

УДК 620.179

doi: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-84-89

А.С. Бойчук¹, А.С. Генералов¹, А.В. Степанов¹**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ УГЛЕПЛАСТИКОВ НА НАЛИЧИЕ
НЕСПЛОШНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ
ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК**

Рассмотрено применение технологии ультразвуковых фазированных решеток (ФР) для контроля технического состояния высоконагруженных конструкций авиационной техники, изготовленных из углепластика. Описан принцип работы ФР и особо опасные типы эксплуатационных повреждений в углепластиках. Предложена высокопроизводительная технология неразрушающего контроля, которую можно применять при периодических технических осмотрах самолетов. Представлены результаты численной оценки вероятности обнаружения ударных повреждений и расслоений с использованием ультразвуковых ФР. Описан опыт применения ФР при разработке и оценке эффективности встроенной системы мониторинга состояния конструкций из углепластика на основе волоконно-оптических сенсоров с брэгговскими решетками для детектирования ударных повреждений.

Ключевые слова: углепластик, полимерные композиционные материалы, неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль, фазированная решетка.

The paper is dedicated to the ultrasonic phased array (UPA) applied for structural health monitoring of high-loaded CFRP used in aviation equipment. Principles of phased array technique and most dangerous types of damages in CERP are shortly described. High-performance NDT technology suitable for periodic examination of airframe structures is suggested. Results of numerical estimation of detection probability of impact damages and exfoliation by UPA technique are given. UPA implementation experience for development and efficiency estimation of integrated CFRP structural health monitoring system based on FBGA for impact damage detection is described.

Keywords: carbon fiber reinforced plastics (CFRP), non-destructive testing, ultrasonic testing, phased array.

¹Федеральное 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

Освоение полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1–9], технологий их производства [10–14], а также широкое их внедрение становится одним из важнейших направлений развития материаловедения. С каждым годом ПКМ все больше используются в конструкциях самолетов, вертолетов, космической техники и многих других изделий, заменяя металлические сплавы. Полимерные композиционные материалы обладают специфическими особенностями, основная из них – высокая анизотропия свойств, позволяющая создавать конструкции с заранее заданными оптимальными характеристиками. Наиболее эффективно используют ПКМ в конструкциях высоконагруженных агрегатов воздушных судов (кессонах кия, стабилизатора и крыла, а также в силовых отсеках фюзеляжа). Вследствие высокой нагруженности перечисленных агрегатов в процессе эксплуатации необходим их периодический контроль на выявление опасных дефектов, которые под воздействием нагрузок и климатических факторов склонны к росту, что приводит к разрушению агрегата. Наиболее опасным эксплуатационным дефектом является ударное повреждение. Такие дефекты трудно обнаружить при визуаль-

ном осмотре, при этом они существенно снижают способность конструкции сопротивляться сжимающим нагрузкам и склонны к росту при эксплуатации. Другим типичным эксплуатационным дефектом, с которым в настоящее время столкнулись ведущие зарубежные авиастроительные компании, являются отслоения и трещины, в частности отслоения приформованного элемента жесткости от панели.

В последние годы в России широко развивается направление интеллектуальных материалов. В ВИАМ ведется разработка ПКМ интеллектуального типа. В частности, проводятся испытания образцов из углепластика с оптическим волокном, закладываемым между слоями препрега, на реакцию сенсоров с брэгговскими решетками при ударных воздействиях. В процессе испытаний разработчики столкнулись с задачами определения местоположения волокна в образце до испытания с целью проведения ударного воздействия на необходимую область образца – относительно волокна и датчиков в нем. Появились задачи определения местоположения и размера ударного повреждения, полученного в результате ударных воздействий на образцы с оптическими волокнами, и влияния этого повреждения на местоположение волокна в образце.

Материалы и методы

Выявление дефектов ПКМ без их разрушения при изготовлении и эксплуатации осуществляют методами неразрушающего контроля (МНК) [15]. В настоящее время ПКМ в основном контролируют акустическими, радиационными и тепловыми МНК, из которых наибольшее применение нашли акустические методы [16].

