

УДК 620.179.1:621.792.05

В.В. Мурашов¹, С.И. Яковлева¹**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ЗАПОЛНИТЕЛЯ
И НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ
ЛОПАСТИ ВОЗДУШНОГО ВИНТА
ИЗ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-83-92

Исследовано влияние дефектов типа нарушения сплошности пенопластового заполнителя композитной лопасти на спектральные характеристики упругих колебаний поверхности объекта контроля, возбуждаемых ударными импульсами при контроле, и влияние дефектов в зонах соединения нагревательной накладки с композитной лопастью на спектральные характеристики упругих колебаний поверхности накладки, возбуждаемых при контроле. Показано, что в зонах наличия трещин в пенопласте и в зонах нарушения соединения нагревательной накладки с композитной лопастью существенно изменяется спектр принятых колебаний, что служит признаком наличия дефекта и позволяет с высокой достоверностью выявлять дефекты.

Ключевые слова: *низкочастотные акустические методы, акустический метод свободных колебаний, лопасть воздушного винта, полимерные композиционные материалы, нарушения сплошности.*

V.V. Murashov¹, S.I. Yakovleva¹**NON-DESTRUCTIVE TESTING
OF THE AIR SCREW BLADE'S FILLER
AND PERMANENT CONNECTIONS
MADE FROM POLYMER COMPOSITE MATERIAL**

Influence of defects like violation of continuity of the foam filler of the composite blade on spectral characteristics of elastic oscillations of surface of object of the control, raised by shock impulses is investigated at control, and influence of defects in zones of connection of heating pad with the composite blade on spectral characteristics of elastic oscillations of surface of the pad, raised at control. It is shown that in zones of availability of cracks in foam plastic and in zones of violation of connection of heating pad with the composite blade the range of the accepted oscillations that is sign of availability of defect significantly changes and allows revealing with high reliability defects.

Keywords: *low-frequency acoustic methods, acoustic free vibration method, blade of air screw, polymer composite materials, continuity violations.*

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

Разработка воздушного винта с лопастью из полимерных композиционных материалов (ПКМ), содержащей внутри пенопластовый наполнитель, выдвигает на одно из первых мест неразрушающий контроль (НК) таких изделий, от качества которых зависит безопасность полетов на летательных аппаратах [1–3].

В настоящее время существует проблема обнаружения дефектов типа трещин и пустот в пенопластовом наполнителе и мест отслаивания его от лонжерона и оболочки

из ПКМ, а также определения качества соединения нагревательной накладки с углепластиковой лопастью воздушного винта.

Цель данной работы – отработка технологии НК заполнителя и неразъемных соединений элементов лопастей воздушного винта из углепластика как одного из путей повышения надежности авиационной техники. Основное направление исследований – выбор эффективных методов и средств НК для определения качества пенопластового элемента лопасти воздушного винта и качества соединения нагревательной накладки с углепластиковой лопастью воздушного винта, а также выбор информативных параметров НК, обеспечивающих выявление дефектов в пенопластовых заполнителях и в местах соединения нагревательной накладки с углепластиковой лопастью [4–9].

При решении задачи выбора эффективного метода НК проводился сравнительный анализ таких эксплуатационных характеристик различных методов НК, как чувствительность (наименьший размер выявляемых дефектов), удобство и производительность контроля [10–15].

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

Материалы и методы

Объектами контроля являются лопасти воздушного винта, содержащие лонжерон из углепластика, оболочку также из углепластика и пенопластовый наполнитель, расположенный внутри лонжерона и оболочки. На рис. 1 схематично показаны различные сечения лопасти воздушного винта, контроль качества которой необходим как в условиях производства, так и в условиях эксплуатации авиационной техники.

