

УДК 620.179:678.747.2

А.С. Бойчук¹, В.В. Мурашов¹, В.Ю. Чертищев¹, И.А. Диков¹

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРИСТОСТИ В МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ЭХО-МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-10-10

Рассмотрены физические основы лазерно-ультразвукового способа эхо-импульсного метода определения пористости углепластиков. Показано, что параметром диагностики при контроле является нормированная энергия шумовой компоненты рассеянного назад акустического сигнала, определяемая по спектральным характеристикам акустических сигналов, рассеянных на порах.

Ключевые слова: углепластик, поры, пористость, эхо-метод, лазерное возбуждение, ультразвуковые колебания.

Physical bases of laser and ultrasonic method of echo-pulse technique for determination of porosity of CFRPs are considered. It is shown that diagnostics parameter under control is a normalized energy of the noise component of the backward scattered acoustic signal determined by spectral characteristics of the acoustic waves scattering by pores.

Keywords: CFRP, pores, porosity, reflection method, laser initiation, ultrasonic fluctuations.

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

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

В настоящее время важное значение имеет использование методов технической диагностики полимерных композиционных материалов (ПКМ) с целью определения их технического состояния путем оценки состава и физических свойств материала [2–4]. Характеристики углепластиков (УП), такие как пористость, плотность, содержание армирующих волокон, играют определяющую роль для получения стабильного уровня упруго-прочностных свойств при кратковременном статическом и особенно при длительном статическом и динамическом нагружениях [5–10].

Отклонение от состава в значительном объеме материала приводит к существенным изменениям характеристик прочности, упругости и эксплуатационной надежности [11–18]. Эти изменения в разной степени зависят от вида деформирования (растяжение, сжатие, сдвиг), характера напряженного состояния (одноосное, плоское, объемное), а также от длительности и цикличности нагружения [19–23].

К причинам, приводящим к повышенной пористости УП, можно отнести отклонение состава препрега от нормы, нарушение сроков или условий его хранения, несоблюдение режима формования (продолжительности и величины приложенного давления, скорости нагрева) [24–26]. Иногда появление повышенной пористости носит случайный характер и тогда пористость в УП является непредсказуемым фактором.

При повышенной пористости материала ухудшаются характеристики матрицы. При значении пористости 1% прочность снижается на 5%, а усталостная долговечность – на 50%. Кроме того, повышенная пористость увеличивает равновесный уровень влажности и способствует термическим выбросам [5, 6]. Для большинства УП, применяемых для изготовления деталей и конструкций ответственного назначения, пористость должна быть минимальной – не более 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 предложен лазерно-акустический способ ультразвукового метода отражения [27–29]. Этот метод 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.

Для получения мощных широкополосных ультразвуковых импульсов предлагается применение лазерного термооптического возбуждения звука – оптико-акустического эффекта [30]. 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 МПа в спектральном диапазоне 0,1–20 МГц.

В ВИАМ разработана методика определения пористости ПКМ лазерно-акустическим способом ультразвукового контроля [31], 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.

Прибор УДЛ-2М включает: оптоэлектронный блок, в состав которого входит импульсный Nd:YAG-лазер и аналого-цифровой преобразователь; широкополосный оптико-акустический преобразователь модели ПЛУ-6П-01, снабженный оптико-акустическим источником и оптоволоконным кабелем для доставки лазерного излучения в оптико-акустический преобразователь; информационно-измерительный комплекс, включающий систему цифровой записи и накопления информации; компьютер типа «Ноутбук». Определение акустических характеристик на приборе УДЛ-2М проводится по специальной программе.

