

УДК 620.179.16

А.С. Бойчук<sup>1</sup>, И.А. Диков<sup>1</sup>, А.С. Генералов<sup>1</sup>, А.В. Славин<sup>1</sup>

## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ РАДИУСНЫХ ЗОН КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-92-103

*Приведен обзор способов ультразвукового неразрушающего контроля радиусных зон конструкций из полимерных композиционных материалов. Показано, что для решения этой задачи в настоящее время можно использовать как одноэлементные пьезоэлектрические преобразователи, так и фазированные решетки. Как с одним, так и с другим типом преобразователей следует применять специальные средства для позиционирования и создания акустического контакта. Ультразвуковой контроль с использованием описанных средств позволяет выявлять дефекты в радиусных зонах размером до 6 мм.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, контроль радиусов, неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль, фазированные решетки, эхо-импульсный метод.

A.S. Boychuk<sup>1</sup>, I.A. Dikov<sup>1</sup>, A.S. Generalov<sup>1</sup>, A.V. Slavin<sup>1</sup>

## FRP STRUCTURES RADIUS ZONES ULTRASONIC TESTING (review)

*The review of FRP structures radius zones ultrasonic non-destructive testing techniques is given in the paper. It is shown that both single-element piezoelectric transducers and phased arrays can currently be used to solve this problem. It is necessary to use special tools for positioning and creating an acoustic contact with both types of transducers. Ultrasonic testing using the described tools allows detecting defects in radius zones up to 6 mm in size.*

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

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

### Введение

Разработка полимерных композиционных материалов (ПКМ) нового поколения [1–5] и технологий изготовления из них деталей и конструкций авиационной и космической техники [6, 7] – одна из приоритетных задач развития материаловедения в настоящее время. Немаловажной задачей при этом является обеспечение контроля качества выпускаемой продукции методами неразрушающего контроля.

Данная работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.3. «Методы неразрушающих исследований и контроля» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [8].

В последнее время перечень изготавливаемых из ПКМ деталей и элементов конструкций летательных аппаратов только увеличивается. Широкое применение ПКМ в конструкции авиационной и космической техники неразрывно связано с уникальными свойствами данного класса материалов. Известно, что основное преимущество при

использовании ПКМ – это снижение массы готового изделия и обеспечение необходимых упруго-прочностных характеристик в заданных направлениях. Как правило, требуемых прочностных свойств в том или ином направлении достигают благодаря применению различных укладок волокна в изготавливаемой конструкции. Несмотря на то, что новые ПКМ и технологии их формования разрабатываются в течение уже нескольких десятилетий, в процессе изготовления имеет место появление несплошностей (дефектов), таких как поры, непропитка, расслоения и посторонние включения.

В настоящее время наибольшее применение для контроля качества продукции из ПКМ находят акустические методы неразрушающего контроля. С помощью таких акустических методов, как эхо-импульсный, теневой, импедансный, ударно-акустический и др., с легкостью решаются задачи выявления нарушений сплошности типа пористости, расслоений, включений, непроклея и др., которые свойственны для деталей и конструкций, изготавливаемых из ПКМ. Наибольшую сложность вызывает контроль интегральных конструкций и конструкций с одинарной и двойной кривизной поверхности. Сложность, как правило, заключается в том, что ультразвуковые колебания при контроле слоистых пластиков, следует вводить перпендикулярно укладке слоев, из которых «набирается» необходимая толщина конструкции, поскольку большинство дефектов образуется именно между слоями. Так, например, ручной контроль радиусных зон как с вогнутой, так и с выпуклой сторон затруднен или невозможен с использованием традиционных одноэлементных преобразователей. Типовые элементы конструкций с радиусными зонами представлены на рис. 1.

