

УДК 620.179

В.В. Мурашов¹

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ КЛЕЕНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-88-94

Рассмотрены физические основы ультразвукового резонансного метода, указаны его область применения и преимущества перед другими акустическими методами. Приведены результаты исследования эксплуатационных возможностей резонансного метода при дефектоскопии клееных конструкций. Показаны зависимость резонансной частоты нагруженного преобразователя от диаметра и глубины залегания дефектов для различных преобразователей, изменение резонансной частоты нагруженного преобразователя по радиусу дефекта, зависимость резонансной частоты нагруженного преобразователя от расстояния двух дефектов друг от друга и от расстояния дефекта от края конструкции при различной глубине залегания дефектов, изменение предельной чувствительности резонансного метода от скорости перемещения преобразователя по поверхности конструкции при различной толщине верхнего листа.

Ключевые слова: многослойные клееные конструкции, неразрушающий контроль качества, ультразвуковой резонансный метод.

V.V. Murashov¹

APPLICATION OF THE ULTRASONIC RESONANCE METHOD FOR DETECTION OF DEFECTS OF GLUED CONSTRUCTIONS

Physical principals of the ultrasonic resonance method are considered, its applicable scope and advantages before other acoustic methods are indicated. Results of research of operation capabilities of resonance method at non-destructive testing of glued constructions are presented. Dependence of resonance frequency of the loaded probe from diameter and depth of defects for different probes, change of resonance frequency of the loaded probe from defect radius, dependence of resonance frequency of the loaded probe from distance of two defects from each other and from defect distance from design edge for different depth of defects, change of usable sensitivity of resonance method from probe traverse speed on design surface for different thickness of the upper sheet are shown in the article.

Keywords: multilayer glued constructions, non-destructive testing of quality, ultrasonic resonance 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

За последние годы прогресс авиационно-космической и других отраслей техники привел к значительному повышению важнейших параметров летательных аппаратов – увеличению их надежности и долговечности, улучшению весовых показателей, снижению их материалоемкости [1, 2]. Применение клеев для изготовления неразъемных соединений обеспечивает наилучшее распределение напряжений и малую скорость распространения трещин в конструкции, что способствует повышению надежности изделий [3, 4].

Актуальной проблемой повышения надежности изделий авиационной техники является проблема повышения их качества как главного показателя оценки надежности изделий ответственного назначения [5].

В настоящее время в машиностроении для выявления дефектов в слоистых металлических и

неметаллических многослойных клееных конструкциях [6, 7] и для диагностики материала применяются различные акустические методы контроля: методы отражения (эхо-метод, реверберационный), методы прохождения (теневой, велосимметрический, реверберационно-сквозной), импедансные методы и методы собственных колебаний (свободных и вынужденных колебаний) [8–18]. Методы диагностики позволяют определить состав и физико-механические свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ), оценить техническое состояние материала изделия и прогнозировать его ресурс [19–28].

К достоинствам ультразвукового резонансного метода, применяемого для контроля многослойных клееных конструкций, относится возможность выявления дефектов типа нарушения сплошности, характеризующихся отсутствием воздушного зазора в зоне дефекта, т. е. непрочлеив и

расслоений без раскрытия зоны дефекта. К таким дефектам относятся и дефекты типа слипания склеиваемых элементов, когда прочность их сцепления близка к нулю, а также «захлопнутые» дефекты, когда склеиваемые элементы прижаты друг к другу и при возбуждении упругих колебаний в конструкции колеблются как единое целое, хотя прочность сцепления элементов равна нулю. Такие виды дефектов трудно, а зачастую вообще невозможно выявить другими акустическими методами (импедансным, велосимметрическим, свободных колебаний и т. п.). Кроме того, резонансным методом успешно выявляются дефекты в клееных конструкциях типа «лист–лист» с одинаковой толщиной листов, а также со стороны более толстого листа, в то время как дефекты в таких конструкциях импедансным методом обычно не выявляются. Следует также отметить, что ультразвуковым резонансным методом можно контролировать очень тонкие изделия, для которых применение ультразвукового эхо-метода невозможно, так как донный импульс сливается с зондирующим импульсом.

