosity is determined by the previously defined correlation between the pores volume content and the standardized energy value of the structural sound.

Keywords: carbon fiber reinforced plastics (CFRP), porosity of material, aircraft constructions, laser-acoustic method, ultrasonic control.

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

К причинам, приводящим к повышенной пористости углепластиков (УП), можно отнести [1–3] отклонение состава препрега от нормы, нарушение сроков или условий его хранения, несоблюдение режима формования (продолжительности воздействия и величины приложенного давления, скорости нагрева). Иногда появление повышенной пористости носит случайный характер, и тогда пористость в УП является непредсказуемым фактором.

При повышенной пористости материала ухудшаются характеристики матрицы. Пористость в 1% снижает прочность на 5%, а усталостную долговечность – на 50%. Кроме того, повышенная пористость увеличивает равновесный уровень влажности [3–7]. Для большинства УП, применяемых для изготовления деталей и конструкций ответственного назначения, пористость должна быть минимальной (не более 1–2% от объема детали), поэтому определение пористости УП непосредственно в деталях и конструкциях без их разрушения с высокой точностью является актуальной задачей.

Материалы и методы

Для определения пористости УП выбран лазерно-акустический способ ультразвукового метода отражения. На рис. 1 схематично показан принцип лазерного термооптического возбуждения акустических импульсов [8–11]. Область повышенной температуры заштрихована.

Поглощение лазерного импульса приводит к нестационарному повышению температуры при-

поверхностного слоя как поглощающей, так и (за счет теплопроводности) прозрачной среды. При этом происходит возбуждение акустических волн как в прозрачной, так и в поглощающей средах [12]. При малых значениях интенсивности падающего светового потока имеет место импульсное локальное расширение объема вблизи поверхности объекта контроля. Эти деформации передаются соседним зонам, порождая упругие волны. При этом амплитуда УЗ-колебаний пропорциональна повышению температуры. При больших значениях интенсивности лазерного излучения возможно повреждение поверхностного слоя объекта контроля из полимерного композиционного материала (ПКМ), поэтому мощность излучения должна ограничиваться.

Для возбуждения упругих колебаний в объекте контроля применяются твердотельные и газовые лазеры, генерирующие оптические импульсы длительностью 5–30 нс. Луч лазера с изначально малым сечением часто дополнительно фокусируют на поверхность объекта контроля для уменьшения площади облучаемой зоны (вплоть до 10 мкм), при этом концентрация энергии в облучаемой зоне может быть очень большой [13].

Если на поверхность объекта контроля воздействует тонкий лазерный луч, то при термоупругом взаимодействии излучаются продольные, поперечные и поверхностные волны. При этом нормальные к поверхности объемные волны практически не возбуждаются.

При лазерном возбуждении в объекте контроля излучается короткий акустический импульс, спектр которого определяется в основном

длительностью (τ) импульса лазера и лежит в пределах частот до $f_{\max}=1/\tau$. При $\tau=10$ нс частота импульса составляет $f_{\max}=100$ МГц [5]. Однако в практике контроля используются только те составляющие спектра (обычно – до 20 МГц), которые могут распространяться в ПКМ на достаточные для контроля расстояния.

Состояние поверхности деталей из ПКМ (степень черноты, шероховатость и пр.) даже на одной детали может значительно отличаться. Уровень акустического сигнала в объекте контроля при лазерном возбуждении ультразвука зависит от состояния поверхности объекта контроля и, прежде всего, от коэффициента поглощения света.

С целью возбуждения в объекте контроля мощных широкополосных ультразвуковых импульсов применено лазерное термооптическое возбуждение звука – оптико-акустический эффект [12]. Амплитуда и временная форма (и соответственно частотный спектр) термооптически возбуждаемого ультразвукового импульса определяется временной зависимостью интенсивности поглощенного лазерного импульса и теплофизическими параметрами поглощающей среды (коэффициентами поглощения света и теплового расширения, теплопроводностью, температуропроводностью), при этом амплитуда термооптически возбуждаемых ультразвуковых импульсов может достигать сотен мегапаскалей в спектральном диапазоне 0,1–20 МГц.

Спектр акустического сигнала, рассеянного на неоднородностях структуры, состоит из регулярной (гладкой) и нерегулярной (шумовой) компонент. Гладкая часть определяется спектральной чувствительностью пьезоприемника в акустическом преобразователе и может быть определена сглаживанием реального спектра сигнала. Нерегулярная часть (так же, как и во временной форме акустического сигнала) определяется рассеянием на неоднородностях структуры ПКМ (в первую очередь – в порах), и ее полная энергия может служить характеристикой пористости среды.

