

Научная статья

УДК 620.179

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-107-120

## ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ ДЕФЕКТОВ В МНОГОСЛОЙНЫХ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ПКМ ПРИ ИМПЕДАНСНОМ КОНТРОЛЕ СЕРИЙНЫМИ ДЕФЕКТОСКОПАМИ

В.Ю. Чертищев<sup>1</sup>, А.С. Бойчук<sup>1</sup>, И.А. Диков<sup>1</sup>, М.А. Горбовец<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Проведены исследования, направленные на создание методики оценки глубины залегания дефектов в многослойных сотовых деталях из полимерных композиционных материалов при импедансном контроле серийными дефектоскопами с построением С-сканов. Существуют методики оценки глубины на основе данных с двумя независимыми параметрами, что требует специального оборудования и программного обеспечения. Исследование направлено на то, чтобы благодаря знанию механизмов влияния глубины дефектов на величину импеданса и пониманию характера изменения сигнала дефектоскопа при изменении нагрузки создать методику, основанную на анализе только по одному параметру.

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

**Для цитирования:** Чертищев В.Ю., Бойчук А.С., Диков И.А., Горбовец М.А. Оценка глубины залегания дефектов в многослойных сотовых конструкциях из ПКМ при импедансном контроле серийными дефектоскопами // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-107-120.

Scientific article

## ESTIMATION OF DEFECT DEPTH IN MULTILAYER PCM HONEYCOMB DURING IMPEDANCE TESTING WITH SERIAL DETECTORS

V.Yu. Chertishchev<sup>1</sup>, A.S. Boichuk<sup>1</sup>, I.A. Dikov<sup>1</sup>, M.A. Gorbovets<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** Presents studies aimed at creating a methodology for assessing the depth of defects in multilayer honeycomb parts made of polymer composite materials during impedance testing with serial flaw detectors with the construction of C-scans. There are methods for estimating depth based on data with two independent parameters, which require special equipment and software. The study is aimed at creating a technique based on the analysis of only one parameter due to the knowledge of the mechanisms of the influence of the depth of defects on the impedance value and understanding the nature of the change in the signal of the flaw detector when the load changes.

**Keywords:** acoustic impedance technique, mechanical impedance, acoustic control methods, honeycomb constructions, polymer composite materials, carbon fiber reinforced plastic

**For citation:** Chertishchev V.Yu., Boichuk A.S., Dikov I.A., Gorbovets M.A. Estimation of defect depth in multilayer PCM honeycomb during impedance testing with serial detectors. *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-107-120.

### **Введение**

Применение методов неразрушающего контроля является важнейшим условием обеспечения качества и безопасности летательных аппаратов, успешной разработки новых авиационно-космических материалов, производства и эксплуатации изделий и конструкций авиационной техники [1–4]. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ 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») [2].

Детали из композиционных материалов могут выполнять свои функции, заложенные конструкторами, только если в них не будет дефектов [3]. Помимо производственных дефектов в конструкциях из полимерных композиционных материалов (ПКМ) часто появляются эксплуатационные дефекты различных типов. В многослойных конструкциях вероятность наличия дефекта возрастает с количеством слоев. Дефекты могут появиться по многим причинам не только в каждом отдельном (монокотном или сотовом) слое, но и между каждой парой слоев. Внутренние дефекты можно обнаружить только с помощью подходящего метода неразрушающего контроля.

Для неразрушающего контроля многослойных сотовых конструкций из ПКМ применяется множество методов (акустические, тепловые, рентгеновские и т. д.), каждый из которых имеет свою специфику применения. Среди акустических методов для контроля многослойных ПКМ популярны специальные методы низкочастотного акустического контроля (импедансный с совмещенным преобразователем и раздельно-совмещенным датчиком, резонансный, ударно-акустический и др.). Данные методы для многих конструкций являются безальтернативными и позволяют обнаруживать наиболее опасные дефекты [5]. Тем не менее на основе физических принципов их работы возникают определенные ограничения при осуществлении неразрушающего контроля. Большинство таких методов являются сравнительными и могут давать ответ о наличии или отсутствии дефекта только в бинарной форме, но не дают дополнительной информации – например, об их размере или глубине [6, 7].

Ранее при ручном контроле трехслойных сотовых конструкций использовали следующий вариант, когда контроль проводили с обеих сторон таких конструкций и любой обнаруженный дефект со стороны контроля считали отслоением обшивки от сотоблока, дефект оконтуривали по поверхности изделия по срабатыванию автоматической сигнализации дефекта (АСД) [8]. Однако для пяти- и семислойных сотовых конструкций до недавнего времени не было удовлетворительного методического решения по оценке размеров и глубины дефектов, хотя эмпирически было установлено множество малосвязанных друг с другом закономерностей по характеру отклонения амплитудных и фазовых показаний дефектоскопа от зоны АСД, являющихся, по сути, единой областью знаний [9].

Теоретически можно установить связь между изменением величины механического импеданса на поверхности изделия и основными параметрами дефекта – размером и глубиной залегания. Данные исследования проведены в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (далее – ВИАМ) с разработкой технологии измерения импеданса с помощью моделирования совмещенного импедансного датчика [10, 11]. Разработанные методики и алгоритмы полного моделирования датчика и численного измерения величины механического импеданса помимо классификации дефектов также позволяют решать и другие задачи. Например, экономия на настроечных образцах за счет введения расчетных корректировок при изменении толщины обшивок или других свойств контролируемой конструкции [12], а также повышения вероятности выявления дефектов [13, 14].

При исследовании модельных зависимостей для датчика и определения влияния дефектов в сотовых конструкциях, находящихся на разной глубине, на величину импеданса на поверхности изделия над дефектом при выполнении работ, представленных в статьях [10, 11], установлен ряд зависимостей, анализ которых показал, что для ряда сотовых конструкций, которые составляют в своем большинстве реально применяемые изделия, можно создать методику оценки глубины залегания дефектов только на основе показаний серийных дефектоскопов без использования моделирования. В разработанной методике [11], основанной на визуальном анализе показаний дефектоскопа на амплитудно-фазовой плоскости, предъявляются высокие требования к квалификации дефектоскописта. Дальнейший анализ показал, что если производить запись показаний серийного дефектоскопа при сканировании поверхности изделия ручным двухкоординатным инкодером или автоматизированными приспособлениями с созданием *C*-сканов, то разработанную ранее методику можно трансформировать для визуального анализа *C*-сканов. Методика, основанная на анализе *C*-сканов, подходит для большинства типов сотовых конструкций и при этом значительно проще в трактовке и применении и, что немаловажно, менее требовательна к квалификации исполнителя. Более того, подобные *C*-сканы подходят для создания в будущем систем автоматического распознавания на изображении дефектов и их свойств с использованием простых нейронных сетей.