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].

Материалы и методы

Физические основы

ультразвукового резонансного метода

Ультразвуковой резонансный метод [8] основан на возбуждении вынужденных упругих колебаний в контролируемой конструкции (или ее части) и анализе параметров колебаний системы «преобразователь–конструкция» при резонансах или вблизи них. Признаком дефекта при контроле резонансным методом служит изменение резонансной частоты нагруженного на контролируемую конструкцию преобразователя. Дополнительным признаком дефекта может служить изме-

нение добротности системы «преобразователь–конструкция», определяемое по изменению амплитуды резонансного импульса.

На рис. 1 представлена схема преобразователя, нагруженного на конструкцию в бездефектной зоне (а) и зоне дефекта, т. е. только на верхний лист (б). Основная собственная частота f в первом случае определяется элементами 1–5 системы, причем клеевой шов обладает определенными упругими и неупругими свойствами, а нижний слой – определенной массой. Основная собственная частота f во втором случае определяется только элементами 1–3.

Свойства клеевого шва полностью определяют тремя первичными параметрами: упругими характеристиками клея $D_{кл}$, его плотностью $\rho_{кл}$ и толщиной клеевого слоя $l_{кл}$, т. е. показания резонансного прибора зависят от $D_{кл}$, $\rho_{кл}$ и $l_{кл}$.

Величина $D_{кл}$ рассматривается в работе [8] как действующий модуль упругости для бесконечной среды:

$$D_{кл} = E_{кл} \cdot \frac{1 - \mu_{кл}}{(1 + \mu_{кл})(1 - 2\mu_{кл})}, \quad (1)$$

где $E_{кл}$ – модуль упругости; $\mu_{кл}$ – коэффициент Пуассона на клеевом слое.

Входной механический импеданс клеевого слоя и нижнего листа $Z_{кл}$, определяющий величину изменения резонансной частоты Δf_r , может быть представлен в виде:

$$Z_{кл} = \frac{jX_{нл}}{1 - X_{нл} \omega \frac{l_{кл}}{D_{кл}}}, \quad (2)$$

где $X_{нл}$ – реактивная составляющая импеданса нижнего слоя; ω – круговая частота; $j = \sqrt{-1}$.

В соответствии с приведенными в работе [29] данными, определяемая резонансным методом прочность клеевого соединения при сдвиге однозначно связана с толщиной $l_{кл}$ (при $D_{кл} = \text{const}$) или отношением $l_{кл}/D_{кл}$.

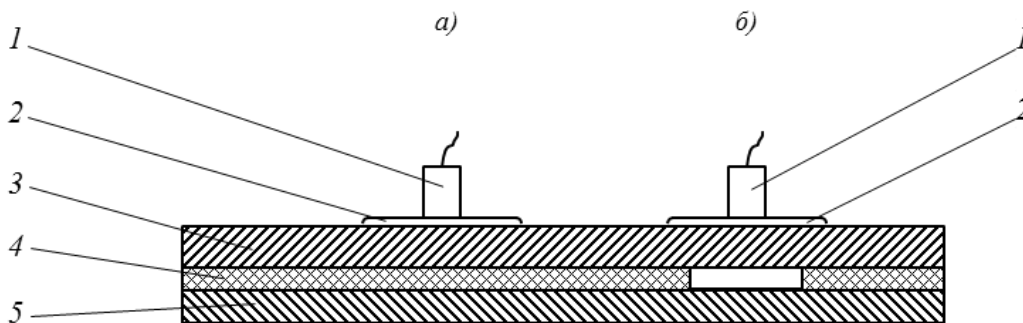


Рис. 1. Схема контроля клееной конструкции в бездефектной зоне (а) и в зоне дефекта типа непроклея (б):

1 – пьезоэлектрический преобразователь; 2 – контактная жидкость; 3 – верхний лист (обшивка); 4 – клей; 5 – нижний лист

Рассмотрим режим работы резонансного прибора, при контроле которым признаком дефекта является изменение резонансной частоты Δf_p пьезопреобразователя при перемещении (перестановке или плавном передвижении) его по поверхности конструкции, смоченной контактной жидкостью.