При определении пористости методом отражения (рис. 1) лазерный импульс падает под углом на лицевую поверхность УП через прозрачную призму, которая находится в акустическом контакте с объектом контроля через слой контактной жидкости и является звукопроводом широкополосного пьезоприемника, приклеенного к призме. При поглощении лазерного импульса в УП происходит термооптическое возбуждение ультразвукового импульса, при этом акустическая волна распространяется от поверхности УП как вглубь него, так и в прозрачную призму. Сигнал от поверхности объекта контроля, прошедший через призму и зарегистрированный пьезоприемником, является эталонным в данном преобразователе. Ультразвуковой сигнал, распространяющийся

вглубь УП, претерпевает рассеяние на неоднородностях структуры. Часть этого сигнала, рассеянная в обратном направлении, попадает в призму и регистрируется пьезоприемником с некоторой временной задержкой относительно прихода эталонного сигнала. Частотный спектр акустических импульсов, рассеянных назад всей толщиной контролируемой конструкции, несет информацию о неоднородностях структуры в целом [32].

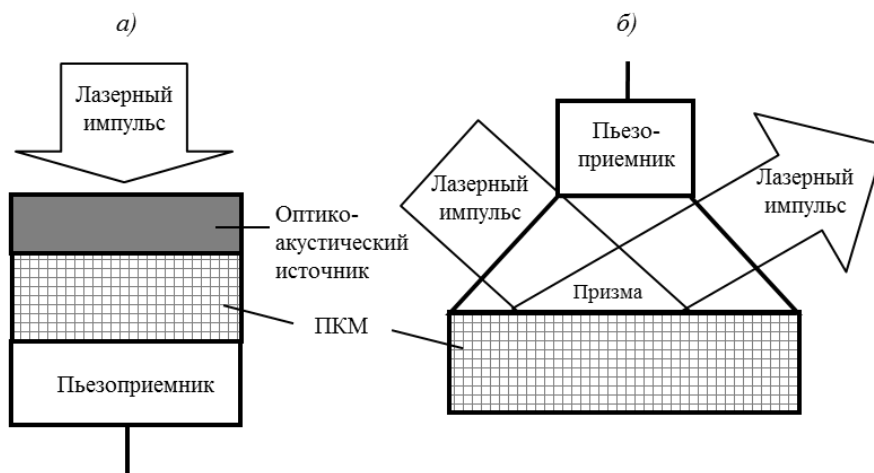


Рис. 1. Принцип определения пористости методом отражения с использованием лазерного возбуждения ультразвуковых колебаний

На рис. 2 показана развертка типа *A* (*A*-скан) – временной трек сигналов (импульсов), прошедших по толщине объекта контроля в прямом и обратном направлениях, и даны следующие обозначения:

A_0 – амплитуда зондирующего импульса;

A_1 – амплитуда первого донного импульса;

$2\Delta t = t_1 - t_0$ – время прохождения сигнала по толщине образца в прямом и обратном направлениях (мкс);

t_1 – время индикации первого донного импульса (мкс);

t_0 – время индикации зондирующего импульса (мкс).

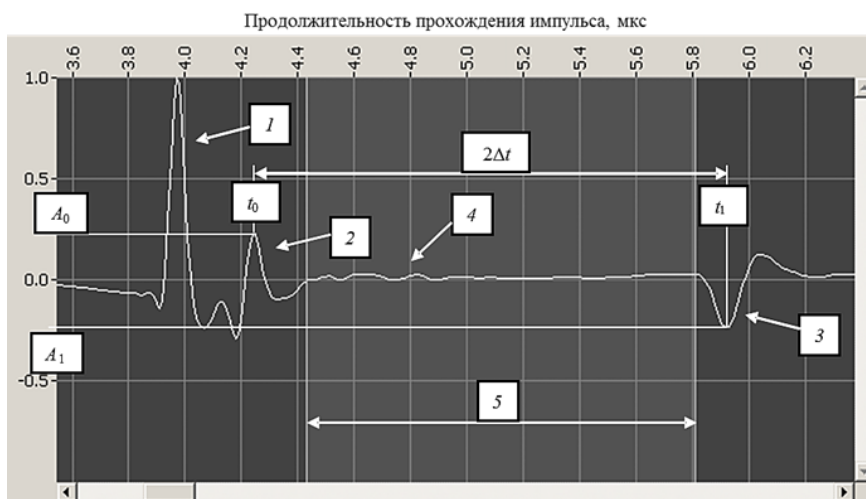


Рис. 2. Временной трек сигналов при их прохождении по материалу детали или конструкции:

1 – сигнал оптико-акустического генератора; 2 – сигнал, отраженный от поверхности объекта контроля (ОК); 3 – донный импульс – сигнал, отраженный от противоположной стороны ОК; 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

Полученные при контроле методом отражения различия профилей сигналов, несущие характер нерегулярных пульсаций, связаны с дополнительным рассеянием ультразвукового импульса на порах. Поэтому характеристикой пористости образца может служить энергия шумовой компоненты, т. е. так называемый структурный шум. 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 ПКМ с целью диагностирования их свойств и состава при одностороннем доступе.

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 композита (в первую очередь порах), и ее полная энергия может служить характеристикой пористости среды.

Нормированная энергия структурного шума (W_H) рассчитывается с использованием компьютерной программы по спектрам зондирующего импульса и импульсов, рассеянных в обратном направлении:

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

где f – частота; f_{\min} и f_{\max} – граничные частоты рабочего диапазона, в котором наблюдается структурный шум.

Нормированная энергия шумовой компоненты рассеянного назад акустического сигнала наилучшим образом коррелирует с пористостью материала, и именно поэтому данная характеристика была выбрана в качестве параметра диагностики [32]. Пористость углепластика определяется по ранее установленной корреляционной связи объемного содержания пор (V_H) с нормированной величиной энергии (W_H) структурного шума:

$$V_H = \varphi(W_H). \quad (2)$$

Теоретически и экспериментально установлено [33], что шумовая компонента рассеянного в обратном направлении акустического импульса при контроле по методу отражения при лазерном возбуждении ультразвуковых колебаний растет с увеличением пористости образца, причем увеличение пористости образца на 1% обуславливает рост мощности шума почти в 3 раза.

При контроле пористости УП ультразвуковые колебания возбуждали широкополосным сигналом в спектральном диапазоне 0,1–10 МГц импульсами длительностью не более 0,05 мкс с частотой повторения не менее 10 Гц, причем величину нормированной мощности структурного шума измеряли на участке временного трека между зондирующим импульсом и импульсом сдвиговой акустической волны.

Результаты и обсуждение

Для обеспечения образцами экспериментальной части работы изготовлены две партии образцов:

– с градацией по составу – объемное содержание углеродного волокна менялось в пределах от 50 до 65%;

– с градацией по пористости – пористость менялась от 0 до 10%.

Затем подбирали новые партии из образцов с одинаковой или близкой пористостью – например, с пористостью от 0 до 2%, от 2 до 4% и т. д. Таким образом, формировались партии образцов, в которых существенно изменялась лишь одна характеристика.

Так, в первой партии образцов в широких пределах изменялась пористость материала (от 0 до 10%) при постоянном составе материала (плотность материала в этом случае полностью зависела от пористости материала и коррелировала с ней). Во второй партии образцов в широких пределах изменялось содержание волокна в углепластике (от 50 до 65%) при постоянной (низкой) пористости материала (от 0 до 2%). Плотность материала в этом случае зависела от соотношения основных компонентов в пластике и повышалась при увеличении содержания волокна.

Уточнение принятой технологии изготовления деталей из углепластика КМУ-7Т2А с целью изготовления экспериментальных плит-образцов с различными плотностью, пористостью и составом материала проводили в следующем направлении:

– изменение состава материала достигнуто путем изменения наноса связующего при изготовлении препрега, которое может быть обеспечено как путем изменения скорости пропитки, так и изменением концентрации связующего при пропитке;

– изменение времени выдержки в прессе под давлением на первых этапах формования образцов.

Экспериментальные образцы из углепластика КМУ-7Т2А изготавливали методом прессования с использованием гидравлического пресса с усилием смыкания плит 10 т.

