УДК 620.179

В.Ю. Чертищев¹, О.Г. Оспенникова¹, А.С. Бойчук¹, И.А. Диков¹, А.С. Генералов¹

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА И ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ ДЕФЕКТОВ В МНОГОСЛОЙНЫХ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ПКМ ПО ВЕЛИЧИНЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-72-94

Приведены результаты аналитических и экспериментальных исследований влияния размеров и глубины залегания дефектов на механический импеданс на поверхности многослойных сотовых конструкций из полимерных композиционных материалов. Произведен выбор критериев различия глубины залегания по слоям сотовых конструкций и параметров оценки условных размеров дефекта в каждом слое. По результатам исследований разработана методика определения размеров и глубины дефектов путем численной оценки характера отклонения импеданса на поверхности объекта контроля от соответствующих величин для годного изделия.

Ключевые слова: акустические методы контроля, импедансный метод, механический импеданс, полимерные композиционные материалы, сотовые конструкции, углепластик, мотогондола.

*V.Yu. Chertishchev*¹, O.G. Ospennikova¹, *A.S. Boichuk*¹, *I.A. Dikov*¹, *A.S. Generalov*¹

DETERMINATION OF THE SIZE AND DEPTH OF DEFECTS IN MULTILAYER PCM HONEYCOMB STRUCTURES BASED ON THE MECHANICAL IMPEDANCE VALUE

The paper provides the results of analytical and experimental studies, which show the influence of the dimensions and depth of defects on mechanical impedance on the surface of multilayer honeycomb structures made of polymer composite materials. The selection of criteria for distinguishing depth over a layer of honeycomb structures and parameters for evaluating the conditional dimensions of a defect in each layer was made. As a result of the research, there was developed a method for determining the size and depth of defects by means of evaluation of the impedance deviation character on the surface of the monitored item from the corresponding values of a nondefective item.

Keywords: acoustic testing methods, impedance method, mechanical impedance, polymer composite materials, honeycomb constructions, carbon fiber reinforced plastic, engine nacelle.

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

Обязательным условием обеспечения качества и, следовательно, безопасности воздушных судов является применение неразрушающих методов контроля и диагностики при разработке новых авиационных материалов, производстве и эксплуатации изделий и конструкций авиационной техники [1–6].

В настоящее время в изделиях авиационной, космической и других видов техники широкое распространение получили трехслойные сотовые конструкции (обшивка-соты-обшивка). Все более широкое применение находят также пяти- и семислойные сотовые конструкции из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Примером могут служить мотогондолы перспективных авиационных газотурбинных двигателей, состоящие на ~50% из подобных конструкций, которые решают как задачи, связанные с обеспечением прочности, так и задачи, связанные с шумо- и вибропоглощением [7].

При всех преимуществах композиционных материалов их расчетные свойства реализуются только при условии отсутствия дефектов, которые могут образоваться в материале детали при ее изготовлении или появиться позднее в процессе эксплуатации [3]. При этом вероятность наличия дефектов в изделии возрастает соразмерно увеличению количества слоев в многослойной

конструкции, поскольку потенциальные дефекты могут образоваться как в каждом одиночном (монолитном или неспло́шном периодическом) слое (зачастую различные типы дефектов для каждого конкретного слоя), так и на стыке каждой пары слоев [8]. Внутренние дефекты могут быть выявлены только с применением методов неразрушающего контроля. В настоящее время многослойные сотовые конструкции из ПКМ в основном контролируют акустическими, радиационными и тепловыми методами неразрушающего контроля, из которых наибольшее распространение на предприятиях авиационной промышленности из-за нулевых раскрытий большинства типичных дефектов получили специальные низкочастотные акустические методы контроля (импедансный с совмещенным и раздельно-совмещенным датчиками, ударно-акустический, резонансный и др.), позволяющие выявлять большинство опасных дефектов [9]. Однако данные методы, исходя из заложенных в них физических принципов контроля, могут дать лишь бинарную информацию о наличии или отсутствии дефекта, но не дают информации о его размере и глубине [10, 11].

С каждым годом возрастают сложность конструкций, изготавливаемых из ПКМ, их габаритные размеры и, соответственно, стоимость. Это приводит к тому, что в случае обнаружения в детали дефекта экономически целесообразным становится применение ее в работе с дефектом по результатам прочностного расчета или с проведением ремонта вместо утилизации. Данная ситуация относится не только к деталям, пострадавшим в условиях эксплуатации, но и к деталям с заводским браком в условиях производства. Прочностной расчет конструкции с дефектом требует наличия численной информации о его размере и глубине залегания. При выборе правильной технологии ремонта современной многослойной сотовой конструкции из ПКМ также необходимо наличие информации о размере и глубине (или как минимум дискретном слое) залегания дефекта. Для трехслойных сотовых конструкций в данное время имеется ряд частичных решений задачи определения дискретного слоя залегания дефекта и его условного размера: любой дефект считается отслоением обшивки от сотоблока с одной или другой стороны конструкции, а приблизительный размер отслоения очерчивается по срабатыванию сигнализации дефекта [12]. Для изделий с большим количеством слоев (в первую очередь для пяти- и семислойных сотовых конструкций) данная задача в настоящее время не имеет удовлетворительного универсального решения, хотя существует ряд эмпирически установленных закономерностей по характеру отклонения маркера на экране амплитуднофазового импедансного дефектоскопа от настройки для годного изделия [13].

Для установления связи размера и глубины дефекта с величиной импеданса в конкретном типе многослойной конструкции в свою очередь требуется аналитическое и экспериментальное изучение влияния дефектов различного размера, расположенных на разной глубине в многослойных сотовых конструкциях, на численную величину механического импеданса (МИ) на поверхности изделия над дефектом, по сравнению с периодической картиной импедансов для годного изделия. Для этого необходимо развитие существующих специальных акустических низкочастотных методов (в первую очередь импедансного) в части создания возможности измерения численной величины МИ (как полного, так и по отдельности активной и реактивной его составляющих), которую в свою очередь теоретически возможно связать с информацией о размере и глубине залегания дефекта. Соответствующие исследования ранее были проведены во ФГУП «ВИАМ» с разработкой технологии измерения численной величины МИ путем моделирования совмещенного импедансного датчика, учитывающего и механические, и электрические колебательные процессы, происходящие в нем [7].

Другой, более общей проблемой применения импедансного метода является то, что без информации о численной величине импедансов сам импедансный метод контроля остается «черным ящиком», не имеющим связи между входными и выходными параметрами [14]. Попытки вычисления различными расчетными способами реальных величин импеданса конструкций, например при изменении толщины обшивок [15], оказываются бесполезными, так как даже если вычислить истинную величину импеданса, остается без ответа вопрос – как при этом изменяются величины измеряемых параметров входных электрических сигналов на импедансном дефектоскопе.

Данная 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

Измерение механического импеданса

Механическим импедансом, или полным механическим сопротивлением \dot{Z} , называется отношение возмущающей силы \dot{F} к вызываемой ею колебательной скорости \dot{v} поверхности среды в точке приложения силы. Сила является гармонической, величины \dot{Z} , \dot{F} и \dot{v} – комплексными. Устройством, чувствительным к изменению МИ, является импедансный датчик (рис. 1).



Рис. 1. Конструктивная схема (1 – тыльная масса; 2 – пьезоэлементы излучателя; 3 – звукопровод; 4 – пьезоэлемент приемника; 5 – наконечник; 6 – объект контроля) и схема замещения совмещенного преобразователя

Отношение между комплексными величинами напряжений \dot{U}_1 на генерирующем колебания пьезоэлементе излучателя и \dot{U}_2 на пьезоэлементе приемника называется комплексным коэффициентом передачи датчика \dot{P} [16]:

$$\dot{P} = \frac{U_2}{\dot{U}_1} = \left| \frac{U_2}{U_1} \right| e^{j\psi} = P \cdot e^{j\psi}, \tag{1}$$

где P – коэффициент передачи датчика; ψ – сдвиг фазы между напряжениями \dot{U}_1 и \dot{U}_2 ; $j=\sqrt{-1}$.

Моделирование преобразователя произведено с помощью метода электромеханических аналогий. Соответствующая схема замещения для совмещенного импедансного преобразователя, нагруженного механическим импедансом контролируемого изделия $Z_{\rm H}$ через шунтирующую контактную гибкость $Z_{\rm K}$, приведена на рис. 1. Пьезоэлементы представлены полными эквивалентными схемами для продольного пьезоэффекта (обведены штриховыми линиями) и каждый из них имеет одну электрическую и две механические стороны, которые связаны между собой идеальным электромеханическим трансформатором с коэффициентом 1:N ($N_{\rm H}$ и $N_{\rm n}$ – для источника и приемника соответственно) между силами F и напряжениями U. Колебания от генератора к приемнику передаются через цилиндрический звукопровод с волновым сопротивлением W и волновым числом k. Подробное описание модели и ее расчета приведено в статье [7].

Расчет внутренних электрических импедансов Z_0 , реактивных импедансов от массы пьезоэлементов Z_M и внутренних механических импедансов пьезоэлементов Z1 произведен с учетом пренебрежения потерями при работе пьезоэлементов на низких частотах и с вычислением инерционных нагрузок как сосредоточенных масс, поскольку в рассматриваемых преобразователях диаметры и толщины пьезоэлементов много меньше длин упругих волн в рабочем диапазоне частот. Импедансы тыльной массы Z_T и контактного наконечника Z_{KH} также рассчитаны как для инерционных сопротивлений от сосредоточенных масс. Наличие соединительного кабеля и входной цепи дефектоскопа учтено комплексным электрическим сопротивлением Z_3 .