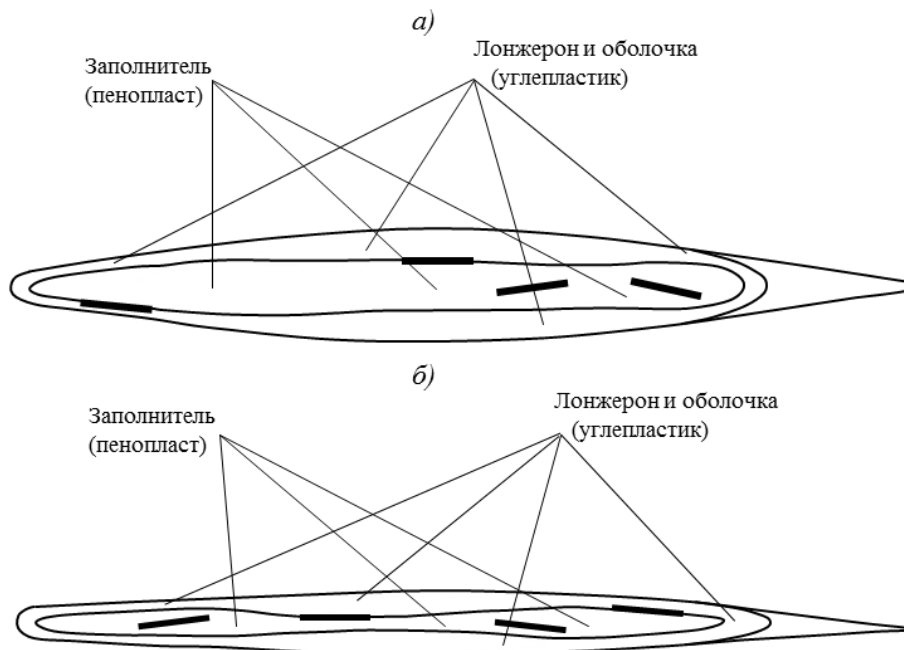


Рис. 1. Эскизы сечений лопасти воздушного винта из ПКМ в «комлевой» (а) и «хвостовой» (б) частях лопасти (жирными линиями показаны места расположения искусственных дефектов в образцах)

Композитные лопасти воздушного винта оснащаются противообледенительными нагревательными накладками, которые приклеивают к телу лопасти. На рис. 2 схематично показано расположение этих накладок.

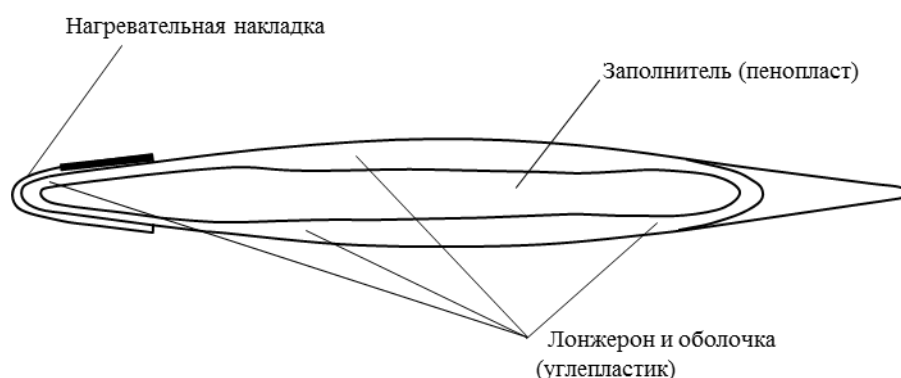


Рис. 2. Эскиз места расположения противообледенительной нагревательной наклейки на теле лопасти воздушного винта (жирной линией показано место расположения искусственного дефекта в образце)

При изготовлении образцов лопасти – для проведения исследований с целью изыскания наиболее эффективных методов выявления дефектов пенопластового заполнителя лопасти (трещины и пустоты во внутреннем пенопластовом заполнителе) и места соединения нагревательной наклейки с лопастью – в образцы закладывали искусственные дефекты, имитирующие нарушения сплошности пенопласта и отслаивание его от лонжерона и оболочки, а также непрочности в зоне соединения нагревательной наклейки с углепластиковым лонжероном. Такие дефекты значительно ухудшают качество лопасти воздушного винта и представляют собой дефекты, которые могут возникнуть в процессе производства или эксплуатации воздушных винтов.

В табл. 1 приведен перечень искусственных дефектов в образцах 1 и 2 (рис. 1) с указанием толщины углепластика, под которым расположен каждый из перечисленных дефектов, и глубины залегания данного дефекта. В табл. 2 приведен перечень искусственных дефектов в образце 3 (рис. 2), расположенных с вогнутой стороны лопасти между телом лопасти и нагревательной накладкой.

