

Научная статья

УДК 620.179

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-111-123

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ РАДИУСНЫХ ЗОН МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА РАДИУСНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ РЕШЕТКОЙ И СПЕЦИАЛЬНОЙ ОПРАВКОЙ

А.С. Бойчук¹, И.А. Диков¹, В.Ю. Чертищев¹, А.С. Генералов¹, М.А. Горбовец¹

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

Аннотация. Статья посвящена неразрушающему контролю радиусных зон монолитных конструкций из углепластика. Авторами предложен способ ручного ультразвукового контроля с помощью радиусной фазированной решетки и специальной оправки. Предложенный способ позволяет проводить неразрушающий контроль радиусных зон с различными радиусами и углами сгиба конструкций с внутренней стороны без погружения объекта контроля в емкость с водой. Способ позволяет выявлять в радиусных зонах плоскостные дефекты типа посторонних включений и пустот диаметром от 3 мм с отношением сигнал/шум более 10 дБ.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, углепластик, радиусные зоны, неразрушающий контроль, ультразвуковой эхо-импульсный метод, фазированные решетки

Для цитирования: Бойчук А.С., Диков И.А., Чертищев В.Ю., Генералов А.С., Горбовец М.А. Ультразвуковой контроль радиусных зон монолитных конструкций из углепластика радиусной фазированной решеткой и специальной оправкой // Труды ВИАМ. 2023. № 5 (123). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-111-123.

Scientific article

ULTRASONIC TESTING OF CFRP MONOLITH STRUCTURES RADIUS ZONES BY RADIUS PHASED ARRAY AND SPECIAL DEVICE

A.S. Boychuk¹, I.A. Dikov¹, V.Yu. Chertishchev¹, A.S. Generalov¹, M.A. Gorbovets¹

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

Abstract. The paper is devoted to nondestructive testing of CFRP monolithic structures radius zones. Manual ultrasonic testing technique by radius phased array and special device is proposed by the authors. Technique allows non-destructive testing of such zones with different radii and bending angles of structures from the inside without testing object immersing in a water container. Technique makes it possible to detect flat defects in radius zones such as extraneous inclusions and voids with diameter from 3 mm and a signal-to-noise ratio of more than 10 dB.

Keywords: fiber reinforced plastics (FRP), carbon fiber-reinforced plastics (CFRP), radius zone, non-destructive testing, ultrasonic pulse-echo method, phased array

For citation: Boychuk A.S., Dikov I.A., Chertishchev V.Yu., Generalov A.S., Gorbovets M.A. Ultrasonic testing of CFRP monolith structures radius zones by radius phased array and special device. *Trudy VIAM*, 2023, no. 5 (123), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-111-123.

Введение

В настоящее время применение полимерных композиционных материалов (ПКМ), в особенности углепластиков, в деталях и конструкциях современной авиационной техники – один из эффективных способов снижения массы планера и обеспечения требуемых упруго-прочностных характеристик конструкций в заданных направлениях. Научными организациями совместно с предприятиями авиационной отрасли проводится большой объем работ по разработке новых ПКМ [1–5], отработке технологий изготовления из них различных деталей и элементов конструкций планера [6–8], а также по проведению различных видов испытаний [9–12]. На каждой из стадий – от разработки нового ПКМ до изготовления и применения его в деталях или конструкциях готового изделия – одним из важных этапов является проведение исследований по контролю качества изготовленной продукции методами неразрушающего контроля.

Как известно, в условиях производства ПКМ имеют место неправильно подобранные режимы формования; нарушения, допускаемые при выкладке слоев препрега и сборке пакета; сбои оборудования при формовании. При эксплуатации изделия из ПКМ постоянно находятся под воздействием механических нагрузок и климатических факторов. Все это приводит к появлению нарушений сплошности (дефектов) в ПКМ, которые могут оказывать влияние на физико-механические и эксплуатационные характеристики изделия. К основным типам дефектов слоистых пластиков можно отнести расслоения, пористость, включения, ударные повреждения.

В настоящее время для проведения неразрушающего контроля изделий из слоистых пластиков в основном применяют акустические, рентгеновские и тепловизионные методы контроля. Для неразрушающего контроля монолитных зон в деталях и конструкциях из ПКМ наибольшее применение находит ультразвуковой эхо-импульсный метод благодаря ряду своих преимуществ, таких как высокая чувствительность контроля (выявление дефектов от 2 мм), односторонний доступ к контролируемой детали и возможность определения глубины расположения дефектов.

Основной сложностью контроля монолитных конструкций из ПКМ ультразвуковым эхо-импульсным методом в настоящее время является проведение контроля зон с радиусными переходами. Основная сложность заключается в первую очередь в создании акустического контакта и обеспечении перпендикулярности ввода ультразвуковых колебаний (это необходимо при контроле слоистых пластиков) относительно радиусной поверхности объекта контроля. На рис. 1 [13] проиллюстрированы некоторые элементы конструкций с радиусными зонами.