Независимой переменной является реактивная составляющая $X_{\rm H}$ комплексной внешней нагрузки $Z_{\rm H}=R_{\rm H}+jX_{\rm H}$, дополнительным параметром является коэффициент $v_{\rm H}=R_{\rm H}/|X_{\rm H}|$, характеризующий отношение величин активной и реактивной составляющих импеданса, применением которого в дальнейших расчетах будет вводиться учет величины энергетических потерь в контролируемом изделии. Графики коэффициента передачи $P(X_{\rm H}, v_{\rm H})$ и фазового смещения $\psi(X_{\rm H}, v_{\rm H})$ можно рассчитать по разработанной схеме замещения в численном виде. Однако с учетом ряда допущений для представленной модельной схемы получено аналитическое решение.

В соответствии со схемой замещения (рис. 1) активная *R* и реактивная *X* составляющие нагрузки на датчик со стороны изделия с учетом шунтирования контактной гибкостью соответственно равны

$$R = \frac{v_{\rm H} |X_{\rm H}|}{(1 - \omega K_{\rm g} X_{\rm H})^2 + (\omega K_{\rm g} v_{\rm H} X_{\rm H})^2};$$
(2)

$$X = \omega m + \frac{X_{\rm H} (1 - \omega K_{\rm K} X_{\rm H} (1 + v_{\rm H}^2))}{(1 - \omega K_{\rm K} X_{\rm H})^2 + (\omega K_{\rm K} v_{\rm H} X_{\rm H})^2},$$
(3)

где $\omega = 2\pi f - \kappa$ руговая частота колебаний; $f - частота колебаний; m = m_{\kappa H} + m_{\Pi}/2; m_{\kappa H}$ и $m_{\Pi} - массы контакт$ $ного наконечника и пьезоэлемента приемника соответственно; <math>K_{\kappa}$ – контактная гибкость сухого точечного контакта.

В результате вычислений получено отношение напряжений на приемном и излучающем пьезоэлементах в комплексном виде:

$$\frac{\dot{U}_{2}}{\dot{U}_{1}} = \frac{-j\omega^{2}nd_{\mu}d_{n}M_{1}\varphi e^{\frac{j}{2}}(C^{T}+C_{3})^{-1}}{\varphi\left(\frac{j\omega M_{0}}{Z_{y3}}+e^{bl}\right)ch\varphi l + \left(\omega M_{0}\left(\frac{jb}{2Z_{y3}}-\frac{k}{W_{y3}}\right)+e^{bl}\left(\frac{W_{y3}(jk+2\beta)}{Z_{y3}}-\frac{b}{2}\right)\right)sh\varphi l},$$
(4)

где *n* – количество пьезопластин в излучателе; $d_{\rm u}$ и $d_{\rm n}$ – пьезомодули пьезопластин источника и приемника соответственно; $M_1=m_{\rm r}+nm_{\rm u}/2$; $m_{\rm r}$ и $m_{\rm u}$ – массы тыльной нагрузки и одиночной пьезопластины источника соответственно; $M_0=m_{\rm r}+nm_{\rm u}/2$; $m_{\rm r}$ и $m_{\rm u}$ – массы тыльной нагрузки и одиночной пьезопластины источника соответственно; $M_0=m_{\rm r}+nm_{\rm u}$; l и b – длина стержня и коэффициент экспоненциальной формы звукопровода; $\varphi = (\gamma^2 + (b/2)^2)^{1/2} = \delta + j\varepsilon$; $\gamma = \beta + jk = k(1/(2Q) + j)$ – постоянная распространения; β – постоянная затухания; $k=\omega/c_{\rm 3B}$ – волновое число; $c_{\rm 3B} = (E_{\rm 3B}/\rho_{\rm 3B})^{1/2}$ – скорость звука; $E_{\rm 3B}$ – модуль упругости; $\rho_{\rm 3B}$ – плотность материала звукопровода; $\delta = k(g^2 + 1/(Q^2))^{1/4} \cdot \cos(0.5 \cdot \arctan(1/(gQ)))$, $g = b^2/(4k^2) - 1$, $\varepsilon = k(g^2 + 1/(Q^2))^{1/4} \cdot \sin(0.5 \cdot \arctan(1/(gQ)))$; Q – добротность звукопровода; $C^{\rm T}$ – электрическая емкость свободного пьезоэлемента (приемника); C_3 – суммарная емкость кабеля, входной цепи и монтажа; $W_{\rm y3} = S_{\rm y3}(E_{\rm 3B}\rho_{\rm 3B})^{1/2}$ – волновое сопротивление узкого конца звукопровода ($S_{\rm y3}$ – его площадь); $Z_{\rm y3} = \dot{F}_{\rm y3}/\dot{\xi}_{\rm y3}$ – нагрузка узкого конца стержня; $\dot{F}_{\rm y3}$ и $\dot{\xi}_{\rm y3}$ – комплексные амплитуды силы и колебательной скорости на узком конце.

После ряда подстановок и вычислений из уравнения (4) с учетом выражений (2) и (3)выведены искомые зависимости для коэффициента передачи $P(X_{\rm H}, v_{\rm H})$ и фазового смещения $\psi(X_{\rm H}, v_{\rm H})$:

$$P = \frac{G}{H^2 + T^2} \sqrt{\left(H(\delta R - \varepsilon X) + T(\delta X + \varepsilon R)\right)^2 + \left(H(\delta X + \varepsilon R) - T(\delta R - \varepsilon X)\right)^2};$$
(5)

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{H(\delta X + \varepsilon R) - T(\delta R - \varepsilon X)}{H(\delta R - \varepsilon X) + T(\delta X + \varepsilon R)}, \qquad (6)$$

где

$$H = W_{y_3} \left(e^{bl} \left(R(\delta p - \varepsilon q) + kW_{y_3} \left(\frac{k}{Q} - h \right) + \frac{b}{2} (hX - aR) \right) - (\varepsilon p + \delta q) \left(\omega M_0 + X e^{bl} \right) \right) + \omega M_0 \left(k(hX - aR) - \frac{bhW_{y_3}}{2} \right);$$

$$T = W_{y_3} \left(e^{bl} \left(R(\varepsilon p + \delta q) + kW_{y_3} \left(k + \frac{h}{Q} \right) - \frac{b}{2} (aX + hR) \right) + (\delta p - \varepsilon q) \left(\omega M_0 + X e^{bl} \right) \right) + \omega M_0 \left(\frac{abW_{y_3}}{2} - k(aX + hR) \right);$$

$$G = \frac{\omega^2 n d_{\mu} d_{\pi} M_1 e^{\frac{bl}{2}} W_{y_3}}{C^T + C_3}; \quad a = \text{sh} \delta l \cos \varepsilon l; \ h = \text{ch} \delta l \sin \varepsilon l; \ p = \text{ch} \delta l \cos \varepsilon l; \ q = \text{sh} \delta l \sin \varepsilon l.$$

По формуле (5) произведен расчет коэффициента передачи P датчика ПАДИ-7 как функции от частоты f при $X_{\rm H}$ =0 (на холостом ходу, без прижатия датчика к объекту контроля) для нескольких величин добротности Q. Эта же зависимость измерена экспериментально. Оказалось, что измереные значения составляют ~0,6 от расчетных. Это объясняется отличием реальных пьезомодулей от расчетных и наличием ненулевых гибкостей в клеевых соединениях пьезоэлементов. После умножения ординат расчетной кривой на поправочный коэффициент $p_{\rm k}$ =0,6 совпадение с экспериментом получилось удовлетворительным. Путем сравнения экспериментальных замеров с серией графиков при различных значениях добротности Q произведен выбор величины добротности для дальнейшего моделирования – для датчика ПАДИ-7 эта величина составила 20 ед.

В результате модельного расчета (с предварительным внесением всех типов корректировок) получены зависимости для коэффициента передачи $P(X_{\rm H}, v_{\rm H})$ и фазового смещения $\psi(X_{\rm H}, v_{\rm H})$ для датчика ПАДИ-8-02 (P – рис. 2, a; ψ – рис. 2, δ) на частотах 2,1 и 10,48 (для изделий из ПКМ) и 4,2 кГц (для титанового сплава ВТ6 – для сравнения) и для датчика ПАДИ-7 (P – рис. 2, e; ψ – рис. 2, c) на частоте 6,2 кГц для изделий из ПКМ.

Поскольку раздельный анализ графиков функций $P(X_{\rm H}, v_{\rm H})$ и $\psi(X_{\rm H}, v_{\rm H})$ затруднителен, целесообразнее объединять данные зависимости для получения годографов коэффициента передачи на комплексной плоскости. При этом текущее значение коэффициента передачи в комплексном виде представляется радиус-вектором, обладающим длиной, равной P, и образующим угол ψ с осью абсцисс. Соответствующие годографы для различных значений коэффициента $v_{\rm H}$ приведены на рис. 3 для датчика ПАДИ-7 на частоте 6,2 кГц. На годографы для примера также наложена группа данных, измеренных в различных точках на годной семислойной сотовой конструкции с общивками из углепластика.



