

Научная статья

УДК 620.179

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-93-103

ВЫЯВЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЛОПАСТЕЙ НЕСУЩЕГО И РУЛЕВОГО ВИНТА ИЗ ПКМ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В.В. Антипов¹, А.С. Бойчук¹, В.Ю. Чертищев¹, С.И. Яковлева¹, А.А. Баранников¹

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

Аннотация. Современные и перспективные лопасти несущих и рулевых винтов вертолетной техники практически полностью изготавливаются из полимерных композиционных материалов. Все эти конструкции крайне чувствительны к эксплуатационным повреждениям, которые не только могут появиться по множеству причин, но и плохо обнаруживаются визуально снаружи даже при больших площадях расслоений и растрескиваний основного материала. Для решения задач по обнаружению и измерению размеров эксплуатационных повреждений произведен подбор оптимальных вариантов неразрушающих методов контроля для каждого типа конструкции, изучены особенности их применения, произведен подбор оптимальных настроек и режимов контроля.

Ключевые слова: лопасти, неразрушающий контроль, полимерные композиционные материалы, ультразвуковой контроль, импедансный метод контроля, эксплуатация, вертолеты

Для цитирования: Антипов В.В., Бойчук А.С., Чертищев В.Ю., Яковлева С.И., Баранников А.А. Выявление эксплуатационных повреждений лопастей несущего и рулевого винта из ПКМ в условиях эксплуатации // Труды ВИАМ. 2023. № 7 (125). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-93-103.

Scientific article

IDENTIFICATION OF OPERATIONAL DAMAGE FROM BLADES OF ROTORS AND TAIL ROTORS MADE OF PCM IN OPERATING CONDITIONS

V.V. Antipov¹, A.S. Boichuk¹, V.Yu. Chertishchev¹, S.I. Yakovleva¹, A.A. Barannikov¹

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

Abstract. Modern and promising blades of rotors and tail rotors of helicopters are almost entirely made of polymer composite materials. All these structures are extremely sensitive to operational damage, which can not only appear for a variety of reasons, but are also poorly detected visually from the outside, even with large areas of delamination and cracking of the base material. To solve the problems of detecting and measuring the size of operational damage, the selection of optimal options for non-destructive testing methods for each type of structure was made, the features of their application were studied, and the optimal settings and control modes were selected.

Keywords: blades, non-destructive testing, polymer composite materials, ultrasonic testing, impedance testing method, operation, helicopters

For citation: Antipov V.V., Boichuk A.S., Chertishchev V.Yu., Yakovleva S.I., Barannikov A.A. Identification of operational damage from blades of rotors and tail rotors made of PCM in operating conditions. *Trudy VIAM*, 2023, no. 7 (125), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-93-103.

Введение

В последнее время при разработке современной отечественной вертолетной техники различного назначения широко применяются полимерные композиционные материалы (ПКМ) [1–5]. При этом в отечественном вертолетостроении происходят процессы, связанные с заменой в конструкциях вертолетной техники ПКМ, разработанных еще в СССР, на современные с повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Такие материалы применяют в тех конструкциях, в которых ранее они традиционно выполнялись из металла – например, лопасти несущего и рулевого винта, элементы фюзеляжа, капоты двигателя и т. д. Вместе с этим внедряются также новые технологии их изготовления [6–8].

Однако создание новых конструкций из ПКМ и улучшение существующих требуют новых подходов к проведению их технического обслуживания и диагностики, в том числе к внедрению неразрушающего контроля.

Документация по техническому обслуживанию и ремонту воздушных судов ведущих зарубежных авиастроительных корпораций, в конструкциях которых широко применяются трехслойные конструкции из ПКМ и высоконагруженные монолитные конструкции из углепластиков, стеклопластиков и органопластиков, содержит указания по выявлению и точной оценке размеров ударных повреждений, повреждений в результате попадания молнии и других характерных дефектов ПКМ эксплуатационного происхождения. Реальные размеры внутренних разрушений этих конструкций, как правило, существенно превышают визуально наблюдаемые на поверхности следы воздействия. Поэтому для объективного определения границ зоны, из которой при ремонте необходимо удалить поврежденный материал, применяются приборные методы неразрушающего контроля – ультразвуковой, рентгенографический, специальные низкочастотные акустические методы.