В ВИАМ разработана методика определения пористости ПКМ лазерно-акустическим способом ультразвукового контроля [14, 15], основанная на применении лазерно-ультразвукового прибора (модель УДЛ-2М). Принцип работы прибора УДЛ-2М основан на лазерном термооптическом возбуждении широкополосных ультразвуковых импульсов в исследуемом материале, приеме импульсов, прошедших материал полностью или частично по толщине в прямом и обратном направлениях, и анализе параметров принятых импульсов.

Структурная схема прибора УДЛ-2М представлена на рис. 2.

Особенностью прибора УДЛ-2М, отличающей этот прибор от используемой ранее лазерной оптико-акустической системы ЛОАС-1, является

наличие в оптико-акустическом преобразователе (ОАП) прибора УДЛ-2М оптико-акустического источника, позволяющего возбуждать в объектах разного цвета одинаковые по амплитуде ультразвуковые импульсы. В этом случае лазерный луч падает не на поверхность объекта контроля, а воздействует на оптико-акустический источник, являющийся практически абсолютно черным телом, от которого ультразвуковые импульсы поступают в объект контроля.

Для создания акустического контакта между преобразователем и испытуемым объектом из углепластика в процессе определения параметров диагностики рекомендуется использовать дистиллированную воду.

В качестве параметра диагностики пористости материала использована полная нормированная энергия шумовой компоненты [16, 17]:

$$W_H = \frac{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} [S(f) - S_0(f)]^2 df}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_0^2(f) df}, \quad (1)$$

где: $S(f)$ – спектр импульсов, рассеянных структурой в обратном направлении; $S_0(f)$ – спектр зондирующего импульса; f – частота ультразвуковых колебаний; f_{\min} и f_{\max} – граничные частоты спектрального диапазона.

Нормированная энергия шумовой компоненты рассеянного назад акустического сигнала наилучшим образом коррелирует с пористостью материала и именно поэтому данная характеристика выбрана в качестве параметра диагностики. Пористость углепластика определяется по ранее установленной корреляционной связи объемного содержания пор (V_n) с нормированной величиной энергии (W_H) структурного шума:

$$V_n = \varphi(W_H), \quad (2)$$

причем нормированная энергия шума (W_H) рассчитывается с использованием компьютерной программы по спектрам зондирующего импульса и импульсов, рассеянных в обратном направлении.

Между пористостью материала и энергией шумовой компоненты существует довольно тесная корреляционная связь (коэффициент корреляции $R=0,95$), что и позволяет использовать энергию шумовой компоненты в качестве параметра диагностики, определяемого при неразрушающих испытаниях деталей и конструкций из углепластиков. Связь объемной пористости материала с энергией структурного шума определяется выражением

$$V_n = 290,66 W_H^2 + 0,2934 W_H. \quad (3)$$

Энергия структурного шума в дефектной области углепластика может на порядок превосходить энергию в бездефектной области [18–25], поэтому производить корректную диагностику пористости в дефектных участках углепластика

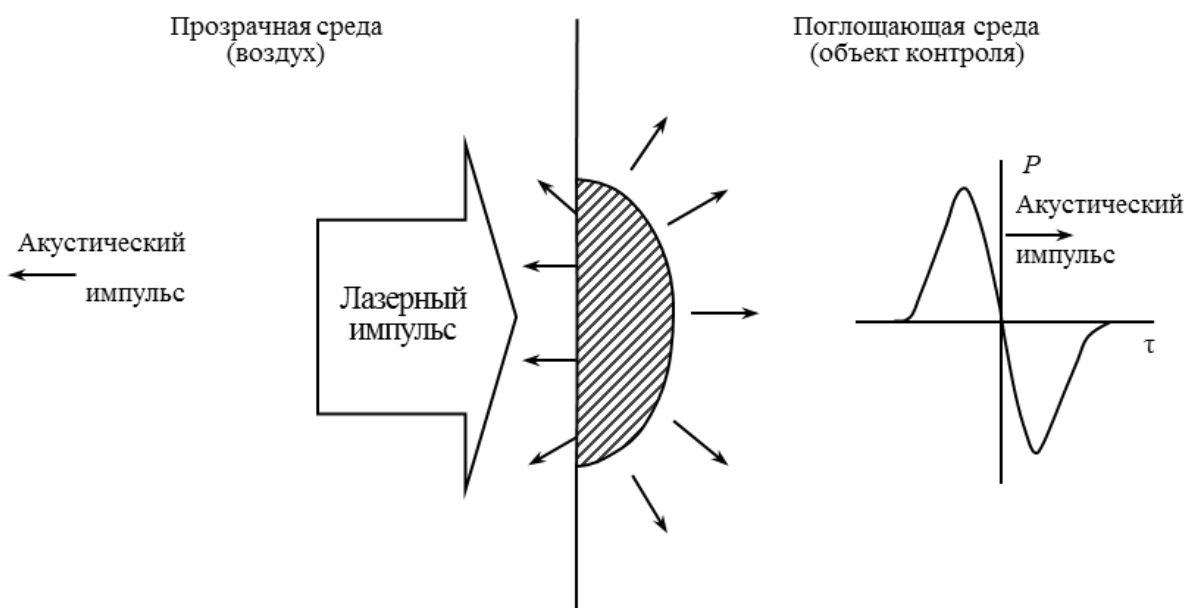


Рис. 1. Принцип лазерного термооптического возбуждения акустических импульсов в контролируемой конструкции