### 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 механического импеданса, является импедансный датчик.

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  $\dot{P}$  [15]:

$$\dot{P} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \left| \frac{U_2}{U_1} \right| e^{j\psi} = P \cdot e^{j\psi}, \quad (1)$$

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

Датчик моделируется с помощью метода электромеханических аналогий. Необходимая для этого схема замещения для совмещенного импедансного преобразователя, нагруженного импедансом изделия  $Z_n$  через контактную гибкость сухого точечного контакта  $Z_k$ , подробно описана в работах [10, 11], там же приведен ее аналитический вывод. Независимой переменной в модели является реактивная составляющая механического импеданса  $X_n$  комплексной внешней нагрузки  $Z_n = R_n + jX_n$ , дополнительным параметром – коэффициент  $\nu_n = R_n / |X_n|$ , равный отношению величин активной и реактивной составляющих импеданса, применением которого вводится учет энергетических потерь в контролируемом изделии.

В результате модельного расчета (с предварительным внесением всех типов корректировок) можно получить зависимости для коэффициента передачи  $P(X_n, \nu_n)$  и фазового смещения  $\psi(X_n, \nu_n)$ . Для практических целей контроля раздельный анализ графиков функций  $P(X_n, \nu_n)$  и  $\psi(X_n, \nu_n)$  затруднителен, поэтому данные зависимости

можно объединять в годографы на комплексной плоскости. Значение коэффициента передачи в комплексном виде представляется радиус-вектором с длиной, равной  $P$ , и образующим с осью абсцисс угол  $\psi$ . Соответствующие годографы при различных значениях  $\nu_n$  приведены на рис. 1 для датчика ПАДИ-7 (для контроля ПКМ на частоте 6200 Гц). На годографы для примера наложена группа данных, измеренных в различных точках на годной семислойной сотовой конструкции из ПКМ (обшивки – из углепластика ВКУ-39, соты – из стеклопластика).

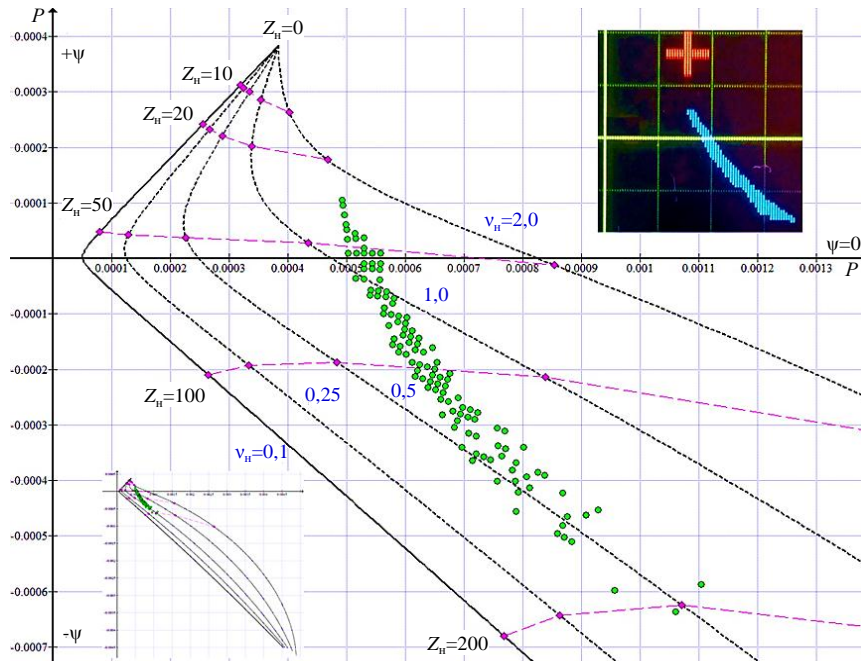


Рис. 1. Годографы при различных значениях коэффициента  $\nu_n$ , объединяющие зависимости  $P(X_n, \nu_n)$  и  $\psi(X_n, \nu_n)$  для датчика ПАДИ-7, для изделий из ПКМ (углепластик ВКУ-39) на частоте 6200 Гц

Механический импеданс на поверхности годной сотовой конструкции представляет собой периодическую картину, повторяющую рисунок сот сотоблока второго слоя многослойной сотовой конструкции. В годном изделии на поверхности обшивки первого слоя в точках над центром сот второго слоя (сотоблока) механический импеданс принимает конкретные значения активной  $R$  и реактивной  $X$  составляющих (при измерениях по модельным годографам соответственно реактивной составляющей нагрузки  $X_n$  и коэффициента  $\nu_n$ ). В свою очередь механический импеданс на поверхности обшивки (первого слоя) над стенками сот второго слоя также будет иметь конкретные значения  $X_n$  и  $\nu_n$ . При этом величины  $X_n$  над стенками сот будут больше, чем над центрами сот. Это объясняется тем, что жесткость поверхности изделия при точечном нагружении вдоль стенок сот будет выше из-за большего коэффициента жесткости подложки  $\chi$  под обшивкой. Над центрами сот под обшивкой коэффициент  $\chi$  будет иметь минимальное значение (формально нулевое), а величина энергетических потерь  $\nu_n$  над центрами сот больше. В данных точках обшивка ближе к модели бесконечного тонкого листа, имеющего бесконечные энергетические потери, а значит должна возрастать доля активной составляющей  $R$  в выражении для механического импеданса. Таким образом, величина  $X_n$  колеблется (по модулю) от  $X_{\min}$  (над центрами сот) до  $X_{\max}$  (над стенками сот), а величина  $\nu_n$  – соответственно от  $\nu_{\min}$  (над стенками сот) до  $\nu_{\max}$  (над центрами сот).