Таблица 1

Искусственные дефекты, имитирующие нарушения сплошности в пенопласте в виде трещин в пенопластовом заполнителе и отслоений его от лонжерона и оболочки из углепластика, заложенные в образцах 1 и 2

Искусственные дефекты	Контроль с выпуклой стороны образца лопасти		Контроль с вогнутой стороны образца лопасти	
	Толщина углепластика, мм	Глубина залегания дефекта, мм	Толщина углепластика, мм	Глубина залегания дефекта, мм
A ₁	12	38–47	12	13–16
A ₂	2,5	20–24	2,5	18–22
B ₁	12	33	5–12	27–33
B ₂	10	13	10	32,5–36
C ₁	10	24–31	10	18–26
C ₂	2,5	16	2,5	5–8
D ₁	2,5	5–7	2,5	23–30
D ₂	8	13–16	8	16–19

Искусственные дефекты, имитирующие непрочности между нагревательной накладкой и телом лопасти, заложенные в образце 3

Искусственные дефекты	Ширина дефектов, мм	Материал поверхности нагревательной накладки	Глубина залегания дефекта, мм
A ₃	5	Резина	1,5–2,5
B ₃	10	Резина	1,5–2,5
C ₃	15	Резина	1,5–2,5

Для НК изделий из ПКМ большой толщины с целью выявления нарушений сплошности материала, инородных включений и других дефектов применяются акустические методы отражения [4, 10, 14]. Дефекты в многослойных конструкциях чаще всего обнаруживают эхо-методом. В тех случаях, когда этот метод не эффективен, может применяться акустический реверберационный метод и, в частности, спектральный вариант этого метода.

Спектральный вариант реверберационного метода основан на исследовании формы огибающей составляющих амплитудного спектра колебаний эхо-импульсов в зависимости от качества многослойных соединений. Рассмотрим изменение спектральной плотности импульса при его распространении в объекте контроля (ОК) под влиянием частотной зависимости затухания [16].

Спектральная плотность эхосигнала $S(j\beta)$ в общем виде определяется выражением

$$S(j\beta) = S_0(j\beta)K_1^2(j\beta)K_2(j\beta), \quad (1)$$

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 $S_0(j\beta)K_1^2(j\beta) = e^{-(1-a\beta)^2}$, получим

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

где a – постоянная, зависящая от добротности преобразователя.

Коэффициент передачи акустического тракта для случая плоской волны равен

$$K_2(j\beta) = Ke^{-2\delta(\beta)r}, \quad (3)$$

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

Подставляя последнее выражение в уравнение (2) получим

$$S(j\beta) = Ke^{-(1-a\beta)^2} e^{-\delta(\beta)}, \quad (4)$$

где $\delta = \frac{\delta_1(f_0) \cdot c}{f_1}$ – величина затухания; $\delta_1(f_0)$ – коэффициент затухания на основной частоте; c – скорость ультразвуковых колебаний (УЗК) 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 [17]: $S_0(j\beta) = K_0 e^{-(1-a\beta)^2}$ – амплитудный спектр импульса от передней поверхности;

$S_1(j\beta) = K_0(1-K_0)^2 e^{-(1-a\beta)^2} e^{-\delta(\beta)}$ – амплитудный спектр 1-го импульса от задней поверхности; $S_2(j\beta) = K_0^3(1-K_0)^2 e^{-(1-a\beta)^2} e^{-2\delta(\beta)}$ – амплитудный спектр 2-го импульса от задней поверхности и, наконец, $S_n(j\beta) = K_0^{2n-1}(1-K_0)^2 e^{-(1-a\beta)^2} e^{-n\delta(\beta)}$ – амплитудный спектр n -го импульса. В данном случае K_0 – коэффициент отражения на границах раздела (для простоты он принят одинаковым на обеих границах).

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

Специальные низкочастотные акустические методы [18–20] чаще всего реализуются с использованием сухого точечного контакта (СТК) [21–23] преобразователя с ОК. При контроле этими методами в ОК возбуждаются антисимметричные нормальные волны нулевого порядка (в частном случае – изгибные) [24–26]. Такие волны могут существовать только в слоях, протяженность которых в направлении распространения волн в несколько раз превышает толщину слоев. Использование СТК преобразователя с ОК позволяет исключить применение контактной жидкости для создания акустической связи между преобразователем дефектоскопа и ОК. Для СТК характерен также особый вид помех – фрикционные шумы [27], связанные с перемещением преобразователя по шероховатой поверхности ОК.

С учетом опыта работ по НК композитных конструкций наиболее перспективным методом для опробования являлся акустический метод свободных колебаний [28–33].