Наибольшее применение для контроля монолитных конструкций из ПКМ, применяемых в авиационной технике, в настоящее время находят ультразвуковой эхоимпульсный и теневой методы неразрушающего контроля [9, 10]. Данные методы обеспечивают высокую чувствительность контроля, позволяют выявлять практически все основные дефекты, характерные для слоистых ПКМ, их можно использовать как в ручном, так и в автоматизированном режимах. Известно много работ по контролю конструкций из углепластиков и стеклопластиков [11–13]. Но в отличие от этих работ задача, затронутая в данной статье, состояла в проведении неразрушающего контроля конструкций из гибридного стекло-углепластика, обладающего более неравномерными акустическими свойствами, чем углепластик или стеклопластик по отдельности. Применительно к трехслойным конструкциям из ПКМ (в особенности со вспененным наполнителем), широко используется низкочастотный акустический импедансный метод [14, 15]. Данный метод чувствителен к уменьшению механической прочности конструкции над дефектом. При ударном повреждении трехслойной конструкции из ПКМ со вспененным наполнителем возможно появление трех основных типов дефектов по отдельности или одновременно: расслоение и растрескивание в монолитной обшивке, расслоение в клеевом соединении между обшивкой и наполнителем, а также смятие и растрескивание вспененного наполнителя. Все данные дефекты приводят к снижению величины механического импеданса на поверхности конструкции над дефектом.

Данная 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») [1].

Материалы и методы

С целью проведения неразрушающих исследований методом вакуумного формования препрега изготовлены конструктивно-подобные образцы из современного отечественного стекло-углепластика и вспененного заполнителя, имитирующие монолитную и трехслойную (с толстыми толщиной 5 мм и тонкими толщиной 1 мм обшивками) конструкции вертолетной лопасти из ПКМ (рис. 1). Монолитный образец имитирует пустотелый силовой лонжерон, трехслойная конструкция с толстыми обшивками – лонжерон с пенопластом, трехслойная конструкция с тонкими обшивками – хвостовую секцию лопасти. В образцах монолитной конструкции для выбора чувствительности контроля изготовлены плоскодонные отражатели диаметром 5 и 10 мм. В трехслойных образцах для подтверждения чувствительности контроля изготовлены отражатели в виде подфрезеровки вспененного заполнителя с диаметрами 5, 10, 15, 20, 25 и 30 мм. Эксплуатационные повреждения в образцах получены путем нанесения удара стальными шариками диаметром 27 и 36 мм по изготовленным образцам. На рис. 1 представлены полученные ударные повреждения на образцах.