**Методика определения глубины залегания дефектов в многослойных сотовых конструкциях из ПКМ по величине механического импеданса**

В ВИАМ на основе ряда исследований [9–11] разработана методика [11] по оценке условного размера и дискретной глубины залегания дефектов при ручном неразрушающем контроле качества трех-, пяти- и семислойных сотовых конструкций из ПКМ акустическим импедансным методом с использованием серийных дефектоскопов без построения С-сканов.

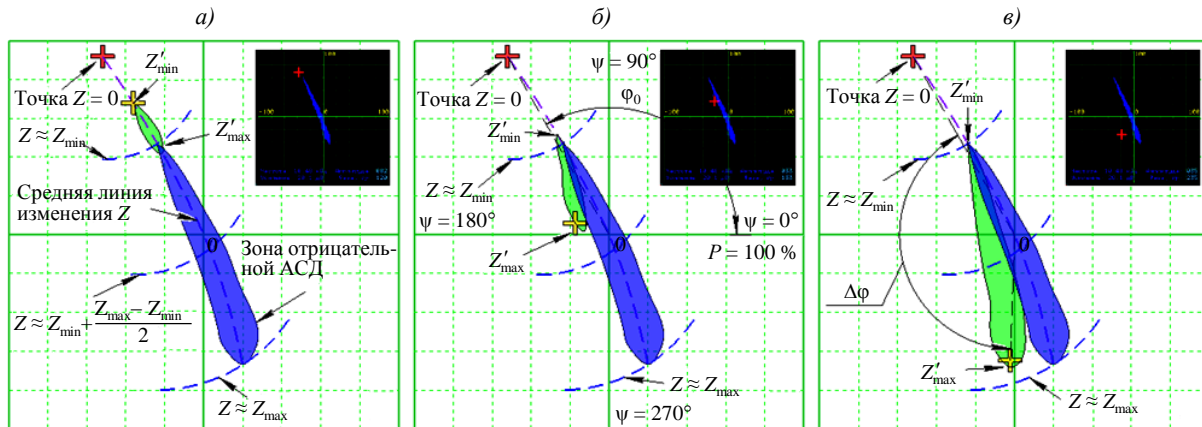


Рис. 2. Положение зоны настройки автоматической сигнализации дефекта для годного изделия и зон смещения маркера над дефектами под первым (а), вторым (б) и третьим (в) слоями многослойной сотовой конструкции

Методика предусматривает оценку нескольких численных и визуальных признаков, анализ которых в соответствии с таблицей и рис. 2 позволяет отнести глубину дефекта к одной из трех возможных дискретных глубин. Описанные критерии основаны в основном на визуальных признаках и не всегда могут трактоваться однозначно, поэтому результат существенно зависит от опыта и квалификации дефектоскописта. В отдельных случаях возможна ситуация, при которой ни один из трех наборов признаков не будет выполнен в полной мере, тогда дискретную глубину дефекта можно с рядом допущений принять равной той, для которой выполняется наибольшее число критериев в таблице. Если выбрать глубину по какой-либо причине невозможно – дефект признается непригодным для оценки по данному параметру, либо глубина принимается равной наибольшей величине из возможных.

**Критерии и признаки для выбора дискретной глубины дефекта**

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 $Z'_{min}$	$< Z_{min}$	$\leq Z_{min}$	$\cong Z_{min}$
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	Да	Нет	Нет
Отсутствие сигнализации дефекта над центрами сот слоя II	Нет	Нет	Да (при наличии)
Величина $\Delta\varphi$ для $Z'_{max}$ , градус	$\pm(0-10)$	$\pm(10-90)$	$\pm(90-180)$

Методика распространяется на двухсторонний ручной контроль многослойных сотовых конструкций как при производственном контроле деталей, так и при контроле эксплуатационных повреждений. В трехслойных конструкциях дефекты могут быть обнаружены в первом и втором слое, в пятислойных – в первом, втором и третьем, в семислойных – в первом, втором, третьем и четвертом слоях.

Начальная настройка производится по заводским инструкциям к прибору путем закрашивания на амплитудно-фазовой плоскости дефектоскопа отрицательной зоны АСД, которую часто называют зоной фрикционных шумов [11]. Следует в несколько итераций расположить центр закрашенной зоны АСД – приблизительно в центре координат с помощью функций центрирования и масштабирования. При этом по возможности следует обеспечить, чтобы нулевая точка (положение маркера на экране для датчика, не установленного на поверхность образца, – точка, в которой измеряемый дефектоскопом механический импеданс ( $Z_n = 0$ )) не выходила за пределы экрана дефектоскопа (рис. 2, а). Угол между направлением на нулевую точку и началом отсчета фазы ( $\psi = 0$  градусов) и равен  $\varphi_0$ .

Как было установлено ранее, точки на поверхности годной многослойной сотовой конструкции над центрами сот второго слоя расположены на амплитудно-фазовой плоскости дефектоскопа, т. е. ближе к точке  $Z_n = 0$  и соответствуют минимальным значениям импеданса ( $Z_n = Z_{\min}$ ), а точки над стенками сот расположены дальше всего от точки  $Z_n = 0$  и соответствуют максимальным ( $Z_n = Z_{\max}$ ) значениям механического импеданса (рис. 2, а). По мере увеличения внешней нагрузки, приложенной к датчику в соответствии с модельными годографами, маркер движется по относительно пологой изогнутой средней линии изменения величины  $Z_n$  – от точки  $Z_n = 0$  через точку  $Z_{\min}$  к точке  $Z_{\max}$  (штриховая линия на рис. 2, а). В грубом приближении можно считать, что при смещении маркера от средней линии изменения величины  $Z_n$  по условной окружности, центром которой является точка  $Z_n = 0$ , реактивная составляющая механического импеданса остается приблизительно постоянной, но изменяется активная составляющая, т. е. изменяется величина коэффициента энергетических потерь  $\nu_n$ . На амплитудно-фазовой плоскости следует умозрительно провести среднюю линию изменения параметра  $Z_n$ , линии минимума ( $Z_n \approx Z_{\min}$ ) и максимума ( $Z_n \approx Z_{\max}$ ), а также линию средней величины этого параметра ( $Z_n \approx Z_{\min} + 0,5 (Z_{\max} - Z_{\min})$ ). После описанной подготовки производится измерение и оценка критериев из таблицы. По результатам оценки полученных критериев делается выбор в пользу одной из трех возможных дискретных глубин дефекта.