Рис. 2. Модельные зависимости $P(X_{\rm H}, v_{\rm H})$ и $\psi(X_{\rm H}, v_{\rm H})$ для датчика ПАДИ-8-02 (*a*, *б*) на частотах 2,1 и 10,48 (для изделий из ПКМ) и 4,2 кГц (для сплава ВТ6 – для сравнения) и для датчика ПАДИ-7 (*в*, *г*) на частоте 6,2 кГц для изделий из ПКМ при различных значениях коэффициента $v_{\rm H}$



Рис. 3. Годографы при различных значениях коэффициента $v_{\rm H}$, объединяющие зависимости $P(X_{\rm H}, v_{\rm H})$ и $\psi(X_{\rm H}, v_{\rm H})$ для датчика ПАДИ-7, для изделий из ПКМ (углепластик ВКУ-39) на частоте 6,2 кГц



Рис. 4. Изменение величин механического импеданса на поверхности сотовой конструкции относительно стенок сот второго слоя

Влияние дефектов на механический импеданс

Точный аналитический расчет механических импедансов над дефектами в трехслойных сотовых конструкциях проблематичен, а в пяти- и семислойных сотовых конструкциях и вовсе практически невозможен – особенно при малой толщине монолитных обшивок и большом размере ячеек сот относительно толщины сотоблоков. Однако общий анализ влияния дефектов в зависимости от их размеров в различных слоях многослойной сотовой конструкции на величины реактивной и активной составляющих механического импеданса (и, соответственно, на величину v_н) в сравнении с годной конструкцией для конкретизации уникальных признаков залегания дефекта в каждом из слоев тем не менее возможен.

Механический импеданс на поверхности изделия над центром соты второго слоя в годном изделии имеет конкретные значения как активной R, так и реактивной X составляющих (или, соответственно, при измерениях по модельным годографам реактивной составляющей $X_{\rm H}$ и величины коэффициента $v_{\rm H}$). Механический импеданс на поверхности изделия над стенками сот второго слоя, в свою очередь, также будет иметь конкретные величины параметров $X_{\rm H}$ и $v_{\rm H}$. При этом можно исходить из логичного предположения (которое в дальнейшем будет проверено экспериментально), что величина $X_{\rm H}$ над стенками больше, чем над центрами сот (рис. 4). Это объясняется тем, что при нагружении вдоль стенки коэффициент подложки χ под обшивкой будет иметь максимальное значение, а под обшивкой над центрами сот – минимальное (формально нулевое), а величина коэффициента $v_{\rm H}$, напротив, над центрами сот должна быть больше, поскольку в данных точках общивка ближе к модели бесконечного тонкого листа, а значит должна возрастать доля активной составляющей R в МИ. Соответственно примем, что величина $X_{\rm H}$ колеблется (по модулю) от $X_{\rm min}$ (над центрами сот) до $X_{\rm max}$ (над стенками сот), а величина $v_{\rm H}$ – соответственно от $v_{\rm min}$ (над стенками сот) до $v_{\rm max}$ (над центрами сот).

Механический импеданс однослойной пластины над дефектом

Рассмотрим закономерности изменения МИ многослойных конструкций в зонах дефектов в наиболее простой ситуации, когда отделенный дефектом участок конструкции является одиночным тонким слоем (рис. 5), толщина h которого обычно постоянна (так как непроклеи между слоями и расслоения в монолитных общивках из слоистых пластиков параллельны поверхности изделия), причем $h \ll b$ (где b – размер отделенного слоя в плоскости общивки). Такие участки могут рассматриваться как тонкие пластинки, определенным образом закрепленные по периметру.



Рис. 5. Расслоение в первом слое (обшивке) и непроклей между первым и вторым слоями

Для оценки соответствия между истинными и измеряемыми с помощью разработанной модели импедансного преобразователя (с учетом всех корректировок, компенсирующих энергетические потери) величинами механического импеданса, выполнено их сравнение на искусственных дефектах, МИ которых может быть вычислен аналитически.

В качестве искусственного дефекта выбрано круглое плоскодонное фрезерованое отверстие, которое позволяет получить в образце колебательную мембрану заданной толщины и диаметра. Механический импеданс в центре данных мембран с учетом ряда допущений может быть вычислен с использованием математической модели защемленной по периметру круглой пластины диаметром d и массой m (плотностью ρ) из материала с модулем упругости E и коэффициентом Пуассона μ , в центре которой нормальной сосредоточенной силой возбуждаются колебания [16]. Для этой модели

$$Z = R + jX \cong jX = j\left(\omega m_{3} - \frac{1}{\omega K_{3}}\right),$$
(7)

где *m*_э и *K*_э – эквивалентные масса и гибкость соответственно, причем

$$m_{9} = \frac{7}{216} \rho \pi h d^{2}; K_{9} = \frac{3(1-\mu^{2})d^{2}}{16\pi E h^{3}}$$

Однако данная модель имеет ряд недостатков. В реальных изделиях граничные условия на краях отделенного дефектом слоя, требующие жесткого закрепления (полной неподвижности и отсутствия изгиба краев пластинки), в полной мере не выполняются. Одной из причин является наличие клеевой пленки, модуль упругости которой обычно значительно меньше модуля упругости обшивки. В результате в зонах перехода от зоны дефекта к зоне годного изделия (контур дефекта) происходит деформация клеевой пленки, работающей как упругое сопротивление, уменьшающее жесткость заделки. Другой, более значимой для сотовых конструкций причиной является малый по сравнению с модулем упругости обшивки модуль упругости сотоблока $E_{\rm c}$. При этом края отделенной дефектом пластинки фактически лежат на упругом основании и модельные граничные условия не выполняются. Наконец, поскольку внутренний элемент конструкции (на который опирается дефект) обладает конечным импедансом, его колебательная скорость отлична от нуля. Поэтому входной импеданс отделенной дефектом зоны при уменьшении размера дефекта не возрастает неограниченно (вплоть до ∞), как того требует модель, а стремится к конечному пределу. Тем не менее модель жестко закрепленной пластинки является наиболее универсальной, имеющей хорошо изученные аналитические зависимости и в определенном диапазоне исходных данных дающей удовлетворительные результаты относительно экспериментальных данных.

Рассмотрим изменение величин МИ над отслоением верхней обшивки первого слоя многослойной сотовой конструкции от сотоблока второго слоя (дефект существует в трех-, пяти- и семислойных сотовых конструкциях) на основании модели защемленной пластинки (условия реального защемления далеки от модельных, однако для оценки общего тренда изменения МИ по мере роста размера дефекта данной модели достаточно). В годном изделии фрагмент обшивки над сотой в определенном приближении можно считать колеблющейся пластинкой диаметром d немного большим, чем размер «под гаечный ключ», т. е. равным ~1,8 a_c (a_c – длина одиночной стенки полигональной соты; например, при ac=8 мм можно принять d, равным 14,4 мм). Проанализируем на основании модели защемленной пластинки по формуле (7), как будет изменяться МИ по мере роста дефекта. Для наглядности построим раздельно графики инерционной $X_m = \omega m_3$ и упругой $X_{\kappa} = 1/(\omega m_3)$ составляющих МИ, а также результирующий график $Z \cong jX = j(\omega m_2 - 1/(\omega K_2))$ для обшивки из углепластика ВКУ-39 толщиной 1 мм при частоте f=6,2 кГц (рис. 6). Очевидно, что при диаметре непроклея под первым слоем конструкции (т. е. при сохранении толщины колеблющейся пластинки) больше диаметра ячейки соты второго слоя реактивная составляющая МИ будет меньше, чем над центром соты годной конструкции (как из-за роста инерционной составляющей, так и из-за падения упругой). За минимальный размер непроклея, который может быть достоверно выявлен, в большинстве случаев принято считать диаметр окружности, описывающей три расположенных рядом ячейки сот (отсутствие трех стенок сот, расположенных «звездой»). Диаметр колеблющейся пластинки минимального непроклея как минимум вдвое больше диаметра ячейки, соответственно величина МИ над центром дефекта существенно (до нескольких раз) будет отличаться от величины МИ над центром соты в годной конструкции в меньшую по модулю сторону и будет меньше X_{min}.

Поскольку пластинка большего диаметра будет ближе к модели бесконечной пластины, то, в свою очередь, величина коэффициента $v_{\rm H}$ над центром дефекта будет больше, чем над центром соты в годной конструкции, т. е. больше $v_{\rm max}$.



Рис. 6. Влияние диаметра непроклея под первым слоем из углепластика ВКУ-39 толщиной 1 мм (сплошные линии) и расслоения в первом слое на глубине 0,5 мм (штриховые линии) на величину импеданса по модели защемленного края (*Z*' – скорректированная модельная функция)

При расслоении в обшивке первого слоя, т. е. при уменьшении толщины колеблющейся пластинки по сравнению с толщиной первого слоя, как видно из уравнения (7), величина реактивной составляющей МИ над центром расслоения будет меньше, чем при непроклее аналогичного диаметра. Соответственно, теоретически возможно выявление расслоений, даже имеющих диаметр, соизмеримый с размером ячейки сот второго слоя. Графики X_m , X_k и Z для расслоения в обшивке из углепластика ВКУ-39 на глубине 0,5 мм приведены на рис. 6 штриховыми линиями.

Изгибную гибкость многослойной сотовой конструкции (в определенном приближении) также можно представить, используя модель пластинки на упругом основании, имеющем коэффициент подложки χ [14]:

$$K_{\mu} = \frac{1}{8\sqrt{D}\sqrt{\chi}},\tag{8}$$

где *D* – изгибная жесткость пластинки.