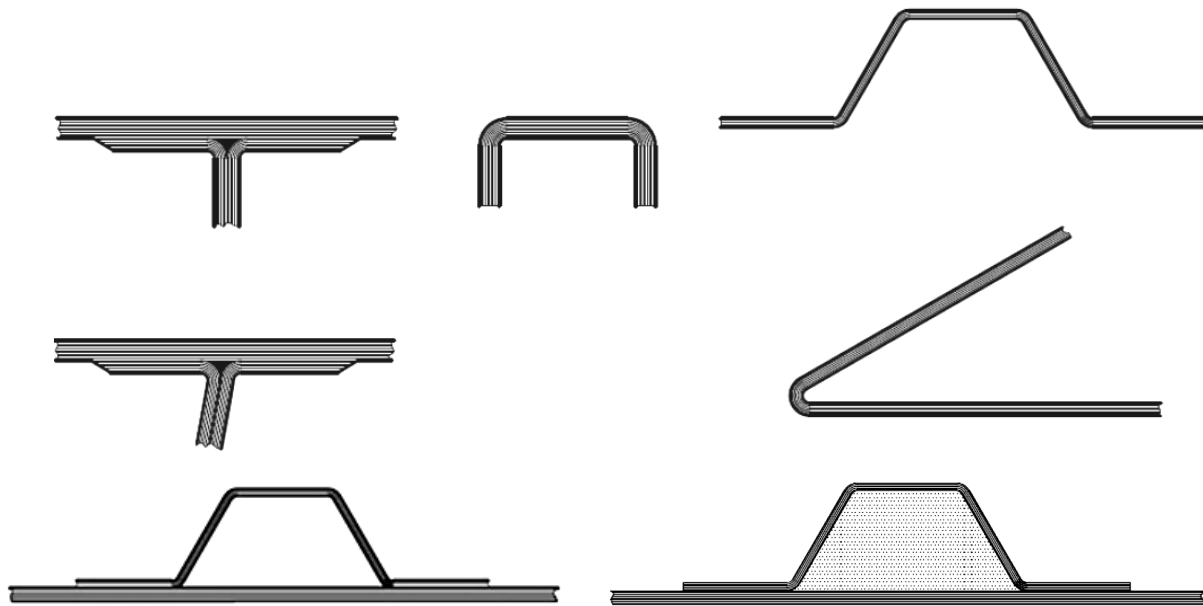


Рис. 1. Типовые элементы конструкций с радиусными зонами

В последнее время в неразрушающем контроле широко используются ультразвуковые датчики на фазированных решетках (ФР), пьезоэлектрические элементы которых могут быть размещены по разным схемам – тем самым формируется необходимый фронт волны. Фронт волны также можно регулировать путем изменения временных задержек при излучении ультразвуковых импульсов на каждом пьезоэлектрическом элементе. На рис. 2 показаны схемы размещения пьезоэлектрических элементов в датчиках на ФР.

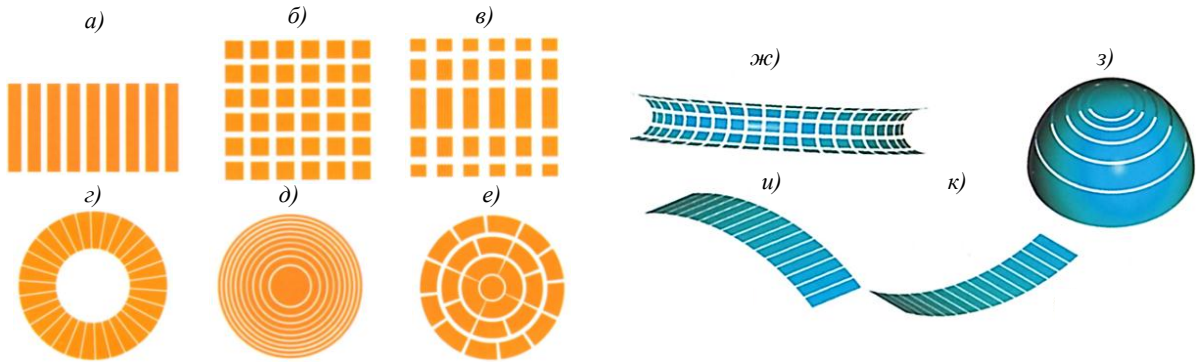


Рис. 2. Схемы размещения пьезоэлектрических элементов в датчиках на фазированных решетках: *a* – линейная; *б* – двумерная матричная; *в* – полуторамерная матричная; *г* – одномерная круглая; *д* – концентрическая; *е* – двумерная концентрическая; *ж* – тороидальная; *з* – концентрическая вогнутая; *и* – линейная вогнутая; *к* – линейная выпуклая

В настоящее время наибольшее применение при ультразвуковом контроле конструкций из ПКМ находят ФР с линейной схемой размещения пьезоэлектрических элементов в датчике, их еще называют линейными фазированными решетками. Как правило, данные ФР используют при контроле плоских и криволинейных конструкций с достаточно большим радиусом кривизны поверхности (от 300 мм и более).

Менее распространенными являются секторные ФР, где пьезоэлектрические элементы решетки расположены по сектору определенного радиуса  $R$ . Данные типы решеток предназначены для контроля радиусных зон (рис. 3).



Рис. 3. Использование секторных фазированных решеток при контроле радиусных зон

Для контроля криволинейных поверхностей стали выпускать гибкие ФР, которые при определенной адаптации могут способствовать проведению контроля радиусных зон, причем как с выпуклой, так и с вогнутой стороны.

**Неразрушающий контроль радиусных зон конструкций из ПКМ с использованием одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей**

В настоящее время наиболее простым и распространенным решением для контроля ПКМ является применение ультразвукового контроля с использованием одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП).