### ***Оценка глубины залегания дефектов в многослойных сотовых конструкциях из ПКМ по величине механического импеданса с построением С-сканов***

Описанная ранее методика дает достаточно хорошие результаты, однако требуется анализ положения маркера на амплитудно-фазовой плоскости, т. е. анализ по двум несвязанным параметрам. Такой подход сложно автоматизировать, а также записать двухпараметрические С-сканы. Возникает вопрос: возможно ли проводить такой анализ только по одному параметру, пусть и с частичной потерей точности? Так, зная общий вид модельной функции изменения механического импеданса, внешний вид зоны АСД для сотовых конструкций и характер отклонения маркера на амплитудно-фазовой плоскости от зоны АСД для дефектов, залегающих на различных глубинах, можно сказать, что это возможно. Более того, можно добиться информативных С-сканов и при записи только амплитуды или только фазы.

Очевидно, что для построения амплитудных С-сканов нужно добиться того, чтобы происходило изменение регистрируемой амплитуды по мере роста величины механического импеданса и перемещения маркера на экране дефектоскопа от зоны с минимальным значением импеданса ( $Z_n = Z_{\min}$ ) к зоне с максимальными значениями

( $Z_n = Z_{\max}$ ). Самое надежное решение – отцентрировать изображение на экране в точку, где  $Z_n = 0$ , тогда записанная амплитуда будет приблизительно равна 0, при  $Z_n = Z_{\min}$  амплитуда будет иметь малое значение, а при  $Z_n = Z_{\max}$  – соответственно, большое. Такой подход будет хорошо работать при наличии большой разницы между значениями импедансов над центрами сот и над стенками сот второго слоя. Это возможно при достаточно большом размере ячейки сот и малой толщине обшивки первого слоя. Зона АСД при этом будет узкой, длинной и достаточно прямой. Если из-за геометрического соотношения размера сот и толщины обшивки зона АСД будет иметь округлую форму (малую длину относительно ширины) – амплитудный способ построения *C*-сканов будет работать плохо.

Для построения фазовых *C*-сканов необходимо также добиться, чтобы происходило изменение регистрируемого сигнала по мере роста величины механического импеданса и перемещения маркера на экране дефектоскопа от зоны с минимальным значением импеданса ( $Z_n = Z_{\min}$ ) к зоне с максимальными значениями ( $Z_n = Z_{\max}$ ). В ряде случаев можно оставить центрирование в центре АСД. При этом измеренные величины углов фазы для  $Z_{\min}$  и  $Z_{\max}$  будут отличаться почти на 180 градусов, а для средних величин импеданса показания станут недостоверными. По этой причине эффективнее отцентрировать изображение на экране так, чтобы центр экрана находился приблизительно на линии средней величины  $Z_n$  ( $Z_n \approx Z_{\min} + 0,5 (Z_{\max} - Z_{\min})$ ), но сбоку от АСД. При таком подходе колебание записываемой величины угла фазы составит ~90 градусов и будет иметь четкое соответствие: малый угол – малый импеданс, средний угол – средний импеданс, большой угол – большой импеданс.

Для подобной записи *C*-скана по одному параметру рассмотрим далее методику анализа данного изображения на основе ранее полученных знаний о взаимосвязи между глубиной залегания дефекта и величиной механического импеданса на поверхности над дефектом.

Для экспериментальной проверки методики оценки глубины залегания дефектов в многослойной сотовой конструкции из ПКМ по однопараметрическим *C*-сканам и отработки методических приемов определения глубины залегания дефектов изготовлен образец семислойной сотовой конструкции с искусственными дефектами как один из наиболее сложных типов объекта контроля (рис. 3). Образец представляет собой конструкцию с тремя слоями стеклопластикового сотоблока высотой по 10 мм, с размером ячейки 8 мм и четырьмя монолитными слоями углепластика (две обшивки толщиной 0,86 мм и две обшивки толщиной 1,2 мм). У образца большие ячейки сот и малая толщина обшивок. Теоретически должна быть получена большая разница в величине механического импеданса на поверхности изделия над центрами сот второго слоя и, соответственно, над стенками сот.

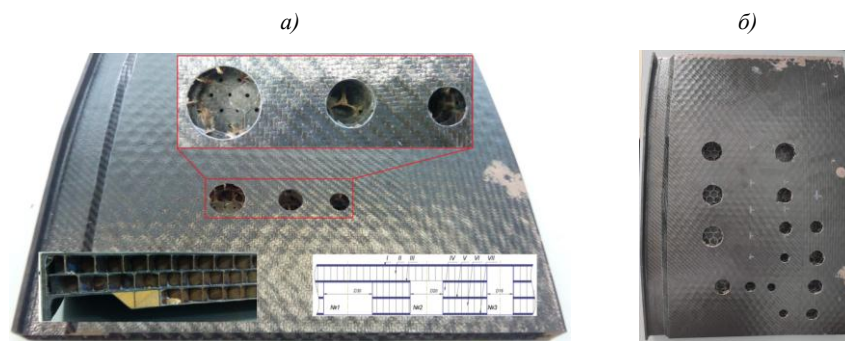


Рис. 3. Образец семислойной сотовой конструкции из ПКМ с искусственными дефектами

Для имитации расслоений и непроклеев в качестве искусственных дефектов выбраны сквозные плоскодонные фрезерованные отверстия круглого сечения на различную глубину разного диаметра (16, 20, 25 и 30 мм). Схема искусственных дефектов, а также нумерация слоев (I, III, V, VII – монолитные слои (обшивки); II, IV, VI – сотоблоки) приведены на рис. 3, а. Помимо трех искусственных дефектов в данном образце имеется еще 12 аналогичных дефектов различных диаметров и глубины (рис. 3, б).

Разработанный в ВИАМ макет комплекса для автоматизированного контроля деталей из ПКМ применялся для сканирования поверхности образца датчиком с заданным шагом, скоростью и точностью [11]. Контроль производился модернизированным датчиком ПАДИ-7 и серийным датчиком ПАДИ-8. Датчики закреплялись в оправке, имеющей три степени свободы для компенсации локальных перекосов поверхности и обеспечения полного прижатия контактной площадки датчика.

