

УДК 620.179

В.В. Мурашов¹**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ВОДЫ В СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-12-12

Рассмотрены область применения, способы реализации акустического метода свободных колебаний и особенности контроля многослойных клееных конструкций с сотовым наполнителем. Показана возможность определения количества воды в сотовых конструкциях.

Ключевые слова: клееная конструкция, сотовый наполнитель, вода в сотах, неразрушающий контроль, акустические методы, метод свободных колебаний.

The scope, ways of implementation of acoustic free vibration method, areas of its application and feature of control multilayer glued structures with honeycomb core are covered. Possibility of definition of amount of water in honeycomb structures is shown.

Keywords: glued structure, honeycomb core, water in honeycombs, non-destructive testing, acoustic methods, free vibration method.

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].

Большую роль в решении задач по увеличению надежности и долговечности летательных аппаратов, улучшению их весовых показателей и снижению их материалоемкости сыграли достижения в области материаловедения. В настоящее время армированные пластики – полимерные композиционные материалы (ПКМ) – углепластики, стеклопластики, органопластики, различные гибридные ПКМ, теплозащитные материалы и другие неметаллические материалы [2] широко применяются в авиационной и космической технике, судостроении, строительной индустрии и других отраслях промышленности. Использование клееных слоистых и сотовых конструкций в авиастроении позволяет существенно повысить весовую эффективность техники, обеспечить ее акустическую прочность и высокую надежность [3, 4].

Наиболее опасными нарушениями клеевых соединений являются непроклеи, т. е. участки, характеризующиеся нулевой прочностью склеивания. В клеевых соединениях также могут быть зоны пониженной прочности склеивания, не связанные с наличием непроклеев. Необходимым условием повышения надежности изделий ответственного назначения является повышение их качества, которое может быть обеспечено совершенствованием технологии их изготовления, а также применением эффективных методов неразрушающего контроля качества изделий [5, 6].

Оптимальным решением задачи неразрушающего контроля клеевых соединений является сочетание методов выявления непроклеев с методами диагностики прочности [7–11]. При этом неразрушающими методами должен проводиться полный (100%-ный)

контроль для выявления непроклеев, а диагностика прочности склеивания без разрушения может рассматриваться как дополнительный контроль, применяемый для оценки клеевых соединений в определенных зонах клееной конструкции (например, в наиболее нагруженных точках) [12–15].

Среди методов контроля многослойных клееных конструкций, выполненных с применением ПКМ, акустические методы по объему применения занимают первое место. Эти методы основаны на взаимодействии упругих колебаний и волн широкого диапазона частот с контролируемой деталью или конструкцией [16–19]. Основная область применения специальных низкочастотных методов, к которым относятся импедансный, велосиметрический методы и метод свободных колебаний, – обнаружение зон нарушения соединений в многослойных клееных конструкциях [20–28].

Метод свободных колебаний (МСК) основан на ударном возбуждении импульсов свободно затухающих упругих колебаний в контролируемой зоне конструкции и анализе параметров принятого сигнала [29–32]. Спектр принятого сигнала при нахождении преобразователя в зоне дефекта контролируемой конструкции отличается от спектра принятого сигнала в бездефектной зоне, что служит признаком дефекта.

Метод свободных колебаний применяется для контроля конструкций из неметаллических материалов и чаще всего для контроля конструкций, содержащих резиноподобные слои, т. е. слои из материалов с большим затуханием упругих колебаний и низким модулем упругости [5, 33]. В данной статье рассмотрены вопросы определения информативных параметров метода свободных колебаний при выявлении воды в сотовых конструкциях.

Материалы и методы

Метод свободных колебаний применяется для выявления дефектов в деталях из неметаллических материалов и зон нарушения соединений между элементами многослойных материалов, имеющих различные металлические и неметаллические слои с высоким коэффициентом затухания упругих колебаний и малым модулем упругости (элементы конструкций из органопластика, резины, теплозащитные покрытия).