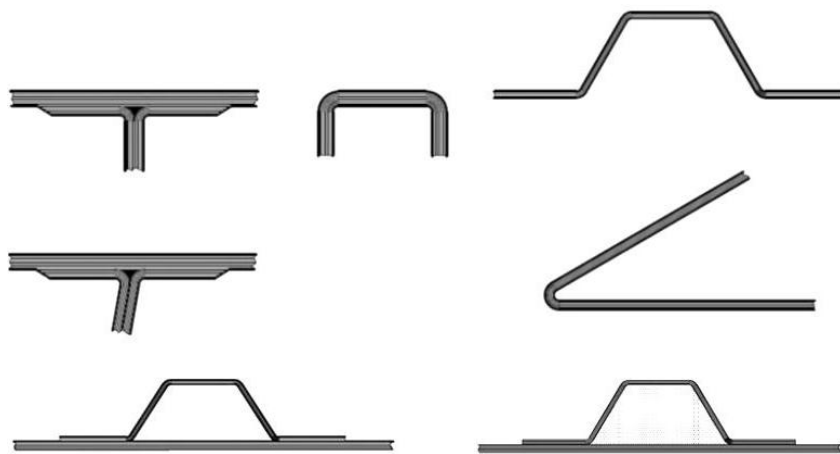


Рис. 1. Типовые элементы конструкций с радиусными зонами

В ультразвуковом неразрушающем контроле в последнее время стали все чаще внедряться ультразвуковые фазированные решетки (ФР), которые представляют собой многоэлементные пьезоэлектрические преобразователи, пьезоэлементы которых могут по-разному размещаться в корпусе преобразователя, тем самым формируя необходимый фронт ультразвуковой волны [14]. При ультразвуковом контроле конструкций из ПКМ наибольшее применение находят линейные ФР со схемой размещения пьезоэлектрических элементов вдоль одной линии [14], которые широко используются при контроле плоских и криволинейных конструкций с относительно небольшой кривизной поверхности [15–19]. Менее распространенными являются радиусные ФР, где пьезоэлементы решетки располагаются по сектору определенного радиуса R (рис. 2), которые используются для проведения контроля радиусных зон.



Рис. 2. Вид радиусных фазированных решеток

Основная сложность при проведении контроля радиусными ФР заключается в создании акустического контакта и обеспечении необходимого расстояния между элементами ФР и поверхностью ввода ультразвуковых волн в контролируемое изделие. В настоящее время уже известно несколько оправок для решения данных задач. Так, в работе [13] описано применение иммерсионной оправки фирмы Olympus для контроля радиусных зон совместно с радиусными ФР. Данная оправка позволяет позиционировать радиусную ФР как на внутренней, так и на внешней поверхности (рис. 3). Однако у такой оправки наблюдаются следующие недостатки:

- необходимость погружения контролируемой детали в емкость с водой (иммерсионный контроль);
- возможность контроля деталей только с углом сгиба 90 градусов.



Рис. 3. Иммерсионная оправка для радиусной фазированной решетки фирмы Olympus

В работе [20] предложено устранить первый недостаток с помощью локальной иммерсионной ванны либо призм из аквалена или полистирола (рис. 4). Однако данные решения не позволяют устранить второй недостаток, а также под каждый радиус R необходимо изготавливать отдельную призму.



Рис. 4. Контроль радиусными фазированными решетками с помощью локальной иммерсионной ванны (а) либо призм из аквалаена (б) или полистирола (в)

В данной статье приведены результаты ультразвуковых исследований конструктивно-подобных образцов (КПО) из углепластика с радиусными зонами при использовании радиусной ФР и специально разработанной оправки, позволяющей проводить ручной контроль радиусных зон различных конструкций из ПКМ без погружения в воду.

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») [21].

Материалы и методы

Для проведения ультразвуковых исследований из углепластика методом автоклавного формования изготовлены КПО, которые имитировали типовые конструкции с радиусными зонами при различных углах сгиба: 90, 120 и 80 градусов. Кроме того, образцы выполняли с разными внутренними радиусами сгиба – от 3 до 7 мм. В образцах создавали искусственные дефекты трех типов:

- из фрагментов фторопластовых пленок толщиной 40 мкм диаметром 3, 4 и 5 мм;
- из пустот, образованных путем закладывания силиконовых вкладок с последующим их удалением после формования диаметром 3, 4 и 5 мм;
- из пакетов, состоящих из двух слоев бумажной салфетки диаметром 3, 4, 5 и 7 мм (далее будет указываться именно этот размер искусственного дефекта данного типа) с толщиной одного слоя от 25 до 40 мкм, заложенных между двумя слоями полиимидного скотча толщиной 50 мкм и диаметром на 1,5–2 мм больше, чем диаметр дефекта из бумажной салфетки.

В качестве оборудования для проведения ультразвуковых исследований использовали ультразвуковой дефектоскоп OmniScan MX с радиусной фазированной решеткой 5CC10.2-16-R1 радиусом $R = 10,2$ мм и датчиком пути Encoder (Olympus NDT). Анализ результатов исследования проводили в программе TomoView Lite Analysis.