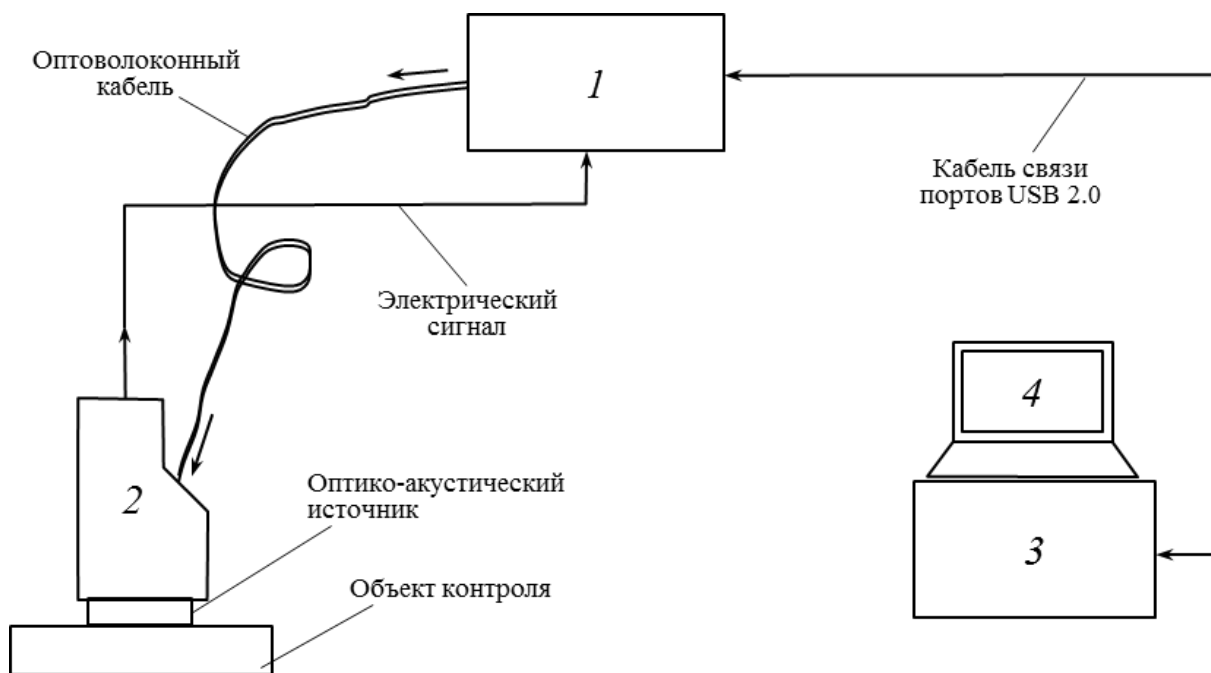


Рис. 2 Структурная схема прибора УДЛ-2М:

1 – оптоэлектронный блок, в состав которого входит импульсный Nd:YAG-лазер и аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 2 – широкополосный оптико-акустический преобразователь (ОАП) модели ПЛУ-6П-01, снабженный оптико-акустическим источником (ОАИ) и оптоволоконным кабелем для доставки лазерного излучения в ОАП; 3 – информационно-измерительный комплекс, включающий в себя систему цифровой записи и накопления информации; 4 – компьютер

не представляется возможным. Следовательно, диагностику углепластика можно проводить только на тех деталях и конструкциях, которые успешно прошли дефектоскопический контроль [26–33], т. е. не имеют дефектов.

Результаты работы использованы при разработке производственной инструкции по определе-

нию плотности и состава углепластиков акустическими методами неразрушающего контроля. Данная инструкция определяет методику измерения энергии структурного шума при прохождении акустического сигнала в углепластике и пористости материала для достоверного определения плотности и состава материала.

Заключение

Получена связь пористости с энергией структурного шума в углепластиках с различным содержанием матрицы, которая позволяет по измеренным значениям энергии структурного шума определять пористость в различных зонах конструкции.

Относительная погрешность определения пористости углепластика предложенным методом –

не более $\pm 5\%$ (погрешность в абсолютных величинах для пористости 2% не превышает $\pm 0,1\%$, т. е. результат определения пористости должен находиться в интервале 1,9–2,1%).