С помощью специально созданного программного обеспечения производили запись показаний наиболее распространенного серийного импедансного дефектоскопа ДАМИ-С-09 по амплитуде и по фазе, а также запись координат на поверхности изделия, полученных от промышленного контроллера роботов. Полученные данные синхронизировали и объединяли в числовые массивы для С-сканов по амплитуде и по фазе. В дальнейшем С-сканы строили в программном обеспечении PTC MathCad и MS Excel.

### Результаты и обсуждение

Для сравнения приведем результаты контроля искусственных дефектов с использованием полноценной методики, основанной на численном измерении механического импеданса с помощью моделирования датчика.

На рис. 4, а и б приведены С-сканы соответственно по реактивному импедансу и по полной величине механического импеданса ( $Z_n = R_n + jX_n = v_n |X_n| + X_n$ ), амплитуда которого вычисляется как  $Z_n = \sqrt{(v_n X_n)^2 + X_n^2}$ . Дефекты обведены пунктиром в зонах срабатывания АСД.

Для имитирующего непроклей между слоями I и II (либо расслоение в слое I) дефекта № 3 выявлено уменьшение в центре дефекта реактивной составляющей механического импеданса по сравнению с минимальной величиной в годном изделии над центрами сот  $Z_{\min}$  с равномерным круговым уменьшением этого параметра от краев дефекта к его центру (индикация стенок сот по величине импеданса в пределах дефекта отсутствует). Такие изменения, как равномерное концентрическое смещение измеряемого параметра в сторону  $Z_n = 0$ , должны легко отслеживаться по однопараметровому С-скану.

Для имитирующего непроклей между слоями II и III (либо повреждение сотоблока слоя II) дефекта № 2 зафиксирована картина величин импеданса на поверхности в полном соответствии с проведенным ранее анализом. Величины реактивного импеданса снизились, но не так сильно как над непроклеем между слоями I и II. Наблюдается индикация в пределах дефекта от стенок сот второго слоя из-за вклада массы сотоблока, подвешенного под обшивкой слоя I в реактивную составляющую механического импеданса. Вдоль стенок, висящих под обшивкой, в зоне дефекта сот, ориентированных относительно радиально от центра дефекта к краям, наблюдается плавное снижение импеданса (до 40 %) на длине одной стенки с одновременным возрастанием параметра  $v_n$  приблизительно на 30 %. Такие дефекты должны хорошо различаться на однопараметровом С-скане по сохранению рисунка сот, но с существенным уменьшением величины механического импеданса над стенками сот.

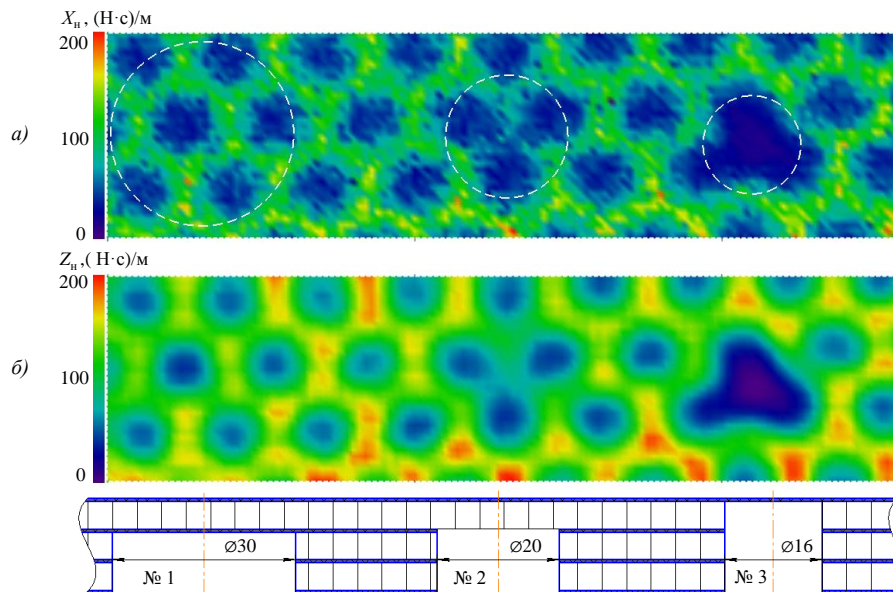


Рис. 4. С-сканы по реактивной составляющей (а; по модулю) и абсолютной величине механического импеданса в (Н·с)/м (б; с медианной фильтрацией)

Для имитирующего непрочной между слоями III и IV (либо расслоение в слое III) дефекта № 1 также зафиксирована картина величин механического импеданса в соответствии с анализом. Величины реактивного импеданса  $X_n$ , как видно на С-скане, незначительно уменьшились по сравнению с фоном (рис. 4, а). Над дефектом уменьшились величины коэффициента энергетических потерь  $\nu_n$ , что привело к уменьшению абсолютных величин импеданса  $Z_n$  (рис. 5).

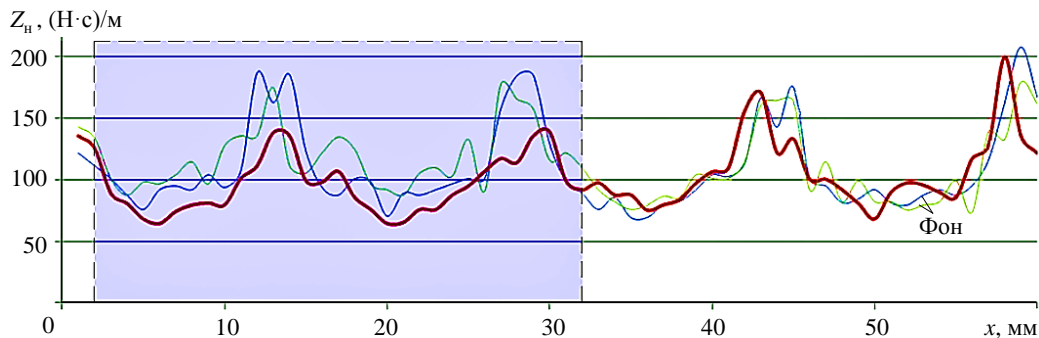


Рис. 5. Зависимость абсолютной величины механического импеданса  $Z_n$  от координаты вдоль сечения образца над дефектом № 1