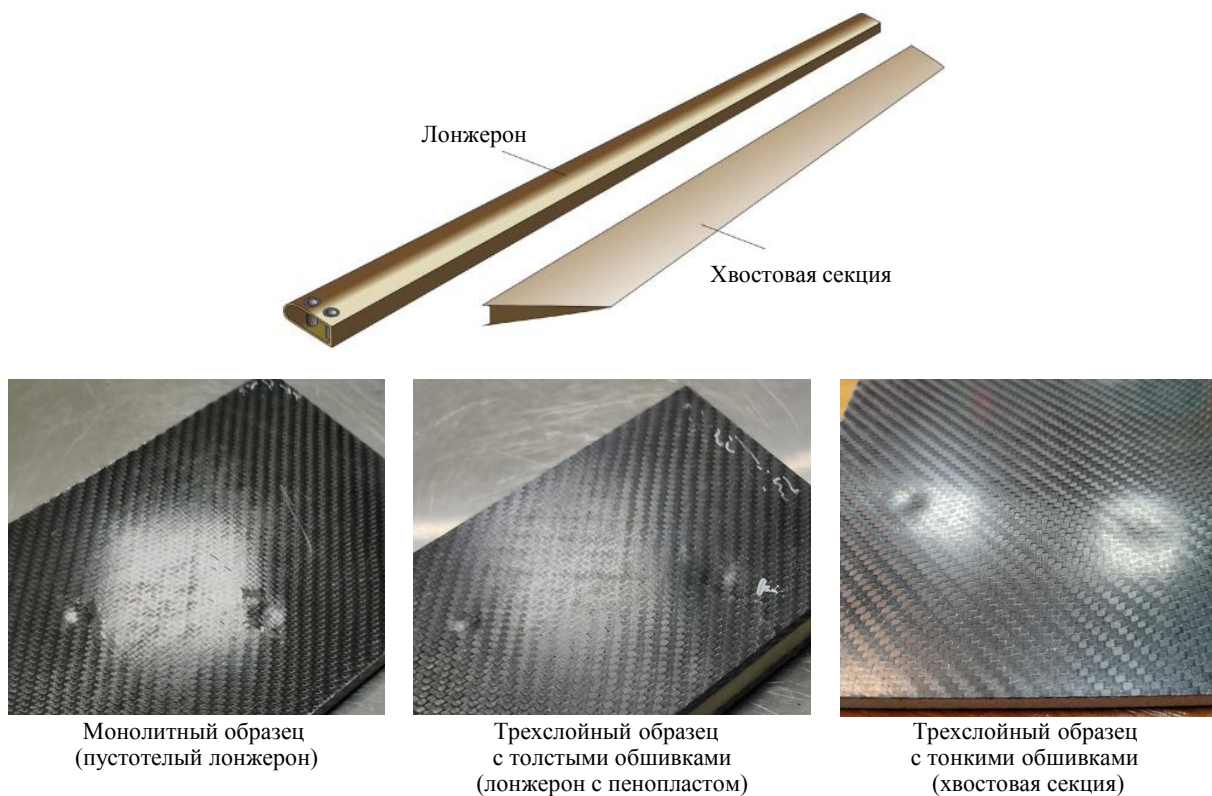


Рис. 1. Образцы, имитирующие монолитную и трехслойную конструкции современной и перспективной лопасти из ПКМ с ударными повреждениями

Подбор и опробование параметров контроля для монолитных конструкций и толстых обшивок трехслойных конструкций осуществляли путем проведения ультразвуковых исследований монолитного образца ручным дефектоскопом OmniScan MX с использованием линейных фазированных решеток при электронном сканировании восьми элементов в каждой из четырех групп с рабочими частотами 5 (1 и 2 группы) и 3,5 МГц (3 и 4 группы) с фокусировкой на середину толщины (1 и 3 группы) и на бесконечность (100 мм – 2 и 4 группы).

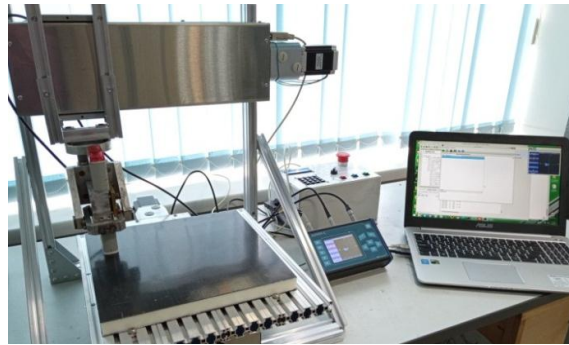


Рис. 2. Многоцелевой автоматизированный комплекс для сканирования образцов

Подбор параметров для импедансного контроля трехслойных конструкций совмещенным датчиком проводили путем подбора резонансной частоты и определением зоны фрикционных шумов на трехслойном образце ручным импедансным дефектоскопом ДАМИ-С09 в комплекте с совмещенным серийным преобразователем ПАДИ-8-02 и модернизированным преобразователем ПАДИ-7 с длинным «полуволновым» звукопроводом. Для построения *S*-сканов по результатам импедансного контроля применяли многоцелевой автоматизированный комплекс для сканирования образцов, созданный в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (рис. 2). Настройку прибора при этом производили из расчета усиления фиксации амплитудных результатов путем помещения в центр комплексной амплитудно-фазовой плоскости дефектоскопа точки с импедансом поверхности, равным нулю.

Результаты и обсуждение

Контроль монолитных зон

При ультразвуковом исследовании монолитных образцов с использованием каждой из групп подобранных параметров контроля проводили сканирование образцов с имитаторами дефектов в виде плоскодонных отражателей диаметром 5 и 10 мм, засверленных на глубину 0,5 мм от поверхности, на середине толщины образца и 0,5 мм относительно донной поверхности. Временную регулировку чувствительности настраивали по плоскодонным отражателям диаметром 10 мм, так как опробованная настройка чувствительности по отражателям диаметром 5 мм давала высокий уровень отраженных эхо-сигналов от внутренней структуры стекло-углепластика с амплитудой, превышающей уровень –6 дБ относительно эхо-сигнала от контрольного отражателя. По результатам сканирования оценены величины мертвых зон, средний уровень структурного шума, появление отражений от внутренней структуры, превышающих пороговый уровень (см. таблицу). На рис. 3 в виде *S*-сканов представлены результаты сканирования монолитного образца с плоскодонными отражателями.