В работе [9] в качестве примера использования одноэлементных ПЭП при контроле радиусных зон описан способ ультразвукового контроля радиусных зон винглета крыла самолета (рис. 4, *a*), в котором доступ к радиусным зонам ограничен из-за их конструктивных особенностей. Предложено использовать специальную конструкцию оправки для одноэлементного ПЭП на магнитах (рис. 4, *б*). В статье речь идет о контроле радиусных зон с внутренней стороны винглета, к которым ограничен доступ

из-за конструктивных особенностей данной детали. Это происходит ввиду того, что кессон винглета изготавливают методом RTM (Resin Transfer Moulding – метод инъекции ненасыщенной полиэфирной смолы в закрытую форму) за один технологический цикл, и при длине 1500 мм высота самой узкой стороны составляет всего 28 мм.

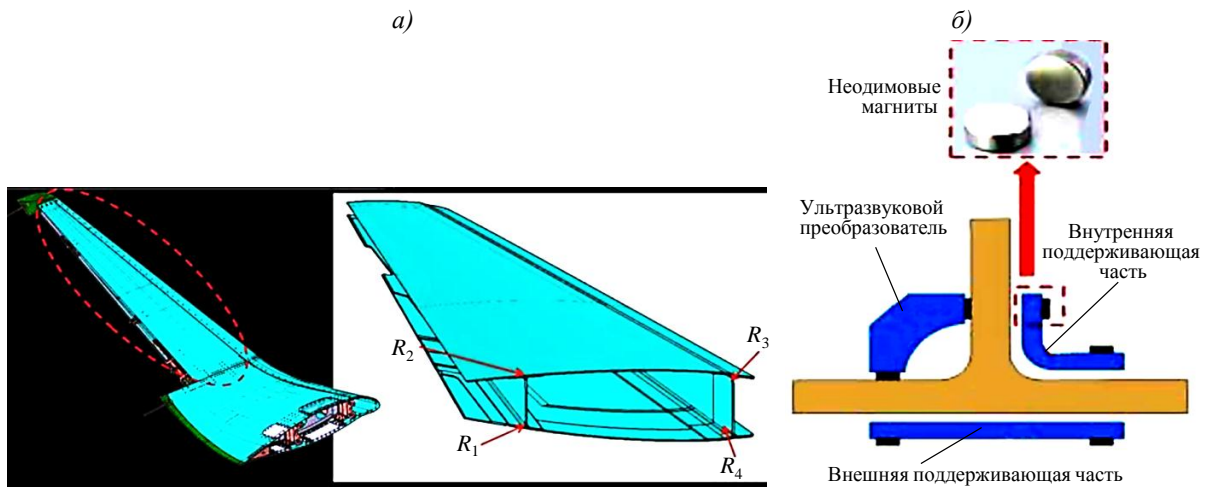


Рис. 4. Модель винглета крыла самолета и оправки для проведения контроля радиусных зон

Различные части предлагаемой оправки разработаны и затем изготовлены с помощью метода селективного лазерного сплавления (SLS) из полиамида PA12. Вместе с частями оправки для ультразвукового контроля изготовлены фрагменты лонжеронов с различными радиусами для геометрической проверки системы. На рис. 5 показано положение оправки для ультразвукового контроля на изготовленном фрагменте лонжерона. Путем незначительных регулировок проводится подгонка изготовленной системы для проведения дальнейшего контроля.



Рис. 5. Расположение специальной оправки для ультразвукового контроля на фрагменте лонжерона

Поскольку обнаруживающая способность контролируемой системы (преобразователь + оснастка) должна быть определена до выполнения контроля на полном кессоне, из его фрагмента для проведения исследований вырезаны образцы с радиусными зонами.

На этих образцах изготовлены искусственные дефекты в виде плоскдонных отверстий диаметром 6 мм. Сверления сделаны на различные глубины с плоским дном в следующих положениях (рис. 6):

- 0,4 мм от поверхности внутреннего радиуса;
- в середину толщины пластика;
- 0,4 мм от противоположной поверхности.

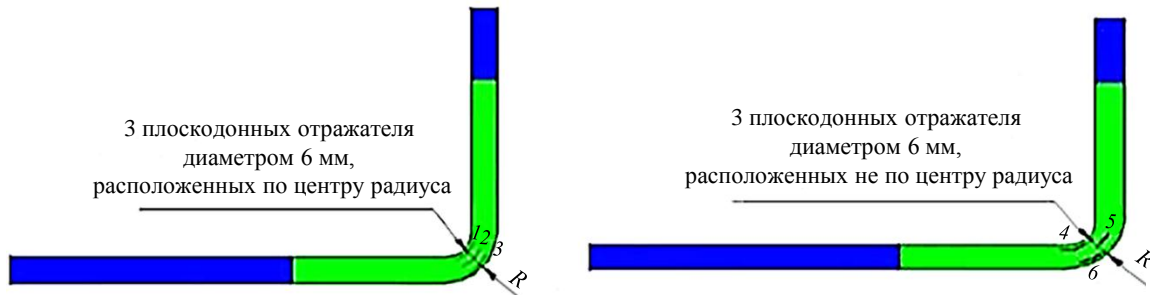


Рис. 6. Схематическое отображение засверловки плоскодонных отражателей в образцах

Для каждого радиуса сверлили по три отверстия, расположенные на средней линии (позиции 1, 2 и 3), и по три отверстия, расположенные под разными углами (дефекты 4, 5 и 6).