Однако в данном виде модель может быть полезна только в случае большой толщины обшивки (первого слоя) и относительно малого размера ячейки сот второго слоя, тогда суммарное влияние второго и последующих слоев на первый слой можно рассматривать как равномерное упругое основание. В реальных конструкциях необходимо рассматривать упругое основание, на которое опирается обшивка, как неравномерное поле упругости с максимумами величин коэффициента подложки χ над стенками сот (рис. 4). Соответственно при наличии расслоения в обшивке и непроклея под обшивкой меняется структура поля величин коэффициента у под обшивкой. Это выражается в том, что над расслоениями и непроклеями в первом слое пропадает строгая геометрическая индикация гексагональных стенок сот, а поле изменения МИ над дефектом приобретает равномерную концентрическую структуру с плавным падением величины МИ от краев дефекта к его центру. Отсутствие данной индикации, в свою очередь, служит как признаком наличия расслоения в первом слое и непроклея между первым и вторым слоем, так и помогает достаточно точно очертить границы дефекта и определить его условный диаметр. При приблизительном соответствии величины МИ над центром дефекта с прогнозированием значений модели для такого же диаметра, делается вывод, что дефект является непроклеем. Если величина МИ значительно меньше модельного значения, то делается вывод, что дефект является расслоением в обшивке, и рассчитывается приблизительная глубина расслоения как модельной толщины колеблющейся пластинки заданного диаметра.

При наличии необходимости повышения точности вычисления глубины расслоения в первом слое, можно выполнить корректировку модельной зависимости при наличии конструктивно-подобного образца с серией плоскодонных фрезерованных отверстий различного диаметра под первой обшивкой. В этом случае в центре каждого искусственного дефекта производится замер (с использованием модельных годографов) величины реактивной составляющей импеданса. На рис. 6 приведен пример подобного замера на конструктивно-подобном образце

семислойной сотовой конструкции с толщиной обшивки 1 мм и стеклопластиковыми сотами второго слоя с размером a_c =8 мм. Для фрезерованных отверстий диаметрами 14,4; 16,0; 18,3 и 25,5 мм величины импеданса составили соответственно -45,99; -22,78; -19,00 и -10,77 H·с/м. Для варьированных отверстий модельной функции при наличии большого количества точек замеров рекомендуется введение двух коэффициентов коррекции перед инерционной и упругой составляющими импеданса по отдельности. Однако при малом количестве точек оптимальным решением является варьирование расчетной толщины колеблющейся пластины из условия минимизации среднеквадратического отклонения точек от модели. В примере скорректированная модельная функция Z' (рис. 6) получена при «условной» толщине 1,2 мм. Соответственно, при вычислении в дальнейшем глубины расслоения по модельной функции, для вычисления реальной толщины следует разделить полученную толщину на отношение «условной» и реальной толщины следует разделить получения импеданса с учетом того, что ее изменение пропорционально толщине в степени 3, в отличие от инерционной составляющей, пропорциональной толщине в степени 1. Коррекции при этом проще всего подвергать величину модуля упругости *E*, тогда скорректированный модуль упругости для первого слоя – E'_1 .

Механический импеданс двухслойной пластины над дефектом

Далее рассмотрим изменение величин МИ над дефектами в виде разрушения сотоблока второго слоя (разрушение любого рода, ведущее к отсутствию механической связи) и непроклея между вторым и третьим слоями (такие дефекты существуют в трех-, пяти- и семислойных сотовых конструкциях). Характерными особенностями дефектов являются наличие фрагмента сотоблока жестко «подвешенного» к обшивке первого слоя и отсутствие механической связи между фрагментом сотоблока и более глубокими слоями конструкции (рис. 7).

В общем случае импеданс многослойной конструкции зависит от большого количества параметров: упругих свойств и плотностей материалов отдельных слоев, толщин слоев, состояния соединений между слоями, размеров конструкции в направлении распространения упругих волн, коэффициентов затухания волн в слоях, наличия и геометрической формы несплошных периодических (сотовых) слоев. Упругие свойства и толщина слоев определяют жесткость многослойной конструкции. В частности, жесткость двухслойной конструкции можно определить из выражения для жесткости двухслойного стержня путем замены в нем (в выражении) зависимости для жесткости стержня цилиндрической жесткостью. В результате получим

$$D = D_1 \frac{1 + 2\alpha(\beta + 3\beta^2 + 2\beta^3) + \alpha^2 \beta^4}{1 + \alpha \beta},$$
(9)

где $\alpha = \frac{E_2(1-\mu_2^2)}{E_1(1-\mu_1^2)}; \beta = \frac{h_2}{h_1}; D_1 = \frac{Eh_1^3}{12(\mu_1^2)}$ (величины с индексом 1 относятся к первому слою, с индексом 2 – ко второму).

Для этой и дальнейших моделей для обеспечения возможности учета в них сотовых слоев произведем расчет удельного модуля упругости E_c и удельной плотности ρ_c для наиболее распространенных симметричных полигональных сот. Из-за выраженной анизотропии механических свойств сотоблока в дальнейшем будем считать, что передача нормальных напряжений возможна только по направлению *z* (вдоль стенок сот), а касательные напряжения отсутствуют (коэффициент Пуассона сотоблока μ_c принимается равным 0), т. е. сотоблок не создает



Рис. 7. Непроклей между вторым и третьим слоями и разрушение сотоблока второго слоя



Рис. 8. Схема элемента конструкции и его основные параметры для расчета удельного модуля упругости и удельной плотности для полигональных сот

изгибных нагрузок. Выделим минимальный периодический объем сотоблока V_c (рис. 8), а также, исходя из предположения о соразмерности величин нормальных напряжений площадям стенок сот $S_{\rm M}$ и удельной площади сотоблока S_c , получим

$$E_{\rm c} = \frac{S_{\rm M}}{S_{\rm c}} E_{\rm M} = \frac{4a_{\rm c}\delta_{\rm c}}{\left(a_{\rm c}\cdot\sin\frac{\pi}{3}\right)\cdot\left(2a_{\rm c}+2a_{\rm c}\cdot\cos\frac{\pi}{3}\right)} E_{\rm M} = \frac{8}{3\sqrt{3}}\frac{\delta_{\rm c}}{a_{\rm c}} E_{\rm M} \approx 1.54\frac{\delta_{\rm c}}{a_{\rm c}} E_{\rm M},\tag{10}$$

где $E_{\rm M}$ – модуль упругости материала сотоблока; $a_{\rm c}$ – длина стороны ячейки сот; $\delta_{\rm c}$ – толщина стенки сот.

Аналогичным образом рассчитаем удельную плотность сотоблока ρ_c как отношение массы материала сот $m_{\rm M}$ к периодическому объему V_c :

$$\rho_{\rm c} = \frac{m_{\rm M}}{V_{\rm c}} = \frac{\rho_{\rm M} V_{\rm M}}{V_{\rm c}} = \frac{S_{\rm M} h}{S_{\rm c} h} \rho_{\rm M} = \frac{8}{3\sqrt{3}} \frac{\delta_{\rm c}}{a_{\rm c}} \rho_{\rm M} \approx 1.54 \frac{\delta_{\rm c}}{a_{\rm c}} \rho_{\rm M} , \qquad (11)$$

где р_м – плотность материала сотоблока.

Моделирование колебаний данного дефекта является нетривиальной задачей. Однако для общей оценки создадим модель дефекта на основании формул (7) и (9–11), расширив модель колебания тонкой пластинки с защемленными краями, в центре которой нормальной сосредоточенной силой возбуждаются колебания, до аналогичной двухслойной пластинки. Механический импеданс над центром дефекта также будет иметь только реактивные инерционную и изгибную составляющие:

$$Z = R + jX \cong jX = j \left(\omega m'_{9} - \frac{1}{\omega K'_{9}} \right), \tag{12}$$

где m'_{3} и K'_{3} – эквивалентные масса и гибкость двухслойной пластинки соответственно.

Для однослойной пластинки
$$m_3 = \frac{7}{216} \rho \pi h d^2 = \frac{7}{54} m_{nn}$$
, где m_{nn} – масса колеблющейся пластинки.

Для расчета массы двухслойной пластинки как суммы масс первого и второго слоев ($m_{c\pi 1}$ и $m_{c\pi 2}$) примем толщины первого и второго слоев соответственно равными h_1 и h_2 . Плотности примем равными ρ_1 (для первого слоя) и ρ_2 (для второго слоя), однако для удобства сразу заменим ρ_2 на удельную плотность сотоблока ρ_c . Отсюда

$$m'_{3} = \frac{7}{54} m_{n\pi} = \frac{7}{54} (m_{c\pi 1} + m_{c\pi 2}) = \frac{7}{216} \pi d^{2} (\rho_{1} h_{1} + \rho_{c} h_{2}).$$
(13)

Эквивалентная гибкость для однослойной пластинки при цилиндрической жесткости листа D равна $K_3 = \frac{3(1-\mu^2)d^2}{16\pi Eh^3} = \frac{d^2}{64\pi D}$. Для двухслойной пластинки рассчитаем эквивалентную гибкость с учетом величины D по формуле (9):

$$K'_{9} = \frac{3d^{2}(1-\mu_{1}^{2})(1+\alpha\beta)}{16\pi Eh_{1}^{3}(1+2\alpha(\beta+3\beta^{2}+2\beta^{3})+\alpha^{2}\beta^{4})},$$
(14)

где $\alpha = \frac{E_2(1-\mu_2^2)}{E_1(1-\mu_1^2)} \cong \frac{E_c}{E_1(1-\mu_1^2)}$ (коэффициент μ_2 для сотоблока считаем равным 0; E_2 равен удельному моду-

лю упругости сотоблока E_c); $\beta = \frac{h_2}{h_1}$ (величины с индексом 1 относятся к первому слою, с индексом 2 – ко второму).

