

УДК 621.721.5:620.179.1

В.В. Мурашов¹, А.С. Генералов¹**КОНТРОЛЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ И МНОГОСЛОЙНЫХ КЛЕЕНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ МЕТОДАМИ ОТРАЖЕНИЯ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-69-74

Рассмотрены физические основы ультразвуковых методов отражения. Указаны достоинства и недостатки этих методов при выявлении дефектов в изделиях из полимерных композиционных материалов (ПКМ) и в многослойных клееных конструкциях. Показана эффективность спектрального анализа эхо-импульсов, прошедших через клеевой слой или отраженных от зоны нарушения клеевого соединения.

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

Ключевые слова: ультразвуковые методы отражения, изделия из ПКМ, многослойные клееные конструкции, нарушения клеевого соединения, спектральный анализ эхо-импульсов.

The physical basis of ultrasonic reflection methods is considered. Advantages and disadvantages of these methods for identification of defects in PCM products and multilayer glued structures are given. The efficiency of spectrum analysis of echo pulses, passed through a glue layer or reflected from zone of violation of glued joint is shown.

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

Keywords: ultrasonic methods of reflection, products from PCM, multilayer glued structures, violations of glued joint, spectrum analysis of echo pulses.

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

Обеспечение высокого качества конструкций, в том числе выполненных с использованием таких полимерных композиционных материалов (ПКМ), как угле-, стекло-, органопластики, гибридные и другие высокомодульные ПКМ, относится к основным задачам авиастроения, так как надежность изделий ответственного назначения в значительной степени зависит от качества их изготовления [1–3].

Для изготовления слоистых и сотовых конструкций из различных металлических и неметаллических материалов, а также клееклепаных, клеесварных и клееболтовых конструкций широко используются клеи [4, 5]. Применение клеев для изготовления неразъемных соединений обеспечивает наилучшее распределение напряжений и малую скорость распространения трещин в конструкции, что способствует повышению надежности изделий.

Для выявления макродефектов в конструкциях из ПКМ и в многослойных клееных конструкциях применяются акустические, радиационные (рентгеновские), тепловые, радиоволновые, оптические и другие методы неразрушающего кон-

троля [6, 7]. Наибольшее применение нашли акустические методы контроля [8–21], так как они позволяют решать почти все основные задачи неразрушающего контроля. Методами дефектоскопии [22–30]: отражения (эхо-методом, реверберационным), прохождения (теневым, велосимметрическим), собственных колебаний (вынужденных колебаний, свободных колебаний), импедансными и другими – можно обнаружить [31–33] расслоения, трещины, раковины, инородные включения, выкрашивания по кромкам отверстий и гнезд, а также отрыв поверхностных слоев при механической обработке деталей из ПКМ, различные отверстия, возникающие при механической обработке и сборке изделий.

Эхо-метод (метод отражения) заключается в посылке в контролируемую деталь пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП) ультразвукового импульса и приеме тем же или другим преобразователем отраженных от структурных неоднородностей и от противоположной поверхности детали (дна) сигналов. По временной развертке можно различать отраженные сигналы и фиксировать время их прихода. В этом основном варианте эхо-метод применяется для выявления непроклеев и

расслоений в клееных конструкциях из ПКМ толщиной от 4–10 до 100–200 мм, причем за рубежом метод применяется шире, чем в России.

Реверберационный метод контроля (метод многократных отражений), являющийся разновидностью ультразвукового импульсного эхо-метода, в последнее время находит все более широкое применение в нашей стране и за рубежом для контроля качества клеевых соединений в многослойных конструкциях.

Этот метод основан на анализе времени объемной реверберации, т. е. процесса постепенного затухания звука в некотором объеме объекта контроля (ОК). При контроле реверберационным методом используется влияние зоны нарушения соединения между слоями с различными значениями волновых сопротивлений и коэффициентов затухания упругих волн на количество и скорость уменьшения амплитуд многократно отраженных импульсов в слое с меньшей величиной коэффициента затухания.

