

УДК 620.179

А.С. Бойчук¹, И.А. Диков¹, А.С. Генералов¹**ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МОНОЛИТНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПКМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК**

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-83-88

При проведении испытаний для определения физико-механических характеристик монолитных образцов из полимерных композиционных материалов (ПКМ) наблюдается большой разброс определяемых величин. Одним из факторов, влияющих на этот разброс, является наличие внутренних дефектов в испытываемых образцах. В настоящее время чувствительность контроля монолитных изделий из ПКМ, эквивалентная выявлению плоскодонного отражателя диаметром 5 мм, является недостаточной для выявления дефектов, влияющих на результаты механических испытаний. В данной статье приведены результаты исследований и показано, что повысить чувствительность и разрешающую способность ультразвукового контроля монолитных образцов из углепластика и стеклопластика можно путем использования фокусировки ультразвукового пучка, использования в преобразователях на фазированной решетке большего количества элементов в группе электронного сканирования, а также за счет уменьшения шага сканирования.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль, фазированные решетки, чувствительность, разрешающая способность.

A.S. Boychuk¹, I.A. Dikov¹, A.S. Generalov¹**THE INCREASE OF SENSITIVITY AND RESOLUTION OF FRP SOLID SAMPLES NONDESTRUCTIVE ULTRASONIC TESTING USING THE ULTRASONIC PHASED ARRAY**

Wide scatter of the defined values is observed during the testing of Fibre-Reinforced Plastics (FRP) solid-cast samples for definition of their physical and mechanical properties. One of the factors affecting this scatter is the presence of internal defects in the test samples. Nowadays the nondestructive inspection sensitivity of FRP solid-cast sample structures which equals to 5 mm diameter flat bottom hole detection is insufficient for detection of defects affecting the mechanical test results. This article gives the test results and shows that it is possible to increase the sensitivity and resolution of CFRP and GFRP solid-cast samples ultrasonic testing by using ultrasonic beam focusing, increasing the number of elements in phased array transducer in electronic scanning group and decreasing scanning pitch.

Keywords: polymer composite materials, nondestructive testing, ultrasonic testing, phased array, sensitivity, resolution.

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

Разработка и внедрение новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) в изделиях авиационной, космической и другой техники в последние годы развиваются довольно высокими темпами [1–6]. В России большой объем вновь разрабатываемых ПКМ связан и с программой по импортозамещению [7, 8].

При разработке и паспортизации новых материалов, а также при проведении их спецквалификации осуществляется большое количество механических испытаний с целью определения их физико-механических характеристик. Как известно, при проведении механических испытаний ПКМ

наблюдается большой разброс значений определяемых характеристик, который обусловлен различными факторами. Одним из существенных факторов, влияющих на этот разброс, является наличие внутренних дефектов в испытываемых образцах, которые не обнаруживаются при визуальном осмотре. В настоящее время большинство механических испытаний образцов проводят без их предварительного неразрушающего контроля (НК), который необходим для выявления внутренних несплошностей материала. В случаях, при которых НК все-таки проводится, используется достаточно невысокая чувствительность контроля (эквивалентная выявлению плоскодонного отражателя

диаметром от 5 мм [9–11]) по отношению к размерам образцов для испытания. Это в первую очередь касается монолитных образцов ПКМ для испытаний на сжатие и сдвиг, а также на малоцикловую усталость. Поэтому актуальной является разработка способов, позволяющих увеличить чувствительность и разрешающую способность контроля для выявления более мелких дефектов.