Для получения образцов толщиной от 4 до 5 мм использовали заготовки препрега на основе однонаправленной углеродной ленты УОЛ-300-2-3к-62ЭД и эпоксидного связующего марки ВС-2526к в количестве 20 слоев. Прессование проводили с ограничением по толщине, для чего под края пуансона пресс-формы устанавливали металлические подкладки определенной толщины с учетом зазора между краями пуансона и матрицы пресс-формы.

В соответствии с технологической документацией на углепластик КМУ-7Т2А за основу приняли базовый температурно-временной режим формования образцов:

– нагрев плит пресса до 80°C, выдержка при 80°C в течение 30 мин без давления;

– подъем температуры до 125°C, выдержка при 125°C в течение 25 мин без давления;

– подъем температуры до 150°C, выдержка при 150°C в течение 30 мин (при достижении температуры 130°C – подача половины от величины полного давления прессования, при достижении температуры от 135 до 140°C – подача полного давления прессования);

– подъем температуры до 180°C, выдержка при 180°C в течение 180 мин под давлением;

– естественное охлаждение под давлением.

Низкие значения пористости в образцах (до 3,5%) получали варьированием базового температурно-временного режима прессования, а именно – использовали дополнительные выдержки полуфабриката образцов в течение 1,5–2 ч при низких температурах (в интервале от 80 до 90°C), предварительные подпрессовки (нагрев пакета в пресс-форме до 60–80°C и кратковременная подача полного давления прессования), а также подачу полного давления прессования в средней фазе процесса отверждения связующего в материале.

Более высокие значения пористости в образцах (10–15%) получены проведением базового режима без выдержек при низких температурах или установкой пресс-формы

с пакетом в предварительно разогретые до 125–130°C плиты пресса, выдержкой при температуре гелеобразования связующего с последующей подачей полного давления прессования либо в начальной, либо в конечной фазе процесса отверждения связующего.

На рис. 3 приведен спектр акустического сигнала в образце с большим содержанием пор. Видно, что реальный спектр сигнала отличается характерными осцилляциями, определяемыми структурными шумами, связанными с наличием пор. Гладкая кривая получена путем аппроксимации экспериментального спектра. Шумовая составляющая спектра может служить мерой пористости материала. Зависимость полной нормированной энергии структурного шума, определенной с помощью лазерной оптико-акустической системы, от объемного содержания пор (V_p) в исследуемых УП представлена на рис. 4.

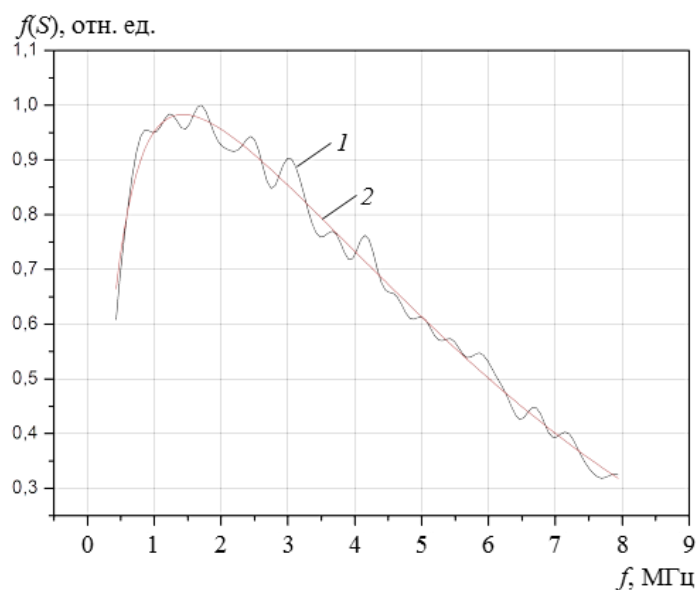


Рис. 3. Амплитудный спектр акустического сигнала на участке 4 (см. рис. 2) в пористом образце из углепластика (1 – реальный спектр; 2 – сглаженная кривая)