Резонансная частота – частота, на которой входной механический импеданс колебательной системы чисто активный и имеет минимальное значение. Резонансная частота зоны дефекта конструкции может быть определена [30] по формуле:

$$f_{m,n} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{D}{\rho t} \left[\left(\frac{m+c}{a} \right)^2 + \left(\frac{n+c}{b} \right)^2 \right]}, \quad (3)$$

где $D = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)}$ – жесткость; E – модуль упругости;

μ – коэффициент Пуассона; t – толщина верхнего слоя; ρ – плотность материала; m и n – номер полуволны, укладываемой в направлении a и b ; a и b – размеры дефекта (мембраны) в зоне отслоения обшивки; c – постоянная, определяемая свойствами клея в зоне дефекта, которая изменяется от 0 до 0,36 (последнее – в случае жесткого соединения) [30].

Такие крайние типы клеевых соединений иллюстрируются схемами на рис. 2 – в конструкциях с пористым (низкомодульным) клеевым швом ($c=0$) и с монолитным (высокомодульным) клеевым швом ($c=0,36$).

Для контроля клеевых конструкций применяются преобразователи, резонансная частота которых близка к резонансной частоте обшивки (верхнего слоя) конструкции. Выбор преобразователя производится либо путем расчета резонансных частот, либо путем экспериментального подбора по наибольшей разнице частот системы в доброкачественной зоне и в зоне дефекта.

Ультразвуковой резонансный метод дефектоскопии может быть реализован с помощью дефектоскопа типа АД-21Р [8], разработанного во ВНИИНК при участии ВИАМ. Дефектоскоп АД-21Р является портативным прибором с цифровой индикацией результатов измерений и звуковой сигнализацией наличия дефектов. Данный прибор предназначен для обнаружения дефектов клеевых соединений обычно плоских или близких к таковым листовых конструкций, изготовленных из различных металлических (алюминиевые и титановые сплавы, стали и т. п.) и неметаллических (угле-, стеклопластики, текстолиты и пр.) материалов.

Дефектоскоп АД-21Р позволяет измерять изменение резонансной частоты и разности частот ненагруженного и нагруженного контролируемой конструкцией пьезоэлектрического преобразователя (т. е. преобразователя, прижатого к объекту контроля). Дефектоскоп АД-21Р снабжен пятью преобразователями закрытого типа с различными резонансными частотами, что позволяет проводить контроль практически всех многослойных конструкций, обычно встречающихся в машиностроении. Дефектоскоп АД-21Р отличается от отечественного (УП-20Р) и зарубежного (Bondtester-80) аналогов более высокой стабильностью показаний, он значительно проще в настройке и работе.

Контроль клеевых конструкций возможен также и зарубежными приборами BondMaster 1000e+ и BondMaster 600 (фирма Olympus, США), позволяющими реализовать ультразвуковой резонансный метод.

Особенностью ультразвукового резонансного метода дефектоскопии является необходимость смачивания контролируемых конструкций контактной жидкостью [31] для создания акустического контакта между преобразователем резонансного дефектоскопа и конструкцией.

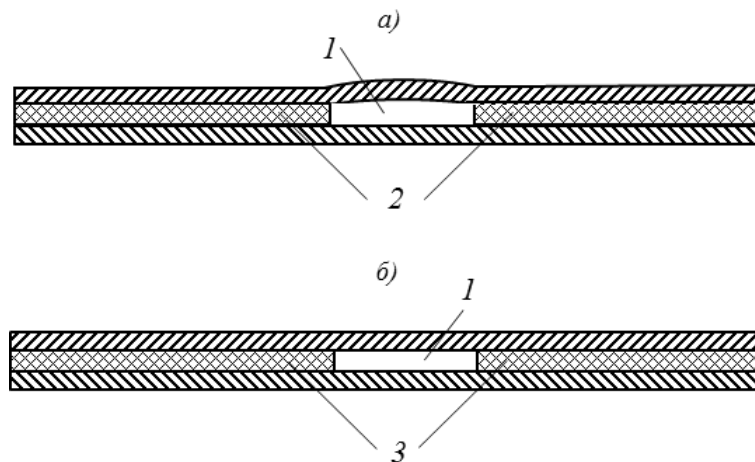


Рис. 2. Схема дефектных клеевых соединений с пористым (а) и монолитным (б) клеевым швом: 1 – дефект; 2 – пористый (низкомодульный) клеевой шов; 3 – монолитный (высокомодульный) клеевой шов