В последнее время методы и оборудование для неразрушающего контроля совершенствуются быстрыми темпами, благодаря чему МНК стали наиболее прогрессивно развивающимся направлением прикладной науки. В результате заимствования технологии применения ФР в радиолокации и медицине появилось новое направление в неразрушающем контроле – технология контроля с применением ультразвуковых фазированных антенных решеток. Сначала технологию использовали исключительно для контроля металлических изделий, однако впоследствии ее стали широко применять при неразрушающем контроле ПКМ [17–19].

Технология ультразвуковых фазированных антенных решеток является усовершенствованием эхо-импульсного метода контроля, где используется многоэлементный преобразователь, а управление амплитудой и фазой импульсов возбуждения отдельных пьезоэлементов происходит с помощью компьютера. 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 один задержанный импульс. Сумма волн, излученных каждым элементом, представляет собой луч, распространяющийся под определенным углом и сфокусированный на определенном расстоянии. Этот луч отражается от дефекта. Сигнал от дефекта 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. Величина временной задержки на элементах фазированной решетки зависит от величины апертуры, типа волны, требуемого угла и глубины фокусировки [20].

Основные достоинства метода неразрушающего контроля с использованием ФР:

- 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).

Для исследований по выявлению эксплуатационных дефектов монолитных конструкций из ПКМ изготовлены специальные образцы из углепластика, имитирующие фрагменты высоконагруженных конструкций из ПКМ. Один образец представляет собой плоскую панель из углепластика размером 230×460×9,5 мм (рис. 1, а), второй – трехстрингерную панель из углепластика размером 480×480×50 мм с толщинами монолитной панели и ребер 7 мм (рис. 1, б).

В обоих образцах были симитированы два наиболее опасных типа эксплуатационных дефектов: ударные повреждения и отслоения (рис. 2), а также – расслоения.

Для оценки возможности определения местоположения оптоволокон с брэгговскими решетками в образце интеллектуального типа до испытаний, а также определения размера ударного повреждения, полученного в результате ударных воздействий на образцы с оптическими волокнами, и влияния этого повреждения на местоположение волокна в образце, изготовлены специальные образцы из углепластика толщиной 4 мм с заложением оптоволоконного размера 200 мкм между слоями препрега углепластика (рис. 3).

Исследования проводили на дефектоскопе Omniscan PA 16:128 с применением ультразвуковой линейной фазированной решетки Olympus NDT 5L-64-NW1 с рабочей частотой 5 МГц, а также двухкоординатного (X–Y) сканера Glider.

Результаты

Неразрушающий контроль монолитных образцов из углепластика

При контроле монолитных образцов из углепластика настройка дефектоскопа осуществлялась на чувствительность, эквивалентную выявлению плоскодонного отражателя $\varnothing 5$ мм, и с использованием временной регулировки чувствительности. Электронное сканирование осуществлялось группой из 8 элементов 64-элементной фазированной решетки. Результаты исследования образцов представлены на рис. 4. Видно, что при использовании ФР с частотой 5 МГц и электронного сканирования (группой из 8 элементов) вышеуказанные типы эксплуатационных дефектов достаточно легко обнаруживаются. На основании экспериментальных исследований разработана технология контроля.

Оценка вероятности обнаружения дефектов

Для оценки достоверности обнаружения эксплуатационных дефектов ПКМ при использовании ФР в процессе контроля технического состояния высоконагруженных конструкций авиационной техники, проведены исследования по оценке вероятности обнаружения дефектов от их размеров. Для проведения исследований изготовлен