Из выражений (13) и (14) видно, что и инерционная, и упругая составляющие МИ для двухслойной колеблющейся пластинки будут существенно отличаться от однослойной. Сравним зависимости для X_m , X_κ и Z от диаметра дефекта d для непроклея под обшивкой из углепластика ВКУ-39 толщиной 1 мм и непроклея между вторым и третьим слоем, когда к аналогичной обшивке прикреплен слой сотоблока толщиной 10 мм из стеклопластика с размерами сот $a_c=8$ мм и $\delta_c=0.8$ мм (рис. 9). Величины E_c и ρ_c рассчитаем по формулам (10) и (11): $E_c\approx 1,386\cdot 10^9$ H/м², $\rho_c\approx 246,4$ кг/м³.

Характер изменения величины МИ по мере роста размера дефекта в виде двухслойной пластинки в целом аналогичен характеру изменения для тонкой одиночной пластинки, но величины всех реактивных составляющих существенно смещены в большую сторону, т. е. при одинаковой величине МИ диаметр дефекта в виде двухслойной пластинки будет существенно больше, а при одинаковой величине диаметра – МИ над двухслойной пластинкой будет больше. Помимо этого при малом размере двухслойной пластины над дефектом ($\sim 4a_c$) ее МИ будет отличаться от аналогичной характеристики для годной конструкции значительно меньше, чем МИ однослойной пластинки над менее глубоким дефектом. В реальной конструкции характер изменения картины МИ над двухслойным дефектом должен носить более сложный характер (в особенности в случае тонкой обшивки и относительно большого размера сот): несмотря на падение средней величины МИ от краев дефекта к его центру должно наблюдаться сложное поле величин МИ вдоль стенок сот, «подвешенных» к колеблющейся пластинке, так как и инерционная составляющая МИ от прикрепленной массы сот, и изгибная составляющая от жесткости стенок сот будут проявляться сильнее над стенками сот, чем над их центрами. В результате над расслоением между вторым и третьим слоями и над разрушением сотоблока второго слоя должна наблюдаться индикация от стенок сот (в виде разницы величин МИ) при одновременном плавном снижении средних величин МИ от краев к центру дефекта. При достаточно большом размере дефекта его МИ (по модулю) будет меньше X_{min} над центром соты в годной конструкции, но при малом размере дефекта возможно отсутствие такого эффекта.

Данная индикация также помогает приблизительно очертить границы дефекта, что в свою очередь позволит, зная диаметр модельного дефекта, удостовериться в том, что это непроклей



Рис. 9. Влияние диаметра непроклея под первым слоем из углепластика ВКУ-39 толщиной 1 мм (штриховые линии) и непроклея между вторым слоем стеклопластикового сотоблока толщиной 10 мм и третьим слоем (сплошные линии) на величину импеданса (по разработанной модели двухслойной защемленной пластинки)



Рис. 10. Расслоение в третьем слое (обшивке) и непроклей между третьим и четвертым слоями

между вторым и третьим слоями при примерном соответствии величины МИ над центром дефекта с расчетными модельными величинами, либо, если МИ значительно меньше, теоретически рассчитать приблизительную глубину разрушения сотоблока второго слоя как модельную толщину сотоблока, подвешенного к колеблющейся пластинке заданного диаметра.

Коррекция модели как для тонкой пластины обшивки первого слоя возможна, но из-за существенной разницы в величинах импедансов над центрами и стенками сот это потребует сложных в методическом плане действий, поскольку все замеры нужно будет производить в одинаковых условиях (например, над стенками сот). Оптимальным решением при этом является смещение датчика при замере МИ на реальном дефекте на ближайшую стенку, но следует учитывать, что замер при этом будет заведомо искажен из-за нецентрального расположения датчика. Коррекции также желательно подвергать величину модуля упругости материала сотоблока второго слоя – $E'_{\rm II}$.

Механический импеданс трехслойной пластины над дефектом

Далее рассмотрим изменение величин МИ над дефектами в виде расслоения в обшивке третьего слоя и непроклея между третьим и четвертым слоями (рис. 10). Данные дефекты существуют в пяти- и семислойных сотовых конструкциях, хотя с учетом двухстороннего контроля изделий импедансным методом для пятислойных конструкций выявление непроклея между третьим и четвертым слоями не требуется, так как он выявляется как непроклей между вторым и третьим слоями с противоположной стороны. Характерной особенностью данных дефектов является то, что колеблющаяся «пластина» над дефектом является полноценной трехслойной сотовой конструкцией и сотоблок второго слоя опирается на упругое основание третьего слоя.

В данном случае применение модели защемленной по краям однослойной пластины уже невозможно, так как полноценная трехслойная сотовая конструкция из-за высокой анизотропии механических свойств слишком далека от тонкой колеблющейся пластины при реальных надежно выявляемых диаметрах дефектов (обычно от 10 до 30 мм в зависимости от конкретной конструкции), а условия закрепления данной «пластины» недопустимо отличаются от граничных условий модельного защемления.

Моделирование колебаний трехслойных конструкций является сложной с математической точки зрения задачей, которой посвящено достаточно большое количество работ. Для оценки свойств рассматриваемого дефекта воспользуемся наиболее подходящей для общего анализа моделью трехслойной упругой пластины, защемленной по контуру, колеблющейся под действием нестационарной локальной распределенной нагрузки вогнутой параболической формы (наиболее близкой к реальному нагружению) на упругом основании Винклера [17].

Рассмотрим малые осесимметричные поперечные колебания несимметричной по толщине упругой трехслойной круговой пластины на упругом основании, возбужденные внезапно приложенными нагрузками (рис. 11). Решение задачи приводится в цилиндрической системе координат r, φ и z. Поскольку заполнитель является сотоблоком, считаем его легким и пренебрегаем работой в тангенциальном направлении. Внешняя вертикальная нагрузка q=q(r, t) симметрична относительно оси z и не зависит от координаты φ . Конструкция опирается на упругое основание, отвечающее на прогиб реакцией в соответствии с моделью Винклера $q_R=k_0w$, где k_0 – коэффициент жесткости упругого основания (в данном случае идентичный коэффициенту подложки χ). На контуре пластинки предполагается наличие жесткой диафрагмы, препятствующей относительному сдвигу слоев. В силу симметрии задачи тангенциальные перемещения



Рис. 11. Модель трехслойной пластины, колеблющейся под внешней вогнутой параболической нагрузкой на упругом основании Винклера

в слоях отсутствуют. Для данной модели искомыми считаются функции прогиба пластинки w=w(r, t), относительного сдвига в заполнителе $\psi=\psi(r, t)$ и радиального перемещения координатной поверхности u=u(r, t), на основании которых будет производиться анализ изменения величины импеданса.

Численные результаты получены для защемленной по контуру круговой трехслойной пластины из материалов Д16-Т-фторопласт-Д16-Т, опирающейся и не опирающейся на основание средней жесткости $k_0=10^8$ Па/м при a=0.5 [17]. Линейные размеры отнесены к радиусу пластины r_1 . Относительные толщины слоев $h_1=h_2=0,01$, c=0,05 (т. е. пластина является тонкой, так как суммарная толщина всей конструкции пластины в 28,6 раз меньше диаметра). На рис. 12 приведены полученные модельные зависимости для прогиба w (в отношении к радиусу r_1) центра пластины от времени t на упругом основании и без него. Очевидно, что при наличии упругого основания возрастает величина реактивной составляющей импеданса на поверхности, что видно как по уменьшению амплитуды прогиба, так и по росту частоты собственных колебаний.

Для анализа влияния дефектов важны два вывода из модельных результатов. Во-первых, импеданс над дефектом будет меньше, чем в годном изделии, так как этот случай можно рассматривать как отсутствие упругого основания под трехслойной пластиной. Во-вторых, разница в величинах реактивных составляющих МИ при реалистичных соотношениях толщин слоев и выявляемых диаметров дефектов, когда относительный диаметр крайне мал, будет относительно небольшой. Однако, как установлено ранее, в колеблющейся пластине должна быть значительно ниже величина активной составляющей импеданса, чем в условно бесконечном годном изделии. Как следствие, в сотовых конструкциях (обладающих большой разницей в величинах реактивных и активных импедансов над центрами и стенками сот второго слоя) над стенками сот в соответствии с модельным анализом для сплошных трехслойных конструкций должно наблюдаться малое (но при этом относительно равномерное по величине) падение реактивной составляющей импеданса и возрастание средней величины коэффициента v_н. При этом, соответственно, должно происходить существенное падение абсолютной величины МИ,



Рис. 12. Изменение прогибов во времени для модели трехслойной пластины при воздействии локальной распределенной нагрузки вогнутой параболической формы при отсутствии основания (*a*) и на основании средней жесткости (б)



Рис. 13. Конструктивно-подобный образец корпуса переднего (семислойная сотовая конструкция) мотогондолы авиационного двигателя с искусственными дефектами

а над центрами сот при тонкой обшивке первого слоя возможно столь низкое влияние на величину импеданса изменения условия нагружения трехслойной пластины на основание, что имеющиеся изменения могут не выйти за пределы настроечных браковочных допусков аппаратуры и не будут зафиксированы на фоне годного изделия, т. е. не произойдет срабатывания сигнализации о дефекте.

Образцы с искусственными дефектами и оборудование для испытаний

Для проведения экспериментальной проверки влияния дефектов, расположенных на различной глубине в многослойной сотовой конструкции из ПКМ, и изучения методических приемов для определения глубины залегания дефектов, изготовлен конструктивно-подобный образец семислойной сотовой конструкции в качестве одного из наиболее сложных типов объектов контроля – корпуса переднего мотогондолы авиационного двухконтурного газотурбинного двигателя с искусственными дефектами (рис. 13). Конструктивно-подобный образец представляет собой конструкцию с сотовым заполнителем марки ССП-1-8Т высотой 10 мм и размером ячейки 8 мм (3 ряда сот), включает изготовленные из углепластика ВКУ-39 две обшивки толщиной 0,86 мм и две обшивки толщиной 1,2 мм.