Наибольшее применение получил механический (электромеханический) способ ударного возбуждения упругих колебаний в контролируемой конструкции, в качестве возбудителя в котором используют, например, устройства, подвижные системы которых приводятся в движение электромагнитными механизмами [33]. В таких вибраторах подвижная система соприкасается с контролируемой конструкцией в течение коротких промежутков времени, малых по сравнению с периодом следования импульсов. Ход подвижных систем относительно велик ($>1,5$ мм). Спектр возбуждаемых импульсов существенно зависит от упругих свойств и других параметров контролируемой конструкции.

Для приема упругих колебаний в дефектоскопах, позволяющих реализовать МСК, используют пьезоэлектрические приемники или микрофоны [33]. Пьезоприемники контактируют с контролируемой конструкцией и воспринимают колебания непосредственно от конструкции. Недостатками пьезоприемников являются подверженность фрикционным шумам, возникающим при перемещении по шероховатой поверхности объекта контроля, и неравномерность амплитудно-частотной характеристики. В преобразователях с микрофонными приемниками упругие колебания конструкции передаются к микрофону через воздух. Преимуществами микрофона перед пьезоприемником являются отсутствие непосредственного контакта и меньшая чувствительность к фрикционным шумам, недостатком – чувствительность к внешним акустическим шумам. Влияние последних в значительной степени ослабляется корпусом преобразователя.

Принятые акустические сигналы преобразуются приемником в электрические сигналы, обработка которых осуществляется в электронном блоке дефектоскопа. МСК

реализуется с помощью отечественных серийно выпускаемых в настоящее время дефектоскопов типа АД-64М (ООО «МНПО «Спектр», Москва), АД-701М (ООО «Контроль. Измерения. Диагностика», Москва), ДАМИ-С09 (ООО «НПК «Вотум», Москва) и АД-60К (ООО «АКА-Скан», Москва).

Результаты и обсуждение

В настоящее время по-прежнему актуальной является задача обнаружения воды в сотовых агрегатах авиационных конструкций. В процессе эксплуатации под действием разного рода нагрузок герметичность сотовых изделий нарушается, как правило, в местах крепления с основной конструкцией. Установлено, что внутрь сотовых агрегатов вода попадает через зазоры в заклепочных соединениях обшивки с каркасом. Проникающая в изделие вода, используя перфорацию стенок сот, распространяется по заполнителю.

Присутствие воды приводит не только к утяжелению полетной массы, но и к увеличению внутренних нагрузок на клеевое соединение при изменении температурных условий. Нагрев сотового агрегата вызывает повышение давления воды, а охлаждение ведет к разрыву сотовых ячеек.

Наиболее распространенным способом обнаружения воды является рентгеновский метод [34, 35]. Процесс выявления воды сводится к последовательному просвечиванию сотового агрегата и регистрации ячеек, просветленных наличием воды на рентгеновских пленках.

Метод является довольно объективным в качественном анализе, однако количественно точность разрешения невелика. Следует отметить большую массу аппаратуры и необходимость двухстороннего доступа к контролируемому агрегату в процессе контроля.

Воду можно выявить и другими методами. Наиболее перспективным в этом отношении является акустический МСК, традиционно используемый для выявления расслоений и непрочных в многослойных конструкциях.

Сущность применения акустического МСК для обнаружения воды в сотовых конструкциях сводится к ударному возбуждению в обшивках сотовых агрегатов изгибных волн и измерению амплитуды колебаний.

Эскиз сотовой конструкции, заполненной водой, и параметры этой конструкции показаны на рис. 1; характерные спектрограммы для сотовых панелей, залитых водой, – на рис. 2. Контроль конструкций проводили с помощью пьезоэлектрического и микрофонного преобразователей. При первом варианте возможны случаи, когда ударник и приемник находятся над стенкой сот. При этом сигнал сильно уменьшается. При микрофонном варианте приема акустический рельеф панели значительно меньше.