Результаты и обсуждение

Исследования эксплуатационных возможностей резонансного метода, реализуемого с помощью дефектоскопа АД-21Р, и особенностей методики контроля клееных конструкций проведены с использованием комплекта отраслевых стандартных образцов КМД 24-0 в лабораторных условиях и реальных клееных конструкций в производственных условиях.

Экспериментальным путем определены следующие зависимости:

- резонансной частоты f_p нагруженного преобразователя от диаметра d и глубины h залегания дефектов для различных преобразователей (рис. 3);
- резонансной частоты f_p нагруженного преобразователя от расстояния r между центром круглого в плане дефекта и центром пьезоэлектрического преобразователя при перемещении последнего по радиусу дефекта (рис. 4);
- резонансной частоты f_p нагруженного преобразователя от расстояния b двух дефектов друг от друга и от расстояния a дефекта от края конструкции при различной глубине залегания дефектов (рис. 5 и 6);
- предельной чувствительности $1/d_{\min}$ резонансного метода от скорости c перемещения преобразователя по поверхности конструкции при различных толщинах верхнего листа (рис. 7).

Результаты экспериментальных исследований представлены в виде графиков на рис. 3–7.

Основной эксплуатационной характеристикой контроля является предельная чувствительность, определяемая в зависимости от глубины залегания дефекта. Представляет интерес рассмотрение

зависимости резонансной частоты f_p нагруженного преобразователя от диаметра d искусственного дефекта (рис. 3, а) и от глубины h (рис. 3, б) залегания дефекта (от толщины верхнего слоя) для различных преобразователей с номинальными частотами 110, 150, 210, 300 и 450 кГц. Графики на рис. 3 показывают, что резонансная частота f_p определяется в первую очередь толщиной верхнего листа конструкции (глубиной залегания дефекта) и в меньшей степени размерами (диаметром дефекта).

Погрешность определения контура дефекта (или точность определения его границ) может быть определена по зависимости (рис. 4) резонансной частоты f_p нагруженного преобразователя от расстояния r между центром круглого в плане дефекта и центром пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) при перемещении последнего по радиусу дефекта ($d_{\text{деф}}=30$ мм, $d_{\text{ПЭП}}=10$ мм). График на рис. 4 дает возможность определить предельную чувствительность метода при контроле различных конструкций и погрешность определения контура дефекта. По этой зависимости также можно определить предельную чувствительность метода при контроле конструкций различными преобразователями.

Разрешающая способность, определяемая как наименьшая разность двух соседних значений контролируемого параметра, при которой возможна их раздельная индикация, может быть оценена по зависимости (рис. 5) резонансной частоты f_p нагруженного преобразователя от расстояния b между центрами двух рядом расположенных дефектов диаметром $d_{1\text{деф}}=d_{2\text{деф}}=28$ мм. В процессе