На рис. 5 приведена абсолютная величина механического импеданса  $Z_n$  вдоль образца по образующей, проходящей над годной частью образца и над дефектом № 1 (зона величины импеданса над дефектом выделена цветом). Средние величины параметра  $Z_n$  над дефектом над центрами ячеек сот второго слоя укладываются в границы диапазона для годной конструкции. Зафиксировано снижение величин  $Z_n$  над стенками сот по сравнению с фоном. На С-скане по величине  $Z_n$  (рис. 4, б) наблюдается равномерное снижение импеданса в пределах дефекта (перепады в пределах одной стенки сот не более 10–15 %). Данный дефект, судя по всему, будет проблематично однозначно классифицировать по однопараметровому С-скану, поскольку положение маркера на амплитудно-фазовой плоскости над стенками сот над подобным дефектом очень близко

для годного изделия. Если при численном измерении механического импеданса и коэффициентов энергетических потерь подобное отличие хорошо фиксируется, то при однопараметровом контроле отличить годное изделие от дефектного будет сложно. Сложно также будет отличить такой дефект от расслоения под слоем II. Тем не менее такой дефект существует только в семислойных конструкциях, которые встречаются не очень часто.

Проверим методику на фазовом *S*-скане для датчика ПАДИ-8 с центровкой амплитудно-фазовой плоскости в центр АСД. Для приведения показаний дефектоскопа в полное соответствие с модельными годографами следует отцентровать амплитудно-фазовую плоскость в точку абсолютного нуля (рис. 6, б) сигнала (при отключенном датчике). По мере роста величины внешней нагрузки в соответствии с годографом маркер должен двигаться по относительно прямой линии от точки  $Z_n = 0$  к точке начала координат с отклонением от данной линии в соответствии с величиной коэффициента энергетических потерь  $\nu_n$ , что и наблюдается. На рис. 6, в приведена та же настройка, но с центровкой амплитудно-фазовой плоскости в центр АСД. На рис. 6, г-е приведены отклонения маркера от АСД над дефектами на разной глубине в полном соответствии с анализом.

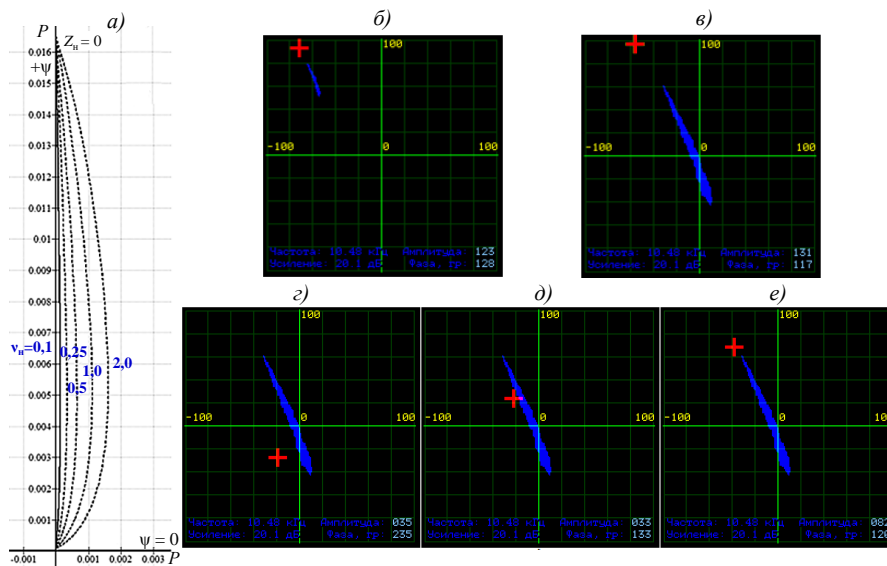


Рис. 6. Годографы при различных значениях  $\nu_n$ , объединяющие зависимости  $P(X_n, \nu_n)$  и  $\psi(X_n, \nu_n)$  для датчика ПАДИ-8, для углепластика ВКУ-39 на частоте 10480 Гц (а) и положение маркера на экране в точке 0 (б, в) и над дефектами на различной глубине (г-е – от большей к меньшей)

На рис. 7 приведен *S*-скан с шагом 2 мм по поверхности образца по величине угла фазы. На *S*-скане измеренные величины фазы отображаются только для точек со срабатыванием АСД. Над дефектом № 3 наблюдается равномерное отклонение фазы в направлении точки  $Z_n = 0$ , что соответствует анализу. На *S*-скане над искусственным дефектом № 2 (хотя и не без труда) можно заметить рисунок сот с небольшим отклонением фазы, что в целом соответствует анализу. При расположении датчика над искусственным дефектом № 1 (в отличие от менее глубоких дефектов) величина механического импеданса над стенками сот визуальнo не на много меньше значения  $X_{\min}$ , а отклонение фазы от направления на точку  $Z_n = 0$  на *S*-скане становится максимальным. Точки  $X_{\min}$  над центрами сот второго слоя не дают срабатывания АСД, что тоже предсказывается анализом. Можно сделать вывод, что различие глубины залегания дефектов возможно, но недостаточно однозначно и достоверно.