Материалы и методы

Принцип контроля *эхо-методом* показан на рис. 1. При падении упругих волн на границу раздела двух сред волны частично отражаются, а частично проходят во вторую среду [8]. Коэффициент отражения R равен отношению амплитуды отраженной волны $A_{отр}$ к амплитуде падающей волны $A_{пад}$:

$$R = A_{отр} / A_{пад}. \quad (1)$$

Амплитуда эхо-сигнала характеризует отражательную способность дефекта. Коэффициент прозрачности D определяется как отношение амплитуды прошедшей волны $A_{пр}$ к амплитуде падающей волны $A_{пад}$:

$$D = A_{пр} / A_{пад}. \quad (2)$$

Аналогичными формулами (1) и (2) определяются коэффициенты отражения и прозрачности по энергии.

При падении волны по нормали к поверхности объекта контроля (ОК) коэффициенты отражения и прозрачности равны [8]:

$$R = (z_1 - z_2)(z_1 + z_2); \quad D = 2z_1 / (z_1 + z_2), \quad (3)$$

где z_1 и z_2 – волновые сопротивления первой и второй сред.

Отражательную способность дефекта характеризует амплитуда эхо-сигнала. Отражение энергии упругих волн на границе дефекта тем больше, чем сильнее различаются удельные волновые сопротивления сред.

Основными достоинствами эхо-метода являются:

- возможность контроля деталей при одностороннем доступе;
 - высокая чувствительность метода (наименьший размер выявляемого дефекта составляет 5–10 мм), не зависящая от глубины залегания дефекта;
 - возможность измерения толщины детали и глубины залегания обнаруженного дефекта.
- К недостаткам эхо-метода можно отнести:
- использование контактной жидкости, что не всегда возможно до нанесения лакокрасочного покрытия;
 - наличие неконтролируемых приповерхностных зон (на углепластике 0,3–0,7 мм, на стеклопластике – до 2 мм);
 - реагирование на изменение акустических свойств материала;
 - ограниченная выявляемость дефектов, ориентация которых не параллельна к поверхностям детали;
 - необходимость применения стандартных образцов при настройке аппаратуры.

Эхо-метод чаще всего применяется для контроля деталей и конструкций из ПКМ большой толщины с целью выявления дефектов типа нарушения сплошности, зон повышенной пористости материала, инородных включений. Для обнаружения дефектов в многослойных клееных конструкциях, которые плохо выявляются эхо-методом, может применяться реверберационный метод.

Реверберационный метод применяется в основном для контроля конструкций типа «металл–ПКМ» и реализуется в двух вариантах: при кон-

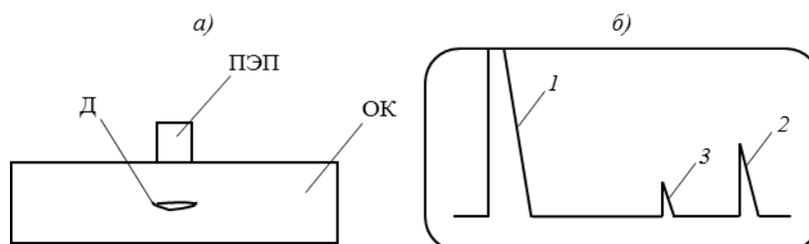


Рис. 1. Прохождение ультразвукового импульса в дефектной и бездефектной зонах конструкции из полимерного композиционного материала – а – схема контроля эхо-методом; б – временная развертка пути прохождения ультразвукового импульса (А-скан): ОК – объект контроля; ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь дефектоскопа; Д – дефект; 1 – зондирующий импульс (сигнал, посылаемый в ОК); 2 – сигнал, отраженный от противоположной поверхности (дна) ОК; 3 – сигнал, отраженный от дефекта