Режимы ультразвукового контроля фазированными решетками

Номер группы параметров контроля	Мертвые зоны, мм	Средний уровень структурного шума, %	Появление отражений от внутренней структуры, превышающих пороговый уровень
1	Ближняя: 0,5; дальняя: 0,8	20	Да
2	Ближняя: 0,5; дальняя: 0,8	20	Да
3	Ближняя: 0,5; дальняя: 0,7	15	Нет
4	Ближняя: 0,5; дальняя: 0,7	16	Нет

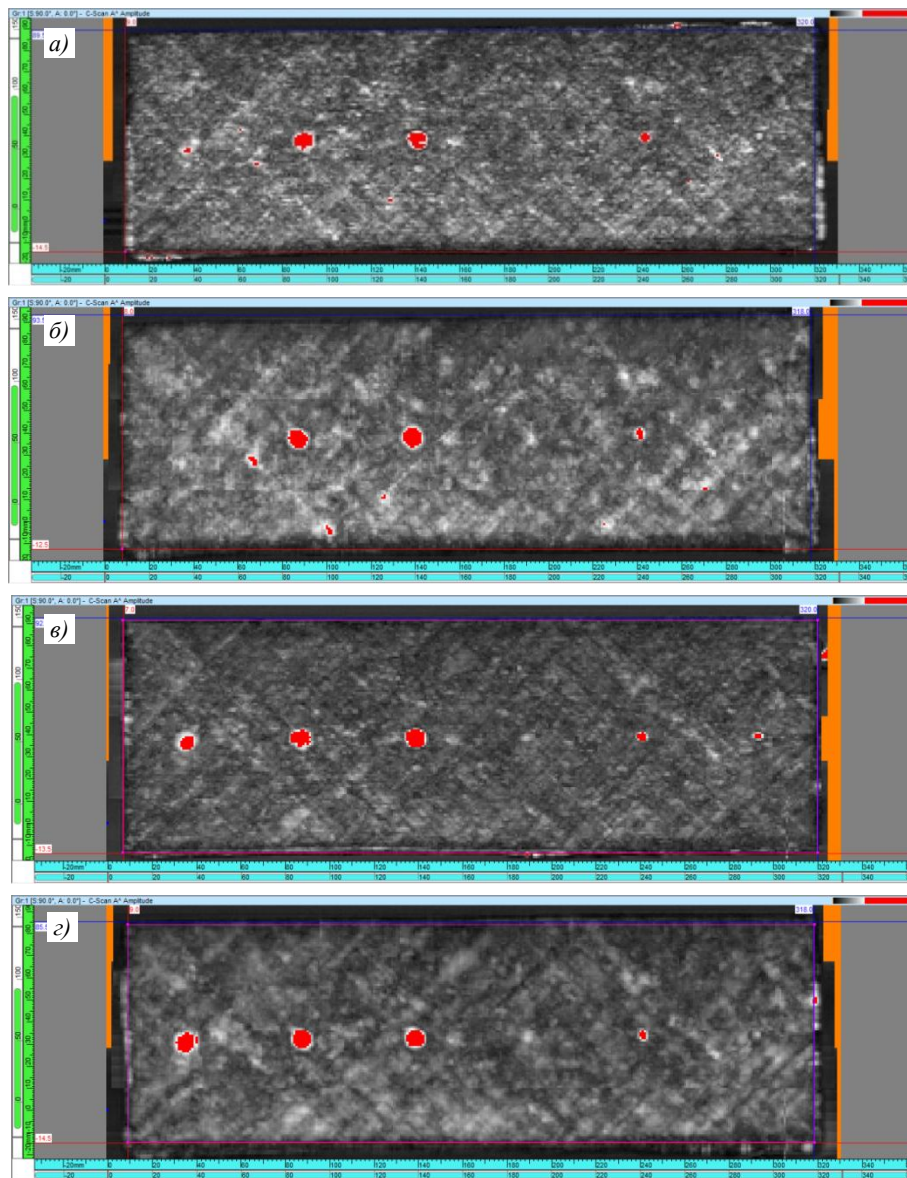


Рис. 3. С-сканы монолитного конструктивно-подобного образца при использовании рабочих групп 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г)

По результатам анализа С-сканов, представленных на рис. 3, и данных таблицы для контроля монолитных зон наиболее подходящими для данного типа ПКМ оказались параметры контроля группы 3. При этом частоту преобразователя можно использовать в диапазоне от 2,25 до 3,5 МГц без увеличения неконтролируемых мертвых зон. Эти параметры в дальнейшем решено использовать при исследовании эксплуатационных дефектов в виде ударных повреждений, полученных в образцах при ударе стальными шариками.