За рубежом проводились работы, посвященные данной теме. Так, в работе [12] авторами исследовались углепластиковый (36 слоев) и стеклопластиковый (16 слоев) монолитные образцы двумя ультразвуковыми методами: теньвым с воздушным вводом (применялось два типа фокусирующих преобразователей с апертурой 19 мм и размером фокального пятна 2–3 мм; традиционные пьезоэлектрические NCG500-D19-P50 Ultrac с центральной частотой 274 кГц и на основе сотового полипропилена с центральной частотой 330 кГц) и эхо-импульсным методом с применением матричных фазированных решеток (60 элементов, центральная частота 2,25 МГц). Толщина исследуемых образцов составляла 5 мм. В образцах изготовлены плоскодонные отражатели и заложены искусственные дефекты (пленки) диаметром от 1 до 40 мм. Минимальные размеры искусственных дефектов, которые выявлялись теньвым методом с воздушным вводом: в углепластике – плоскодонные отражатели диаметром от 2 мм и пленки диаметром от 4,7 мм, в стеклопластике – плоскодонные отражатели и пленки диаметром от 3 мм. Эхо-импульсным методом с матричной фазированной решеткой выявлялись: в углепластике – плоскодонные отражатели и пленки диаметром от 1 мм, в стеклопластике – от 3 мм.

В другой работе [13] авторы исследуют образец из углепластика (10 слоев). Для исследований использовали пьезокерамические ультразвуковые фокусирующие преобразователи с воздушным вводом с частотой 400 кГц. Выявляли дефекты, изготовленные из тефлоновой пленки, диаметром ~3 мм.

Еще в одной работе [14] исследовали образец с плоскодонными отражателями диаметрами 0,5; 1; 2 и 4 мм на различных глубинах. Образец был выполнен из углепластика с квазиизотропной укладкой и состоял из 128 слоев общей толщиной 22 мм. Отражатели диаметром 0,5 мм располагались на глубинах 3; 7 и 12 мм; диаметром 1 мм – на глубинах 3; 7 и 12 мм; диаметром 2 мм – на глубинах 1; 7; 12 и 18 мм; диаметром 4 мм – на глубинах 7; 20 и 21 мм. С использованием преобразователей с воздушным вводом в теньвом режиме с частотой 200 кГц выявлены отражатели диаметрами 4 и 2 мм, отражатели диаметром 0,5 и 1 мм не выявлены.

Для решения задачи повышения чувствительности и разрешающей способности НК для монолитных образцов из ПКМ во ФГУП «ВИАМ» проведены специальные исследования ультразвуковым эхо-импульсным методом с применением преобразователей на фазированной решетке. 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») [15].

Материалы и методы

Для проведения исследований по повышению чувствительности НК монолитных образцов из ПКМ методом автоклавного формования изготовлены два образца: из углепластика (образец 1) и стеклопластика (образец 2), которые представляли собой плоские монолитные плиты размером 150×200 мм толщиной 5 (образец 1) и 6 мм (образец 2) с просверленными в них плоскодонными отражателями диаметром 1; 2; 3; 4 и 5 мм (рис. 1). Плоскодонные отражатели изготавливали в образцах на сверлильном станке с использованием специальных твердосплавных сверл на основе карбида вольфрама.

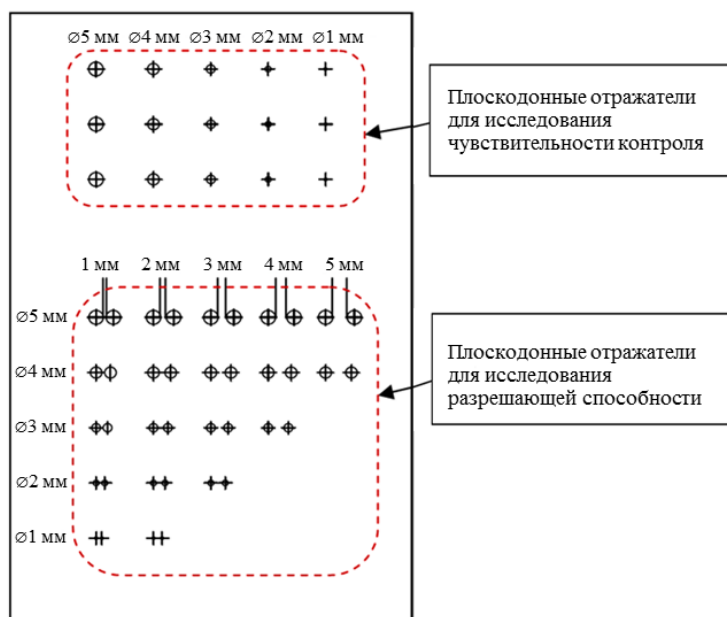


Рис. 1. Схема расположения плоскодонных отражателей в исследуемых образцах

Для проведения исследований по повышению чувствительности контроля в образцах изготовлены плоскодонные отражатели диаметром 1; 2; 3; 4 и 5 мм, расположенные на глубинах 0,5; $H/2$ и $H-0,5$ мм (где H – толщина исследуемого образца) от поверхности ввода ультразвуковых колебаний в образец.