Искусственные дефекты, имитирующие непроклеи и расслоения в образце, получены путем фрезерования отверстий различного диаметра (16, 20 и 30 мм) в обшивках и сотовом заполнителе на различную глубину в соответствии со схемой (рис. 13), на которой также приведена нумерация слоев: I, III, V, VII – монолитные обшивки; II, IV, VI – сотовый заполнитель.

Пространственное перемещение импедансного датчика по поверхности конструктивноподобного образца осуществляли с использованием разработанного во ФГУП «ВИАМ» совместно с ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана» полномасштабного макета автоматизированного комплекса для контроля деталей и агрегатов из ПКМ – «МАК ПКМ» (рис. 14). Макет позволяет реализовать несколько методов контроля помимо импедансного: теневой метод с использованием струйного контакта и роликовых катящихся преобразователей, эхоимпульсный метод с использованием многоканального раздельно-совмещенного датчика и фазированных решеток в классическом варианте и с применением синтезированной апертуры. Сканирование по поверхности конструктивно-подобного образца производили датчиком ПАДИ-7, закрепленным в специальной оправке, имеющей три степени свободы для обеспечения полного прижатия контактной площадки датчика к сканируемой поверхности вне зависимости от локальных нарушений геометрической формы изделия.

Запись первичных данных на пьезоэлементах датчика производили с помощью базового осциллографа прибора ДАМИ-С-09. Полученные данные в дальнейшем оцифровывали и обрабатывали в соответствии с расчетными моделями в программном обеспечении MS Excel и PTC MathCad.

В качестве серийного импедансного дефектоскопа применяли наиболее распространенный прибор ДАМИ-С-09 с серийным датчиком ПАДИ-8-02. Ранее для данного датчика рассчитаны



Рис. 14. Макет автоматизированного комплекса для неразрушающего контроля качества деталей и агрегатов из ПКМ акустическими методами

модельные зависимости коэффициента передачи и фазового смещения от величины приложенной к датчику внешней нагрузки для резонансной частоты 10,48 кГц для обшивок из углепластика ВКУ-39. Путем объединения данных зависимостей получен амплитудно-фазовый годограф (рис. 15, *a*), идентичный отображению информации на экране дефектоскопа (без учета смещения фазы для Z_H=0 из-за некратности длины волны в звукопроводе с его длиной).



Рис. 15. Годографы при различных значениях $v_{\rm H}$, объединяющие зависимости $P(X_{\rm H}, v_{\rm H})$ и $\psi(X_{\rm H}, v_{\rm H})$ для датчика ПАДИ-8-02, для углепластика ВКУ-39 на частоте 10,48 кГц (*a*), и положение маркера на экране в точке 0 (*б*, *в*) и над дефектами на различной глубине (*z*-*e* – от большей к меньшей)

Результаты и обсуждение

Экспериментальная проверка возможности оценки размера и глубины залегания дефектов в многослойных сотовых конструкциях из ПКМ без численного измерения величины МИ осуществляется с использованием ручных импедансных дефектоскопов.

В соответствии с логикой импедансного контроля заштрихуем на амплитудно-фазовой плоскости зону отрицательного режима автоматической сигнализации дефектов (АСД), соответствующую годной конструкции. По аналогии с обычным импедансным контролем в дальнейшем будем называть ее зоной фрикционных шумов (ЗФШ), хотя в данном случае вклад непосредственно фрикционных шумов по сравнению с влиянием величины импеданса приложенной к датчику внешней нагрузки крайне мал.

На рис. 15, б приведено отображение данной зоны при центровке экрана в точке абсолютного нуля для величины напряжения на приемном пьезоэлементе (для этого датчик полностью отключали от дефектоскопа и производили центровку экрана). При такой центровке показания дефектоскопа полностью соответствуют модельным годографам, поскольку имеют одинаковую точку начала координат. Маркер (красный крест) при этом расположен в точке нулевой внешней нагрузки $Z_{\rm H}=0$ (для этого датчик освобождался от нагрузки путем его отрыва от поверхности объекта контроля и подвешивания в воздухе). При этом точки над центрами сот второго слоя расположены в верхней части зоны годного образца (ближе к точке $Z_{\rm H}=0$), а точки над стенками сот, в свою очередь, расположены в нижней части зоны (дальше от точки $Z_{\rm H}=0$), что полностью соотносится с модельными годографами. По мере роста величины внешней нагрузки в соответствии с годографом маркер должен двигаться по относительно прямой линии от точки $Z_{\rm H}=0$ к точке начала координат с отклонением от данной линии в соответствии с величиной коэффициента энергетических потерь $v_{\rm H}$, что и наблюдается.

На рис. 15, *в* приведена та же настройка, но с изменением масштаба отображения и смещением точки начала координат экрана приблизительно в центр заштрихованной настроечной зоны (как это обычно делается при обычном импедансном контроле). В центре координат экрана при этом находится уже не точка абсолютного нуля напряжения на приемном пьезоэлементе. Однако, если заранее уже установлено соответствие между показаниями прибора и модельным годографом, то данное отображение является более удобным для дальнейшего анализа и приближает эксперимент к обычным параметрам настройки прибора. Маркер при этом также расположен в точке нулевой внешней нагрузки $Z_{\rm H}=0$.

При расположении датчика над искусственным дефектом №3 (рис. 13) диаметром 16 мм, который является имитацией непроклея между первым и вторым слоями, маркер выходит из заштрихованной зоны 3Φ Ш в направлении уменьшения величины импеданса (в направлении точки $Z_{\rm H}$ =0), величина МИ над центром дефекта отличается от величины МИ над центром соты в годной конструкции в меньшую (по модулю) сторону и при этом меньше значения $X_{\rm min}$, в полном соответствии с выполненным ранее анализом влияния подобного дефекта на величину импеданса (рис. 15, *e*). Наблюдается также предсказанная с помощью анализа картина величин МИ над дефектом, когда маркер на экране равномерно смещается к точке минимума значений МИ при перемещении датчика от краев дефекта к его центру во всех направлениях движения.

Поскольку смещение маркера в направлении точки $Z_{\rm H}=0$ является простым и при этом достаточно достоверным критерием идентификации данного типа дефектов при использовании обычных дефектоскопов, для его апробации построен *C*-скан (рис. 16) с шагом 2 мм по поверхности конструктивно-подобного образца с настройкой в соответствии с рис. 15, *в* по величине угла $\Delta \phi$ в градусах между направлением на точку $Z_{\rm H}=0$ из центра координат и направлением на текущее положение маркера на экране. Информативные значения на *C*-скане фиксировали только для точек со срабатыванием АСД. Следует отметить относительно равномерное закрашивание дефекта красным цветом, что свидетельствует о постоянном смещении маркера над дефектом в направлении точки $Z_{\rm H}=0$, что соответствует выполненному анализу, хотя и невозможно при этом ни оценить величину уменьшения значений МИ, ни зафиксировать критерий $X_{\rm H} < X_{\rm min}$ (хотя его, как было отмечено ранее, можно зафиксировать визуально на экране дефектоскопа).

При расположении датчика над искусственным дефектом №2 (рис. 13) диаметром 20 мм, который является имитацией непроклея между вторым и третьим слоями, маркер выходит из заштрихованной зоны 3Φ Ш и совершает сложные перемещения в пределах умозрительной линии – от точки, находящейся рядом с верхним краем 3Φ Ш (приблизительно соответствующей координате X_{min}), и точкой, изображенной на рис. 15, ∂ , – при нахождении датчика над стенками сот, свободно подвешенных под обшивкой первого слоя, которая, несмотря на смещение фазы, остается достаточно близкой к верхнему краю 3Φ Ш, что соответствует выполненному ранее анализу влияния подобного дефекта на величину импеданса. Поскольку отклонение фазы



Рис. 16. С-скан по фазовому смещению точек со срабатыванием сигнализации дефекта от «нулевого» направления (на точку Z_H=0) при начале координат в центре зоны фрикционных шумов при контроле датчиком ПАДИ-8-02 на частоте 10,48 кГц

маркера от направления на точку $Z_{\rm H}=0$ при этом является относительно малым, на *C*-скане (рис. 16) дефект также закрашен преимущественно красным и оранжевым цветами, кроме желтых и салатовых точек над стенками сот, для которых данные отклонения максимальны (до 30 градусов), что также соответствует прогнозу выполненного ранее анализа. Кроме того, при наличии достаточной квалификации оператора, перемещая датчик над дефектом вдоль стенки соты от края дефекта к его центру, можно зафиксировать уменьшение величины МИ, которое выражается в смещении маркера от точки, изображенной на рис. 15, ∂ , в направлении $Z_{\rm H}=0$, в отличие от годной конструкции, в которой величина МИ над стенкой соты является приблизительно постоянной (хотя подобный методический прием может быть доступен только достаточно опытному дефектоскописту по импедансному методу контроля).

