

А.С. Бойчук¹, А.В. Степанов¹, Е.И. Косарина¹, А.С. Генералов¹

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ ДЕТАЛЕЙ И КОНСТРУКЦИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ, ИЗГОТОВЛЯЕМЫХ ИЗ ПКМ

Ультразвуковые методы неразрушающего контроля – одни из основных методов при контроле качества деталей и конструкций авиационной техники, изготавливаемых из полимерных композиционных материалов, а применение ультразвуковых фазированных решеток позволяет увеличить чувствительность, производительность, полноту и достоверность результатов контроля. Описаны основные принципы работы фазированных решеток и результаты, достигнутые с их использованием при ультразвуковом контроле углепластиков.

Ключевые слова: *неразрушающий контроль, ультразвуковой метод, ультразвуковой эхо-импульсный метод, фазированная решетка, полимерные композиционные материалы, углепластик.*

A.S. Boychuk¹, A.V. Stepanov¹, E.I. Kosarina¹, A.S. Generalov¹

APPLICATION OF ULTRASONIC PHASED LATTICE TECHNIQUE FOR NONDESTRUCTIVE TESTING OF AVIATION FRP PARTS AND STRUCTURES

Nondestructive ultrasonic techniques are one of the main quality testing techniques for aviation FRP parts and structures. Application of ultrasonic phased lattices makes it possible to increase sensitivity, productivity, completeness and reliability of testing results. Basic principles of phased lattice operation and CFRP ultrasonic testing results are described.

Keywords: *nondestructive testing, ultrasonic technique, pulse-echo method, phased lattice, FRP (fiber reinforced plastics), CFRP (carbon fiber reinforced plastic).*

¹ 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

Проведение неразрушающих методов контроля и диагностики [1] на стадии разработки новых материалов, а также на стадиях производства и эксплуатации деталей и конструкций, применяемых в авиационной технике, является обязательным условием обеспечения контроля качества продукции, а следовательно, безопасности полета воздушных судов. Широкое применение неразрушающих методов контроля, не требующих вырезки образцов или разрушения готовых изделий, позволяет избежать больших временных и материальных затрат, обеспечить частичную или полную автоматизацию операций контроля при одновременном значительном повышении качества и надежности изделия.

Ультразвуковые методы неразрушающего контроля являются одними из наиболее применяемых при оценке контроля качества продукции, так как наряду с радиационными методами позволяют обнаруживать как поверхностные и подповерхностные дефекты, так и внутренние с высокой чувствительностью [2–3]. В отличие от радиационных методов, они не оказывают вредного воздействия на обслуживающий персонал. Однако не стоит отрицать, что, как и все методы неразрушающего контроля, ультра-

звуковые методы имеют и свои недостатки, в частности необходимость создания акустического контакта.

При контроле деталей и конструкций авиационной техники в последнее время широко применяется ультразвуковой эхо-импульсный метод неразрушающего контроля [2]. Этот метод основан на излучении преобразователем ультразвуковых импульсов и приеме эхо-сигналов, отраженных от различных неоднородностей в объекте контроля, или – с точки зрения физики – границ раздела двух сред. На рис. 1 проиллюстрирован принцип обнаружения дефектов в материале объекта контроля при использовании эхо-импульсного метода.