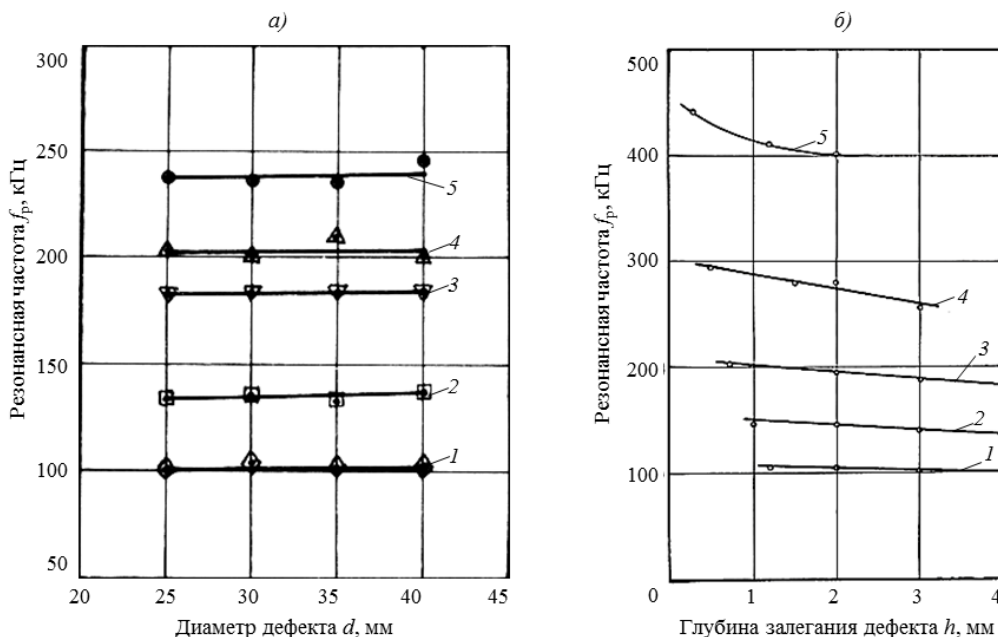


Рис. 3. Зависимость резонансной частоты f_p нагруженного преобразователя от диаметра d искусственного дефекта (а) и от глубины h залегания дефекта (от толщины верхнего листа) (б) для преобразователей с номинальными частотами 110 (1), 120 (2), 210 (3), 300 (4) и 450 кГц (5)

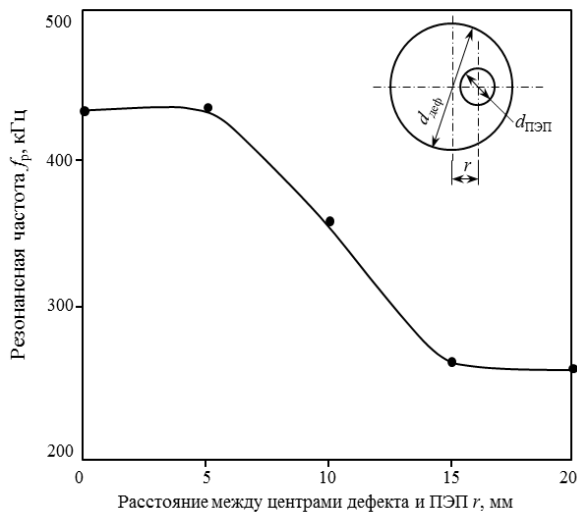


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты f_p нагруженного преобразователя от расстояния r между центром круглого в плане дефекта и центром пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) при перемещении последнего по радиусу дефекта ($d_{\text{деф}}=30$ мм, $d_{\text{ПЭП}}=10$ мм)

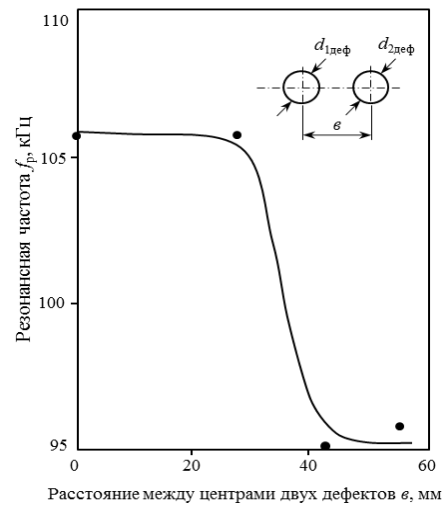


Рис. 5. Зависимость резонансной частоты f_p нагруженного преобразователя от расстояния v между центрами двух рядом расположенных дефектов ($d_{1\text{деф}}=d_{2\text{деф}}=28$ мм)

эксперимента центр ПЭП совпадал с серединой расстояния v . График на рис. 5 позволяет определить разрешающую способность метода при выявлении дефектов в клеевых конструкциях.