В монолитном образце возможен основной тип эксплуатационного повреждения – ударное повреждение монолитной обшивки в виде множества расслоений и растрескиваний. Для трехслойных образцов характерно несколько типов эксплуатационных повреждений: ударное повреждение монолитной обшивки, отслоение монолитной обшивки от пенозаполнителя и смятие пенозаполнителя. При этом ударное повреждение в обшивке трехслойной конструкции для случая, когда обшивка толщиной $>(2-3)$ мм, лучше обнаруживается с помощью ультразвукового контроля эхо-импульсным методом. Поэтому для дальнейших исследований использовали два типа образцов:

- монолитный образец толщиной 5 мм с нанесенными ударными повреждениями для имитации эксплуатационных повреждений в монолитной конструкции;
- образец трехслойной конструкции с обшивкой толщиной 5 мм с нанесенными ударными повреждениями со стороны монолитной части.

На каждом из образцов проведено сканирование с построением *C*-сканов и последующим анализом площадей ударных повреждений (рис. 4). Эхо-импульсным методом получен *C*-скан, построенный по эхо-сигналам, расположенным между поверхностью ввода и донной поверхностью образца, а зеркально-теневым методом – *C*-скан, построенный по донному сигналу.

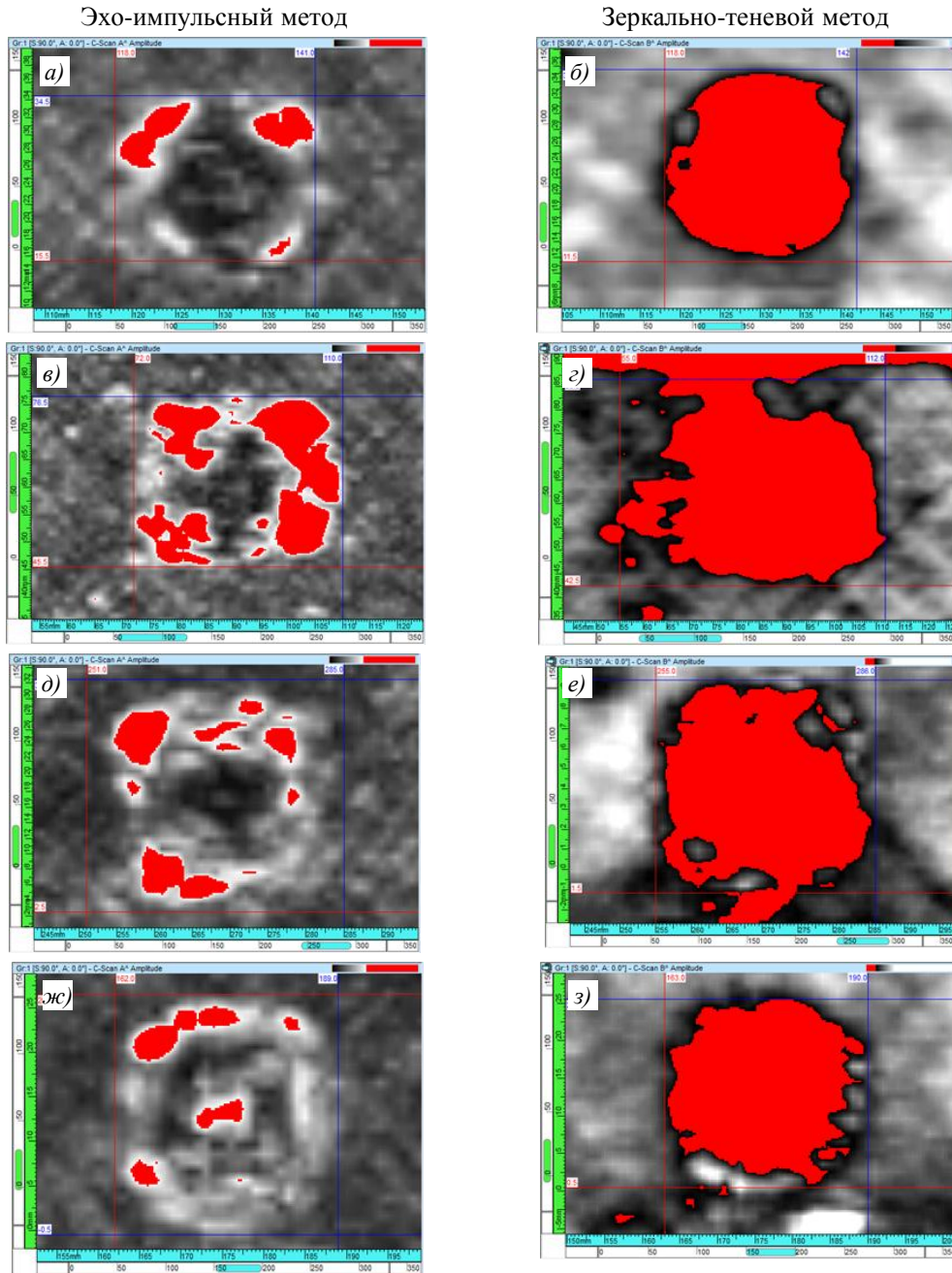


Рис. 4. Участки *C*-сканов с ударными повреждениями 1 (а, б, д, е) и 2 (в, г, ж, з), полученные на монолитном образце (а–г) и образце трехслойной конструкции (д–з)

Как видно из данных рис. 4, выявление ударных повреждений классическим эхо-импульсным методом в монолитных образцах и обшивках трехслойных конструкций затруднено, так как отраженные эхо-сигналы вызывает не вся площадь ударного повреждения, а лишь края, которые по своему характеру являются расслоениями, распространяющимися от центра ударного повреждения. При этом вся площадь ударного повреждения вызывает снижение амплитуды донного эхо-сигнала, поэтому для выявления и определения размеров ударного повреждения более эффективным является зеркально-теневой метод.

Контроль трехслойных зон