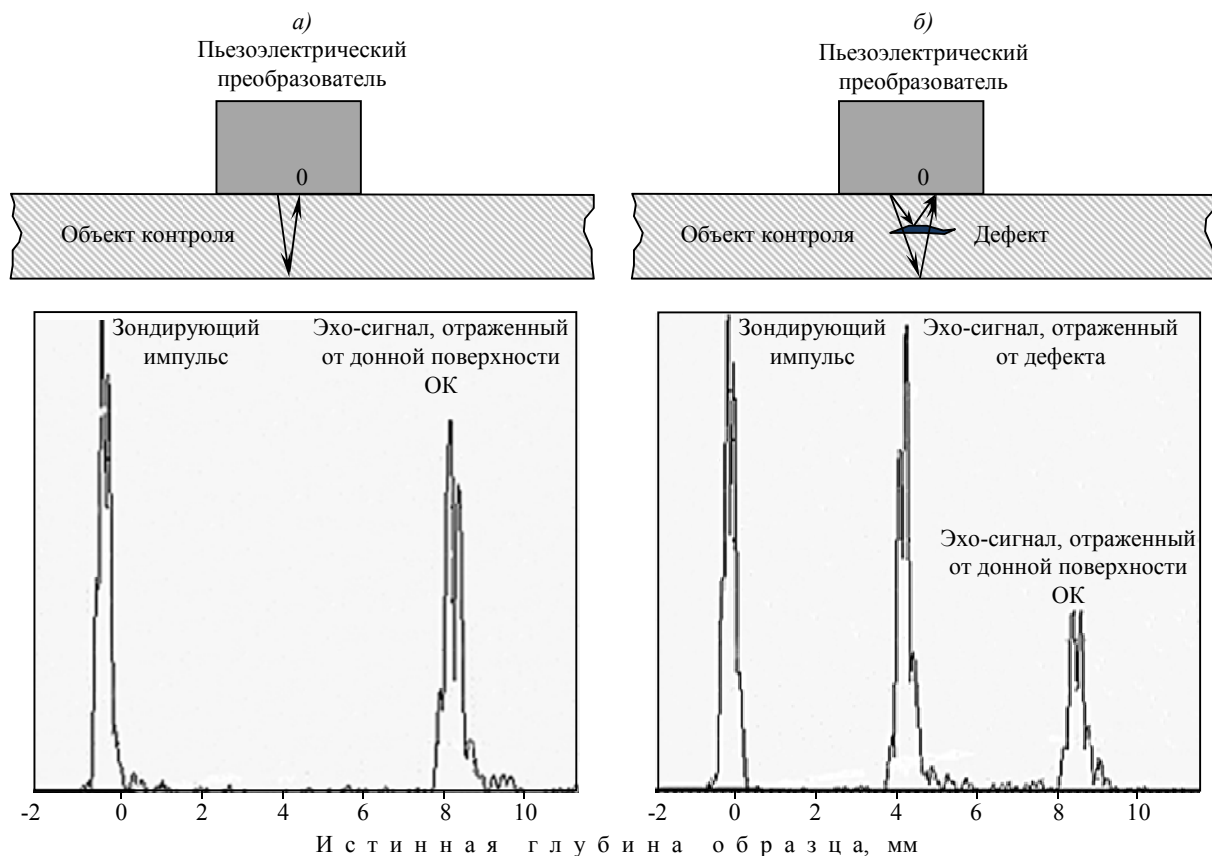


Рис. 1. Принцип обнаружения дефектов в материале объекта контроля (ОК) при использовании эхо-импульсного метода:

a – объект контроля без дефектов; *б* – объект контроля с дефектом

Развитие ультразвукового эхо-импульсного метода привело к появлению технологии фазированных решеток [4, 5]. Многие прикладные задачи дефектоскопии стали решаться с помощью фазированных решеток, благодаря которым контроль стал осуществляться гораздо быстрее и проще. Фазированная решетка представляет собой многоэлементный преобразователь в виде излучающих и принимающих ультразвуковых элементов, расположенных на определенном расстоянии друг от друга. Возбуждающие электрические импульсы на элементы подают со сдвигом фазы (времени). Аналогичные электрические временные задержки для каждого принимающего элемента вводят в приемный тракт. Изменяя сдвиг фазы, управляют акустическим полем преобразователя. Иногда также изменяют амплитуды сигналов, подаваемых на различные элементы и снимаемых с них. Главная особенность технологии ультразвуковых фазированных решеток – амплитуда и фаза импульсов возбуждения отдельных пьезоэлементов в многоэлементном преобразователе управляются компьютером. Возбуждение пьезоэлементов может осуществляться таким образом, чтобы была возможность управлять параметра-

ми ультразвукового луча (например углом, фокусным расстоянием, размером фокусного пятна) посредством компьютерной программы. Это позволяет обнаруживать дефекты, различно ориентированные относительно акустической оси (рис. 2). Простой одноэлементный преобразователь с высокой вероятностью может пропустить дефекты, расположенные под большим углом к акустической оси преобразователя или в стороне от ультразвукового луча.