Для проведения исследований по увеличению разрешающей способности плоскодонные отражатели диаметром от 1 до 5 мм в образцах изготовлены на глубине, соответствующей $1/2$ толщины

образца, парами и расположены относительно друг друга на межосевом расстоянии 1; 2; 3; 4 и 5 мм + величина диаметра плоскодонного отражателя (рис. 1).

Исследования проводили ультразвуковым эхоимпульсным методом с использованием дефектоскопа OmniScan MX (Olympus NDT), фазированной решетки Olympus NDT 5L-64-NW1 с рабочей частотой 5 МГц, прямоугольной призмы из полистирола SNW1-0L-HIC-C и двухкоординатного сканера Glider. Для создания акустического контакта использовали дистиллированную воду. Для проведения анализа результатов, полученных с использованием дефектоскопа OmniScan MX, использовали специальное программное обеспечение TomoView Analysis (Olympus NDT).

Повышение чувствительности контроля монолитных образцов из ПКМ проводили путем введения фокусировки ультразвукового пучка. Фокус при этом устанавливали в середину исследуемого образца, для того чтобы образы эхо-сигналов от плоскодонных отражателей, расположенных на трех разных глубинах, на С-скане отличались друг от друга по размерам не более чем на 1 мм (это различие возможно из-за изменения размера фокусного пятна по глубине).

Для увеличения разрешающей способности, исследования проводили с количеством элементов в одной группе электронного сканирования – по 8 и 16 элементов. Ширина ультразвукового пучка при увеличении количества элементов будет значительно сужаться, что в теории должно улучшить разрешение [16]. На рис. 2 изображено изменение ширины ультразвукового пучка в зависимости от используемого количества элементов в группе электронного сканирования. Вместе с увеличением элементов в группе уменьшен шаг сканирования – с 1 до 0,5 мм.

Результаты

Повышение чувствительности контроля

При сканировании образцов 1 и 2 без использования и с использованием фокусировки ультразвукового пучка при настройке временной регулировки

чувствительности дефектоскопа по плоскодонным отражателям соответственно диаметром 3 и 4 мм (без фокусировки) и 2 мм (с фокусировкой) получены результаты контроля образцов в виде С-сканов. После анализа результатов в программном обеспечении TomoView проведен расчет отношения «сигнал от плоскодонного отражателя/шум» (ΔA) следующим образом: в программе TomoView проводили оценку уровня максимальной амплитуды от каждого выявленного отражателя ($A_{\text{ПДО}}$) в процентном отношении от высоты экрана, затем по всей площади образца без учета мест расположения плоскодонных отражателей в диапазоне между поверхностным и донным сигналами оценивали максимальный уровень шума ($A_{\text{шум}}$) также в процентном отношении от высоты экрана. Затем отношение «сигнал от плоскодонного отражателя/шум» рассчитывали по следующей формуле:

$$\Delta A = 20 \log A_{\text{ПДО}} / A_{\text{шум}}$$

Результаты расчетов приведены в табл. 1 и 2.

Признаком допустимой чувствительности является превышение амплитуды эхо-сигнала от плоскодонного отражателя в сравнении

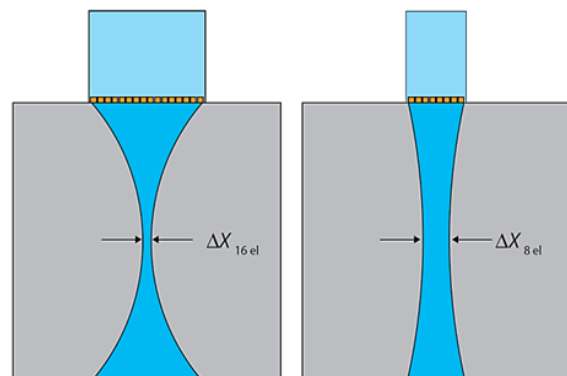


Рис. 2. Изменение ширины ультразвукового пучка при использовании 16-ти и 8-ми элементов в группе электронного сканирования [16]