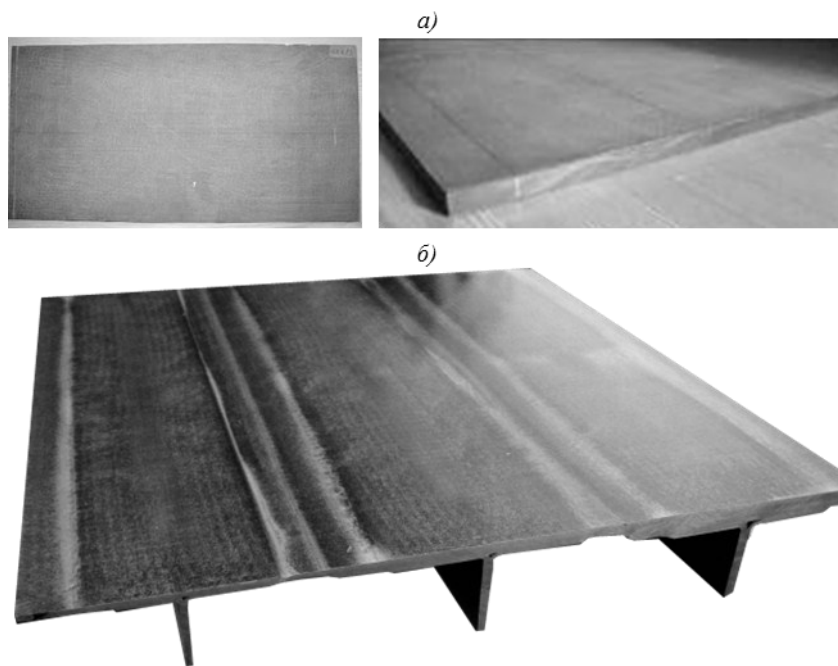


Рис. 1. Образцы из углепластика для исследований

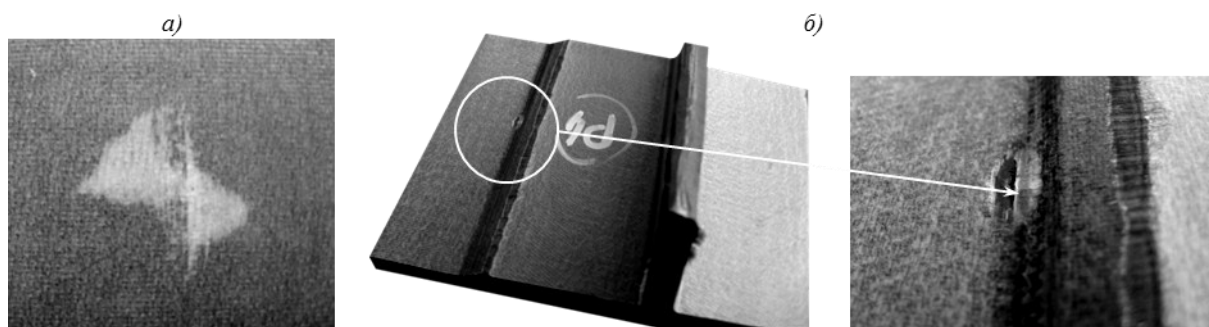


Рис. 2. Сымитированные эксплуатационные дефекты ПКМ:
a – ударное повреждение; *б* – отслоение