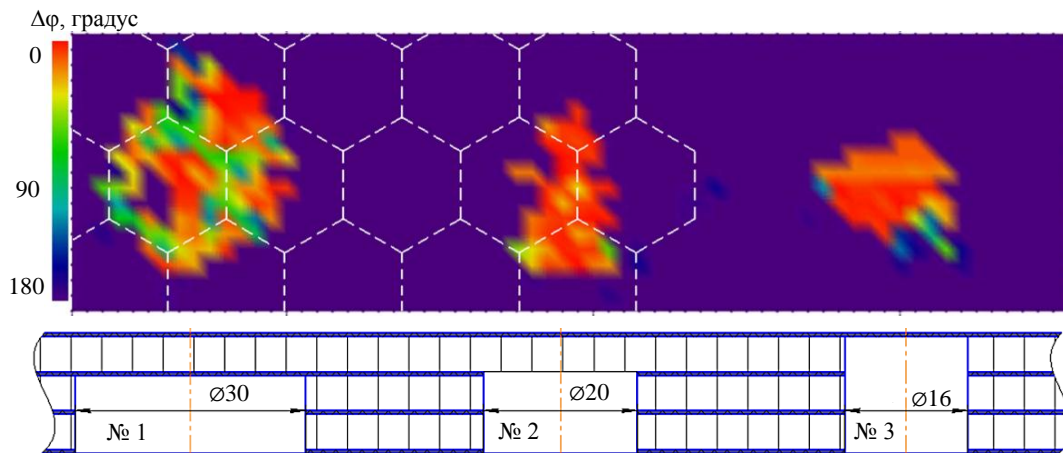


Рис. 7. С-скан по фазовому смещению при начале координат в центре автоматической сигнализации дефекта при контроле датчиком ПАДИ-8 на частоте 10480 Гц

На рис. 8, *a* приведен С-скан при контроле датчиком ПАДИ-7 по фазе с центровкой экрана дефектоскопа на средней линии импеданса сбоку от АСД так, чтобы диапазон измеряемых углов уложился в 90 градусов. Над дефектом № 3 легко просматривается исчезновение индикации от стенок сот и плавное concentрическое смещение измеряемого параметра в направлении нулевой точки. Над дефектом № 2 заметно нарушение рисунка стенок сот при сравнении с фоновым рисунком для годного изделия, при этом индикация стенок сот имеет малое и среднее отклонение от нулевой точки. Над дефектом № 1 наблюдается индикация, схожая с дефектом № 2, но с большим отклонением фазы в сторону больших значений импедансов. Глубина залегания дефекта № 3 определяется однозначно, а глубину залегания дефектов № 2 и № 1 достоверно отличить друг от друга сложно, но легко отличить от глубины залегания дефекта № 3. Поэтому применение методики для семислойных конструкций может иметь ограничения в зависимости от детали. Различение дефектов № 2 и № 1 возможно в случае, если будет фиксироваться отсутствие срабатывания АСД над центрами сот в пределах дефекта, тогда можно будет сделать вывод, что это дефект № 1.

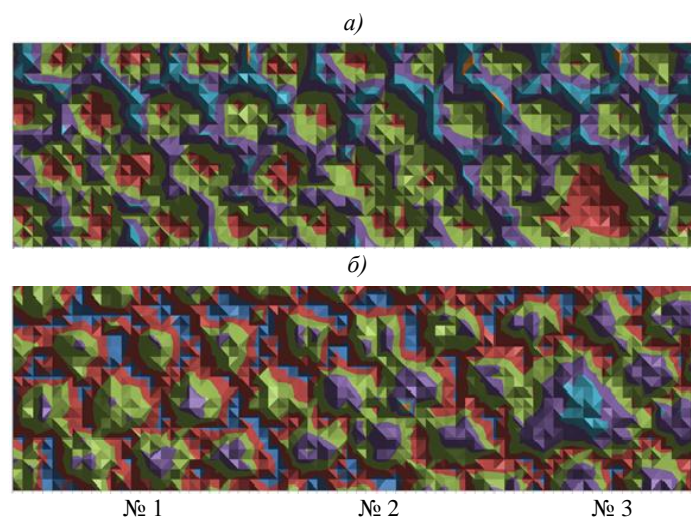


Рис. 8. С-сканы дефектов № 1–№ 3 по фазовому смещению с центровкой сбоку от автоматической сигнализации дефекта (*a*) и по амплитуде с центровкой в нулевую точку (*б*) при контроле датчиком ПАДИ-7

На рис. 8, б приведен *C*-скан при контроле датчиком ПАДИ-7 по амплитуде с центровкой экрана дефектоскопа в нулевой точке  $Z_n = 0$ . Выводы по точности оценки глубины те же, что и для оценки по фазе.

Дефекты № 1–№ 3 имеют минимальные надежно выявляемые размеры по выявляемости для своих слоев. Проверим работоспособность методики на более крупных дефектах. В том же образце изготовлены дополнительные дефекты. Дефект № 4 имитирует отслоение обшивки I от сотоблока II (аналогичен дефекту № 3) диаметром 30 мм. Дефекты № 5 и № 6 имитируют отслоение сотоблока II от слоя III (аналогичны дефекту № 2) диаметрами 30 и 25 мм соответственно.

На рис. 9 приведен *C*-скан при контроле датчиком ПАДИ-7 по фазе с центровкой экрана дефектоскопа на средней линии импеданса сбоку от АСД так, чтобы диапазон измеряемых углов уложился в 90 градусов. Над дефектом № 4, как и должно быть, легко просматриваются исчезновение индикации от стенок сот и плавное concentрическое смещение измеряемого параметра в направлении нулевой точки. Над дефектами № 5 и № 6 заметно нарушение рисунка стенок сот при сравнении с фоновым рисунком для годного изделия, при этом имеется индикация стенок сот с малым и средним отклонением от нулевой точки. Можно заметить, что по *C*-скану расслоение над дефектом № 6 больше, чем над дефектом № 5, несмотря на то, что дефект № 6 имеет меньший диаметр фрезерования. Осмотр показал, что действительно сотоблок слоя II в дефекте № 6 значительно разрушен (судя по всему из-за ошибок при механической обработке) вглубь от зоны фрезеровки и реальное расслоение имеет больший размер, чем диаметр фрезерования.

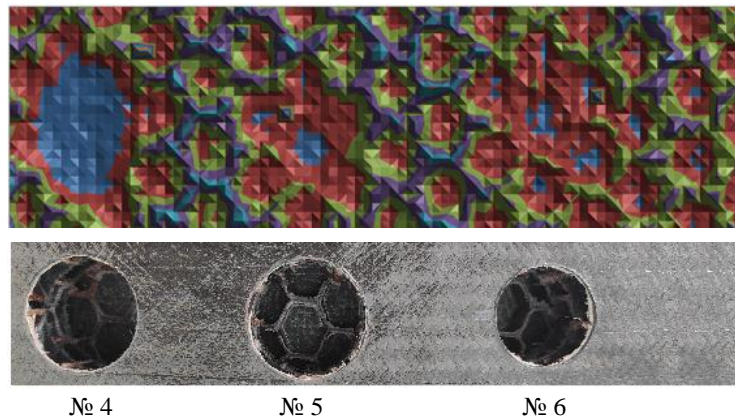


Рис. 9. *C*-скан по фазовому смещению при контроле крупных дефектов № 4–№ 6 датчиком ПАДИ-7

Признаки для классификации глубины легко определяются визуально. Как и планировалось, оценка дискретной глубины дефектов в соответствии с разработанной методикой проведена успешно и не требует высокой квалификации дефектоскописта.