Краевая неконтролируемая зона оценивается по зависимости резонансной частоты f_p нагруженного преобразователя от расстояния a дефекта от края конструкции (рис. 6) для двух толщин верхнего листа (1,2 и 5 мм) и диаметра дефекта

$d_{\text{деф}}=28$ мм (номинальная частота ПЭП составляет 110 кГц). График на рис. 6 позволяет определить крайнюю неконтролируемую («мертвую») зону.

Максимальную скорость перемещения преобразователя по поверхности контролируемой конструкции при заданной предельной чувствительности контроля можно определить по зависимости (рис. 7) чувствительности (d_{min} – наименьший размер выявляемого дефекта) от скорости перемещения

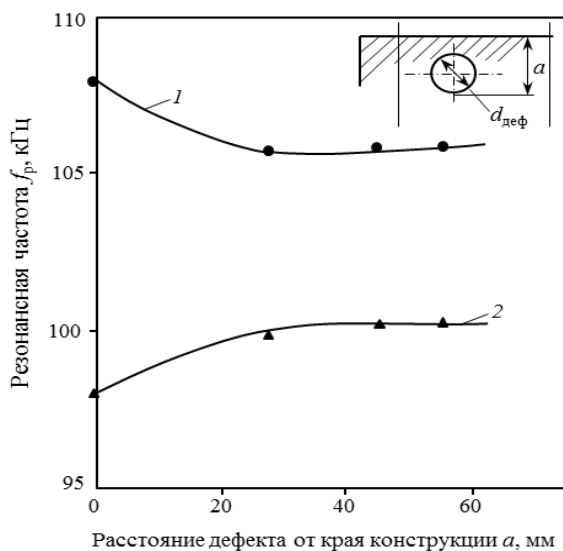


Рис. 6. Зависимость резонансной частоты f_p нагруженного преобразователя от расстояния a дефекта от края конструкции для различных толщин верхнего листа:

1 – $h_1=1,2$ мм; 2 – $h_2=5$ мм (ПЭП: 110 кГц; $d_{\text{деф}}=28$ мм)

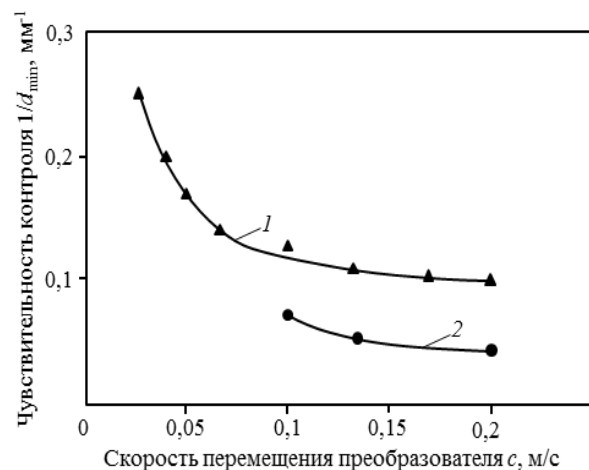


Рис. 7. Зависимость чувствительности контроля (d_{min} – наименьший размер выявляемого дефекта) от скорости перемещения преобразователя по поверхности контролируемого изделия при различной глубине залегания дефектов:

1 – $h_1=1,2$ мм; 2 – $h_2=5$ мм (ПЭП: 110 кГц)

при различной глубине залегания дефектов (номинальная частота ПЭП составляет 110 кГц). Зная максимальную скорость перемещения преобразователя и шаг сканирования, зависящий от наименьшего размера выявляемого дефекта, можно оценить производительность контроля.

Результаты экспериментальных исследований (рис. 3–7) использованы при разработке отраслевой технологической рекомендации по контролю качества многослойных конструкций ультразвуковым резонансным методом.

Заключения

1. Рассмотрены физические основы ультразвукового резонансного метода дефектоскопии. Показано, что резонансная частота бездефектной

зоны клееной конструкции в большей степени определяется отношением толщины клеевого слоя к действующему модулю упругости, причем плотность клея влияет на резонансную частоту лишь при малых значениях толщины нижнего (внутреннего) слоя конструкции, когда масса клея и нижнего слоя соизмеримы.