При подборе режимов выбор рабочей частоты преобразователя производили на исследуемом образце исходя из критерия близости частоты контроля к резонансной собственной частоте конструкции. Настройку прибора осуществляли в месте, не имеющем видимых глазом производственных дефектов, а также искусственно полученных дефектных зон. В нескольких точках, находящихся в местах отсутствия каких-либо дефектов, проведено сравнение положения маркера текущего значения импеданса с целью выбора точки для настройки. В пределах этой точки осуществляли построение зоны фрикционных шумов, соответствующей бездефектной области. Затем построенную зону фрикционных шумов увеличивали для исключения ложных срабатываний. Расположение маркера текущего значения импеданса на экране прибора вне зарисованной области свидетельствует о наличии дефекта. При сканировании поверхности вокруг остальных точек величина отклонения маркера текущего значения импеданса находилась в пределах зарисованной при настройке зоны, вследствие чего сделан вывод, что настройка проведена в бездефектных местах. Отмечено, что при скорости сканирования >50 мм/с фрикционные шумы начинают вызывать ложные срабатывания автоматической сигнализации о дефекте, так что скорость сканирования должна быть ограничена.

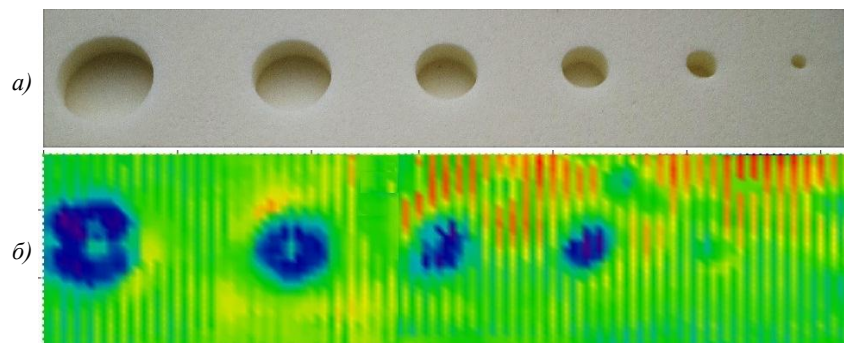


Рис. 5. Внешний вид (а) искусственных дефектов (подфрезеровок пеноблока различных диаметров до склеивания образца) и С-скан (б) амплитудного варианта импедансного контроля образца с искусственными дефектами трехслойной конструкции с тонкими обшивками

С помощью двухкоординатного многоцелевого автоматизированного комплекса для контроля образцов также получены С-сканы импедансного контроля по амплитуде сигнала на амплитудно-фазовой комплексной плоскости. Для амплитудной настройки точку с импедансом поверхности, равным нулю, устанавливали в центр отображаемой на экране дефектоскопа комплексной плоскости для получения нелинейной корреляции «рост импеданса–рост амплитуды сигнала». С подобранными режимами в трехслойном образце с тонкими обшивками, имитирующем хвостовую часть лопастей несущего и рулевого винтов, достоверно выявляются искусственные дефекты диаметрами 10, 15, 20, 25 и 30 мм (рис. 5). Хорошо фиксируется изменение механического импеданса над