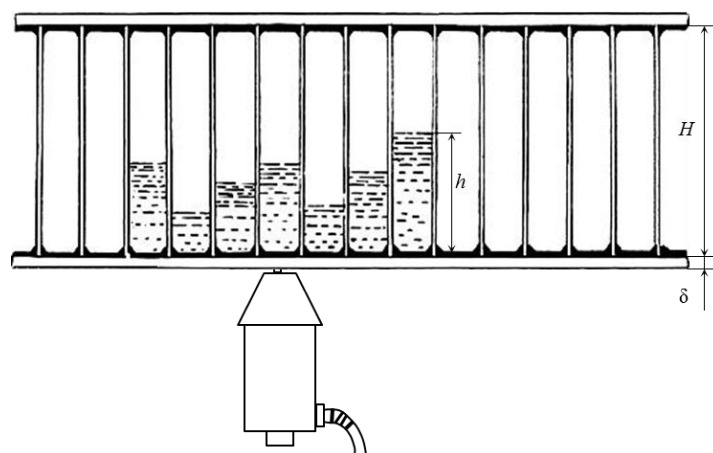


Рис. 1. Эскиз сотовой панели, заполненной водой:

H – высота сотового заполнителя; h – высота водяного столба; δ – толщина обшивки

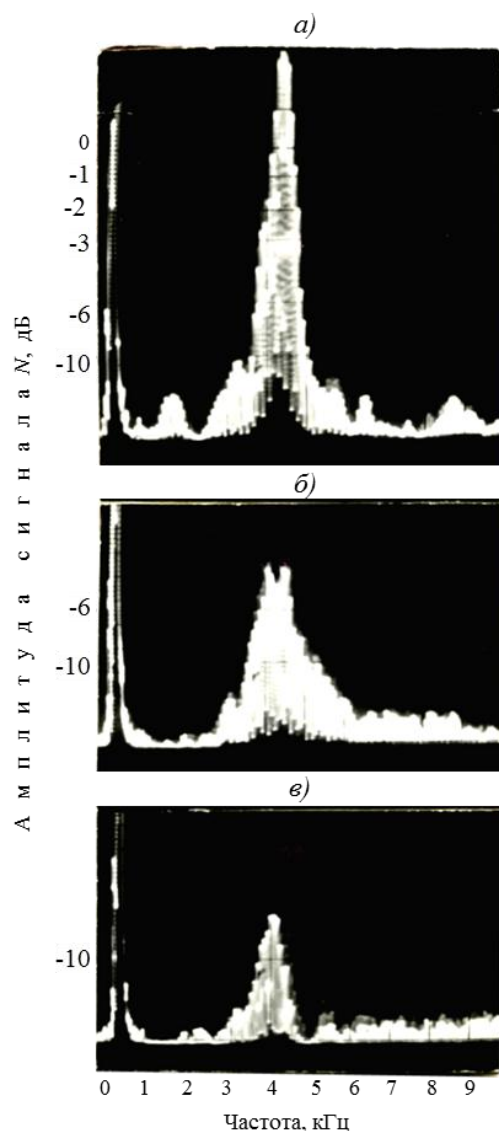


Рис. 2. Спектрограммы импульса свободно затухающих колебаний в образце сотовой конструкции (высота сотового заполнителя $H=80$ мм, размер сотовой ячейки $d=2,5$ мм, толщина обшивки $\delta=0,6$ мм) без воды (а), с 70 (б) и 100% воды (в)

Стенки сот, подкрепляющие обшивку, работают как идеальные рычаги, передавая волны возбуждения по всей обшивке. Торец каждой ячейки представляет собой колебательную пластину с постоянными геометрическими размерами, т. е. акустический рельеф обшивки периодически меняется от ячейки к ячейке.

Наибольшее воздействие воды на колебания торца ячейки получается при вертикальном расположении столба воды. Импеданс элементарной ячейки увеличивается за счет демпфирующего действия воды. Физически колебания такой обшивки можно с достаточной степенью точности моделировать зажатой по краям пластиной с переменной удельной массой.

Будем считать в первом приближении величину импульсной силы воздействия постоянной:

$$F_{\text{const}}=Z_{\text{с}} \cdot A_{\text{с}}=Z_{\text{в}} \cdot A_{\text{в}}, \quad (1)$$

где $Z_{\text{с}}$ и $Z_{\text{в}}$ – импедансы пластин, подкрепленных соответственно сухой и заполненной водой ячейками; $A_{\text{с}}$ и $A_{\text{в}}$ – амплитуды колебаний пластин, также подкрепленных соответственно сухой и заполненной водой ячейками.