Ультразвуковые исследования проводили ультразвуковым эхо-импульсным методом с использованием дефектоскопа OmniScan MX фирмы Olympus NDT и одноэлементного ПЭП марки V201-RM с рабочей частотой 5 МГц и диаметром пьезопластины 6 мм. По результатам ультразвуковых исследований выявлено, что искусственные дефекты могут быть обнаружены, по крайней мере, в одном из трех экспериментальных положений. На рис. 7, а показан А-скан, полученный в бездефектной зоне. Поскольку геометрические особенности конструкции не позволяют наблюдать донный эхо-сигнал, эхо-сигналы от дефектов обнаруживаются после эхо-сигнала от поверхности ввода. На рис. 7, б представлен А-скан, когда система ультразвукового контроля располагается над третьим дефектом (расположен по центру радиуса – см. рис. 6), а на рис. 7, в – А-скан шестого дефекта (расположен не по центру радиуса – см. рис. 6).

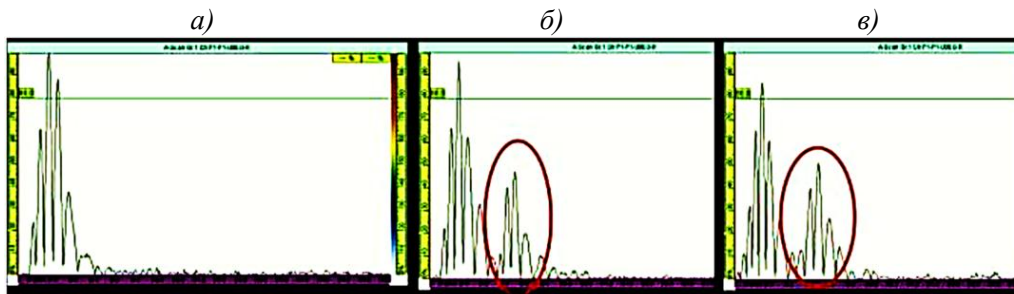


Рис. 7. Результаты ультразвуковых исследований образцов с отражателями

Впоследствии разработанная система опробована при контроле внутренних радиусов в пяти серийных узлах кессона и показала работоспособность для ультразвукового контроля радиусов в условиях производства. При этом контролируемые детали погружали в воду для обеспечения акустического контакта.

Интересное решение для контроля радиусных зон в хэт-образных стрингерах предложено фирмой Creo Dynamics [10]. Разработчики демонстрируют контроль образца хэт-образного стрингера из углепластика толщиной 2 мм с искусственными расслоениями с помощью применения решетки, состоящей из 10 контактных одноэлементных преобразователей, и специального программного обеспечения. Данное решение основано на акусто-ультразвуковой томографии и может быть использовано для тонкостенных изделий из ПКМ.

На рис. 8 показано выявление расслоения в радиусной зоне хэт-образного стрингера с помощью разработанной системы.

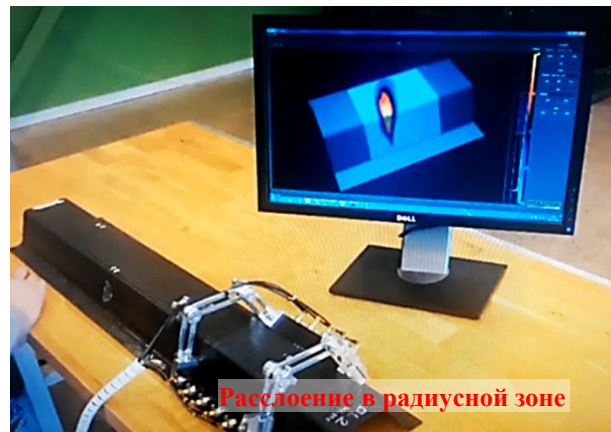


Рис. 8. Обнаружение расслоения в радиусной зоне

Применение одноэлементных преобразователей с помощью теневого метода при контроле радиусных зон продемонстрировано в работе [11]. Авторы предлагают для проведения ультразвукового контроля радиусных зон лонжерона в качестве оборудования использовать самый простой ультразвуковой дефектоскоп с низкочастотными ультразвуковыми преобразователями с воздушным вводом. Применяли дефектоскоп Epoch 4 фирмы Olympus NDT с ультразвуковыми преобразователями Ultrac с рабочей частотой 200 кГц. Контроль проводили ультразвуковым амплитудным теневым методом.