### Заключения

Разработана методика определения дискретной глубины дефекта по слоям в трех-, пяти- и семислойных сотовых конструкциях при контроле серийными импедансными дефектоскопами с построением простых *C*-сканов по одному параметру: амплитуде или фазе. Работоспособность методики и легкость визуальной трактовки результатов подтверждены экспериментально.

## Список источников

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. Ключевая проблема – материалы // *Тенденции и ориентиры инновационного развития России*. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Кудинов И.И., Головков А.Н., Генералов А.С., Князев А.В. Оценка вероятности выявления эксплуатационных дефектов в деталях авиационной техники из жаропрочных сплавов с использованием дефектоскопических жидкостей отечественного и зарубежного производства // *Дефектоскопия*. 2021. № 1. С. 64–71. DOI: 10.31857/S0130308221010073.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // *Защита и безопасность*. 2014. № 4. С. 28–29.
5. Мурашов В.В. Контроль и диагностика многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами. М.: Спектр, 2016. 244 с.
6. *Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева*. М.: Машиностроение, 2004. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. 864 с.
7. 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.
8. 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.
9. Шершак П.В., Яковлев Н.О., Шокин Г.И., Куцевич К.Е., Попкова Е.А. Метод оценки и факторы, влияющие на качество склеивания обшивки с сотовым наполнителем в конструкциях пола и интерьера воздушных судов // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 81–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-81-88.
10. 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.
11. Чертищев В.Ю., Оспенникова О.Г., Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С. Определение размера и глубины залегания дефектов в многослойных сотовых конструкциях из ПКМ по величине механического импеданса // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 72–94. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-72-94.
12. Стариковский Г.П., Жовнер П.Б. *Неразрушающий контроль трехслойных интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов* // *Контроль. Диагностика*. 2012. № 6. С. 58–62.
13. *Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment: Handbook. Military and Government Specs & Standards (Naval Publications and Form Center)*, 2009. 171 p.
14. Краснов И.С., Ложкова Д.С., Далин М.А. Оценка дефектности заготовок из титановых сплавов для вероятностного расчета риска разрушения дисков газотурбинных двигателей в эксплуатации // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.06.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
15. Ланге Ю.В. *Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций*. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.

## References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. The key problem is materials. *Trends and guidelines for Russia's innovative development*. Moscow: VIAM, 2015, pp. 458–464.

3. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Kudinov I.I., Golovkov A.N., Generalov A.S., Knyazev A.V. Estimation of the probability of detecting operational defects in aircraft parts made of heat-resistant alloys using domestic and foreign flaw detection liquids. *Defektoskopiya*, 2021, no. 1, pp. 64–71. DOI: 10.31857/S0130308221010073.
4. Kablov E.N. New generation materials. *Zashchita i bezopasnost*, 2014, no. 4, pp. 28–29.
5. Murashov V.V. *Control and diagnostics of multilayer structures made of polymer composite materials by acoustic methods*. Moscow: Spektr, 2016, 244 p.
6. *Non-destructive testing: a reference book in 7 vols. General ed. V.V. Klyuev*. Moscow: Mashinostroenie, 2004, vol. 3: Ultrasonic testing. Ed. I.N. Ermolov, Yu.V. Lange, 864 p.
7. Murashov V.V., Generalov A.S. Control of multilayer adhesive structures operating in severe climatic condition. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 2, pp. 59–67. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-59-67.
8. Murashov V.V. Research and improvement of acoustic low-frequency control methods of products from layered plastics and multilayered glued of constructions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 4 (53), pp. 87–93. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-87-93.
9. Shershak P.V., Yakovlev N.O., Shokin G.I., Kutsevich K.E., Popkova E.A. Evaluation method and factors influencing the bonding quality between face and honey-comb cores in floor and interior aircraft panels. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 81–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-81-88.
10. Chertishchev V.Yu., Boychuk A.S., Dikov I.A., Yakovleva S.I., Generalov A.S. Determination of the Defect Depth in Multilayer PCM Structures by Acoustic Methods Based on the Mechanical Impedance. *Defektoskopiya*, 2018, no. 8, pp. 21–34. DOI: 10.1134/50130308218080031.
11. Chertishchev V.Yu., Ospennikova O.G., Boichuk A.S., Dikov I.A., Generalov A.S. Determination of the size and depth of defects in multilayer PCM honeycomb structures based on the mechanical impedance value. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 72–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-72-94.
12. Starikovskiy G.P., Zhovner P.B. Non-destructive testing of three-layer integral structures made of polymer composite materials. *Kontrol. Diagnostika*, 2012, no. 6, pp. 58–62.
13. *Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment: Handbook. Military and Government Specs & Standards (Naval Publications and Form Center)*, 2009, 171 p.
14. Krasnov I.S., Lozhkova D.S., Dalin M.A. Evaluation of deficiency of titanium alloy forgings for probabilistic calculation of gas turbine engine disks fracture risk. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 12. Available at: <https://journal.viam.ru> (accessed: June 01, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
15. Lange Yu.V. *Acoustic low-frequency methods and means of non-destructive testing of multilayer structures*. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 272 p.

**Информация об авторах**

**Чертисhev Василий Юрьевич**, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Бойчук Александр Сергеевич**, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Диков Иван Алексеевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Горбовец Михаил Александрович**, начальник Испытательного центра, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Vasily Yu. Chertishchev**, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Alexander S. Boychuk**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Ivan A. Dikov**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Mikhail A. Gorbovets**, Head of Testing Center, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 20.07.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.08.2022.  
The article was submitted 20.07.2022; approved and accepted for publication after reviewing 22.08.2022.