При расположении датчика над искусственным дефектом №1 (рис. 13) диаметром 30 мм, который является имитацией непроклея между третьим и четвертым слоями, маркер при выходе из заштрихованной зоны 3ФШ совершает сложные перемещения в пределах умозрительной линии – от точки, находящейся рядом с верхним краем 3ФШ (приблизительно соответствующей координате X_{min}), и точкой, изображенной на рис. 15, *г*, – при нахождении датчика над стенками сот, которые поддерживаются общивкой третьего слоя над дефектом. В отличие от менее глубоких дефектов величина МИ над стенками сот визуально не на много меньше значения X_{max} , а отклонение фазы от направления на точку $Z_{H}=0$ на *C*-скане (рис. 16) становится максимальным (до 117 градусов). Точки X_{min} на комплексной плоскости над центрами сот второго слоя, в свою очередь, в отличие от менее глубоких дефектов либо вообще не выходят из 3ФШ (возможность данного эффекта также соответствует прогнозу выполненного ранее анализа), либо при выходе из 3ФШ остаются близко к верхнему краю 3ФШ [13].

Очевидно, что измерить точно условный размер и глубину дефекта, опираясь на данные, полученные с использованием обычного серийного импедансного дефектоскопа, невозможно. Однако провести дискретную оценку глубины дефекта как непроклея между определенными слоями или расслоения в определенном слое (по факту наличия; без установления точной глубины в слое) на основании данных по форме модельного годографа и по влиянию глубины дефекта в сотовой конструкции на величину импеданса, как показала экспериментальная проверка, вполне возможно. Базовым критерием при этом должно стать отклонение маркера от направления на точку «отрыва датчика от поверхности» в точках со срабатыванием АСД. Для различения расслоений под первым и вторым слоями потребуется применение методических приемов для оценки характера перемещения маркера над дефектом.

Экспериментальная проверка возможности определения размера и глубины залегания дефектов в многослойных сотовых конструкциях из ПКМ с численным измерением величины механического импеданса специальным оборудованием

Для экспериментальной проверки возможности определения глубины дефектов по численной величине импеданса на конструктивно-подобном образце проведено сканирование с шагом 1 мм с записью первичных данных по величинам коэффициента передачи и фазового



Рис. 17. *С*-сканы по реактивной составляющей (*a*; по модулю) и абсолютной величине механического импеданса (*б*; с медианной фильтрацией)

смещения с помощью базового осциллографа прибора ДАМИ-С-09. Полученные данные в дальнейшем оцифрованы и для каждой точки на основании рассчитанного ранее амплитуднофазового годографа (рис. 3), полученного путем моделирования совмещенного импедансного датчика, вычислены соответствующие величины реактивной составляющей механического импеданса $X_{\rm H}$ и коэффициента энергетических потерь $v_{\rm H}$.

Результаты приведены в виде *C*-сканов по реактивной составляющей МИ (рис. 17, *a*; по модулю) и по абсолютной (полной) величине механического импеданса $Z_{\rm H}=R_{\rm H}+jX_{\rm H}=v_{\rm H}|X_{\rm H}|+jX_{\rm H}$ (рис. 17, *б*; с медианной фильтрацией), амплитуда которого соответственно равна $Z_{\rm H}=((v_{\rm H}X_{\rm H})^2+X_{\rm H}^2)^{1/2}$. Приведены результаты по всей просканированной поверхности (для демонстрации различия между дефектными и бездефектными зонами) без учета срабатывания автоматической сигнализации дефектов при выходе маркера за границы ЗФШ, очерченной для годного изделия. Однако для наглядности зоны срабатывания АСД (дефекты) обведены пунктирными линиями. Шкала соответствия градации цвета и величины импеданса приведена в H·c/м.

Для дефекта №3, имитирующего расслоение в первом слое и/или непроклей между первым и вторым слоями, зафиксированы в соответствии с выполненным анализом как общее уменьшение (здесь и далее имеется в виду снижение по модулю) величины реактивной составляющей импеданса до -18 H·с/м в центре дефекта по сравнению с соответствующей минимальной величиной в годном изделии над центрами сот X_{min} ~-(30–35) H·с/м, так и отсутствие характерной индикации с высокими величинами импеданса над стенками сот и соответствующая картина равномерного кругового падения величины импеданса от краев дефекта к его центру.

На рис. 18 приведены графики численных величин $X_{\rm H}$ и коэффициента энергетических потерь $v_{\rm H}$ вдоль сечения образца, проходящего через центры дефектов №1–3 (по оси абсцисс отложены координаты вдоль поверхности образца). На графике для параметра $X_{\rm H}$ можно заметить описанное ранее падение реактивной составляющей импеданса над дефектом №3 по сравнению с фоном (далее под термином «фон» будет пониматься пример соответствующего графика для замеров, произведенных на годном изделии в отсутствие дефекта), а на графике для параметра $v_{\rm H}$ – соответствующий существенный рост коэффициента энергетических потерь. Для удобства, зоны, соответствующие пересечению дефектов, выделены синим цветом, а также для сравнения приведены графики для фона. Для обеих зависимостей для дефекта №3 также хорошо видно плавное изменение соответствующих величин от краев дефекта к его центру. Дефект надежно идентифицируется как визуально по *C*-сканам параметров $X_{\rm H}$ и $Z_{\rm H}$, так и численно – по величинам $X_{\rm H} < X_{\rm min}$ и $v_{\rm H} > v_{\rm max}$ в соответствии с выявленными ранее критериями.



Рис. 18. Зависимости величин реактивной составляющей импеданса $X_{\rm H}$ и коэффициента энергетических потерь v_H от координаты вдоль сечения образца

Для дефекта №2, имитирующего непроклей между вторым и третьим слоями и/или разрушение сотоблока второго слоя, зафиксирована сложная картина величин импеданса, соответствующая выполненному ранее анализу. Видно общее падение величин реактивной составляющей МИ, но значительно меньшее, чем при непроклее под первым слоем. Наблюдается характерная индикация от стенок сот из-за прикрепленной массы сотоблока, а также (как и прогнозировалось) вдоль «радиальных» стенок сот (ориентированных по направлению от края дефекта к его центру) происходит плавное снижение значений МИ от -(130-140) до приблизительно -80 Н с/м (т. е. на ~40%) в пределах одной стенки сот с соответствующим возрастанием величины $v_{\rm H}$ от 0,62–0,65 до 0,839 (рис. 18). Величины $X_{\rm H}$ и $v_{\rm H}$ над центрами сот над дефектом не вышли за пределы разброса значений для фона из-за малого размера дефекта (на границе надежной выявляемости) и достаточной отдаленности данных зон от центра дефекта. Дефект надежно идентифицируется визуально как по С-скану реактивной (X_н) составляющей МИ, так и по С-скану по абсолютной (Z_н) величине МИ по индикации стенок сот, и изменению величин $X_{\rm H}$ вдоль «радиальных» стенок сот в сторону уменьшения от краев дефекта к его центру. При достаточно большом размере дефекта также возможна численная идентификация по величинам X_H<X_{min} и v_H>v_{max} в соответствии с выявленными ранее критериями. При малом размере дефекта (когда условия X_н<X_{min} и v_н>v_{max} не выполняются) численная идентификация может производиться по изменению величин X_н вдоль «радиальных» стенок сот.

Для дефекта №1, имитирующего непроклей между третьим и четвертым слоями и/или расслоение в третьем слое, также зафиксирована сложная картина величин импеданса, соответствующая выполненному ранее анализу. Величины реактивной ($X_{\rm H}$) составляющей МИ по сравнению с фоном уменьшились, но при этом довольно незначительно – до -(120–125) Н·с/м, что видно как по *C*-скану (рис. 17, *a*), так и по графику на рис. 18. Однако над дефектом существенно уменьшились величины коэффициента энергетических потерь $v_{\rm H}$ (рис. 18) до величин 1,2–1,3 над центрами сот при фоне, приблизительно равном 1,6–1,7, и до величин 0,48–0,50 над стенками сот при фоне 0,65–0,70, что соответственно привело к уменьшению абсолютных ($Z_{\rm H}$) величин МИ.

На рис. 19 приведена зависимость абсолютной ($Z_{\rm H}$) величины МИ от координаты вдоль сечения образца над дефектом №1 (для удобства зона дефекта выделена синим цветом) и прилегающей к нему годной зоной. Над дефектом над центрами ячеек сот величина $Z_{\rm H}$ равна 64–65 H·c/м, а в годном изделии соответственно 65–80 H·c/м. Таким образом, несмотря на то,



Рис. 19. Зависимость абсолютной величины механического импеданса $Z_{\rm H}$ от координаты вдоль сечения образца над дефектом №1

что средние величины $Z_{\rm H}$ над дефектом меньше, чем над годным изделием, они укладываются в нижнюю границу диапазона для годного изделия, что, в свою очередь, объясняет зафиксированное ранее отсутствие срабатывания АСД над дефектом над центрами сот. Над стенками сот наблюдается надежно фиксируемое снижение величин $Z_{\rm H}$ до 135–140 H·c/м по сравнению с фоном в 175–200 H·c/м. При этом по *C*-скану по параметру $Z_{\rm H}$ (рис. 17, δ) можно отметить относительно равномерное изменение величин импеданса с перепадами в пределах одной стенки сот не более 10–15%.

Методика определения размера и глубины залегания дефектов в многослойных сотовых конструкциях из ПКМ

На основе выполненных исследований разработана методика, которая может являться руководством по оценочному определению условного размера и дискретной глубины залегания дефектов при проведении неразрушающего контроля качества трех-, пяти- и семислойных сотовых конструкций, деталей и узлов из ПКМ акустическим импедансным методом с использованием серийных дефектоскопов.