Наибольший интерес представляет возможность определения малых значений пористости, что особенно важно для обеспечения надежности конструкций из углепластиков ответственного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
2. Murashov V.V. Types of Production and Operational Defects of the Multilayer Glue Constructions and Polymer Composite Materials Products and Methods to Detect them /In: 5-th European-American Workshop on Reliability of NDT. Berlin. Germany. October 7–10, 2013. (CD-диск).
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Nagem R.J., Seng J.M., Willians 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.
7. Rose J. Achievements and prospects of development of the ultrasonic waveguide method of control //Materials Evaluation. 2010. V. 68. №5. P. 494–500.
8. Мурашов В.В., Мишуков К.С. Внедрение методов диагностики состава и физико-механических свойств полимерных композиционных материалов /В сб. материалов XXXII Международной конф. «Композиционные материалы в промышленности». К.: «Наука. Техника. Технология». 2012. С. 241–243.
9. Мурашов В.В. Определение физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов акустическими методами //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 465–475.
10. Bobrov V.T., Rozlovenko S.G., Murashov V.V. Materials characterization //Testing. Diagnostics. 2010. №2. С. 42–44.
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. Kablov E., Murashov V., Rummyantsev A. Diagnostics of Polymer Composites by Acoustic Methods //Ultrasound. Kaunas: Technologija. 2006. №2. P. 7–10.
13. 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.
14. Karabutov A.A., Murashov V.V., Podymova N.B. Evaluation of Layered Composites by Laser Optoacoustic Transducers //Mechanics of Composite Materials. 1999. T. 35. №1. P. 89–94.
15. Карабутов А.А., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б., Резников А.В. Применение ND:YAG-лазера с диодной накачкой в неразрушающем ультразвуковом контроле графито-эпоксидных композитов //Контроль. Диагностика. 2002. №11. С. 24–29.
16. Способ определения физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов в конструкциях ультразвуковым методом: пат. 2196982. Рос. Федерация; опубл. 20.01.2003 Бюл. №2.
17. Способ определения физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов и устройство для его осуществления: пат. 2214590 Рос. Федерация; опубл. 20.10.2003 Бюл. №29.
18. Мурашов В.В., Генералов А.С. Контроль многослойных клееных конструкций низкочастотными акустическими методами //Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 59–67.
19. 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.
20. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль заготовок и деталей из углерод-углеродного композиционного материала многоразового космического корабля «Буран» //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 05 (viam-works.ru).

21. Петрова А.П., Лукина Н.Ф. Клеи для многоразовой космической системы //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 04 (viam-works.ru).
22. Мурашов В.В., Алексахин В.М. Контроль прочности зоны соединения элементов интегральных конструкций из полимерных композитов ультразвуковым методом //Клеи. Герметики. Технологии. 2014. №7. С. 15–19.
23. Бакунов А.С., Мурашов В.В., Сысоев А.М. Контроль лопастей воздушного винта средствами низкочастотной акустики //Контроль. Диагностика. 2012. №6. С. 72–74.
24. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефектоскопия и диагностика полимерных композиционных материалов акустическими методами /В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 342–347.
25. Сорокин К.В., Мурашов В.В. Интеллектуальные углепластики с интегрированными оптическими сенсорами на основе волоконных брэгговских решеток для диагностики преддефектного состояния материала /В сб. тезисов докладов XX Всероссийской науч.-технич. конф. по неразрушающему контролю и технической диагностике. М.: Экспоцентр. 2014. С. 339–342 (CD-диск).
26. Murashov V.V. Nondestructive Testing of Glued Joints //Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials. 2009. V. 2. №1. P. 58–63.
27. Murashov V.V. Glued Joint Strength Diagnostics //Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials. 2009. V. 2. №1. P. 64–70.
28. Murashov V.V. Attestation of Glued Articles by Acoustic Impedance Method //Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials. 2010. V. 3. №4. P. 267–273.
29. Murashov V.V. Control of Multilayer Glued Constructions of Polymeric Composite Materials //Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials. 2012. V. 5. №2. P. 109–115.
30. Murashov V.V. Control of Laminated Structures by the Acoustic Free Vibration Method //Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials. 2012. V. 5. №4. P. 341–345.
31. Murashov V.V. Identification of Areas of Absence of Adhesive Bonding between Layers in Multilayer Structures //Polymer Science. Series D. Glues and Sealing Materials. 2014. V. 7. №1. P. 46–48.
32. Murashov V.V. Control of Multilayer Constructions by Spectral Acoustic-Impedance Defectoscopy //Polymer Science. Series D. Glues and Sealing Materials. 2014. V. 7. № 2. P. 133–135.
33. Murashov V.V. Control of Glued Structures by the Electromagnetic Acoustic Variant of the Impedance Method //Polymer Science. Series D. Glues and Sealing Materials. 2014. V. 7. №2. P. 136–139.