Рис. 3. Образец из углепластика интеллектуального типа с оптоволоконном

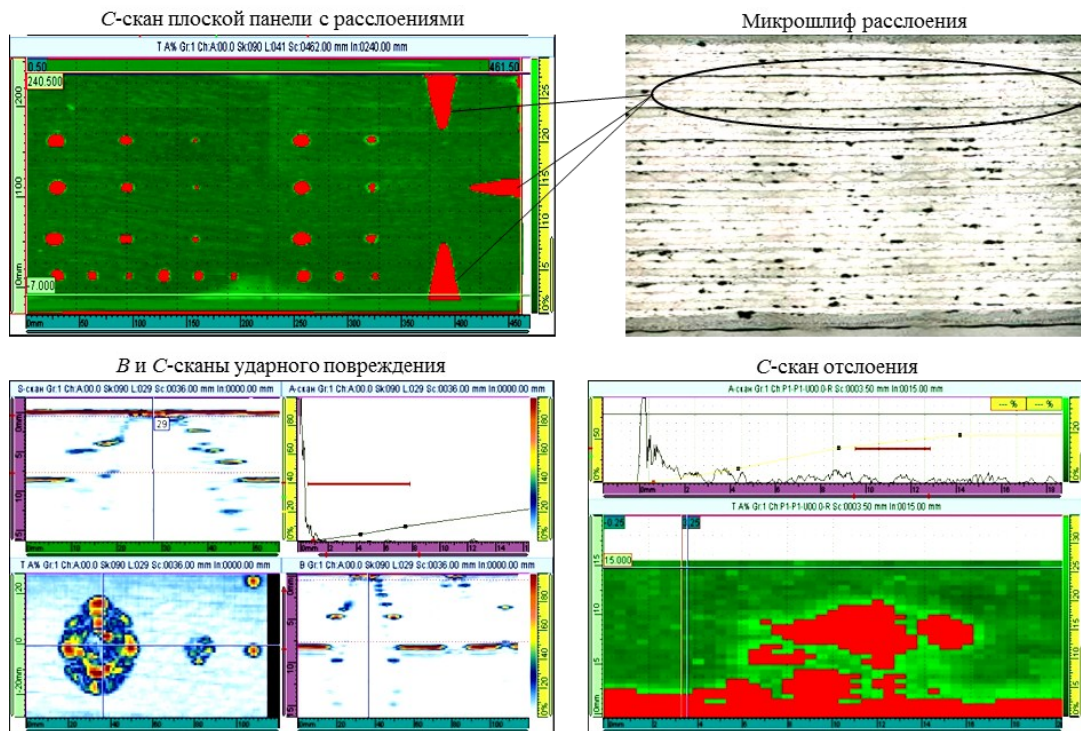


Рис. 4. Результаты выявления расслоений, ударных повреждений и отслоений элементов жесткости от обшивки

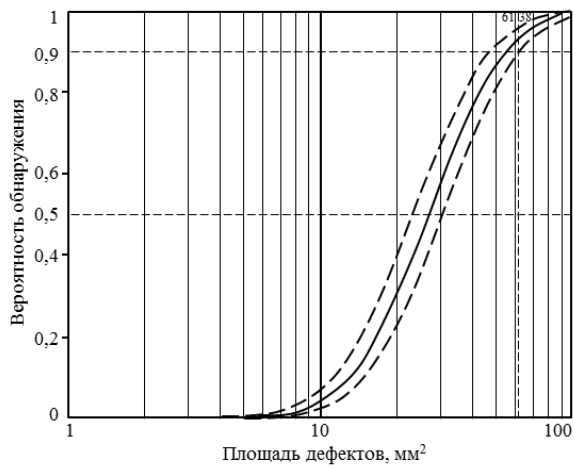


Рис. 5. Зависимость вероятности обнаружения эксплуатационных дефектов агрегатов из углепластика от размеров дефектов при УЗК с использованием фазированных решеток

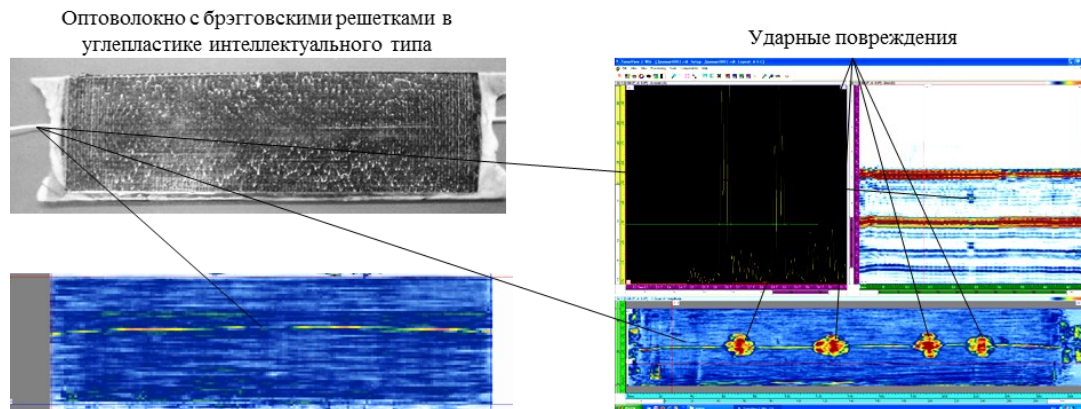


Рис. 6. А-, В- и С-сканы образца из углепластика с оптоволокном с брэгговскими решетками до и после ударных воздействий