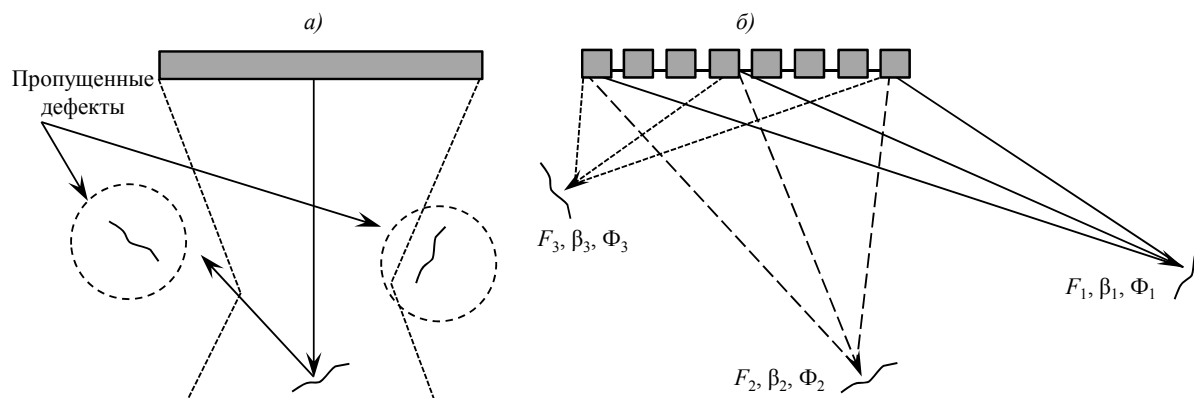


Рис. 2. Обнаружение различно ориентированных дефектов одноэлементным преобразователем (а) и фазированной решеткой (б)

На рис. 3 показана схема формирования луча и временных задержек при излучении и приеме фазированной решеткой. При излучении генератор импульсов синхронизации посылает синхроимпульс на блок фазовых задержек. Последний генерирует импульс высокого напряжения заданной длительности и с заданной задержкой, определенной фокальным законом. На каждый элемент решетки поступает задержанный импульс. Сумма волн, излученных каждым элементом, представляет собой луч, распространяющийся под определенным углом и сфокусированный на определенном расстоянии. Этот луч отражается от дефекта. При приеме сигнал принимается каждым элементом решетки, затем задерживается во времени в соответствии с заданным фокальным законом. Задержанные импульсы суммируются и формируют единый импульс, который поступает в устройства приемного тракта.

Традиционный ультразвуковой контроль основан на отражении луча от дефекта в материале и представлении результата в виде *A*-скана. Метод фазированных решеток представляет собой то же самое, если используются изображения *A*-скана. Однако многие пользователи предпочли бы использование изображений (*B*-скан или *C*-скан) для выполнения измерений и диагностики (рис. 4). Визуализация основана на выведении каждого скана отдельно на экран в масштабе 1:1, поэтому, к примеру, при положении курсора на изображении под углом 45 град можно получить *A*-скан на луче под 45 град. Можно перемещать курсор (представление в декартовых координатах) по краям дефекта и получать информацию о глубине и площади при соответствующем положении курсора.

Основные достоинства неразрушающего контроля с использованием фазированных решеток:

- высокая производительность в сочетании с высокой разрешающей способностью (по сравнению с традиционными методами НК);
- фокусировка луча в любую точку объекта контроля;
- гибкость при контроле изделий сложной формы;
- контроль под различными углами ввода одним многоэлементным датчиком;
- высокая достоверность результатов контроля;

– мобильность и достаточно невысокая стоимость оборудования (по сравнению с автоматизированными установками).