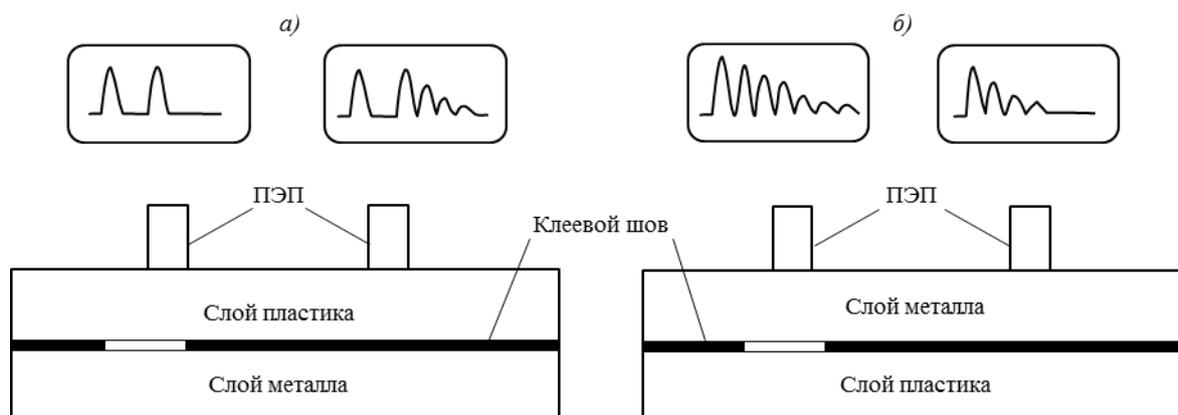


Рис. 2. Схемы контроля реверберационным методом со стороны пластика (а) и со стороны металла (б): ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь дефектоскопа

троле со стороны пластика (рис. 2, а) и со стороны металлического слоя конструкции (рис. 2, б). При контроле клееной конструкции реверберационным методом со стороны неметаллического слоя в бездефектной зоне склеивания ультразвуковые импульсы переходят из пластика в металл, вызывая в нем реверберацию ввиду малого коэффициента затухания ультразвука в металле. В зоне дефекта реверберация отсутствует, что является признаком дефекта при контроле клееной конструкции со стороны пластика.

При контроле клееной конструкции реверберационным методом со стороны металлического слоя в зоне дефекта наблюдаются многократно отраженные эхо-сигналы, длительность реверберации которых существенно превосходит длительность реверберации эхо-сигналов в бездефектной зоне конструкции. Это связано с тем, что в бездефектной зоне конструкции значительная часть энергии импульсов переходит в неметаллический слой, что уменьшает скорость затухания амплитуд эхо-сигналов и является признаком дефекта при контроле.

Контроль со стороны пластика возможен только при относительно небольшом коэффициенте затухания в нем ультразвука, когда обеспечивается прием многочисленных эхо-сигналов в металлическом слое [8]. При возможности выбора стороны многослойной комбинированной конструкции для контроля реверберационным методом предпочтение чаще отдают металлическому слою, так как в противном случае, при высоком коэффициенте затухания ультразвука в пластике, дефекты склейки могут быть не выявлены. При контроле реверберационным методом проводят оценку огибающей повторных отражений ультразвуковых импульсов от различных поверхностей многослойной конструкции.

Рассмотрим более подробно вариант контроля со стороны металлического слоя. При введении импульса ультразвуковой энергии в металлический слой он будет отражаться от донной и перед-

ней поверхностей, при этом будет происходить потеря энергии при каждом отражении. Если лист соединен с другим листом, энергия будет поглощаться клеевым слоем при каждом отражении. Если клеевое соединение имеет дефект (заполненный газом промежуток), то от границы раздела с газом, обладающим весьма малым удельным волновым сопротивлением, упругие колебания отражаются практически без потерь. Затухание ультразвука в металле мало, поэтому на экране дефектоскопа наблюдаются последовательные многократно отраженные в металлическом слое эхо-сигналы. При отсутствии дефектов склеивания часть энергии поглощается клеевым слоем, и амплитуды эхо-сигналов быстро уменьшаются. Признаком дефекта является изменение амплитуды и длительности огибающей повторных отражений импульсов при перемещении преобразователя в зону дефекта.

К недостаткам основного варианта реверберационного метода относятся трудность или невозможность выявления зон нарушения соединения в том случае, когда клеевой слой прилегает к обшивке, со стороны которой проводится контроль (непроклей между клеевым слоем и внутренним элементом конструкции), а также трудность выявления зон нарушения соединения в конструкциях с очень тонкими обшивками и с обшивками из материалов с высоким затуханием в них упругих колебаний.

В ряде случаев реверберационный метод является недостаточно эффективным из-за трудности расшифровки результатов контроля. Изображения эхо-импульсов на экране прибора, многократно отраженных в контролируемой конструкции, зачастую сливаются, причем количество и скорость уменьшения амплитуд эхо-импульсов установить затруднительно. В таких случаях эффективен спектральный вариант метода [34].

Спектральный вариант реверберационного метода основан на исследовании формы огибающей составляющих амплитудного спектра колеба-

ний эхо-импульсов в зависимости от качества многослойных соединений.