Следовательно,

$$A_B = \frac{Z_c}{Z_B} A_c = A_c K, \quad (2)$$

где $K = \frac{Z_c}{Z_B}$ – коэффициент, равный отношению импедансов пластин, подкрепленных соответственно сухой и заполненной водой ячейками.

Выразим импеданс Z и коэффициент K через параметры сотового блока [36]:

$$Z = 8\alpha^2 m, \quad (3)$$

где α^2 – коэффициент, определяемый параметрами обшивки сотовой конструкции; m – масса пластины;

$$K = \frac{m_a}{m_a + m_b} = \frac{\rho_a \delta}{\rho_a \delta + \rho_b h_b} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_b H}{\rho_a \delta} V}, \quad (4)$$

где m_a и m_b – масса обшивки из алюминиевого сплава и воды соответственно; ρ_a и ρ_b – плотности алюминиевого сплава и воды соответственно; δ – толщина обшивки; h_b – высота водяного столба; H – высота сотового заполнителя; V – коэффициент заполнения водой сотовой ячейки ($V = h_b/H$).

При анализе принимаем, что импульсная реакция обшивки на удар, определяемая коэффициентом $\alpha^2 = \delta \sqrt{\frac{E}{12(1-\nu^2)\rho}}$ (где E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; ρ – плотность материала), изменяется при наличии воды в ячейках или при ее отсутствии [37].

Исходя из определения децибела: $N = 20 \lg \frac{A}{A_0}$ (где N – логарифмический уровень величины амплитуды колебаний (A), выраженный в децибелах; A_0 – нулевой уровень величины амплитуды колебаний), можно записать

$$\lg \frac{A_B}{A_c} = \frac{N_B - N_c}{20}. \quad (5)$$

Подставив в выражение (5)

$$\frac{A_B}{A_c} = K = \frac{1}{1 + aV}, \quad (6)$$

где $a = \rho_b H / \rho_a \delta$, получим

$$\lg \frac{1}{1 + aV} = \frac{N_B - N_c}{20} \quad (7)$$

или

$$V = \frac{\rho_a \delta}{\rho_b H} = \left(\text{antilg} \frac{N_c - N_B}{20} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (8)$$

Следует иметь в виду, что формула (8) не учитывает условный диаметр (описанной окружности) сотовой ячейки. После проверки экспериментальные формулы дополнены коэффициентами, различными для различных размеров сотовой ячейки.

Количество воды можно определить расчетным путем по формуле:

$$V = \psi \frac{\rho_a \delta}{\rho_b H} = \left(\text{antilg} \frac{N_c - N_B}{20} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (9)$$

где ψ – коэффициент геометрических размеров торца ячейки, определяемый экспериментально (для сот с $d = 2,5$ мм – $\psi = 10$, для сот с $d = 5$ мм – $\psi = 15$); d – сторона сотовой ячейки.

Зависимость амплитуды сигнала для различного количества воды представлена на рис. 3 для различных значений высоты сотового заполнителя H , размера сотовой ячейки d и толщины обшивки δ . Пользуясь тарировочной кривой можно определить количественное содержание воды в сотовой конструкции.