Для радиусной ФР разработана модель (рис. 5) и изготовлена экспериментальная оправка для позиционирования и создания акустического контакта между объектом контроля и радиусной ФР.

Оправка предназначена для контроля с внутренней стороны радиусной зоны и работает по принципу *waterbox* как с линейной ФР [22–25]. Основная составляющая конструкции приспособления – локальная иммерсионная ванна, представляющая собой загерметизированный корпус заполненный водой с эластичной мембраной на протовоположном радиусной ФР конце оправки. Немоловажными элементами конструкции оправки являются системы позиционирования радиусной ФР относительно поверхности объекта контроля, поэтому необходимо обеспечить такое расположение ФР относительно радиусной зоны объекта контроля, при котором будет выполняться условие, проиллюстрированное на рис. 6. При этих условиях фронт ультразвуковой волны

радиусной ФР будет распространяться перпендикулярно поверхности ввода (поверхности радиусной зоны), а на экране В-скана дефектоскопа будет наблюдаться равномерный образ эхо-сигналов от поверхности ввода в объект контроля.

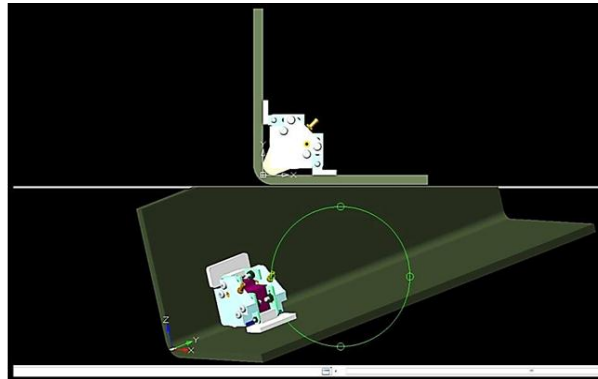


Рис. 5. Разработанная модель оправки для контроля радиусных зон

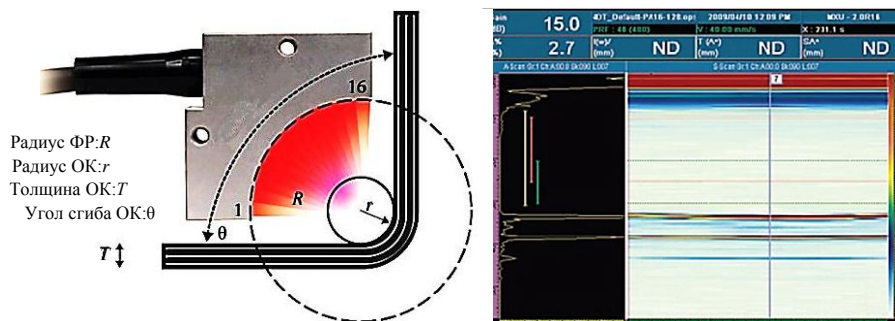


Рис. 6. Необходимое условие расположения радиусной фазированной решетки (ФР) относительно поверхности радиусной зоны объекта контроля (ОК)

Кроме того, данная конструкция должна подстраиваться под различный диапазон радиусов r контролируемой поверхности и под разные углы сгиба θ .

Исследования проводили ультразвуковым эхо-импульсным методом контактным способом. В качестве контактной жидкости между оправкой и поверхностью объекта контроля использовали дистиллированную воду.

Результаты и обсуждение

Контроль радиусных зон с углом сгиба 90 градусов (с внутренней стороны) с разными внутренними радиусами

Основные типы конструкций с радиусными зонами (стрингер, лонжерон и др.) в большинстве случаев имеют угол сгиба 90 градусов. Поэтому первоначально исследования с разработанной оправкой и радиусной ФР проводили на образцах с таким углом сгиба. Исследования проводили на КПО стрингерной панели и заготовок для испытания на изгиб изогнутой балки. Настройку чувствительности дефектоскопа осуществляли по фрагментам фторопластовой пленки – искусственному дефекту первого типа диаметром 5 мм, заложенному в КПО № 1 толщиной 6,8 мм и радиусом сгиба внутренней поверхности 6,5 мм. Временную регулировку чувствительности (ВРЧ) устанавливали таким образом, чтобы амплитуда эхо-сигналов от искусственных дефектов в виде фрагментов фторопластовой пленки составляла $80 \pm 10\%$. На рис. 7 в виде А-, В- и С-сканов представлены результаты сканирования КПО № 1 без использования фокусировки по глубине. В табл. 1 представлены результаты замеров отношений максимальных амплитуд эхо-сигналов от искусственных дефектов к амплитуде эхо-сигналов структурного шума в КПО № 1.