В работе [35] проведено теоретическое исследование спектральной плотности последовательности эхо-сигналов и методика расшифровки информативных параметров каждого из эхо-сигналов (амплитуды, времени сдвига и начальной фазы) путем спектрального анализа. В работе [36] рассмотрены физические основы спектрального метода измерения коэффициента затухания ультразвуковых волн в материалах, основанного на частотном анализе амплитудных спектров для проходящего и отраженного образцом импульсно-го сигнала.

Рассмотрим изменение спектральной плотности импульса при его распространении в ОК под влиянием частотной зависимости затухания [34]. Спектральная плотность эхо-сигнала $S(j\delta)$ в общем виде определяется выражением

$$S(j\beta) = S_0(j\beta) \cdot K_1^2(j\beta) \cdot K_2(j\beta), \quad (4)$$

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; $\beta = f/f_0$ (где f – частота; f_0 – частота основной гармоники; $j = \sqrt{-1}$).

Преобразователь формирует импульс, который при отражении от передней поверхности образца близок к колокольной форме. Поэтому, допуская, что $S_0(j\beta) \cdot K_1^2(j\beta) = e^{-(1-\alpha\beta)^2}$, получим

$$S(j\beta) = e^{-(1-\alpha\beta)^2} \cdot K_2(j\beta), \quad (5)$$

где α – постоянная, зависящая от добротности преобразователя.

Коэффициент передачи акустического тракта для случая плоской волны равен

$$K_2(j\beta) = K \cdot e^{-2\delta(\beta)r}, \quad (6)$$

где K – коэффициент пропорционального ослабления составляющих спектра; $\delta(\beta)$ – частотная зависимость коэффициента затухания; r – толщина ОК (пластины, слоя).

Подставляя последнее выражение в равенство (5), получим

$$S(j\beta) = K \cdot e^{-(1-\alpha\beta)^2} \cdot e^{-\delta(\beta)}, \quad (7)$$

где $\delta = \frac{\delta_1(f_0) \cdot c}{f_1}$ – величина затухания; $\delta_1(f_0)$ – коэф-

фициент затухания на основной частоте; c – скорость УЗ колебаний в материале; f_1 – резонансная частота ОК (пластины, слоя) по толщине.

Рассмотрим спектры отдельных импульсов, отраженных от поверхности и прошедших через ОК в прямом и обратном направлениях. Они будут определяться выражениями [35]: $S_0(j\beta) = K_0 \cdot e^{-(1-\alpha\beta)^2}$ – амплитудный спектр импульса от передней поверхности; $S_1(j\beta) = K_0(1-K_0)^2 \cdot e^{-(1-\alpha\beta)^2} \cdot e^{-\delta(\beta)}$ – амплитудный спектр 1-го импульса от задней поверхности; $S_2(j\beta) = K_0^3(1-K_0)^2 \cdot e^{-(1-\alpha\beta)^2} \cdot e^{-2\delta(\beta)}$ – амплитудный спектр 2-го импульса от задней поверхности; $S_n(j\beta) = K_0^{2n-1}(1-K_0)^2 \cdot e^{-(1-\alpha\beta)^2} \cdot e^{-n\delta(\beta)}$ – амплитудный спектр n -го импульса, где K_0 – коэффициент отражения на границах раздела (для простоты он принят одинаковым на обеих границах).

На рис. 3 показаны огибающие амплитудного спектра зондирующего импульса, первого и второго отраженных импульсов для случая $\delta(\beta) = \delta\beta^4$ [37]. Видно, что затухание оказывает достаточно сильное влияние на спектральный состав эхо-импульсов: изменяется плотность различных гармонических составляющих, в большей степени подавляются высокочастотные составляющие, а максимум огибающей амплитудного спектра смещается в сторону низких частот [38].

Анализируя спектры многократных эхо-импульсов можно определить частотную зависимость коэффициента затухания $\delta(\beta)$ и, следовательно, характер нарушения клеевого соединения.

Для экспериментальных исследований формы огибающей амплитудного спектра эхо-импульсов собран стенд, состоящий из ультразвукового дефектоскопа, работающего в режиме недетектированных сигналов, селектора радиоимпульсов для выделения требуемого эхо-импульса и анализатора спектра.

На рис. 4 представлены спектрограммы эхо-импульсов при контроле спектральным вариантом реверберационного метода соединения листа из титана толщиной 7 мм с капрономассой толщиной 5 мм со стороны титана при использовании раздельно-совмещенного ПЭП.