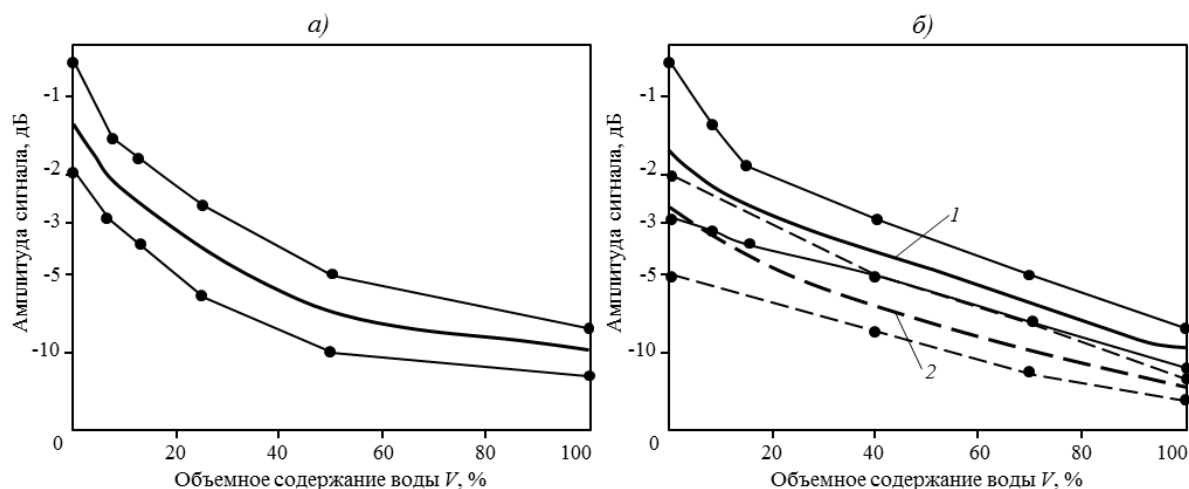


Рис. 3. Зависимость амплитуды сигнала от объема воды в сотовых конструкциях при высоте сотового заполнителя 80 мм:

a – размер сотовой ячейки 5 мм, толщина обшивки 0,3 мм; $б$ – размер сотовой ячейки 2,5 мм, толщина обшивки 0,8 (1) и 0,3 мм (2)

Таким образом, методом свободных колебаний можно определять наличие воды в сотовых конструкциях по уменьшению амплитуды сигнала (без изменения основной частоты спектра) при сканировании преобразователем по нижней обшивке конструкции с вертикальным расположением сот. Содержание воды в сотах (в % от полного объема) оценивается по предварительно построенным тарировочным кривым. Чувствительность метода при выявлении влаги в сотовых конструкциях (наименьшая выявляемая величина столбика воды) уменьшается с увеличением толщины обшивки и уменьшением размеров сотовой ячейки (составляет 7 мм для сотовых конструкций из алюминиевого сплава с толщиной обшивки 0,3 мм и стороной сотовой ячейки 5 мм) и практически не зависит от высоты сотового блока. При наличии дефектов типа непроклеев и нерастянутых сот результаты определения влаги становятся недостоверными.

С целью проверки достоверности выявления залитых водой зон изделия, параллельно проводили рентгеновский контроль. Результаты проверки хорошо коррелируют между собой.

Заключения

1. Основным признаком наличия воды при контроле методом свободных колебаний является уменьшение амплитуды сигнала (без изменения основной частоты спектра) при сканировании преобразователем по нижней обшивке конструкции с вертикальным расположением сот.

2. Методом свободных колебаний может быть выявлена вода в сотовых агрегатах с оценкой ее содержания в процентах в контролируемом участке конструкции.

3. Чувствительность метода при выявлении воды в сотовых конструкциях уменьшается с увеличением толщины обшивки и уменьшением размеров сотовой ячейки и практически не зависит от высоты сотового блока.

4. При наличии непрочности со стороны нижней обшивки при выявлении воды в сотовой конструкции результаты контроля методом свободных колебаний становятся недостоверными.