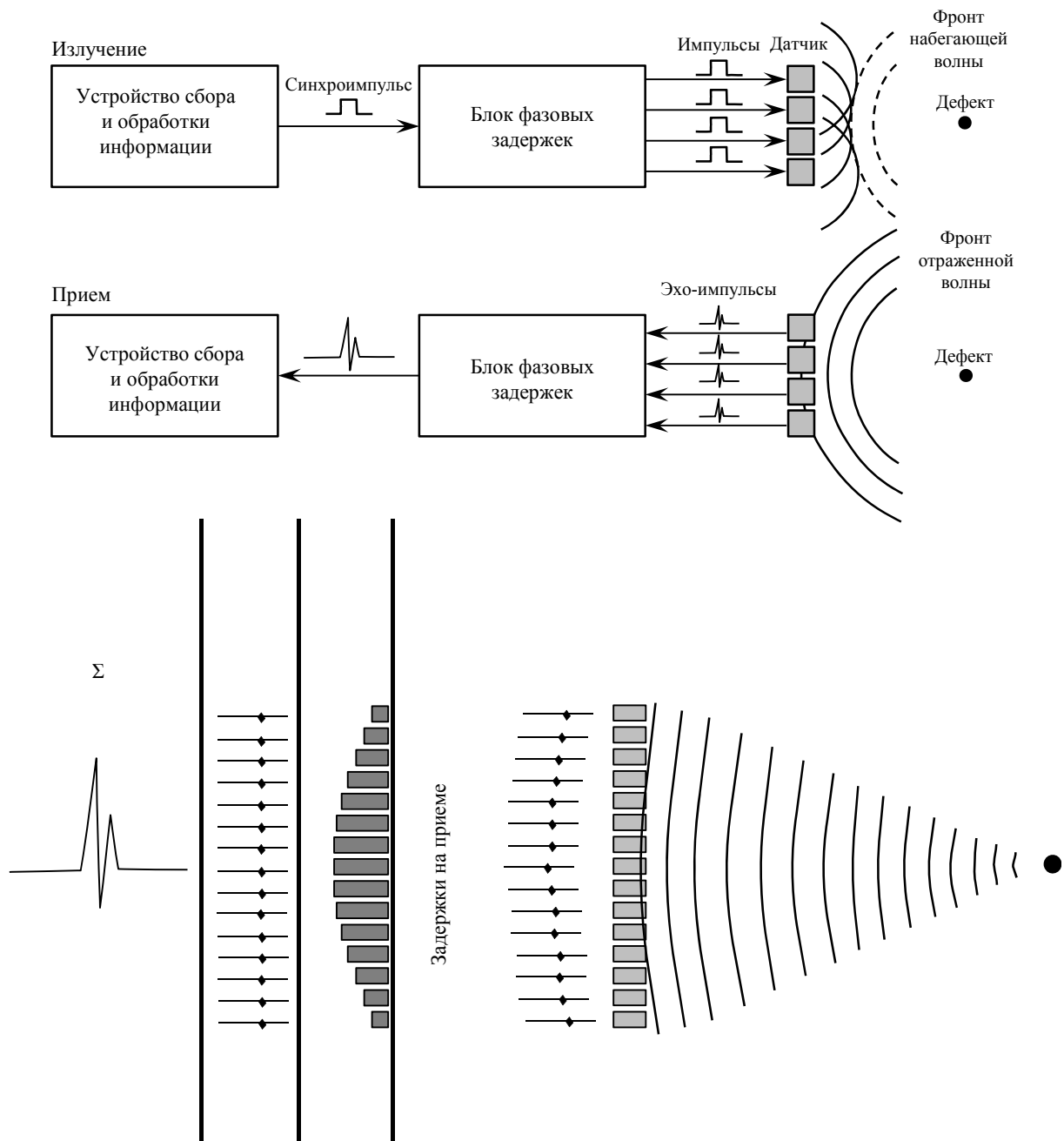


Рис. 3. Схема формирования луча и временных задержек при излучении и приеме

В ВИАМ начиная с 2010 года ведется освоение данной технологии для неразрушающего контроля ответственных деталей и конструкций авиационной техники. Первой задачей, поставленной перед специалистами лаборатории неразрушающего контроля при освоении данной технологии, стала разработка технологии ультразвукового неразрушающего контроля крупногабаритных элементов конструкций из углепластика с использованием фазированных решеток. Это связано с тем, что в последние годы в авиастроении широкое применение получили полимерные композиционные материалы (ПКМ). В частности, из ПКМ изготавливают такие элементы конструкций современных и перспективных самолетов, как крылья, механизацию крыла, хвостовое оперение, эле-

менты фюзеляжа и др. Новые методики неразрушающего контроля (с использованием фазированных решеток) призваны повысить чувствительность, увеличить производительность, а также полноту и достоверность контроля, что невозможно при использовании традиционных методов.

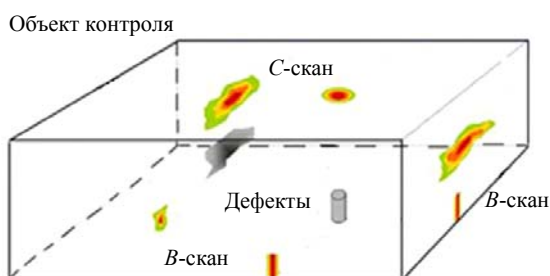


Рис. 4. Виды отображения результатов контроля (В- и С-сканы)