искусственными дефектами и их выявление. Искусственный дефект диаметром 5 мм слишком небольшой для достоверного выявления с учетом зашумления зоны фрикционных шумов для исключения ложных срабатываний. В центре больших дефектов можно заметить локальное увеличение амплитуды сигнала, коррелирующей с полным (активным и реактивным) импедансом. Реактивный импеданс состоит из двух составляющих: упругой (обусловленной жесткостью конструкции) и инерционной (обусловленной массой колеблющегося фрагмента обшивки). Обычно влияние инерционной составляющей мало. Однако для тонких колеблющихся мембран над дефектами больших размеров упругая составляющая становится крайне низкой и проявляется влияние инерционной составляющей, что приводит к изменению как суммарного реактивного импеданса, так и полного импеданса, состоящего из активной и реактивной составляющих.

По результатам исследований для контроля трехслойных конструкций с использованием акустического импедансного метода выбран следующий режим: частота контроля на собственной резонансной частоте конструкции при скорости сканирования не более 50 мм/с. Оконтурирование обнаруженных дефектов производили по срабатыванию автоматической сигнализации дефектов. Исследование проводили с обеих сторон образцов. Все эксплуатационные повреждения в виде отслоений обшивок от пены выявлены и околтурены на поверхности с оценкой условных размеров.

В образце трехслойной конструкции с тонкими обшивками помимо эксплуатационных повреждений, полученных путем нанесения ударов стальными шариками диаметром 27 и 36 мм, также изготовлен реалистичный эксплуатационный дефект. Имитация реалистичного ударного повреждения произведена относительно гладким твердым предметом путем нанесения двух ударов разной силы в две точки на расстоянии 15 мм друг от друга ударной поверхностью, представляющей собой фрагмент сферы диаметром ~80 мм.

Видимое промятие обшивки от удара сферой диаметром 27 мм имеет округлую форму диаметром ~8 мм и глубиной ~100 мкм. Промятие от удара сферой диаметром 36 мм имеет округлую форму диаметром ~17 мм и глубиной ~250 мкм. Сферические промятия создают на поверхности достаточно ровные сферические поверхности и хорошо различимые блики при правильном освещении (рис. 6).

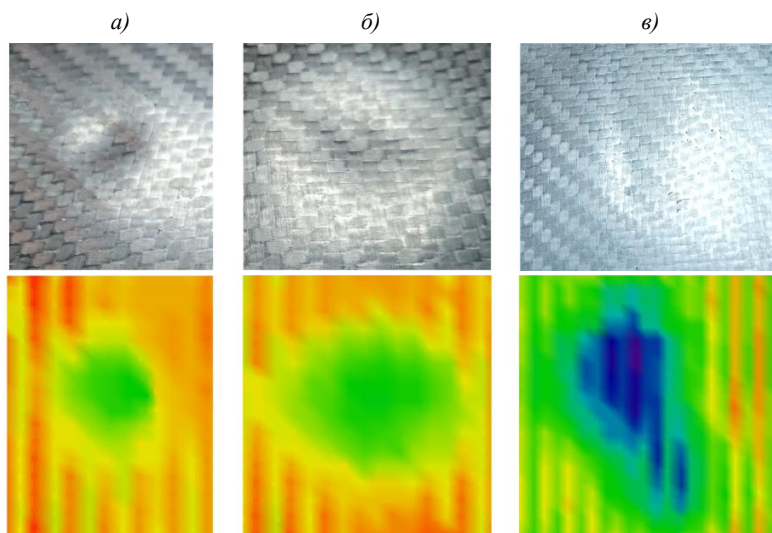


Рис. 6. С-сканы импедансного контроля образца трехслойной конструкции с тонкими обшивками с эксплуатационными ударными дефектами сферой диаметром 27 (а) и 36 мм (б), а также реалистичное ударное повреждение сложной формы (в)

Видимое промятие от реалистичного удара имеет сложную форму с габаритными размерами $\sim(45 \times 25)$ мм и глубиной ~ 250 мкм. Глубина идентична промятию от сферы диаметром 36 мм, но из-за большой площади и неправильной формы вмятины заметить ее очень сложно даже на ощупь и визуально при подборе правильного освещения, что соответствует реалистичному ударному повреждению малозаметному снаружи, но приводящему к смятию пенопласта и потере механической прочности во внутреннем слое.