Размещение преобразователей на специальной оправке типа скоба относительно образца в радиусной зоне показано на рис. 9, а. Излучение и прием ультразвуковых импульсов от преобразователей осуществлялись специальным генератором и предусилителем Panametrics 5058. На рис. 9, б видно, что прошедший сигнал – довольно хороший по отношению к шумам и его можно использовать при обнаружении дефектов в радиусной зоне.



Рис. 9. Размещение преобразователей на специальной оправке в радиусной зоне и демонстрация прошедшего ультразвукового сигнала

### Неразрушающий контроль радиусных зон конструкций из ПКМ с использованием фазированных решеток

Учеными из Канады и Германии в работе [12] показан способ выявления дефектов в радиусных зонах стрингеров стрингерных панелей с использованием линейной ФР методом секторного сканирования в пределах изменения углов ввода  $\pm 20$  градусов.

Угол падения луча на объект контроля (ОК) регулировали путем изменения временных задержек генерирования ультразвуковых импульсов на пьезоэлектрических элементах.

Данное решение полезно при ультразвуковом контроле стрингерных панелей со стороны обшивки, когда ограничен доступ со стороны радиусной зоны.

На рис. 10 показано обнаружение дефекта в радиусной зоне стрингера. Дефект на S-скане идентифицируется благодаря уменьшению образа эхо-сигнала от донной поверхности и появлению эхо-сигнала от дефекта.

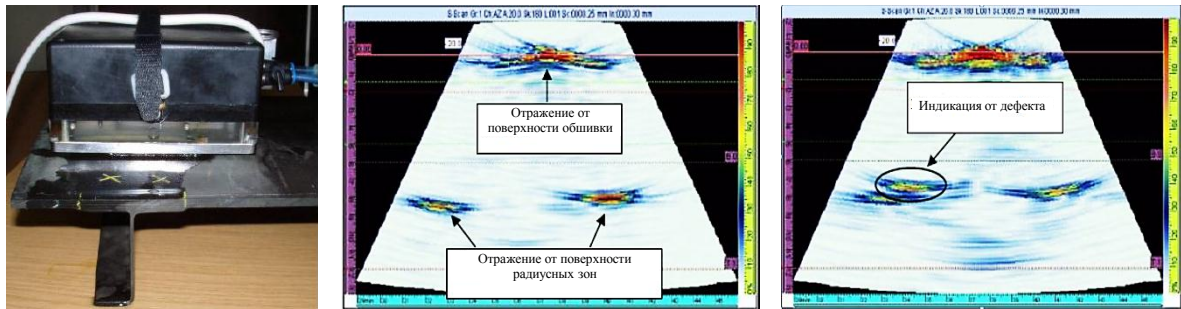


Рис. 10. Обнаружение дефектов в радиусной зоне линейной фазированной решетки

В работе [13] показано, что довольно эффективным способом ультразвукового контроля радиусных зон со стороны вогнутой поверхности является применение секторных ФР и специальной оправки, представляющей собой локальную иммерсионную ванну с системой непрерывной подачи воды. Для исследований в работе использовали секторную ФР марки SSC10.2-16-R1 фирмы Olympus NDT с рабочей частотой 5 МГц и локальную иммерсионную ванну (рис. 11) с размерами, подобранными в соответствии со схемой, представленной на рис. 12 (где  $L_{xФР}$  и  $L_{yФР}$  – габаритные размеры ФР;  $L_{xопр}$  и  $L_{yопр}$  – геометрические размеры стенок оправки;  $W_{изм}$  – измеренное по экрану дефектоскопа значение ширины дефекта;  $W_{ист}$  – истинное значение ширины дефекта;  $R$  – радиус фазированной решетки;  $r$  – внешний радиус контролируемой зоны;  $d$  – измеренная глубина залегания дефекта;  $T$  – толщина стрингера).



Рис. 11. Секторная фазированная решетка с локальной иммерсионной ванной

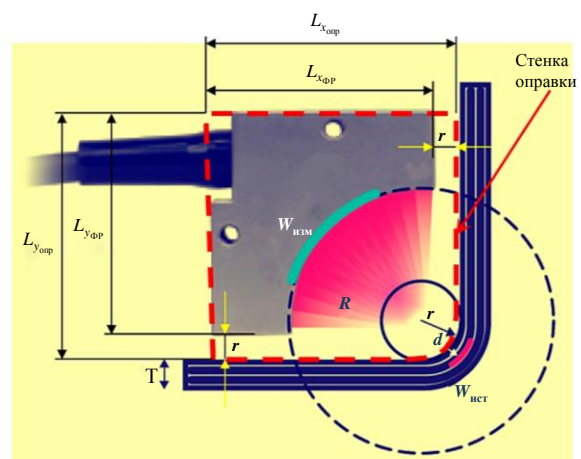


Рис. 12. Требования к размерам локальной иммерсионной ванны

При использовании линейного электронного сканирования по 4 элемента в группе удавалось выявлять искусственные дефекты в виде фрагментов технологических пленок площадью  $0,5 \text{ см}^2$ , имитирующие расслоения слоев препрега углепластика, а также дефекты в виде объемных термостойких вкладок, имитирующих дефекты жгута.