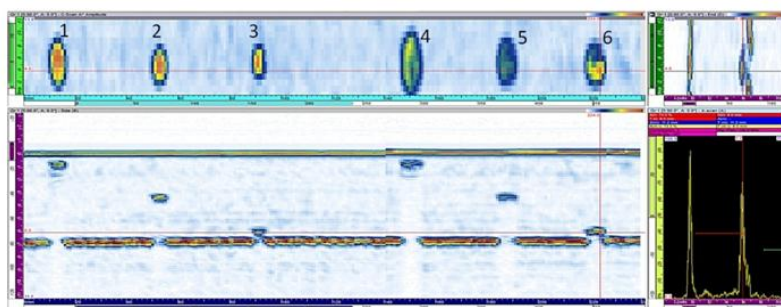


Рис. 7. А-, В- и С-сканы при сканировании конструктивно-подобного образца № 1

Таблица 1

Результаты замеров отношений максимальных амплитуд эхо-сигналов от искусственных дефектов диаметром 5 мм к амплитуде эхо-сигналов структурного шума в конструктивно-подобном образце № 1

Условный номер дефекта	Глубина залегания дефекта по показаниям дефектоскопа, мм	Отношение максимальной амплитуды эхо-сигнала от дефекта к амплитуде эхо-сигналов структурного шума, дБ
<i>Искусственные дефекты первого типа</i>		
1	0,8	19,8
2	3,4	19,4
3	6,1	19,3
<i>Искусственные дефекты третьего типа</i>		
4	0,8	16,8
5	3,4	14,2
6	6,1	18,1

По результатам, приведенным на рис. 7 и в табл. 1, можно сделать следующие выводы:

- искусственные дефекты первого типа при сканировании выявляются так же стабильно как и в процессе настройки ВРЧ (в статике);
- искусственные дефекты третьего типа выявляются хуже дефектов первого типа, но с достаточным отношением «сигнал/шум», чтобы быть обнаруженными как при настройке чувствительности по искусственным дефектам третьего типа, так и при настройке по искусственным дефектам первого типа;
- равномерность поверхностного сигнала свидетельствует о хорошем акустическом контакте и правильном позиционировании радиусной ФР относительно радиусной поверхности КПО № 1.

При настройке на КПО № 1 по искусственным дефектам первого типа просканировано еще два КПО:

- КПО № 2 толщиной 6,8 мм, с внутренним радиусом 6,5 мм и с искусственными дефектами второго и третьего типов;
- КПО № 3 стрингерной панели с радиусами поверхностей ввода 3, 5 и 7 мм и искусственными дефектами первого, второго и третьего типов.

Систему позиционирования в ручную подстраивали под каждый радиус, при этом в настройке дефектоскопа менялась только «задержка в призме», так как менялся путь по воде от элементов решетки до поверхности ввода ультразвуковой волны в объект контроля. Результаты сканирования КПО № 2 и № 3 в виде А-, В- и С-сканов представлены на рис. 8 и 9. Результаты замеров отношений максимальных амплитуд эхо-сигналов от искусственных дефектов к амплитуде эхо-сигналов структурного шума представлены в табл. 2 и 3.

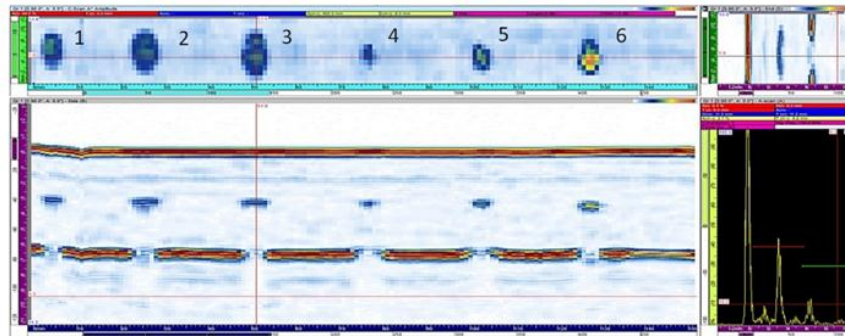


Рис. 8. А-, В- и С-сканы при сканировании конструктивно-подобного образца № 2

Таблица 2

Результаты замеров отношений максимальных амплитуд эхо-сигналов от искусственных дефектов к амплитуде эхо-сигналов структурного шума в конструктивно-подобном образце № 2

Условный номер дефекта	Диаметр искусственно-го дефекта, мм	Глубина залегания дефекта по показани-ям дефектоскопа, мм	Отношение максимальной амплитуды эхо-сигнала от дефекта к амплитуде эхо-сигналов структурного шума, дБ
<i>Искусственные дефекты третьего типа</i>			
1	3	3,1	14,0
2	4	3,1	13,4
3	5	3,2	13,8
<i>Искусственные дефекты второго типа</i>			
4	3	3,4	12,1
5	4	3,4	14,4
6	5	3,5	19,2