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. 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: 22.11.2016).
4. 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.
5. Мурашов В.В. Контроль и диагностика многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами. М.: Спектр, 2016. 244 с.
6. Мурашов В.В. Оценка степени накопления микрповреждений структуры ПКМ в деталях и конструкциях неразрушающими методами // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №3 (42). С. 73–81. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-73-81.
7. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Диагностика состава и свойств полимерных композитов в деталях и конструкциях // *Контроль. Диагностика*. 2008. №8. С. 13–17.
8. Kablov E., Murashov V., Rumyantsev A. Diagnostics of Polymer Composites by Acoustic Methods // *Ultragarsas*. Kaunas: Technologija. 2006. No. 2. P. 7–10.
9. Karabutov A.A., Murashov V.V., Podymova N.B., Oraevsky A.A. Nondestructive Characterisation of Layered Composite Materials with a Laser Optoacoustic Sensor // *Nondestructive Evaluation of Materials and Composites II* (San Antonio, Texas, march–april 1998). San Antonio: Published by SPIE – The International Society for Optical Engineering. 1998. Vol. 3396. P. 103–111.
10. Способ определения физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов и устройство для его осуществления: пат. 2214590 Рос. Федерация. №2001135020/28; заявл. 26.12.01; опубл. 20.10.03, Бюл. №29.
11. Способ определения физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов в конструкциях ультразвуковым методом: пат. 2196982 Рос. Федерация. №2001100302/28; заявл. 09.01.01; опубл. 20.01.03, Бюл. №2.
12. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2005. №1. С. 21–27.
13. 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.
14. 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.
15. Мурашов В.В. Определение прочностных характеристик углепластиков в монолитных и интегральных конструкциях лазерно-акустическим способом ультразвукового контроля // *Материаловедение*. 2016. №11. С. 9–16.
16. Мурашов В.В. Контроль качества изделий из полимерных композиционных материалов акустическими методами // *Контроль. Диагностика*. 2016. №12. С. 16–29.
17. Мурашов В.В., Трифонова С.И. Контроль клеевых соединений в конструкциях и изделиях из ПКМ ультразвуковым теневым методом // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2015. №5. С. 15–23.
18. 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.

19. Мурашов В.В. Контроль многослойных клееных конструкций акустико-тепловым методом // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. №9. С. 36–40.
20. 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.
21. Мурашов В.В. Выявление зон отсутствия адгезионного соединения слоев в многослойных конструкциях // Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №3. С. 29–31.
22. 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. Vol. 7. No. 1. P. 46–48.
23. Murashov V.V. Control of Multilayer Constructions by Spectral Acoustic-Impedance Defectoscopy // Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials. 2014. Vol. 7. No. 2. P. 133–135.
24. Murashov V.V. Control of Glued Structures by the Electromagnetic Acoustic Variant of the Impedance Method // Ibid. P. 136–139.
25. Мурашов В.В., Слюсарев М.В., Евдокимов А.А. Контроль качества оболочек арочных элементов надземных частей опор быстровозводимых мостовых сооружений из ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №7. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.11.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-10-10.
26. Мурашов В.В., Слюсарев М.В. Выявление зон пониженной прочности соединения обшивки с сотовым наполнителем в клееных сотовых агрегатах // Клеи. Герметики. Технологии. 2016. №12. С. 27–32.
27. Murashov V.V. Control of Multilayer Glued Constructions of Polymeric Composite Materials // Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials. 2012. Vol. 5. No. 2. P. 109–115.
28. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций акустико-топографическим методом // Клеи. Герметики. Технологии. 2016. №3. С. 21–27.
29. 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.
30. Бакунов А.С., Мурашов В.В., Сысоев А.М. Контроль лопастей воздушного винта средствами низкочастотной акустики // Контроль. Диагностика. 2012. №6. С. 72–74.
31. Ланге Ю.В. Акустический спектральный метод неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 1978. №3. С. 7–14.
32. Мурашов В.В., Токтуева В.Н. Спектральный состав импульсов ударного возбуждения // Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 1979. Вып. 6. С. 21–26.
33. Неразрушающий контроль: справочник / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2006. Т. 3: Ультразвуковой контроль / под ред. И.Н. Ермолова, Ю.В. Ланге. 864 с.
34. Косарина Е.И., Степанов А.В. Радиографический контроль сотовых конструкций с целью обнаружения технологических и эксплуатационных дефектов // В мире неразрушающего контроля. 2003. №3. С. 2–5.
35. Степанов А.В. Методы контроля сотовых конструкций авиационной техники в условиях эксплуатации // Авиационные материалы и технологии. 2004. М.: ВИАМ. С. 81–86.
36. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. М.: Мир, 1971. 557 с.
37. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.