Рассмотрим более подробно теоретические основы акустического метода свободных колебаний. Спектр $\dot{S}_2(j\omega)$ электрического сигнала на выходе преобразователя дефектоскопа, работающего по методу свободных колебаний, определяется:

– спектром входного воздействия $\dot{S}_1(j\omega)$, однозначно связанным с формой и длительностью возбуждающих ОК импульсов;

– параметрами контролируемой конструкции, особенно ее участка в зоне расположения преобразователя. Влияние ОК на преобразование спектра представим коэффициентом передачи $\dot{Y}_n(j\omega)$, зависящим от параметров данной конструкции, наличия и характеристик имеющихся в ней дефектов;

– коэффициентом передачи $\dot{P}(j\omega)$ приемного преобразователя, к которому отнесем также участок акустического тракта, связывающий собственно преобразователь с контролируемой конструкцией, и входную электрическую цепь усилителя. При использовании микрофонного приемника таким участком является воздушный промежуток между микрофоном и ОК, в случае пьезоэлектрического приемника – гибкость зоны его контакта с ОК.

Таким образом,

$$\dot{S}_2(j\omega) = \dot{S}_1(j\omega) \dot{Y}_n(j\omega) \dot{P}(j\omega), \quad (5)$$

где $j = \sqrt{-1}$; ω – круговая частота; точки над символами означают, что данные функции являются комплексными.

В общем случае функции, стоящие в правой части выражения (5), не являются независимыми в том смысле, что изменение параметров контролируемой конструкции влияет на каждую из них, хотя и различным образом. Основным интересом представляет преобразование спектра контролируемой конструкцией. В общем случае вид зависимости

$Y_n(\omega)$ для доброкачественных и дефектных зон различен, поэтому дефект изменяет спектр сигнала на выходе приемного преобразователя.

Дефект в виде зон отслаивания внутреннего пенопластового элемента от лонжерона и оболочки из ПКМ или нарушения соединения между слоями лонжерона или оболочки можно рассматривать как закрепленную по контуру пластину. В случае неглубоко расположенных крупных дефектов слои ПКМ могут рассматриваться как зажатые по контуру пластины.

Основная частота зажатой по контуру пластины диаметром D и толщиной h определяется выражением [34–38]

$$f_0 = \frac{1,88h}{D^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}, \quad (6)$$

где E , ρ и μ – модуль упругости, плотность и коэффициент Пуассона материала пластины соответственно.

При реальных условиях закрепления контура отделенного дефектом слоя величина f_0 с ростом h и E и уменьшением D и ρ увеличивается.

В случае расположения дефекта (трещины) внутри пенопластового элемента на некотором расстоянии от лонжерона и оболочки аналитическое решение задачи о собственных колебаниях отделенной дефектом части конструкции затруднительно ввиду разнообразия условий закрепления этой части конструкции. Поэтому задачу выявления трещин в пенопластовых деталях композитной лопасти решали экспериментальным путем на образцах с искусственными дефектами.

Результаты

В данной работе наиболее тщательно исследована возможность применения ультразвукового эхо-импульсного метода (дефектоскопы ЕРОСН 1000 Olympus, УД2-12 и УДЛ-2М) и двух низкочастотных акустических методов: метода свободных колебаний (дефектоскопы АД-50У, АД-60С, АД-64М и ЧИКП-4УС) и импедансного метода (дефектоскопы АД-42И, ДАМИ-С и ИД-403) – для выявления дефектов типа нарушения сплошности материала в пенопласте и под нагревательной накладкой.

Для выявления дефектов под нагревательной накладкой положительные результаты показали только эхо-импульсный метод (при лазерном возбуждении импульсов УЗК) и метод свободных колебаний. Сравнение эксплуатационных возможностей этих методов позволило сделать выбор в пользу метода свободных колебаний, реализуемого с помощью дефектоскопа типа АД-64М [22].

Для выявления дефектов в пенопласте эффективным признан только метод свободных колебаний. Применение других методов (эхо-импульсного и импедансного) для указанной цели не эффективно. В связи с этим рассмотрим более подробно возможности метода свободных колебаний при выявлении дефектов в лопасти воздушного винта.

В табл. 3 представлены результаты выявляемости дефектов в образцах при контроле методом свободных колебаний, реализуемым с помощью дефектоскопа АД-64М. Следует учитывать, что чем меньше размер выявляемого дефекта, тем выше чувствительность контроля.