набор образцов из углепластика, содержащих искусственные дефекты, имитирующие эксплуатационные дефекты ПКМ (ударные повреждения и отслоения), разных размеров – от 3 до 1000 мм². Проведен УЗК с использованием ФР и оценка реально полученных размеров искусственных дефектов. В результате сформирован набор статистических данных УЗК ПКМ с использованием ФР в виде зависимости максимальных амплитуд эхосигналов от дефектов при заданной настройке оборудования от площади дефектов. Для обработки статистических данных и построения зависимостей вероятности обнаружения дефектов от их размеров разработан алгоритм их математической обработки [21] и впоследствии – методический материал. По разработанному алгоритму проведена математическая обработка статистических данных и построены зависимости вероятности обнаружения опасных эксплуатационных дефектов ПКМ от их размеров и границы 95%-го доверительного интервала (рис. 5).

На практике особый интерес вызывает величина $a_{90/95}$ [22], представляющая собой значение размера дефекта, выявляемого при неразрушающем контроле в 90% случаев с доверительной вероятностью 95% (см. рис. 5). По проведенной оценке вероятности обнаружения дефектов от их размеров определено, что данная величина составила 61,38 мм², что эквивалентно площади плоскодонного отражателя $\varnothing 8,84$ мм.

Применение технологии ультразвуковых фазированных антенных решеток при разработке ПКМ интеллектуального типа

Для определения местоположения оптоволокон с брэгговскими решетками в образце интеллектуального типа и размера ударного повреждения до и после испытаний, дефектоскоп OmniScan PA 16:128 с фазированной решеткой Olympus NDT 5L-64-NW1 с рабочей частотой 5 МГц настраивался по контрольным отражателям $\varnothing 5$ мм и электронному сканированию 16 элементов. Для определения местоположения волокна в образце до и после ударных воздействий, а также измерения и определения положения ударных повреждений в образцах, использовалось

сохранение и представление результатов контроля в виде *A*-, *B*- и *C*-сканов. Путем анализа и обработки данных контроля на ПК с помощью программного обеспечения TomoView визуально определялись положения волокон размером 200 мкм (в оболочке) и ударных повреждений в образцах (рис. 6).

Обсуждение и заключения

Изготовлены специальные образцы из углепластика, имитирующие фрагменты высоконагруженных конструкций из ПКМ. С помощью оборудования с ФР проведен их неразрушающий контроль. По результатам контроля можно сделать вывод, что использование ФР позволяет в процессе контроля состояния высоконагруженных агрегатов из ПКМ при их эксплуатации обнаруживать появление наиболее опасных макродефектов, таких как ударные повреждения и отслоения, а также расслоения, с чувствительностью, эквивалентной выявлению плоскодонного отражателя $\varnothing 5$ мм.

Для оценки достоверности результатов неразрушающего контроля с использованием ФР, проведена численная оценка вероятности обнаружения дефектов. При настройке оборудования с ФР на чувствительность контроля, эквивалентную выявлению контрольного отражателя $\varnothing 5$ мм, величина $a_{90/95}$, представляющая собой значение размера дефекта, выявляемого при неразрушающем контроле в 90% случаев с доверительной вероятностью 95%, составляет 61,38 мм², что эквивалентно площади плоскодонного отражателя $\varnothing 8,84$ мм.