С помощью двухкоординатного многоцелевого автоматизированного комплекса для контроля образцов получены *S*-сканы импедансного контроля по амплитуде сигнала на амплитудно-фазовой комплексной плоскости образца трехслойной конструкции с тонкими обшивками с эксплуатационными ударными дефектами. Амплитудная настройка произведена аналогично контролю образца с искусственными дефектами. Результаты контроля представлены на рис. 6. Все дефекты успешно выявлены по изменению механического импеданса. Условные размеры дефектов, измеренные по *S*-сканам, соответствуют реальным размерам дефектов.

Заключения

Проведенные исследования конструктивно-подобных образцов из стеклоуглепластика, имитирующих элементы монолитных и трехслойных конструкций вертолетных лопастей, показали, что для неразрушающего контроля лопастей несущего и рулевого винтов вертолета, изготовленных из современных материалов, можно с успехом применять ультразвуковой высокочастотный эхо-импульсный и низкочастотный импедансный методы.

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. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // *Крылья Родины*. 2019. № 7–8. С. 54–58.
5. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
6. 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.
7. Гончаров В.А., Тимошков П.Н., Усачева М.Н. Перспективы производства крупногабаритных авиационных деталей из полимерных композиционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 12 (106). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-55-62.
8. Сидорина А.И. Мультиаксиальные углеродные ткани в изделиях авиационной техники (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 3 (64). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.12.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.

9. Бойчук А.С., Диков И.А., Чертищев В.Ю., Генералов А.С. Определение пористости монолитных зон деталей и агрегатов самолета, изготавливаемых из ПКМ, с применением ультразвукового эхо-импульсного метода // Дефектоскопия. 2019. № 1. С. 3–9. DOI: 10.1134/S01303082190100019.
10. Мурашов В.В. Контроль и диагностика многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами. М.: Спектр, 2016. 244 с.
11. 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.
12. Hopkins D., Neau G., Le Ber L. Advanced phased-array technologies for ultrasonic inspection of complex composite parts // Smart materials, structures & NDT in aerospace. Conference NDT in Canada 2011, 2–4 November, Montreal, Quebec, Canada. URL: https://www.ndt.net/article/ndtcanada2011/papers/109_Hopkins.pdf (дата обращения: 07.12.2022).
13. Демидов А.А., Крупнина О.А., Михайлова Н.А., Косарина Е.И. Исследование образцов из полимерных композиционных материалов методом рентгеновской компьютерной томографии и обработка томограмм с изображением объемной доли пористости // Труды ВИАМ. 2021. № 5 (99). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-105-113.
14. 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.
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. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
5. Raskutin A.E. Russian polymer composite materials of new generation, their exploitation and implementation in advanced developed constructions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
6. 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.
7. Goncharov V.A., Timoshkov P.N., Usacheva M.N. Prospects of the production of large-sized aircraft parts from polymer composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 12 (106), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 01, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-55-62.
8. Sidorina A.I. Multiaxial carbon fabrics in the products of aviation technology (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 01, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.
9. Boychuk A.S., Dikov I.A., Chertishchev V.Yu., Generalov A.S. Determination of the porosity of monolithic zones of aircraft parts and assemblies made from PCM using the ultrasonic echo-pulse method. *Defektoskopiya*, 2019, no. 1, pp. 3–9. DOI: 10.1134/S01303082190100019.

10. Murashov V.V. *Control and diagnostics of multilayer structures made of polymer composite materials by acoustic methods*. Moscow: Spektr, 2016, 244 p.
11. 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.
12. Hopkins D., Neau G., Le Ber L. Advanced phased-array technologies for ultrasonic inspection of complex composite parts. *Smart materials, structures & NDT in aerospace*. Conference NDT in Canada 2011, 2–4 November, Montreal, Quebec, Canada. Available at: https://www.ndt.net/article/ndtcanada2011/papers/109_Hopkins.pdf (accessed: December 07, 2022).
13. Demidov A.A., Krupnina O.A., Mikhaylova N.A., Kosarina E.I. Investigation of polymer composite material samples by x-ray computed tomography and processing of tomograms with the image of the volume fraction of porosity. *Trudy VIAM*, 2021, no. 5 (99), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 01, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-105-113.
14. 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.
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

Антипов Владислав Валерьевич, заместитель генерального директора по науке, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бойчук Александр Сергеевич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чертищев Василий Юрьевич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Яковлева Светлана Ивановна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Баранников Александр Александрович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vladislav V. Antipov, Deputy Director General for Science, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander S. Boichuk, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vasily Yu. Chertishchev, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Svetlana I. Yakovleva, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander A. Barannikov, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 03.04.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 07.04.2023.
The article was submitted 03.04.2023; approved and accepted for publication after reviewing 07.04.2023.