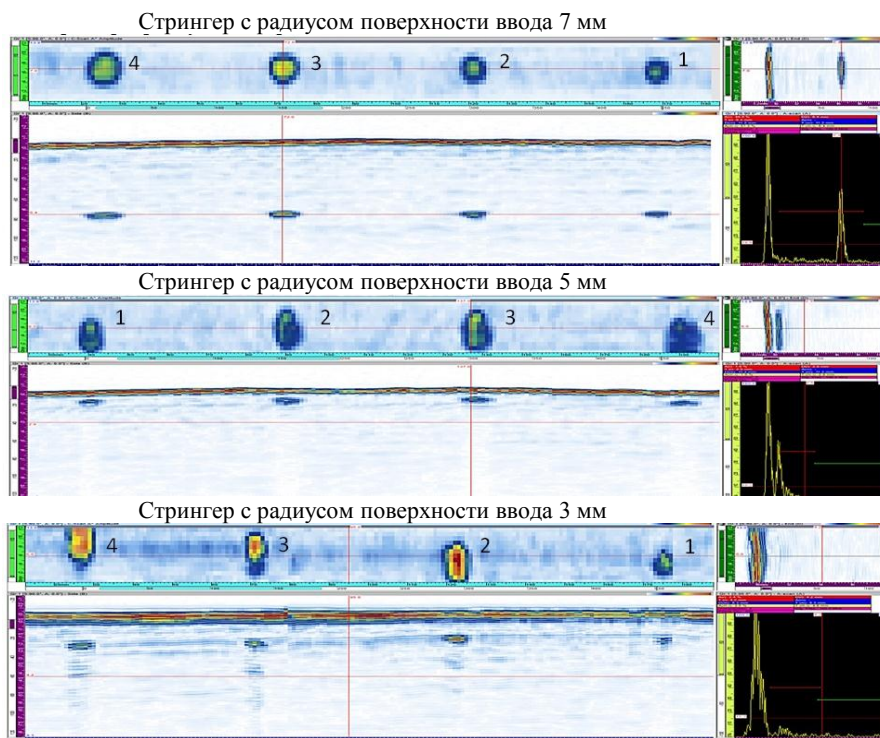


Рис. 9. А-, В- и С-сканы при сканировании конструктивно-подобного образца № 3

**Результаты замеров отношений максимальных амплитуд эхо-сигналов
от искусственных дефектов к амплитуде эхо-сигналов
структурного шума в конструктивно-подобном образце № 3**

Условный номер дефекта	Диаметр искусственного дефекта, мм	Глубина залегания дефекта по показаниям дефектоскопа, мм	Отношение максимальной амплитуды эхо-сигнала от дефекта к амплитуде эхо-сигналов структурного шума, дБ
<i>Стрингер с радиусом поверхности ввода 6,4 мм и искусственным дефектом третьего типа</i>			
1	3	6,2	11,2
2	4	6,5	11,9
3	5	6,4	13,3
4	7	6,4	12,4
<i>Стрингер с радиусом поверхности ввода 5 мм и искусственным дефектом третьего типа</i>			
1	3	0,8	12,9
2	4	0,9	13,0
3	5	0,9	15,0
4	7	0,9	11,6
<i>Стрингер с радиусом поверхности ввода 3 мм и искусственным дефектом первого типа</i>			
1	3	1,8	8,4
2	4	1,8	13,9
3	5	2,0	13,5
4	7	2,0	13,5

Как видно из результатов исследований, представленных на рис. 8, 9 и в табл. 2, 3, радиусной ФР с разработанной оправкой возможно проводить контроль радиусных зон с радиусами поверхности ввода от 3 до 7 мм за счет гибкости подстройки используемого приспособления. Из данных, полученных по отношению «сигнал/шум», представленных в табл. 2 и 3, в КПО № 2 и № 3 разные типы искусственных дефектов выявляются при настройке на отражатели в виде искусственных дефектов первого типа. Следует отметить, что некоторые дефекты (пустоты) получены неидеальной плоской формы, но тем не менее все равно выявляются.

*Контроль радиусных зон с углом сгиба,
отличающимся от 90 градусов (с внутренней стороны)*

Помимо конструкций с радиусными переходами с углами сгиба 90 градусов, очень часто встречаются конструкции, имеющие радиусные зоны с углом сгиба, несколько отличающимся от 90 градусов. Разработанная оправка для радиусной ФР позволяет подстраиваться под контроль таких зон благодаря имеющейся системе позиционирования. Для проверки работоспособности оправки проведены исследования на КПО № 4 и № 5 с радиусными зонами с углами сгиба 80 и 120 градусов и радиусом сгиба 6,5 мм. На рис. 10 и 11 представлены результаты сканирования КПО № 4 и № 5 в виде А-, В- и С-сканов. Проведены также замеры отношений максимальных амплитуд эхо-сигналов от искусственных дефектов к амплитуде эхо-сигналов структурного шума, результаты которых представлены в табл. 4 и 5. При сканировании КПО № 4 в зонах расположения искусственных дефектов обнаружена и локальная пористость.