В образце 3 при настройке дефектоскопа в бездефектных зонах приклейки нагревательной накладки к телу лопасти уверенно выявляются только дефекты В₃ и С₃ шириной соответственно 10 и 15 мм. Чувствительность в этом случае равна 10 (вдали от зоны скругления лопасти) и 15 мм (около зоны скругления лопасти).

Погрешности определения чувствительности контроля при выявлении дефектов определяются как настройкой дефектоскопа, так и формой ОК в различных его зонах. В табл. 3 представлены результаты определения чувствительности контроля при настройке дефектоскопа в зоне лонжерона, когда пенопласт контролируется со стороны толстого углепластика (толщиной от 8 до 12 мм), и в зоне оболочки, когда пенопласт контролируется со стороны тонкого углепластика (толщиной 2,5 мм). Точность выявления границ дефектов, определяющая погрешность экспериментов, в этом случае составляет $\pm 1,5$ мм.

Таблица 3

**Выявляемость дефектов типа нарушения сплошности
пенопластового заполнителя в образцах 1 и 2**

Выявление дефектов	Толщина углепластика, мм	Чувствительность контроля при выявлении дефектов							
		A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	C ₁	C ₂	D ₁	D ₂
при глубине залегания дефекта, мм (в скобках)									
Контроль в зоне лонжерона									
С выпуклой стороны лопасти	12	25 (38–47)	–	30 (33)	–	–	–	–	–
	10	–	–	–	25 (13)	27 (24–31)	–	–	–
	8	–	–	–	–	–	–	–	27 (13–16)
С вогнутой стороны лопасти	12	27 (13–16)	–	25 (27–33)	–	–	–	–	–
	10	–	–	–	28 (32,5–36)	27 (18–26)	–	–	–
	8	–	–	–	–	–	–	–	25 (16–19)
Контроль в зоне оболочки									
С выпуклой стороны лопасти	2,5	–	30 (20–24)	–	–	–	24 (16)	10 (5–7)	–
С вогнутой стороны лопасти	2,5	–	20 (18–22)	–	–	–	17 (5–8)	30 (23–30)	–

На рис. 3, *а* и *б* показаны спектры принятых сигналов при контроле пенопластового заполнителя со стороны лонжерона в бездефектной и дефектной зонах соответственно. На рис. 4, *а* и *б* показаны спектры принятых сигналов при контроле пенопластового заполнителя со стороны оболочки в бездефектной и дефектной зонах соответственно.

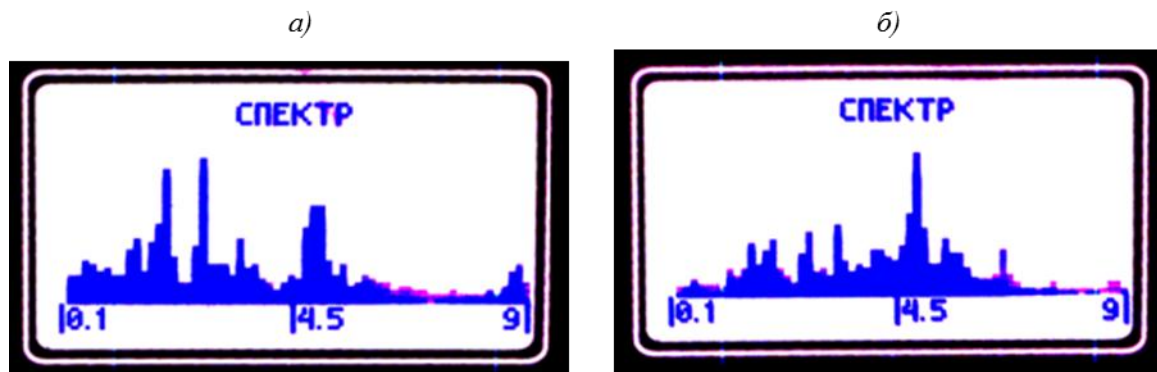


Рис. 3. Спектр принятого сигнала при контроле пенопластового заполнителя со стороны лонжерона в бездефектной зоне при $f_0=1,81$ кГц (*а*) и в дефектной зоне при $f_0=5,06$ кГц (*б*)

Признаком дефекта в данном случае является существенное изменение спектра: в первом случае (рис. 3) основная составляющая спектра f_0 (наибольшая по амплитуде) при контроле в бездефектной зоне располагалась на частоте 1,81 кГц, при контроле в зоне дефекта – на частоте 5,06 кГц, а во втором случае (рис. 4) при контроле в бездефектной зоне располагалась на частоте 2,75 кГц, при контроле в зоне дефекта – на частоте 4,79 кГц.