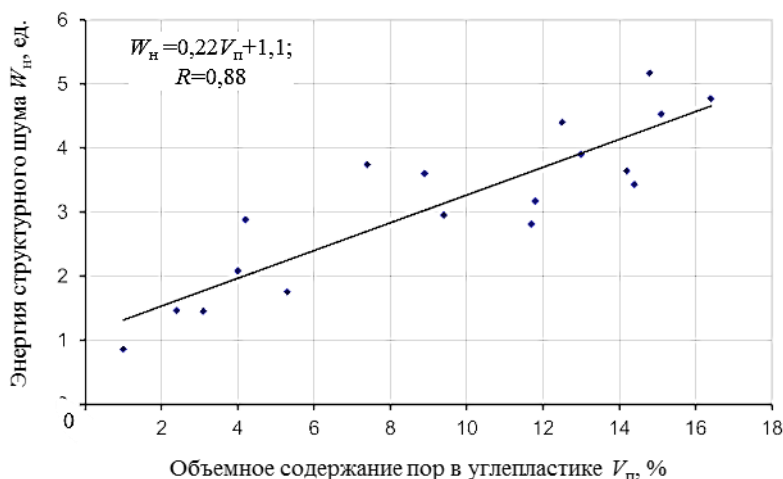


Рис. 4. Зависимость полной нормированной энергии (W_n) структурного шума от объемного содержания (V_p) пор в углепластике

Энергия структурного шума в дефектной области углепластика может на порядок превосходить энергию в бездефектной области. Поэтому производить корректную диагностику пористости в дефектных участках углепластика не представляется возможным. Следовательно, диагностику углепластика можно проводить только на тех

деталей и конструкциях, которые успешно прошли дефектоскопический контроль, т. е. не имеют дефектов.

Полученная связь $V_p(W_n)$ позволяет проводить определение пористости углепластиков в различных зонах конструкции. Наибольший интерес представляет возможность определения малых значений пористости, что особенно важно для обеспечения надежности конструкций из УП ответственного назначения.

Энергия структурного шума определяется для оценки пористости материала на первом этапе контроля. Если пористость находится в интервале 0–1% (в крайнем случае – до 2%), то можно переходить к определению содержания армирующего волокна в УП и его плотности в соответствии с ранее установленными корреляционными связями.

Выводы

Показано, что повышенная пористость в значительном объеме материала приводит к существенным изменениям характеристик прочности, упругости и эксплуатационной надежности. Эти изменения в разной степени зависят от вида деформирования (растяжение, сжатие, сдвиг), характера напряженного состояния (одноосное, плоское, объемное), а также от длительности и цикличности нагружения.

Нормированная энергия шумовой компоненты рассеянного назад акустического сигнала, определяемая по спектральным характеристикам акустических сигналов, наилучшим образом коррелирует с пористостью материала, и именно поэтому данная характеристика выбрана в качестве параметра диагностики для предложенного способа определения пористости эхо-методом с лазерным возбуждением ультразвуковых колебаний.

Относительная погрешность определения предложенным методом пористости углепластика – не более $\pm 10\%$ (погрешность в абсолютных величинах для пористости 2% не превышает $\pm 0,2\%$, т. е. результат определения пористости должен находиться в интервале 1,8–2,2%).

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. *Авиакосмическое материаловедение // Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
3. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. М.: ВИАМ, 2001. Вып. «Методы испытаний и контроля качества металлических и неметаллических материалов». С. 3–8.
4. 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.
5. *Неразрушающий контроль: справочник / под общ. ред. В.В. Клюева*. М.: Машиностроение, 2008. Т. 3.: *Ультразвуковой контроль / под ред. И.Н. Ермолова, Ю.В. Ланге*. 864 с.
6. Мурашов В.В. Контроль и диагностика многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами. М.: Спектр, 2016. 244 с.
7. 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.
8. 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.

