

УДК 620.179:678.8

А.С. Бойчук<sup>1</sup>, А.С. Генералов<sup>1</sup>, И.А. Диков<sup>1</sup>**КОНТРОЛЬ ДЕТАЛЕЙ И КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК**

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-45-50

*Показано применение технологии ультразвуковых фазированных решеток (ФР) для контроля ответственных деталей и конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) на стадиях производства и эксплуатации. Описаны особо опасные типы производственных и эксплуатационных дефектов в ПКМ, а также способы их получения в лабораторных условиях на образцах из ПКМ. Описан опыт применения ФР для выявления дефектов типа расслоения, посторонних включений, ударных повреждений и ударов молний с чувствительностью контроля, эквивалентной выявлению плоскостонного отражателя диаметром 5 мм. Предложен способ неразрушающего контроля (с применением ФР) деталей и конструкций из ПКМ с криволинейной поверхностью, а также радиусной зоны стрингерной панели.*

*Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.3. «Методы неразрушающих исследований и контроля» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].*

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

*The application of phased array (PA) technique for critical FRP parts and structures testing in production and service conditions is shown in the article. The most dangerous production and service types of defects and ways of its obtaining in laboratory on FRP specimens are described. The experience of PA application for delaminations, inclusions, impact damages, lightning stroke damages detection with sensitivity equivalent to assured detection of 5 mm diameter flat bottom hole is described. The way of nondestructive testing of FRP parts and structures with curved surface and also stringer panel radii zone with the use of PA is proposed.*

*Work is executed within implementation of the complex scientific direction 2.3. «Methods of nondestructive researches and control» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** carbon fiber reinforced plastics (CFRP), fiber reinforced plastics (FRP), nondestructive testing (NDT), ultrasound testing (UT), phased array (PA).

<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**

Проведение неразрушающего контроля (НК) на стадиях производства и эксплуатации ответственных деталей и конструкций, применяемых в авиационной технике, является обязательным условием допуска производимых воздушных судов к летным испытаниям, а также дальнейшей безопасности их полетов. В настоящее время в деталях и конструкциях планеров используется большая доля полимерных композиционных материалов [1–10] – до 50% от общей массы изделия, и эта цифра только растет. Это связано с тем, что ПКМ обладают специфическими особенностями, основная из них – высокая анизотропия свойств, позволяющая создавать конструкции с заранее заданными оптимальными характеристиками. В настоящий момент наиболее эффективно используют ПКМ в конструкциях высоконагруженных агрегатов воздушных судов –

кессонах киля, стабилизатора и крыла, а также в силовых отсеках фюзеляжа.

На стадиях производства детали или конструкции из ПКМ могут образовываться несплошности (дефекты), к наиболее опасным из которых можно отнести пористость, расслоения и посторонние включения. При формовании ребристых панелей также наблюдаются полости в зоне Т-образного соединения стрингера с обшивкой, вызванные неправильной закладкой, непроформовкой или смещением жгута. К наиболее опасным эксплуатационным дефектам относятся ударные повреждения. Такие дефекты могут трудно обнаруживаться при визуальном осмотре, при этом они существенно снижают способность конструкции сопротивляться сжимающим нагрузкам и склонны к росту в процессе эксплуатации. Другим типичным эксплуатационным дефектом,

с которым столкнулись ведущие зарубежные авиастроительные компании, являются отслоения и трещины, в частности отслоения приформованного элемента жесткости от панели. В связи с этим проведение неразрушающего контроля и диагностики ПКМ является важной и актуальной задачей.

При НК деталей и конструкций авиационной техники, изготавливаемых из ПКМ, в последнее время широко применяется ультразвуковой высокочастотный эхо-импульсный метод [11]. Однако производительность контроля при использовании одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), используемых при проведении контроля, очень низкая и составляет  $\sim 2-4$  м<sup>2</sup>/ч, достоверность результатов также невысокая. Совершенствование эхо-импульсного метода привело к появлению технологии ультразвуковых фазированных решеток (ФР), которая вслед за применением ее при контроле металлических изделий стала использоваться при контроле ПКМ [12, 13]. Данная технология позволяет существенно увеличить производительность, а также повысить достоверность результатов контроля.

В данной работе приведены результаты неразрушающих исследований образцов из углепластика, подобных простым и сложным конструкциям, применяемым в авиационной технике, с использованием ультразвуковых фазированных антенных решеток.

### Материалы и методы

Для проведения неразрушающих исследований методом автоклавного формования отформованы образцы из углепластика, которые имитировали типовые простые и сложные конструкции из ПКМ (рис. 1), применяемые в воздушных судах. Образцы изготавливали из углепластика на основе клевого связующего (клея ВК-36Р) и наполнителя (однонаправленной углеродной ленты ЭЛУР-П) со схемой укладки слоев  $[0^\circ/90^\circ]$ . Один из образцов изготовлен на основе углеродной ткани и эпоксидного связующего, модифицированного наночастицами (с лакокрасочным покрытием).