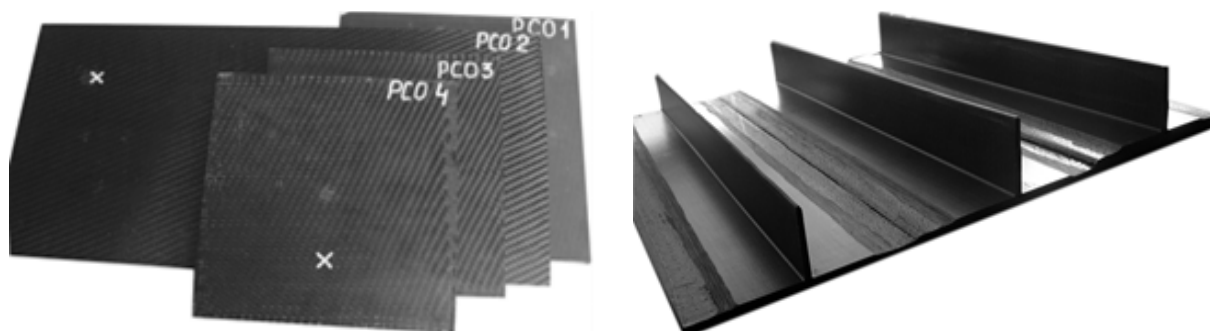


Рис. 5. Образцы из углепластика для исследований

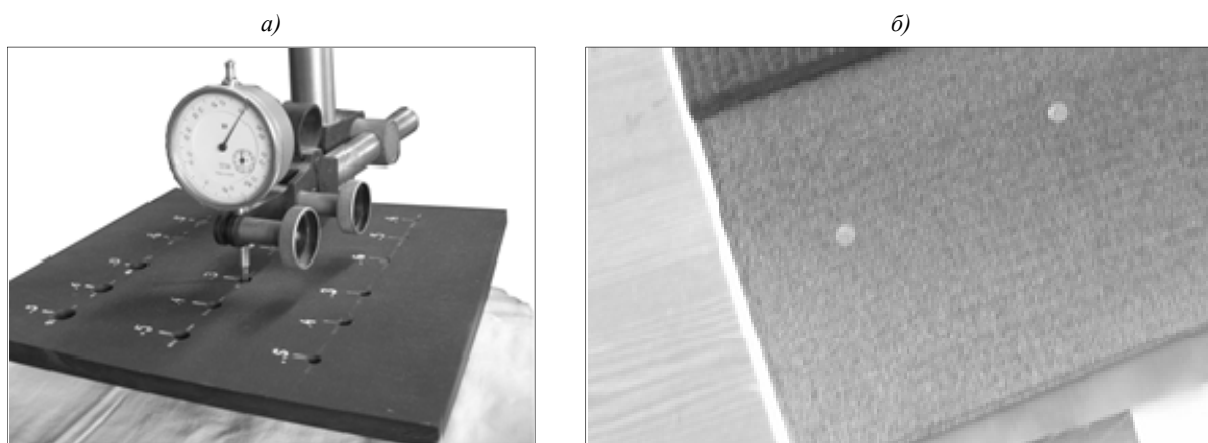


Рис. 6. Искусственные дефекты:
а – плоскодонные отверстия; б – технологические пленки, закладываемые между слоями препрега