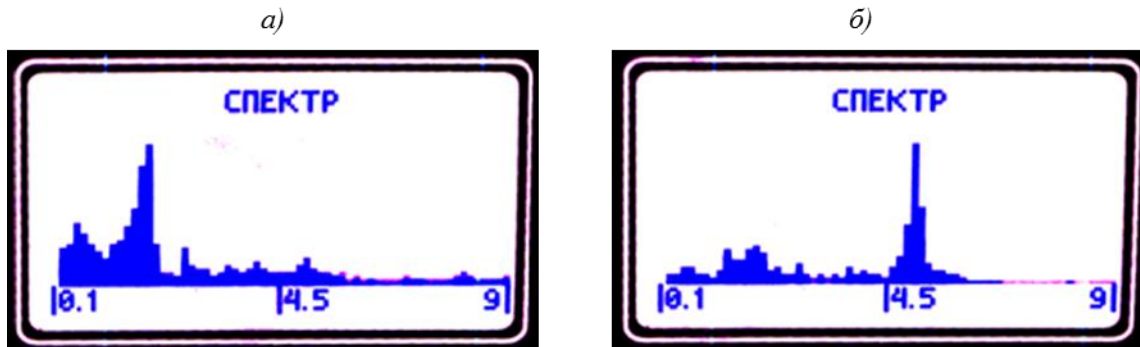


Рис. 4. Спектр принятого сигнала при контроле пенопластового заполнителя со стороны оболочки в бездефектной зоне при $f_0=2,75$ кГц (а) и в дефектной зоне при $f_0=4,79$ кГц (б)

Чувствительность дефектоскопа при контроле пенопласта в зоне лонжерона составляет от 25 до 30 мм как с выпуклой, так и с вогнутой стороны лопасти.

На рис. 5, а и б показаны спектры принятого сигнала при контроле нагревательной наклейки в бездефектной и дефектной зонах соответственно. Признаком дефекта в этом случае является также значительное изменение спектра: в первом случае (рис. 5, а) основная составляющая спектра f_0 при контроле в бездефектной зоне располагалась на частоте 1,65 кГц, при контроле в зоне дефекта (рис. 5, б) – на частоте 2,72 кГц.



Рис. 5. Спектр принятого сигнала при контроле нагревательной наклейки в бездефектной зоне при $f_0=1,65$ кГц (а) и в дефектной зоне при $f_0=2,72$ кГц (б)

При контроле качества приклейки нагревательной наклейки чувствительность дефектоскопа составляет от 10 до 15 мм в зависимости от места расположения (дальше от зоны скругления лопасти или ближе к ней).

Обсуждение и заключения

Важный момент при отработке методики контроля – выбор параметра НК. В процессе работы исследовано влияние дефектов типа нарушения сплошности пенопластового заполнителя композитной лопасти на спектральные характеристики упругих

колебаний поверхности объекта контроля, возбуждаемых ударными импульсами при контроле. В зонах наличия трещин в пенопласте существенно изменяется спектр принятых колебаний, что служит признаком наличия дефекта.

Амплитуда, длительность и форма импульсов, возбуждаемых механическими вибраторами, существенно зависят от ОК. Уменьшение значений модуля упругости наружного слоя и механического импеданса изделия (например, вследствие уменьшения толщины изделия или наличия в нем дефекта) увеличивает длительность, уменьшает амплитуду и сужает спектр импульса. Поэтому изделия для контроля необходимо разметить с обеих сторон с помощью шаблонов на две зоны: на «зону лонжерона» (толщина углепластика – от 8 до 12 мм) и на «зону оболочки» (толщина углепластика – от 2 до 3 мм).

В процессе работы исследовано влияние дефектов в зонах соединения нагревательной накладки с композитной лопастью на спектральные характеристики упругих колебаний поверхности накладки, возбуждаемых при контроле. В зонах нарушения соединения нагревательной накладки с композитной лопастью существенно изменяется спектр принятых колебаний, что позволяет с высокой достоверностью выявлять непрочности.