Результаты и обсуждение

Анализ спектрограмм, приведенных на рис. 4, позволяет сделать вывод о том, что спектр в дефектном участке ОК заметно отличается от спектра в зоне бездефектного соединения. Высокочастотные составляющие в бездефектной зоне соединения в значительной степени поглощаются клеевым слоем.

Следует отметить, что наличие клея только на одном верхнем листе (при расслоении между клеем и нижним листом) может ложно указывать на бездефектное соединение (отсутствие непрочности) и затруднить расшифровку спектрограмм. В этом случае необходим дополнительный контроль со стороны нижнего листа.

В случае высокой прочности клеевого соединения происходит подавление высокочастотных составляющих, а максимум огибающей амплитудного спектра смещается в сторону низких частот.

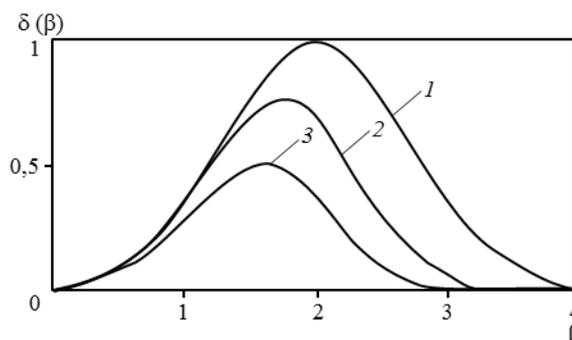


Рис. 3. Огибающие амплитудного спектра зондирующего импульса (1), первого (2) и второго (3) отраженных импульсов

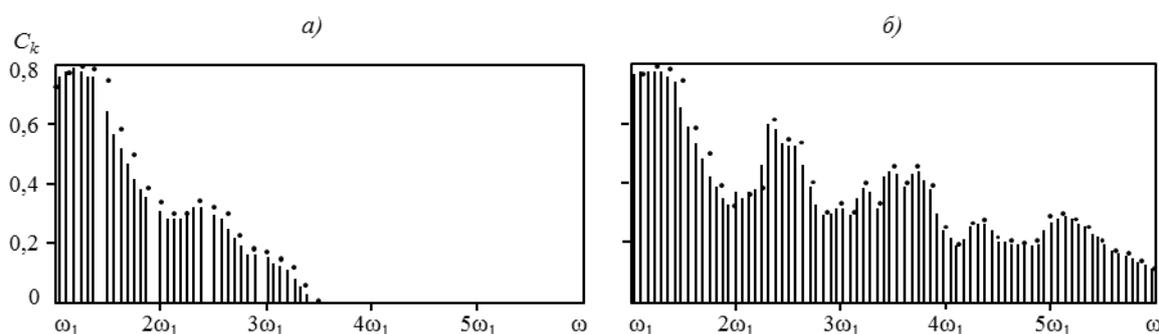


Рис. 4. Спектрограммы эхо-импульсов при контроле соединения листа из титана с капрономассой со стороны титана при использовании раздельно-совмещенного преобразователя (C_k – спектральные составляющие спектра; ω_1 – основная частота):

a – качественное соединение; *б* – искусственный дефект (непроклей)

Заключения

Рассмотрен принцип ультразвукового эхо-метода, его эксплуатационные возможности и особенности при контроле конструкций из ПКМ. Указаны способы реализации, достоинства и недостатки эхо-метода.

Рассмотрены физические основы реверберационного метода контроля многослойных конструкций. Ультразвуковой реверберационный метод, являющийся разновидностью эхо-метода, позволяет выявлять дефекты склейки двухслойных конструкций из разнородных материалов типа «металл–пластик» и «пластик–металл».

Возможности реверберационного метода существенно расширяются при использовании спектрального анализа эхо-импульсов, прошедших через клеевой слой или отраженных от зоны нарушения соединения. Спектральный вариант реверберационного метода основан на регистрации изменения формы огибающей амплитудного спектра эхо-импульсов в зависимости от качества соединения.

Показано, что исследование формы огибающей амплитудного спектра эхо-импульсов увеличивает эффективность применения метода при контроле качества многослойных соединений.