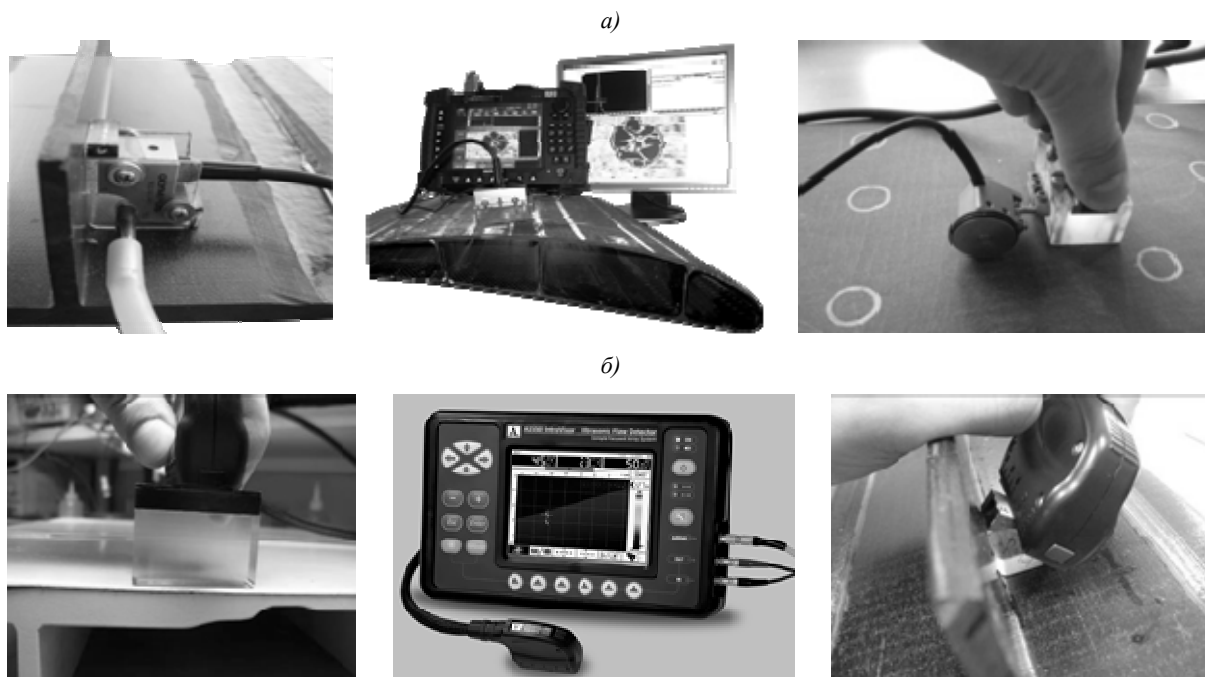


Рис. 7. Дефектоскопы OmniScan PA (а) и А1550 (б) с линейной и секторной фазированными решетками для контроля полимерных композиционных материалов (ПКМ)