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. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. №5. С. 8–18.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. №2 (14). С. 16–21.
4. Мурашов В.В. Контроль и диагностика многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами. М.: Спектр, 2016. 244 с.
5. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Сереженков А.А. Конструкционные и термостойкие клеи // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 328–335.
6. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 544 с.
7. Gunasekera A.M. Monitoring of impact damage products from PCM // *Materials Evaluation*. 2010. Vol. 68. No. 8. P. 880–887.
8. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Комарова О.А., Гуняева А.Г. Конструкционные углепластики, модифицированные наночастицами // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 277–286.
9. Петрова А.П. Клеящие материалы: справочник / под ред. Е.Н. Каблова, С.В. Резниченко. М.: Редакция журнала «Каучук и резина», 2002. 196 с.
10. 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.
11. Rose J.L., Soley L.E. Ultrasonic guided waves for anomaly detection in aircraft components // *Materials Evaluation*, September 2000. P. 1080–1086.
12. Ашкенази Е.К. Анизотропия машиностроительных материалов. Л.: Машиностроение, 1969. С. 37–39.
13. Generazio E.R. Assessment of the probability of detection of the defect // *Materials Evaluation*. 2009. Vol. 67. No. 6. P. 730–738.

14. Барынин В.А., Будадин О.Н., Кульков А.А. Современные технологии неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов. М.: Спектр, 2013. 243 с.
15. Gryzagoridis J., Findeis D. Comparison of two control facilities of products from composites // *Insight*. 2014. Vol. 56. No. 1. P. 35–38.
16. Барышев С.Е. Спектральная плотность последовательности эхо-сигналов // *Дефектоскопия*. 1974. №2. С. 19–25.
17. Меркулов Л.Г., Токарев В.А. Физические основы спектрального метода измерения затухания ультразвуковых волн в материалах // *Дефектоскопия*. 1970. №4. С. 3–11.
18. Мурашов В.В. Применение вариантов акустического импедансного метода для контроля деталей из ПКМ и многослойных клееных конструкций // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 469–482. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-469-482.
19. Мурашов В.В. Контроль качества изделий из полимерных композиционных материалов акустическими методами // *Контроль. Диагностика*. 2016. №12. С. 16–29.
20. Ланге Ю.В. Низкочастотные акустические методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций // *Контроль. Диагностика*. 2004. №2. С. 39–41.
21. Ланге Ю.В., Теумин И.И. О динамической гибкости сухого точечного контакта // *Дефектоскопия*. 1971. №2. С. 49–60.
22. *Неразрушающий контроль: справочник / под общ. ред. В.В. Клюева*. М.: Машиностроение, 2006. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. 864 с.
23. Ланге Ю.В. Электрическое моделирование пьезопреобразователей низкочастотных акустических дефектоскопов // *Дефектоскопия*. 1979. №11. С. 20–26.
24. 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.
25. Скучик Е. Основы акустики. М.: Мир, 1976. Т. 1. 520 с.
26. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэля и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. С. 84–87.
27. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.
28. Мурашов В.В. Исследование характеристик акустического метода свободных колебаний // *Контроль. Диагностика*, 2017. №3. С. 4–11.
29. Мурашов В.В., Яковлева С.И. Применение акустического метода свободных колебаний для контроля конструкций, содержащих слои из неметаллических материалов // *Контроль. Диагностика*. 2017. №10. С. 28–35.
30. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. М.: Мир, 1971. С. 309.
31. Ланге Ю.В. О работе пьезоприемника акустического спектрального дефектоскопа // *Дефектоскопия*. 1978. №7. С. 67–77.
32. Ланге Ю.В. Акустический спектральный метод неразрушающего контроля // *Дефектоскопия*. 1978. №3. С. 7–14.
33. Ланге Ю.В., Устинов Е.Г. Акустические импульсы ударного возбуждения изделий // *Дефектоскопия*. 1982. №10. С. 81–87.
34. Вайнберг Д.В. Справочник по прочности, устойчивости и колебаниям пластин. Киев: Будівельник, 1973. С. 260.
35. Иофе В.К., Янпольский А.А. Расчетные графики и таблицы по электроакустике. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1954. С. 98.
36. Ермолов И.Н., Вopilкин А.Х., Бадалян В.Г. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии (краткий справочник). М.: Эхо+, 2000. 108 с.
37. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Физматгиз, 1962. 216 с.
38. Бойчук А.С., Генералов А.С., Диков И.А. Контроль деталей и конструкций из полимерных композиционных материалов с применением технологии ультразвуковых фазированных решеток // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №1 (46). С. 45–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-45-50.