9. Мурашов В.В., Алексашин В.М. Контроль прочности зоны соединения элементов интегральных конструкций из полимерных композитов ультразвуковым методом // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. №7. С. 15–19.
10. Мурашов В.В., Лаптев А.С. Контактные жидкости для создания акустического контакта при ультразвуковом контроле многослойных конструкций из ПКМ // Труды ВИАМ. 2015. №8. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-10-10.
11. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций // Клеи. Герметики. Технологии. 2005. №1. С. 21–27.
12. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль клеевых соединений // Клеи. Герметики. Технологии. 2008. №7. С. 21–28.
13. Murashov V.V. Nondestructive Testing of Glued Joints // Polymer Science. Series D. Glues and Sealing Materials. 2009. Vol. 2. No. 1. P. 58–63.
14. Murashov V.V. Attestation of Glued Articles by Acoustic Impedance Method // Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials. 2010. Vol. 3. No. 4. P. 267–273.
15. Murashov V.V. Control of Laminated Structures by the Acoustic Free Vibration Method // Polymer Science. Series D. Glues and Sealing Materials. 2012. Vol. 5. No. 4. P. 341–345.
16. Мурашов В.В., Генералов А.С. Контроль многослойных клееных конструкций низкочастотными акустическими методами // Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 59–67. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-59-67.
17. Murashov V.V. Control of Glued Structures Made of Dissimilar Materials by Ultrasound Reverberation // Polymer Science. Series D. 2016. Vol. 9. No. 3. P. 303–306.
18. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций акустическим импедансным методом // Клеи. Герметики. Технологии. 2010. №3. С. 13–20.
19. 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.
20. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Диагностика состава и свойств полимерных композитов в деталях и конструкциях // Контроль. Диагностика. 2008. №8. С. 13–17.
21. Мурашов В.В. Контроль монолитных и клееных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическим импедансным методом // Авиационная промышленность. 2009. №3. С. 43–48.
22. Мурашов В.В., Трифонова С.И. Контроль качества полимерных композиционных материалов ультразвуковым временным способом велосимметрического метода // Авиационные материалы и технологии. 2015. №4. С. 86–90. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-86-90.
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. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2007. №4. С. 23–31.
25. Bar-Cohen Y., Lih S-S. Experimental enhancements of leaky Lamb wave dispersion data acquisition and implementation challenges to NDT of composites // Materials Evaluation. 2000. Vol. 58. No. 6. P. 801–806.
26. Cawley P., Adams R. Defect types and NDT for composites and bonded joints // Materials Science and Technology. 1989. Vol. 5. P. 406–447.
27. Kablov E., Murashov V., Rumyantsev A. Diagnostics of Polymer Composites by Acoustic Methods // Ultrasound. Kaunas: Technologija. 2006. No. 2. P. 7–10.
28. Способ определения физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов и устройство для его осуществления: пат. 2214590 Рос. Федерация; опубл. 20.10.03. Бюл. №29.

-
29. Способ определения физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов в конструкциях ультразвуковым методом: пат. 2196982 Рос. Федерация; опубл. 20.01.03. Бюл. №2.
 30. Karabutov A.A., Murashov V.V., Oraevsky A.A., Podymova N.B. Nondestructive characterization of layered composite materials with a laser optoacoustic sensor // *Nondestructive Evaluation of Materials and Composites II* (San Antonio, Texas, march-april 1998). Published by SPIE – The International Society for Optical Engineering. 1998. Vol. 3396. P. 103–111.
 31. 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.
 32. Mishurov K.S., Murashov V.V. Determination of the Composition and Density of Polymer Composite Materials in Details and Constructions by Nondestructive Methods // *Polymer Science. Series D*. 2016. Vol. 9. No. 2. P. 176–180.
 33. Мурашов В.В. Определение состава и плотности конструкционных углепластиков лазерно-акустическим способом ультразвукового контроля // *Материаловедение*. 2014. №11. С. 24–29.