Применение секторных антенных решеток (АР) для контроля радиусных зон представлено в работе [14]. Для создания акустического контакта между секторной АР продольных волн M9062 4.0V0C@X10CL (ООО «Акустические контрольные системы», г. Москва) и радиусной зоной стрингерной панели из углепластика использовали обычную призму из полистирола (рис. 13) с такими же размерами, как указано на рис. 12. Призму в этом случае приклеивали к поверхности АР. Данное решение для контроля радиусных зон монолитных конструкций из углепластика с использованием дефектоскопа-томографа A1550 IntroVisor предложено ООО «Акустические контрольные системы».

Разработчики воспользовались тем, что радиус перехода полки стрингера в ребро в контролируемой конструкции оставался постоянным и наиболее ровным благодаря использованию специализированной оснастки при формовании. Что касается приклеивания призмы к АР, то разработчиками реализована возможность быстрой и оперативной смены АР с призмой с контактным радиусом, соответствующим радиусу контролируемой поверхности из углепластика. Качество акустического контакта между АР и поверхностью ОК можно оценивать по наличию отражения от стенок ребра стрингера и/или от поверхности обшивки. На рис. 14 на В-скане отображено выявление фторопластовой пленки диаметром 8 мм, заложеной между слоями препрега, образующими стрингер. Силиконовые вставки также выявляются при использовании секторной АР с призмой, несмотря на то, что амплитуда отраженных эхо-сигналов от них меньше, чем при отражении от фторопластовой пленки.



Рис. 13. Секторная антенная решетка с призмой из полистирола

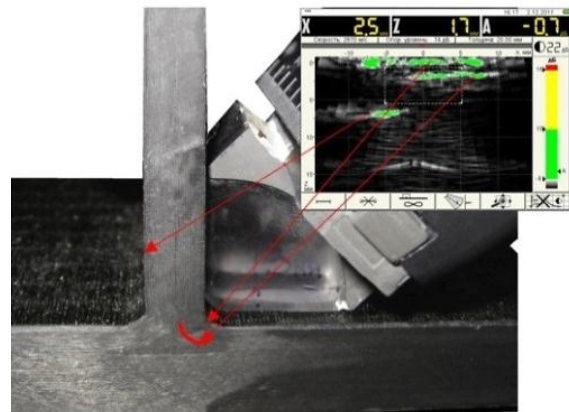


Рис. 14. В-скан на экране дефектоскопа-томографа A1550 IntroVisor при контроле радиусной зоны Т-образного соединения стрингера с обшивкой

Довольно перспективное решение для контроля радиусов с использованием секторных ФР представлено в работе [15], где рассмотрено применение секторной ФР в корпусе локальной иммерсионной ванны (waterbox) с эластичной мембраной для контроля радиусной зоны стрингерной панели с вогнутой поверхностью (рис. 15). Данная система применяется с датчиком пути или может быть смонтирована на сканер.



Рис. 15. Секторная фазированная решетка в корпусе локальной иммерсионной ванны

Еще один пример применения секторной ФР для контроля радиусных зон представлен в работе [16]. Для создания акустического контакта между секторной ФР и радиусной зоной Т-образного соединения стрингера с обшивкой предложена конструкция оправки со специальной вставкой из эластомерного материала. Необходимо решить задачу контроля радиусных зон без погружения контролируемой детали в воду, а также с минимальным расходом контактной жидкости. Здесь обращено внимание на эластомерный материал аквален, который обладает акустическими свойствами, близкими к акустическим свойствам воды. Для разработки конструкции оправки в качестве аналога взята оправка для линейной ФР со вставкой в призму фрагмента аквалена. В качестве основы оправки изготовлены две стенки из оргстекла толщиной 4 мм, которые специальными болтами с обеих сторон прикручивали к ФР. Геометрические размеры оправки выбирали в соответствии с условием, представленным на рис. 12. Образовавшееся таким образом пространство между секторной ФР и поверхностью радиусной зоны стрингера (акустическая задержка) заполнялось акваленом требуемого размера, который зажимали между стенками оправки (рис. 16).