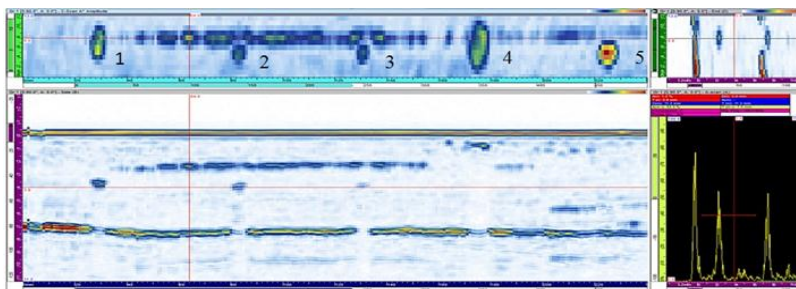


Рис. 10. А-, В- и С-сканы при сканировании конструктивно-подобного образца № 4

Таблица 4

Результаты замеров отношений максимальных амплитуд эхо-сигналов от искусственных дефектов третьего типа к амплитуде эхо-сигналов структурного шума в конструктивно-подобном образце № 4

Условный номер дефекта	Диаметр искусственного дефекта, мм	Глубина залегания дефекта по показаниям дефектоскопа, мм	Отношение максимальной амплитуды эхо-сигнала от дефекта к амплитуде эхо-сигналов структурного шума, дБ
1	3	3,4	13,2
2	4	3,6	10,3
3	5	3,2	10,1
4	5	0,7	12,3
5	5	5,9	17,7

Примечание. В зоне дефектов 2 и 3 в образце наблюдалась локальная пористость на глубине 2,5 мм с эхо-сигналами амплитудой 40 %.

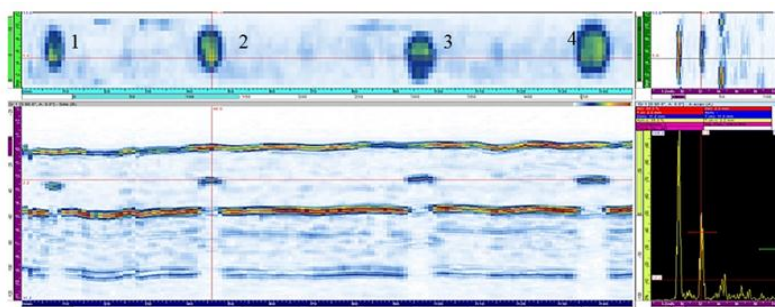


Рис. 11. А-, В- и С-сканы при сканировании конструктивно-подобного образца № 5

Таблица 5

Результаты замеров отношений максимальных амплитуд эхо-сигналов от искусственных дефектов третьего типа к амплитуде эхо-сигналов структурного шума в конструктивно-подобном образце № 5

Условный номер дефекта	Размер искусственного дефекта, мм	Глубина залегания дефекта по показаниям дефектоскопа, мм	Отношение максимальной амплитуды эхо-сигнала от дефекта к амплитуде эхо-сигналов структурного шума, дБ
1	3	2,6	12,4
2	4	2,4	13,4
3	5	2,4	12,6
4	7	2,4	12,9

Результаты проведенных исследований КПО № 4 и № 5 показывают хорошую выявляемость заложенных в КПО искусственных дефектов. Ровность образа поверхностного эхо-сигнала свидетельствует о правильном позиционировании радиусной ФР с оправкой относительно поверхности радиусной зоны КПО с углами сгиба, отличающимися от 90 градусов. Даже несмотря на небольшую волнистость поверхности КПО № 5, что заметно по образу поверхностного эхо-сигнала на В-скане (рис. 11), удается обеспечивать приемлемое качество акустического контакта.

Заключения

Проведены ультразвуковые исследования КПО из углепластика с радиусными зонами ручным контактным способом с использованием радиусной ФР и разработанной экспериментальной оправки для обеспечения акустического контакта между ФР и радиусной поверхностью ввода ультразвуковых волн в объект контроля. Результаты

исследований показали возможность ультразвукового контроля радиусных зон в конструкциях из ПКМ с помощью разработанной системы (радиусная ФР с оправкой) с выявлением дефектов типа посторонних включений и полостей с размером от 3 мм и более. Есть возможность контролировать конструкции с радиусными зонами как с углами сгиба 90 градусов, так и с углами, отличающимися от 90 градусов, а также с различными радиусами сгиба. Несомненным преимуществом контроля с использованием радиусной ФР и разработанной оправки является отсутствие необходимости погружать объект контроля в воду, а также гибкость подстройки позиционирования радиусной ФР относительно поверхности ввода ультразвуковых колебаний в объект контроля с разными радиусами сгиба.

Несмотря на полученные положительные результаты исследований, присутствуют и небольшие сложности при контроле радиусных зон с использованием разработанной оправки. Одной из них является не до конца оптимизированное регулирование системы позиционирования, т. е. приходится затрачивать некоторое время для подстройки системы позиционирования под нужные углы и радиусы сгиба. Ко второй можно отнести обеспечение стабильности акустического контакта между поверхностью объекта контроля и оправкой. Тем не менее все эти проблемы могут быть решены путем усовершенствования конструкции.