Проведено опробование МНК углепластиков интеллектуального типа с применением оборудования с ФР для решения задач определения местоположения оптоволокон с брэгговскими решетками в образце интеллектуального типа до ударных воздействий, а также местоположения и размера повреждения после ударных воздействий. По результатам опробования можно сделать вывод, что неразрушающий контроль с использованием ФР позволяет определять местоположение волокна размером 200 мкм (в оболочке) в углепластике интеллектуального типа до и после испытаний на ударные воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

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.
2. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов //Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. №3–4. С. 24–42.
3. Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Бочарова Л.И., Аниховская Л.И. Клеевые препреги и композиционные материалы на их основе //Клеи. Герметики. Технологии. 2008. №1. С. 14–16.
4. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Котова Е.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В., Куцевич К.Е. Клеевые препреги и композиционные материалы на их основе //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 53–57.
5. Тростянская Е.Б., Михайлин Ю.А., Бухаров С.В. Тенденции применения и развития композиционных

- материалов в самолетостроении //Авиационная промышленность. 2002. №2. С. 18–22.
6. Каримбаев Т.Д., Скибин В.А. Волокна и композиционные материалы на их основе для создания перспективных двигателей //Конверсия в машиностроении. 2000. №5. С. 74–78.
 7. Полиимидное связующее для армированных пластиков, препрег на его основе и изделие, выполненное из него: пат. 2394857 Рос. Федерация; опубл. 07.05.2009.
 8. Эпоксидное связующее, препрег на его основе и изделие, выполненное из него: пат. 2424259 Рос. Федерация; опубл. 22.10.2009.
 9. Коган Д.И., Попов Ю.О., Хрульков А.В., Кривonos В.В. Перспективные композиционные материалы для создания силовых элементов вертолетных лопастей /В сб. тезисов докл. III Международной науч.-технич. конф. молодых ученых и специалистов «Современные проблемы аэрокосмической науки и техники» (СПАН-2004). М. 2004. С. 25–26.
 10. Чурсова Л.В., Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Особенности технологии изготовления деталей из композиционных материалов методом пропитки под давлением /В сб. тезисов докл. межотраслевой науч.-технич. конф. «Композиционные материалы в авиакосмическом материаловедении», посвященной 100-летию со дня рождения чл.-кор. А.Т. Туманова. М.: ВИАМ. 2009. С. 17–18.
 11. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Выбор технологических параметров автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 20–26.
 12. Хрульков А.В., Душин М.И., Попов Ю.О., Коган Д.И. Исследования и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 292–301.
 13. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении /Под ред. А.Г. Братухина, В.С. Боголюбова, О.С. Сироткина. М.: Готика. 2003. 516 с.
 14. Коган Д.И., Чурсова Л.В., Петрова А.П. Технология изготовления ПКМ способом пропитки пленочным связующим //Клеи. Герметики. Технологии. 2011. №5. С. 25–29.
 15. Мурашов В.В., Косарина Е.И., Генералов А.С. Контроль качества авиационных деталей из полимерных композиционных материалов и многослойных клееных конструкций //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 65–70.
 16. Далин М.А., Генералов А.С., Бойчук А.С., Ложкова Д.С. Основные тенденции развития акустических методов неразрушающего контроля //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 64–69.
 17. Бойчук А.С., Генералов А.С., Степанов А.В., Юхацкова О.В. Неразрушающий контроль ПКМ с использованием ультразвуковых фазированных решеток //Промышленные АСУ и контроллеры. 2013. №2. С. 39–43.
 18. Бойчук А.С., Степанов А.В., Косарина Е.И., Генералов А.С. Применение технологии ультразвуковых фазированных решеток в неразрушающем контроле деталей и конструкций авиационной техники, изготавливаемых из ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 41–46.
 19. 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.
 20. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline. 2004.
 21. Бойчук А.С., Генералов А.С., Ложкова Д.С., Степанов А.В. Оценка вероятности обнаружения дефектов в углепластике при ультразвуковой дефектоскопии с использованием фазированных решеток /В сб. тезисов докл. XIX Международной науч.-технич. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М.: НИУ МЭИ. 2013. С. 132.
 22. Department of Defense Handbook: Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment, MIL-HDBK-1823A, 7 April 2009.