2. Проведенные экспериментальные исследования эксплуатационных возможностей резонансного метода и особенностей методики контроля клееных конструкций позволили установить зависимости пороговой чувствительности, погрешности определения контура дефекта, разрешающей способности и краевой неконтролируемой зоны от различных факторов контроля.

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. 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.
4. Малышева Г.В. Прогнозирование ресурса клеевых соединений // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2013. №8. С. 31–34.
5. 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.
6. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефектоскопия и диагностика полимерных композиционных материалов акустическими методами // 75 лет. *Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбил. науч.-технич. сб.* М.: ВИАМ, 2007. С. 342–347.
7. Мурашов В.В. Контроль и диагностика многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами. М.: Спектр, 2016. 244 с.
8. *Неразрушающий контроль: справочник* / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2006. Т. 3. Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. 864 с.
9. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций акустическим импедансным методом // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2010. №3. С. 21–27.
10. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль клеевых соединений // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2008. №7. С. 13–20.
11. Murashov V.V. Nondestructive Testing of Glued Joints // *Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials*. 2009. Vol. 2. No. 1. P. 58–63.
12. Мурашов В.В. Контроль монолитных и клееных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическим импедансным методом // *Авиационная промышленность*. 2009. №3. С. 43–48.
13. 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.
14. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций акустическим методом свободных колебаний // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2012. №4. С. 40–44.
15. Бакунов А.С., Мурашов В.В., Сысоев А.М. Контроль лопастей воздушного винта средствами низкочастотной акустики // *Контроль. Диагностика*. 2012. №6. С. 72–74.
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. Мурашов В.В., Трифонова С.И. Контроль качества полимерных композиционных материалов ультразвуковым временным способом велосиметрического метода // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №4 (37). С. 86–90. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-86-90.
18. Мурашов В.В. Выявление зон отсутствия адгезионного соединения слоев в многослойных конструкциях // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2013. №3. С. 29–31.
19. Karabutov A.A., Murashov V.V., Oraevsky A.A., Podymova N.B. Nondestructive characterization of layered composite materials with a laser optoacoustic sensor // *Conf. «Nondestructive Evaluation of Materials and Composites II» (San Antonio, Texas, March-April, 1998)*. San Antonio: The International Society for Optical Engineering. 1998. Vol. 3396. P. 103–111.

20. Kablov E., Murashov V., Rumyantsev A. Diagnostics of Polymer Composites by Acoustic Methods // *Ultrasound*. Kaunas: Technologija. 2006. No. 2. P. 7–10.
21. 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.
22. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Диагностика состава и свойств полимерных композитов в деталях и конструкциях // *Контроль. Диагностика*. 2008. №8. С. 13–17.
23. Мурашов В.В. Контроль многослойных клееных конструкций из полимерных композиционных материалов // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2011. №10. С. 16–23.
24. Способ определения прочности соединения деталей интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов: пат. 2262099 Рос. Федерация; опубл. 10.10.05, Бюл. №28.
25. 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.
26. Мурашов В.В., Мишуров К.С. Определение пористости углепластиков в авиационных конструкциях ультразвуковым методом // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2 (35). С. 88–92. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-88-92.
27. 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.
28. Способ определения физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов в конструкциях ультразвуковым методом: пат. 2196982 Рос. Федерация; опубл. 20.01.03, Бюл. №2.
29. Murashov V. Non-destructive testing and evaluation designs by the acoustic methods. Saarbrücken, Germany: LAMBERT Academic Publishing, 2017. 167 p.
30. Schliekelmann R.J. Non-destructive testing of bonded joints // *Non-Destructive Testing*. 1975. Vol. 8. No. 2. P. 100–103.
31. Мурашов В.В., Лаптев А.С. Контактные жидкости для создания акустического контакта при ультразвуковом контроле многослойных конструкций из ПКМ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №8. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-10-10.