Список источников

1. 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.
2. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // *Крылья Родины*. 2019. № 7–8. С. 54–58.
3. Сорокин А.Е., Иванов М.С., Сагомонова В.А. Термопластичные полимерные композиционные материалы на основе полиэфирэфиркетонов различных производителей // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 05.12.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-41-50.
4. 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.
5. Славин А.В., Силкин А.Н., Гриневич Д.В., Яковлев Н.О. Композиционные материалы с объемно-армированной структурой (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 8 (114). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-113-122.
6. 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.
7. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор). Часть 1. Автоматизированная выкладка лент (ATL) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.12.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
8. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор). Часть 2. Автоматизированная выкладка волокон (AFP) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 3 (64). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.12.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-117-127.
9. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. II. Развитие методов исследования ранних стадий старения // *Деформация и разрушение материалов*. 2020. № 1. С. 15–21.

10. Баринов Д.Я. К выбору оптимальной толщины образца углепластика при измерениях теплопроводности импульсным методом // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.12.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-131-140.
11. Гуляев А.И., Медведев П.Н., Сбитнева С.В., Петров А.А. Экспериментальное исследование по оценке адгезионной прочности «волокно–матрица» в углепластиках на основе эпоксидного связующего, модифицированного полисульфоном // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 4 (57). С. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-80-86.
12. Велигодский И.М., Коваль Т.В., Курносков А.О., Мараховский П.С. Исследование климатической стойкости образцов стеклопластика после натурной экспозиции в различных климатических зонах // *Труды ВИАМ*. 2022. № 11 (117). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-134-148.
13. Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С., Славин А.В. Ультразвуковой контроль радиусных зон конструкций из ПКМ (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 8 (102). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-92-103.
14. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline. Quebec: R/D Tech inc., 2004. 368 p.
15. Бойчук А.С., Генералов А.С., Далин М.А., Диков И.А. Контроль монолитных деталей и конструкций авиационной техники, изготавливаемых из ПКМ, ультразвуковым методом неразрушающего контроля с использованием фазированных решеток // Сб. трудов X Всерос. конф. «Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли» (ТестМат). М.: ВИАМ, 2018. С. 18–31. URL: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1063.pdf> (дата обращения: 06.12.2022).
16. Hopkins D., Neau G., Le Ber L. Advanced phased-array technologies for ultrasonic inspection of complex composite parts // *Smart Materials, Structures & NDT in Aerospace*. Montreal; Quebec, 2011. URL: https://www.ndt.net/article/ndtcanada2011/papers/109_Hopkins.pdf (дата обращения: 07.12.2022).
17. Lamarre A. Ultrasonic phased-array for aircraft maintenance. Amsterdam, 2009. URL: <https://ndt.aero/images/docs/UTPAfor%20maintenance.pdf> (дата обращения: 07.12.2022).
18. Brotherhood C.J., Drinkwater B.W., Freemantle R.J. An ultrasonic wheel-array sensor and its application to aerospace structures // *Insight*. 2003. Vol. 45. No. 11. P. 729–734. URL: http://https://www.researchgate.net/publication/239411267_An_ultrasonic_wheel-array_sensor_and_its_application_to_aerospace_structures (дата обращения: 07.12.2022).
19. Nageswaran C., Bird C.R. Phased array scanning of artificial and impact damage in carbon fibre reinforced plastic (CFRP) // *Insight*. 2006. Vol. 48. No. 3. P. 155–159. URL: https://www.ndt.net/article/insight/papers/insi_48_3_155.pdf (дата обращения: 07.12.2022).
20. Бойчук А.С. Разработка технологий неразрушающего контроля монолитных конструкций из углепластика с использованием ультразвуковых антенных решеток: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 203 с.
21. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 1. С. 7–17.
22. Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С. Особенности УЗК-конструкций из углепластика с выпуклой поверхностью с использованием фазированных решеток и оправок типа Waterbox // *Контроль. Диагностика*. 2019. № 3. С. 14–21.
23. Rau E., Grauvogl E., Manzke H., Cyr P. Ultrasonic Phased Array Testing of Complex Aircraft Structures // *ECNDT*. 2006. Tu. 1.1.2. P. 1–17. URL: <https://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.1.1.2.pdf> (дата обращения: 07.12.2022).
24. Moles M. Portable Phased Array Applications // 3rd MENDT – Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition. Bahrain, Manama, 2005. URL: <https://www.ndt.net/article/mendt2005/pdf/20.pdf> (дата обращения: 08.12.2022).
25. Kass D., Nelligan T., Henjes E. The Evolution and Benefits of Phased Array Technology for the Every Day Inspector // 9th European Conference on NDT. Berlin, 2006. P. 1–6. URL: <https://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/P198.pdf> (дата обращения: 08.12.2022).