В ВИАМ ведутся интенсивные разработки ПКМ и технологий их изготовления для перспективных гражданских и военных самолетов [6]. В частности, разработаны разные типы углепластиков на полимерных и эпоксидных связующих, а также технологии автоклавного и инфузионного формования конструкций из них. Для разработки методик контроля с использованием фазированных решеток разрабатывались эскизы, и по эскизам с использованием разработанных в ВИАМ технологий изготавливались специальные образцы из углепластика (рис. 5), имитирующие фрагменты крупногабаритных элементов конструкций из углепластика, применяемых в гражданских и военных самолетах.

Для того чтобы определить различные параметры контроля, в образцах изготавливались искусственные отражатели (дефекты) (рис. 6), которые получали путем фрезерования плоскостных отверстий с противоположной по отношению к положению преобразователя стороны, или путем закладки между слоями препрега углепластика перед процессом формования специальных технологических пленок.

Исследования образцов с искусственными дефектами осуществлялись как с использованием зарубежного дефектоскопа OmniScan PA (Olympus NDT) и линейных и секторных фазированных решеток с 128, 64 и 16 элементами, так и отечественного А1550 (ООО «АКС») с линейной и секторной фазированной решеткой с 16 элементами (рис. 7).

В результате многочисленных проведенных исследований определены оптимальные режимы контроля с использованием фазированных решеток конструкций из углепластика толщиной 2–25 мм. Применение фазированных решеток позволило повысить чувствительность контроля при выявлении дефектов типа расслоений размерами (площадью) 0,2–0,5 см², при этом производительность контроля увеличилась в 10–20 раз, а также была решена проблема контроля радиусных зон Т-образных соединений стрингеров с панелями обшивки (стрингерных панелей). Рекомендации по настройке оборудования и процедурам проведения неразрушающего контроля конструкций из ПКМ при использовании фазированных решеток описаны в разработанных нормативных документах, выпущенных как ВИАМ, так и совместно с ООО «АКС».

ЛИТЕРАТУРА

1. Генералов А.С., Мурашов В.В., Далин М.А., Бойчук А.С. Диагностика полимерных композитов ультразвуковым реверберационно-сквозным методом //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 42–47.
2. Неразрушающий контроль: Справочник. В 8 т. /Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. Ультразвуковой контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение. 2006. 864 с.
3. Каневский И.Н., Сальникова Е.Н. Неразрушающие методы контроля: Учеб. пособ. Владивосток: Изд-во ДВГТУ. 2007. 243 с.
4. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline.
5. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications: Olympus NDT.
6. Хрульков А.В., Душин М.И., Попов Ю.О., Коган Д.И. Исследование и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 292–301.

REFERENS LIST

1. Generalov A.S., Murashov V.V., Dalin M.A., Bojchuk A.S. Diagnostika polimernyh kompozitov ul'trazvukovym reverberacionno-skvoznym metodom [Diagnostics of polymeric composites by an ultrasonic reverberation and through method] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 42–47.
2. Nerazrushajushhij kontrol' [Nondestructive control]: Spravochnik. V 8 t. /Pod obshh. red. V.V. Kljueva. T. 3. I.N. Ermolov, Ju.V. Lange. Ul'trazvukovoj kontrol'. 2-e izd., ispr. M.: Mashinostroenie. 2006. 864 s.
3. Kanevskij I.N., Sal'nikova E.N. Nerazrushajushhie metody kontrolja [Nondestructive control methods]: Ucheb. posob. Vladivostok: Izd-vo DVG TU. 2007. 243 s.
4. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline.
5. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications: Olympus NDT.
6. Hrul'kov A.V., Dushin M.I., Popov Ju.O., Kogan D.I. Issledovanie i razrabotka avtoklavnyh i bezavtoklavnyh tehnologij formovanija PKM [Research and development autoclave and non-autoclave technologies of formation of PCM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 292–301.