Таблица 1

Отношение «сигнал от плоскодонного отражателя/шум» без использования фокусировки

Условный номер образца	Отношение «сигнал от плоскодонного отражателя/шум», дБ, по плоскодонному отражателю диаметром, мм			
	2	3	4	5
1	4,7	8,0	8,7	13
2	1,1	6,9	8,5	8,6

Таблица 2

Отношение «сигнал от плоскодонного отражателя/шум» с использованием фокусировки

Условный номер образца	Отношение «сигнал от плоскодонного отражателя/шум», дБ, по плоскодонному отражателю диаметром, мм				
	1	2	3	4	5
1	2,5	8,5	11	12	14,5
2	1,3	5,2	8,4	10,2	10

с шумами структуры материала более чем на 8 дБ. Эта величина часто используется на практике.

Из данных, представленных в табл. 1 и 2, следует, что при использовании фокусировки ультразвукового пучка удается повысить энергетические характеристики на 2–3 дБ и добиться повышения чувствительности по сравнению с контролем без фокусировки на 1–2 мм.

Повышение разрешающей способности

Для повышения разрешающей способности опробовано использование:

- сфокусированного ультразвукового пучка вместо несфокусированного;
- вместе с фокусировкой ультразвукового пучка в фазированной решетке 16-ти элементов в группе электронного сканирования вместо 8-ми элементов и уменьшение шага сканирования с 1 до 0,5 мм.

Для исследования возможности увеличения разрешающей способности путем использования фокусировки, настройку дефектоскопа осуществляли аналогично настройке при проведении исследований по повышению чувствительности. С этой настройкой просканированы области образцов в местах расположения плоскодонных отражателей диаметром от 1 до 5 мм на глубине, соответствующей 1/2 толщины образца, и расположенных парами относительно друг друга на межосевом расстоянии 1; 2; 3; 4 и 5 мм + величина диаметра плоскодонного отражателя. Результаты сканирования получены в виде С-сканов (рис. 3).

Из полученных результатов следует, что фокусировка ультразвукового пучка повышает энергетические характеристики (отношение «сигнал/шум») и дает выигрыш в разрешающей способности в сравнении с результатами, полученными без фокусировки.

С целью большего повышения разрешающей способности проведено сканирование образцов при использовании 16-ти элементов в группе электронного сканирования вместо 8. Вместе с этим уменьшен шаг сканирования – с 1 до 0,5 мм. Результаты сканирования образцов представлены на рис. 4. Видно, что увеличение количества элементов в группе электронного сканирования (с 8 до 16) и уменьшение шага сканирования (с 1 до 0,5 мм) приводят к дополнительному выигры-

шу в разрешающей способности при ультразвуковом эхо-импульсном контроле образцов из ПКМ.

Для численной оценки максимально достижимой разрешающей способности проведена обработка результатов сканирования образцов 1 и 2 при использовании фокусировки ультразвукового пучка, 16 элементов в группе электронного сканирования и шаге сканирования 0,5 мм. Признаком разрешения двух соседних отражателей являлось падение их максимальных амплитуд эхо-сигналов более чем на 6 дБ, расположенных на одной оси с центрами отражателей (рис. 5). Результаты расчетов представлены в табл. 3.

По результатам расчетов, представленным в табл. 3, можно сделать вывод, что минимальное расстояние между двумя рядом расположенными отражателями, на котором они при ультразвуковом контроле на С-скане видны раздельно, составляет 1 мм, т. е. максимально достижимое разрешение при ультразвуковом контроле монолитных образцов из ПКМ эхо-импульсным методом при использовании фазированных решеток составляет 1 мм. Это, в свою очередь, достигается за счет использования фокусировки ультразвукового пучка, использования в фазированной решетке большего количества элементов в группе электронного сканирования и уменьшения шага сканирования.