Referenes

1. 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.
2. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
3. Sorokin A.E., Ivanov M.S., Sagomonova V.A. Thermoplastic polymer composite materials based on polyetheretherketones of various manufacturers. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 05, 2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2022-0-1-41-50.
4. 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.
5. Slavin A.V., Silkin A.N., Grinevich D.V., Yakovlev N.O. Composite materials with a 3D-reinforced structure (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 8 (114), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 01, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-113-122.
6. 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.
7. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. The development of automated laying: from the beginning to our days (review). Part 1. Automated Tape Laying (ATL). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 02, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
8. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. The development of automated laying: from the beginning to our days (review). Part 2. Automated Fiber Placement (AFP). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 02, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-117-127.
9. Kablov E.N., Startsev V.O. Climatic aging of polymer composite materials for aviation purposes. II. Development of methods for studying the early stages of aging. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2020, no. 1, pp. 15–21.
10. Barinov D.Ya. About selection of optimal thickness of the carbon sample for thermal conductivity measurements using laser flash method. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 05, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-131-140.
11. Gulyaev A.I., Medvedev P.N., Sbitneva S.V., Petrov A.A. Experimental research of «fiber-matrix» adhesion strength in carbon fiber epoxy/polysulphone composite. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-80-86.
12. Veligodskiy I.M., Koval T.V., Kurnosov A.O., Marakhovskiy P.S. Study of resistance of glass fiber reinforced plastic to natural weathering in different climatic conditions. *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 06, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-134-148.
13. Boychuk A.S., Dikov I.A., Generalov A.S., Slavin A.V. FRP structures radius zones ultrasonic testing (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 8 (102), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 06, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-92-103.
14. *Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline*. Quebec: R/D Tech inc., 2004, 368 p.
15. Boychuk A.S., Generalov A.S., Dalin M.A., Dikov I.A. Inspection of monolithic parts and structures of aviation equipment made from PCM by ultrasonic non-destructive testing using phased arrays. *Proceedings of the X All-Rus. conf. "The main trends, directions and prospects for the development of non-destructive testing methods in the aerospace industry" (TestMat)*. Moscow: VIAM, 2018, pp. 18–31. Available at: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1063.pdf> (accessed: December 06, 2022).

16. Hopkins D., Neau G., Le Ber L. Advanced phased-array technologies for ultrasonic inspection of complex composite parts. *Smart Materials, Structures & NDT in Aerospace*. Montreal; Quebec, 2011. Available at: https://www.ndt.net/article/ndtcanada2011/papers/109_Hopkins.pdf (accessed: December 07, 2022).
17. Lamarre A. *Ultrasonic phased-array for aircraft maintenance*. Amsterdam, 2009. Available at: <https://ndt.aero/images/docs/UTPAfor%20maintenance.pdf> (accessed: December 07, 2022).
18. Brotherhood C.J., Drinkwater B.W., Freemantle R.J. An ultrasonic wheel-array sensor and its application to aerospace structures. *Insight*, 2003, vol. 45, no. 11, pp. 729–734. Available at: http://https://www.researchgate.net/publication/239411267_An_ultrasonic_wheel-array_sensor_and_its_application_to_aerospace_structures (accessed: December 07, 2022).
19. Nageswaran C., Bird C.R. Phased array scanning of artificial and impact damage in carbon fibre reinforced plastic (CFRP). *Insight*, 2006, vol. 48, no. 3, pp. 155–159. Available at: https://www.ndt.net/article/insight/papers/insi_48_3_155.pdf (accessed: December 07, 2022).
20. Boychuk A.S. *Development of technologies for non-destructive testing of monolithic structures made of carbon fiber using ultrasonic antenna arrays*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2016, 203 p.
21. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 5, pp. 7–17.
22. Boychuk A.S., Dikov I.A., Generalov A.S. Features of ultrasonic structures made of carbon fiber with a convex surface using phased arrays and Waterbox mandrels. *Kontrol. Diagnostika*, 2019, no. 3, pp. 14–21.
23. Rau E., Grauvogl E., Manzke H., Cyr P. *Ultrasonic Phased Array Testing of Complex Aircraft Structures*. Available at: <https://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.1.1.2.pdf> (accessed: December 07, 2022).
24. Moles M. Portable Phased Array Applications. *3rd MENDT – Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition*. Bahrain, Manama, 2005. Available at: <https://www.ndt.net/article/mendt2005/pdf/20.pdf> (accessed: December 08, 2022).
25. Kass D., Nelligan T., Henjes E. The Evolution and Benefits of Phased Array Technology for the Every Day Inspector. *9th European Conference on NDT*. Berlin, 2006, pp. 1–6. Available at: <https://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/P198.pdf> (accessed: December 08, 2022).

Информация об авторах

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

Диков Иван Алексеевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чертисцев Василий Юрьевич, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Генералов Александр Сергеевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Горбовец Михаил Александрович, начальник Испытательного центра, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Ivan A. Dikov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Alexander S. Generalov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 23.01.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 25.01.2023.

The article was submitted 23.01.2023; approved and accepted for publication after reviewing 25.01.2023.