В соответствии с методикой производится оценка ряда численных критериев и методических признаков, приведенных в таблице и на рис. 20. Поскольку описанные критерии основаны преимущественно на оценочных визуальных признаках с высокой зависимостью результата от квалификации дефектоскописта, достоверность различения по глубине составляет около 90–95%. В случае наличия неоднозначных признаков, подходящих для разной по величине дискретной глубины, следует принимать глубину дефекта, равной той, для которой выполняется наибольшее число критериев по таблице или при равенстве количества критериев – равной наибольшей глубине из возможных.

Критерии и признаки	Дискретная глубина дефекта в слое		
	I (или между I и II)	II (или между II и III)	III (или между III и IV)
Величина Z' _{min}	<z<sub>min</z<sub>	≤Z _{min}	$\cong Z_{\min}$
Величина Z' _{max}	$\cong Z_{\min}$	$\sim Z_{\min} + (0, 1-0, 5)(Z_{\max} - Z_{\min})$	$\sim Z_{\min} + (0,5-0,9)(Z_{\max}-Z_{\min})$
Плавное изменение величины механического импеданса при радиусном сканировании	Дa	Нет	Нет
Отсутствие сигнализации де- фекта над центрами сот слоя II	Нет	Нет	Дa
Величина $\Delta \phi$ для Z'_{max} , градус	±(0-10)	±(10-90)	±(90–180)

Численные критерии и методические признаки для оценочного различения дискретной глубины дефектов в многослойных сотовых конструкциях из ПКМ



Рис. 20. Положение зоны настройки сигнализации дефекта для годного изделия и зон смещения маркера над дефектами под первым (*a*), вторым (*б*) и третьим (*в*) слоями многослойной сотовой конструкции

Разработанная методика распространяется на ручной контроль с обеих сторон многослойной сотовой конструкции, проводимый в процессе изготовления изделия, а также в условиях ремонта и эксплуатации изделия. Дефекты в трехслойных конструкциях обнаруживаются в первом и втором слоях, в пятислойных – в первом, втором и третьем, в семислойных – в первом, втором, третьем и четвертом слоях. Для повышения производительности, увеличения надежности и снижения трудоемкости контроля в условиях производства возможно применение данной методики неразрушающего контроля в автоматизированном варианте.

Настройку следует производить, руководствуясь штатными инструкциями к прибору: установить преобразователь на бездефектную область контрольного образца; центрировать маркер и очистить экран; затем перемещать преобразователь в пределах выбранной для настройки зоны контрольного образца, закрашивая на комплексной (амплитудно-фазовой) плоскости экрана дефектоскопа зону фрикционных шумов (или в данном случае отрицательную зону АСД). С использованием функций центрирования и масштабирования следует (при необходимости – в несколько итераций) расположить центр ЗФШ приблизительно в центре координат при одновременном расположении нулевой точки (положение маркера на экране при отрыве преобразователя от поверхности контрольного образца – точка, в которой измеряемый прибором МИ соответствует $Z_{\rm H}=0$) в пределах экрана дефектоскопа без ее выхода (рис. 20, *a*) за границы зоны отображения комплексной плоскости (или с малым выходом – *P* составляет не более 150%). Угол между началом отсчета фазы ($\psi=0$ градусов) и направлением на нулевую точку равен ϕ_0 .

Для годной конструкции точки над центрами сот второго слоя расположены, как было установлено ранее, ближе к точке $Z_{\rm H}=0$ и соответствуют минимальным значениям импеданса $(Z_{\rm H}=Z_{\rm min})$, а точки над стенками сот, в свою очередь, расположены дальше от точки $Z_{\rm H}=0$ и соответствуют максимальным $(Z_{\rm H}=Z_{\rm max})$ значениям МИ (рис. 20, *a*). По мере роста величины внешней нагрузки в соответствии с полученными ранее модельными годографами маркер двигается по относительно пологой изогнутой средней линии изменения величины $Z_{\rm H}$ – от точки $Z_{\rm H}=0$ через точку $Z_{\rm min}$ к точке $Z_{\rm max}$ (фиолетовая штриховая линия на рис. 20, *a*). В грубом приближении можно считать, что при смещении маркера от средней линии изменения величины $Z_{\rm H}$ по окружности, центром которой является точка $Z_{\rm H}=0$, величина реактивной составляющей импеданса остается относительно постоянной, но меняется величина активной составляющей, т. е. изменяется величина коэффициента потерь $v_{\rm H}$. Для различения глубины дефектов на амплитудно-фазовой плоскости следует предварительно умозрительно провести среднюю линию изменения параметра $Z_{\rm H}$, линии минимума ($Z_{\rm H}\approx Z_{\rm min}$) и максимума ($Z_{\rm H}\approx Z_{\rm max}$), а также линию средней величины этого параметра ($Z_{\rm H}\approx Z_{\rm min}$).

Оконтуривание дефекта производится по срабатыванию АСД, т. е. наличию стабильного звукового сигнала в статическом режиме при неподвижном преобразователе.

После определения дискретного слоя залегания дефекта производится оценка его условного размера. При обнаружении компактного дефекта, т. е. дефекта, для которого оконтуренная зона срабатывания АСД на поверхности объекта контроля является точкой или кругом диаметром <5 мм, его условный размер считается равным размерам минимальных

уверенно выявляемых для данной конструкции дефектов. Для некомпактных дефектов с округлой формой оконтуренной зоны АСД измеряется диаметр описанной окружности для данной зоны. В данном случае условный размер (диаметр) дефекта считается равным сумме измеренного диаметра контура и размера компактного дефекта в соответствующем слое. Для некомпактных дефектов сложной формы производится построение уточненного контура дефекта на поверхности объекта контроля путем построения расширенных наружу во все стороны границ контура АСД на половину величины компактного дефекта в соответствующем слое. После чего производится измерение необходимых габаритных условных размеров дефекта по скорректированному контуру.

Заключения

1. Установлено, что на поверхности годной многослойной сотовой конструкции из ПКМ картина величин МИ носит периодический характер в соответствии с расположением стенок сот второго слоя, а информацию об условном размере и глубине дефекта можно связать с численными изменениями в данной периодической картине.

2. По результатам математического моделирования и экспериментальных исследований показано, что при расположении дефекта: в I слое или между I и II слоями – величина МИ над центром дефекта будет существенно отличаться от импеданса над центром соты слоя II в годной конструкции в меньшую по модулю сторону; во II слое или между II и III слоями – над дефектом наблюдается индикация от стенок сот (в виде разницы МИ) при одновременном снижении величин реактивного и полного импедансов от краев к центру дефекта; в III слое или между II и VI слоями – над стенками сот наблюдается малое и равномерное падение реактивной составляющей импеданса и уменьшение энергетических потерь.

3. Выбраны критерии для различения дискретной глубины дефектов в многослойных сотовых конструкциях по отклонению маркера от направления на точку «отрыва датчика от поверхности» (в которой МИ изделия Z_H=0) в точках со срабатыванием автоматической сигнализации дефектов и положению маркера относительно зоны настройки АСД для годного изделия.

4. Разработана методика определения дискретной глубины и условного размера дефекта по слоям в трех-, пяти- и семислойных сотовых конструкциях при ручном контроле серийными импедансными дефектоскопами и с использованием *С*-сканов по величине МИ при автоматизированном производственном неразрушающем контроле.

Библиографический список

- 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. Ключевая проблема материалы // Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
- 3. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2001. №1. С. 3–8.
- 4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. №4. С. 28-29.
- Mishurov K.S., Murashov V.V. Determination of the Composition and Density of Polymer Composite Materials in Details and Constructions by Nondestructive Methods // Polymer Science. Series D. 2016. Vol. 9. No. 2. P. 176–180.
- 6. Оспенникова О.Г. Итоги реализации стратегических направлений по созданию нового поколения жаропрочных литейных и деформируемых сплавов и сталей за 2012–2016 гг. // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 17–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-17-23.
- Чертищев В.Ю., Бойчук А.С., Диков И.А., Яковлева С.И., Генералов А.С. Определение глубины залегания дефектов в многослойных конструкциях из ПКМ акустическими методами по величине механического импеданса // Дефектоскопия. 2018. №8. С. 21–34. DOI: 10.1134/ 50130308218080031.
- Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment: Handbook. 2009. 171 p. URL: https:// www.cnde.iastate.edu/mapod/2005%20September/MIL%20HNDB%201823.pdf (дата обращения: 11.12.2019).
- Мурашов В.В. Контроль и диагностика многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами. М.: Спектр, 2016. 244 с.

- 10. 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.
- 11. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004. Т. 3: Ультразвуковой контроль / под ред. И.Н. Ермолова, Ю.В. Ланге. 864 с.
- 12. Мурашов В.В. Исследование и совершенствование акустических низкочастотных методов контроля изделий из слоистых пластиков и многослойных клееных конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2018. №4 (53). С. 87–93. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-87-93.
- 13. Генералов А.С., Бойчук А.С., Чертищев В.Ю., Яковлева С.И., Диков И.А. Выявление расслоений и непроклеев в 5- и 7-слойных сотовых деталях и элементах конструкций из ПКМ акустическим методом // Клеи. Герметики. Технологии. 2017. №3. С. 23–26.
- 14. 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-S-469-482.
- 15. Стариковский Г.П., Жовнер П.Б. Неразрушающий контроль трехслойных интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2012. №6. С. 58–62.
- 16. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.
- 17. Старовойтов Э.И., Леоненко Д.В. Колебания круговых трехслойных пластин на упругом основании под действием параболических нагрузок // Труды МАИ: электрон. науч.-техн. журн. 2014. №78. С. 1–12. URL: http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=53490 (дата обращения: 11.12.2019).