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*. 2001. №1. С. 3–8.
4. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Сереженков А.А. Конструкционные и термостойкие клеи // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 328–335.
5. Петрова А.П., Лукина Н.Ф. Клеи для многоразовой космической системы // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №4. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.06.2015).
6. Kablov E., Murashov V., Rumyantsev A. Diagnostics of Polymer Composites by Acoustic Methods // *Ultrason. Kaunas: Technologija*. 2006. No. 2. P. 7–10.
7. Gunasekera A.M. Monitoring of impact damage products from PCM // *Materials Evaluation*. 2010. Vol. 68. No. 8. P. 880–887.
8. *Неразрушающий контроль: справочник в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2006. Т. 3. Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. 864 с.*

9. Ланге Ю.В. Акустические методы неразрушающего контроля соединений в многослойных конструкциях // Дефектоскопия. 1974. №3. С. 70–79.
10. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 2. Методы выявления дефектов монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2007. №5. С. 31–42.
11. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефектоскопия и диагностика полимерных композиционных материалов акустическими методами // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды 1932–2007: юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 342–347.
12. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций // Клеи. Герметики. Технологии. 2005. №1. С. 21–27.
13. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль клеевых соединений // Клеи. Герметики. Технологии. 2008. №7. С. 21–28.
14. Генералов А.С., Бойчук А.С., Мурашов В.В. Контроль прочности углепластиков на клеевых препрегах ультразвуковым методом // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. №5. С. 27–31.
15. 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.
16. Мурашов В.В. Определение состава и плотности конструкционных углепластиков лазерно-акустическим способом ультразвукового контроля // Материаловедение. 2014. №11. С. 24–29.
17. Smith R.A., Nelson L.J. et al. Automation of control and estimation of parameters of defects in parts of the PCM // Insight. 2009. Vol. 51. No. 2. P. 82–87.
18. Zeighami M., Hohorvar F. Control of glue joints by immersion method of reflection // Materials Evaluation. 2009. No. 8. P. 945–954.
19. Каблов Е.Н., Грашенков Д.В., Ерасов В.С., Анчевский И.Э., Ильин В.В., Вальтер Р.С. Стенд для испытания на климатической станции ГЦКИ крупногабаритных конструкций из ПКМ // Сб. докл. IX Междунар. науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон–2012». 2012. С. 122–123.
20. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций акустическим импедансным методом // Клеи. Герметики. Технологии. 2010. №3. С. 13–20.
21. 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.
22. Мурашов В.В. Выявление зон отсутствия адгезионного соединения слоев в многослойных конструкциях // Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №3. С. 29–31.
23. 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.
24. Мурашов В.В. Контроль многослойных конструкций спектральным способом акустического импедансного метода дефектоскопии // Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №6. С. 19–22.
25. 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.
26. Мурашов В.В., Генералов А.С. Контроль многослойных клееных конструкций низкочастотными акустическими методами // Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 59–67.
27. Бакунов А.С., Мурашов В.В., Сысоев А.М. Контроль лопастей воздушного винта средствами низкочастотной акустики // Контроль. Диагностика. 2012. №6. С. 72–74.
28. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль заготовок и деталей из углерод-углеродного композиционного материала многооразового космического корабля «Буран» // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.06.2015).
29. Мурашов В.В. Контроль многослойных клееных конструкций из полимерных композиционных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2011. №10. С. 16–23.
30. Rose J. Achievements and prospects of development of the ultrasonic waveguide method of control // Materials Evaluation. 2010. Vol. 68. No. 5. P. 494–500.
31. 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.
32. Деев И.С., Каблов Е.Н., Кобец Л.П., Чурсова Л.В. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №7. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.06.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-7-0-6-6.
33. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ // Авиационная промышленность. 2009. №4. С. 36–46.
34. Ультразвуковой способ контроля качества соединений в многослойных клееных конструкциях: а. с. 819688 СССР; опубл. 07.04.81. Бюлл. №13.
35. Барышев С.Е. Спектральная плотность последовательности эхо-сигналов // Дефектоскопия. 1974. №2. С. 19–25.
36. Меркулов Л.Г., Токарев В.А. Физические основы спектрального метода измерения затухания ультразвуковых волн в материалах // Дефектоскопия. 1970. №4. С. 3–11.
37. Барышев С.Е. Влияние затухания на спектральную плотность эхо-сигналов // Дефектоскопия. 1978. №1. С. 56–62.
38. Chamders J.K., Tucker J.R. Bondline analysis using swept-frequency ultrasonic spectroscopy // Insight. 1999. Vol. 41. No. 3. P. 151–155.