Рис. 16. Оправка для секторной фазированной решетки со вставкой из аквалена

Решение оказалось довольно простым, но очень эффективным. Расход воды при смачивании поверхности ОК оказался таким же, как и при использовании линейных ФР с призмами, а благодаря эластичности аквалена обеспечивается надежный акустический контакт между ФР и ОК. При присоединении кодировщика к стенке оправки контроль можно проводить с использованием С-скана и дальнейшим анализом результатов контроля на персональном компьютере.

На рис. 17 представлены результаты выявления искусственных несплошностей в виде фторопластовых пленок диаметром 8 мм и вставок из RTV-силикона длиной 7 и 9 мм, заложенных в радиусную зону Т-образного соединения стрингера с обшивкой.

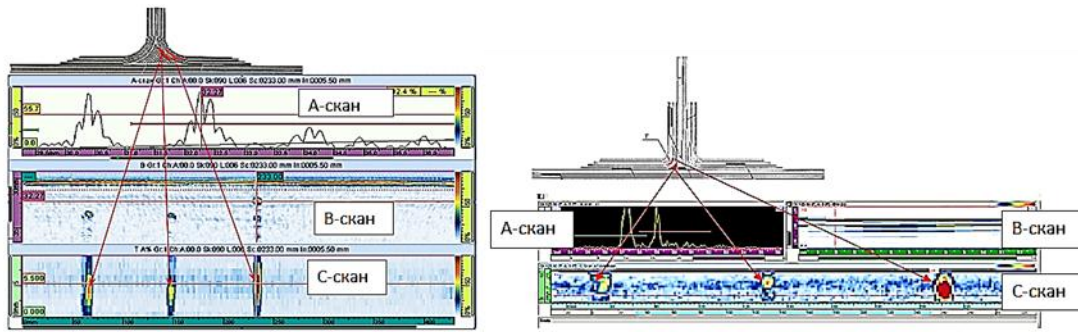


Рис. 17. Результаты контроля радиусных зон стрингерных панелей с использованием секторной фазированной решетки и оправки с акваленом

Как видно из полученных результатов, все типы заложенных искусственных несплошностей с помощью секторной ФР 5CC10.2-16-R1 и оправки с акваленом выявлены, а результаты контроля радиусных зон дают наглядное представление о размерах выявленных дефектов.

### Неразрушающий контроль радиусных зон конструкций из ПКМ с использованием гибких фазированных решеток

Гибкие ФР являются одними из перспективных решений при контроле радиусных зон и в целом деталей с криволинейной поверхностью. В настоящее время несколько фирм занимается разработкой и производством таких ФР (рис. 18), несомненным достоинством которых является возможность адаптироваться к радиусным поверхностям с различными радиусами кривизны без дополнительных приспособлений.

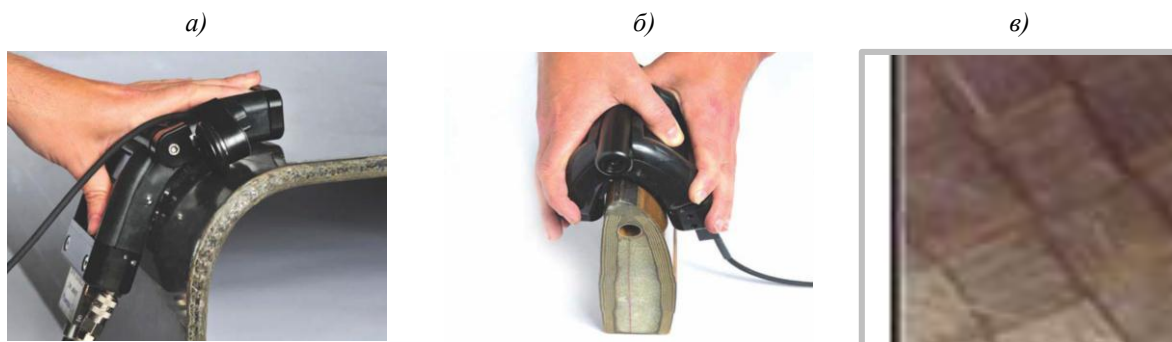


Рис. 18. Гибкие фазированные решетки для контроля радиусных зон конструкций из ПКМ

Так, например, фирма Phoenix ISL [17] изготавливает гибкие ФР в специальных корпусах (wrapIt), которые, по заявлениям производителей, позволяют проводить контроль как по вогнутым, так и по выпуклым поверхностям (рис. 18, а, б). Тем не менее минимальный радиус изгиба контролируемых изделий такими ФР ограничен частотой и размерами последних. Типичное применение wrapIt включает изогнутые композитные изделия, такие как лонжероны крыла, крылья, стрингеры, механизация крыла, лопасти винтов, аэродинамические компоненты автомобилей и др. В центре wrapIt действительно гибкая ультразвуковая ФР, работающая и на вогнутых, и на выпуклых поверхностях. Адаптируемый резиновый корпус функционально ограничивает гибкость для защиты ФР от потенциального повреждения. Каждый корпус подходит для того, чтобы осмотреть диапазон радиусов без любой механической требуемой корректировки. WrapIt включает пластмассовый корпус для обеспечения стабильного и гладкого движения при контроле.