Обсуждение и заключения

По результатам проведенных исследований образцов из угле- и стеклопластика показаны способы повышения чувствительности и разрешающей способности ультразвукового контроля монолитных образцов из ПКМ, подвергающихся последующим механическим испытаниям для определения их физико-механических характеристик.

Так, показано, что одним из способов повышения чувствительности контроля монолитных образцов из ПКМ является использование фокусирующих преобразователей, в частности – преобразователей на фазированной решетке, где путем изменения задержек сигналов, подаваемых на пьезоэлектрические элементы, можно управлять фокусировкой ультразвукового пучка. Проведение контроля монолитных образцов из углепластика и стеклопластика фазированной решеткой на частоте 5 МГц при использовании фокусировки дает выигрыш в чувствительности на 1–2 мм эквивалентного диаметра в сравнении с контролем без фокусировки.

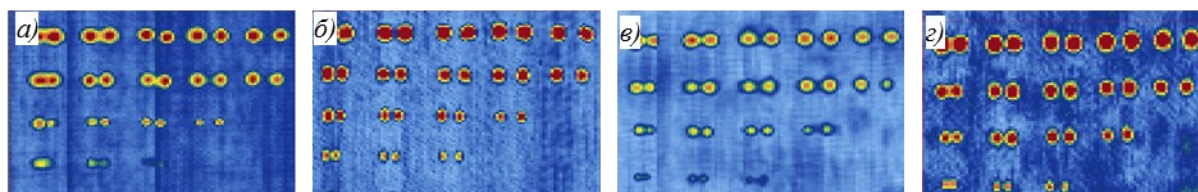


Рис. 3. Результаты сканирования образцов 1 (а, б) и 2 (в, з) без фокусировки (а, в) и с фокусировкой (б, з)

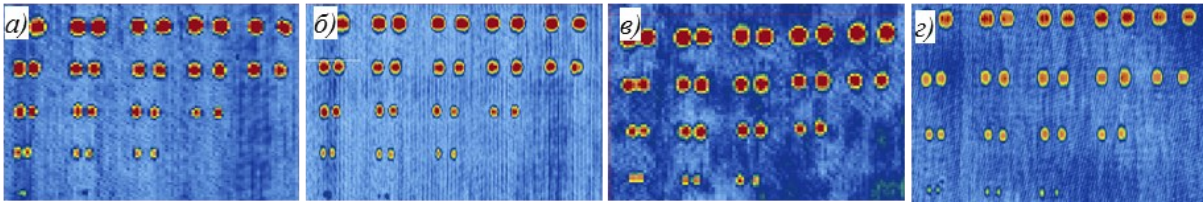


Рис. 4. Результаты сканирования образцов 1 (а, б) и 2 (в, г) с шагом 1 мм и 8-ю элементами (а, в) и с шагом 0,5 мм и 16-ю элементами в группе электронного сканирования

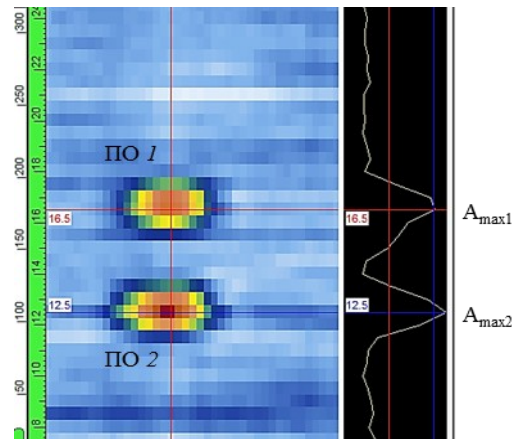


Рис. 5. Разрешение двух соседних плоскостных отражателей (ПО)

Таблица 3

Результаты расчета падения максимальных амплитуд эхо-сигналов между соседними плоскостными отражателями

Условный номер образца	Расстояние между плоскостными отражателями, мм	Падение максимальных амплитуд эхо-сигналов, дБ, между соседними плоскостными отражателями диаметром, мм			
		2	3	4	5
1	1	10,7	14,0	16,1	12,5
	2	10,4	14,0	17,2	18,8
	3	12,1	13,2	15,6	17,2
	4	–	13,1	16,8	18,8
	5	–	–	15,4	17,7
2	1	9,7	11,4	10,1	14,4
	2	11,8	15,1	16,0	15,4
	3	10,5	13,3	13,2	17,0
	4	–	15,4	16,1	16,1
	5	–	–	14,3	15,0

Повышения разрешающей способности при ультразвуковом контроле монолитных образцов из ПКМ можно достичь путем использования фокусировки, а также с помощью фазированных решеток при использовании большего количества элементов в группе электронного сканирования и уменьшения шага сканирования. По результатам проведенных исследований показано, что при использовании 64-элементной линейной фазированной решетки Olympus NDT 5L-64-NW1 с рабочей частотой 5 МГц с использованием 16-ти элементов в группе электронного сканирования при шаге сканирования 0,5 мм можно достичь разрешения в 1 мм.

В заключении следует отметить, что при использовании линейной фазированной решетки повышение разрешающей способности достигается лишь в плоскости электронного сканирования, а в плоскости линейного сканирования она будет оставаться невысокой. Поэтому для повышения разрешающей способности в обеих плоскостях рекомендуется использовать 2D-фазированные решетки.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотруднице ФГУП «ВИАМ» С.И. Яковлевой за помощь в подготовке статьи к изданию.

ЛИТЕРАТУРА

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. Савин С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. №4 (2). С. 686–693.
3. Тимошков П.Н., Платонов А.А., Хрульков А.В. Пропитка пленочным связующим (RFI) как перспективная безавтоклавная технология получения изделий из ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №5. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-5-9-9.
4. Мишкин С.И., Раскутин А.Е., Евдокимов А.А., Гуляев И.Н. Технологии и основные этапы строительства первого в России арочного моста из композиционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №6 (54). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.02.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-5-5.
5. Гончаров В.А., Раскутин А.Е. Компьютерное моделирование процесса инфузии при изготовлении композитного арочного элемента // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №7. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.02.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-11-11.
6. Вешкин Е.А. Особенности безавтоклавного формования низкопористых ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №2 (38). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-7-7.
7. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. №2. С. 37–42.
8. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. №8. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-8-349-367.
9. Бойчук А.С., Генералов А.С., Диков И.А. Контроль деталей и конструкций из полимерных композиционных материалов с применением технологии ультразвуковых фазированных решеток // Авиационные материалы и технологии. 2017. №1 (46). С. 45–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-45-50.
10. 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.
11. 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 // X Всерос. конф. ТестМат «Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли». М.: ВИАМ, 2018. С. 18–31. URL: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1063.pdf> (дата обращения: 21.08.2018).
12. Schadow F., Brackrock D., Gaal M., Heckel T. Ultrasonic Inspection and Data Analysis of Glass- and Carbon-Fibre-Reinforced Plastics // 3rd International Symposium on Fatigue Design and Material Defects, FDMD-2017. (September 19–22, 2017, Lecco, Italy). 2017. P. 299–306. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321617304481> (дата обращения: 17.10.2018).
13. Hsu D.K., Kommareddy V., Barnard D.J. et al. Aerospace NDT using piezoceramic air-coupled transducers // WCNDT. 2004. URL: <http://pdfs.semanticscholar.org/5a74/6552355e7ad839d8e78554a07257cf5a356b.pdf> (дата обращения: 01.11.2018).
14. Grager J., Kotschate D., Gamper J. et al. Advances in air-coupled ultrasonic testing combining an optical microphone with novel transmitter concepts // 12th European conference on Non-Destructive Testing, At Gothenburg, Sweden 2018 URL: http://www.researchgate.net/publication/325711243_Advances_in_aircoupled_ultrasonic_testing_combining_an_optical_microphone_with_novel_transmitter_concepts (дата обращения: 04.12.2018).
15. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
16. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications // Olympus NDT, 2007. URL: <http://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-advances/> (дата обращения: 24.01.2019).