Еще одним производителем гибких ФР является фирма Olympus NDT [18], выпускающая гибкие ФР как без корпуса (рис. 18, в), так и в специальном корпусе.

### Заключения

Проведен обзор существующих способов неразрушающего контроля радиусных зон конструкций из ПКМ, применяемых в авиационной и космической технике. Показано, что в настоящее время для контроля радиусных зон можно применять ультразвуковой контроль с использованием одноэлементных ПЭП и ФР.

Проанализированы существующие способы контроля. Сделан вывод, что нет универсального способа и соответствующей техники, с помощью которой можно контролировать радиусную зону в той или иной конструкции из ПКМ. Какие-то решения подходят только для контроля по вогнутой поверхности, какие-то – только по выпуклой.

Появившиеся гибкие ФР являются перспективным решением, но в настоящее время они еще не до конца освоены, поэтому пока сложно определить границы их применимости, а также возможность автоматизации контроля с использованием таких датчиков. Наиболее практичными являются секторные ФР, но под каждый тип конструкции приходится подбирать или изготавливать новое приспособление для создания акустического контакта и фокусировки ультразвукового луча.

### Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
3. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
4. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Макрушин К.В., Рысин Л.С. Полимерные композиционные материалы для изготовления пылезащитного устройства перспективного вертолетного двигателя // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). С. 58–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63.
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. Тимошков П.Н. Оборудование и материалы для технологии автоматизированной выкладки препрегов // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 2 (41). С. 35–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-35-39.
7. Иванов Н.В., Гуревич Я.М., Хасков М.А., Акмеев А.Р. Изучение режима отверждения связующего ВСЭ-34 и его влияния на механические свойства // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 2 (47). С. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-50-55.
8. 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.
9. González S., Herrera Á., Fernández R. etc. Ad-hoc solutions for ultrasonic inspection of radii in closed composite Structures // 11th International Symposium «NDT in Aerospace». Paris, 2019. URL: [https://www.ndt.net/article/aero2019/papers/fp\\_fri2b3\\_s\\_gonzalez.pdf](https://www.ndt.net/article/aero2019/papers/fp_fri2b3_s_gonzalez.pdf) (дата обращения: 06.05.2021).
10. We developed a unique solution for real-time detection of defects in composite plates using acousto-ultrasonic tomography (AUT) // Creo Dynamics. 2021. URL: <https://creodynamics.com/portfolio-posts/acousto-ultrasonic-tomography> (дата обращения: 07.05.2021).
11. Kite A.H. Nondestructive evaluation of a carbon fiber wing spar using air-coupled ultrasound // Retrospective Theses and Dissertations. 2007. URL: <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=16040&context=rtd> (дата обращения: 06.05.2021).

12. Rau E., Grauvogl E., Manzke H. etc. Ultrasonic Phased Array Testing of Complex Aircraft Structures // ECNDT. 2006. Tu. 1.1.2. URL: <https://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.1.1.2.pdf> (дата обращения: 07.05.2021).
13. Бойчук А.С., Генералов А.С., Далин М.А., Степанов А.В. Неразрушающий контроль технологических нарушений сплошности Т-образной зоны интегральной конструкции из ПКМ с использованием ультразвуковых фазированных решеток // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 10. С. 38–44.
14. Бойчук А.С. Разработка технологий неразрушающего контроля монолитных конструкций из углепластика с использованием ультразвуковых антенных решеток: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 203 с.
15. Lamarre A. Ultrasonic phased-array and eddy current array as approved methods for aircraft maintenance // Aerospace Testing Conference. Hamburg, 2006. URL: <https://ndt.aero/images/docs/UTPAfor%20maintenance.pdf> (дата обращения: 07.05.2021).
16. 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 // ТестМат. Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли: сб. материалов X Всерос. конф. (Москва, 9 февр. 2018 г.). М.: ВИАМ, 2018. С. 18–31. URL: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1063.pdf> (дата обращения: 07.05.2021).
17. Flexible Phased Array Scanning Tool // Phoenix ISL. 2021. URL: <https://www.phoenixisl.com/product/wrapit> (дата обращения: 07.05.2021).
18. Flexible Ultrasonic Phased-Array Probe for Complex Shape Inspection // Olympus Corporation. 2021. URL: <https://www.olympus-ims.com/en/applications/flexible-ultrasonic-phased-array-probe-for-complex-shape-inspection> (дата обращения: 07.05.2021).