Для имитации дефектов ПКМ, в образцах были отфрезерованы плоскостные отражатели (имитация расслоения), при формовании в образцы между слоями препрега углепластика закладывали фрагменты технологических пленок (имитация попадания в материал посторонних включений), а также металлические клинья с последующим их удалением (имитация расслоения). В качестве технологических пленок использовали фторопластовую пленку толщиной 40 мкм, полиимидную пленку толщиной 40 мкм и полиэтиленовую пленку толщиной  $\sim 80$  мкм. Металлические клинья изготавливали из нержавеющей жаропрочной стали толщиной 0,09 мм и сверху покрывали антиадгезионным покрытием для легкого удаления их после формования образца.

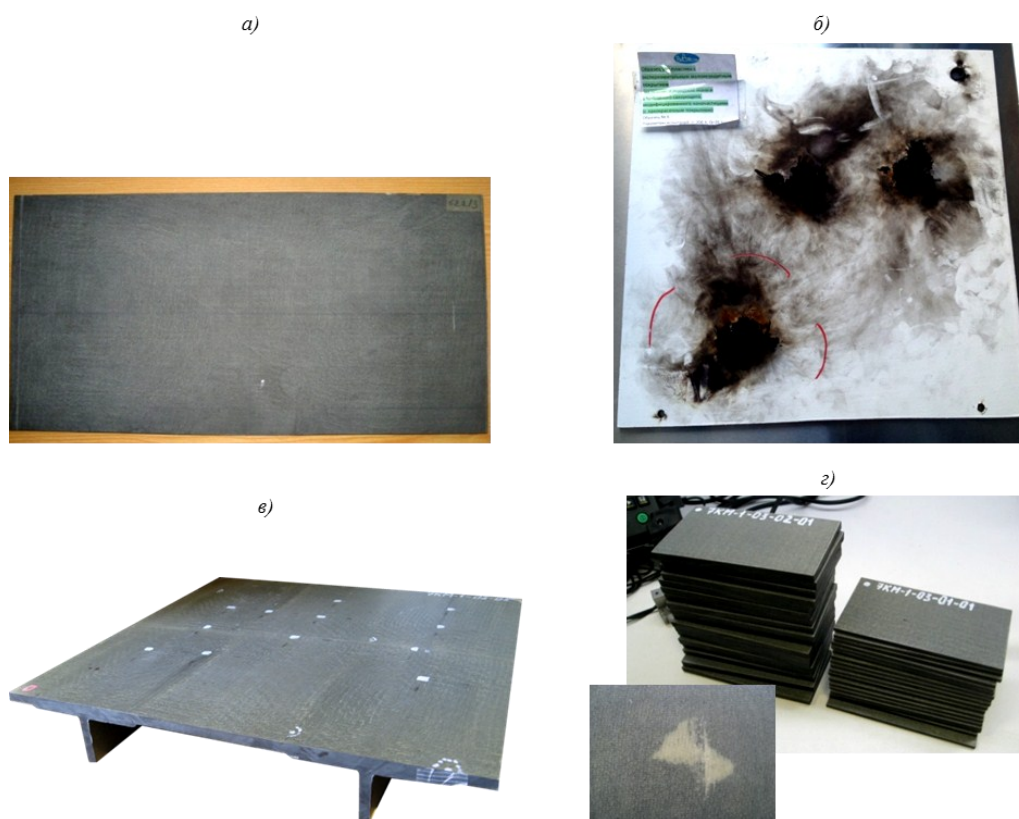


Рис. 1. Внешний вид образцов до проведения неразрушающих исследований (а, в) и после них (б, г): а – плоская панель из углепластика с искусственными дефектами; б – образец из углепластика с повреждениями от ударов молний; в – образец стрингерной панели из углепластика с искусственными дефектами; г – образцы из углепластика с повреждениями после удара копра

В образцы стрингерных панелей в зону жгута Т-образного соединения стрингера с обшивкой помимо технологических пленок закладывали фрагменты из термостойкого силикона (имитация дефектов жгута, полостей).

В качестве имитации эксплуатационных дефектов использовали повреждения, получаемые путем ударных воздействий с применением копра Instron Ceast с энергией удара от 5 до 18,5 Дж и путем удара молнией с силой тока 200 А и зарядом 20 Кл (имитация ударного повреждения), а также путем удара металлического клина в границу раздела монолитной панели и приформованной к ней полки стрингера с последующим его удалением (имитация отслоения).

В качестве оборудования с фазированными решетками для проведения исследований использовали дефектоскоп компании Olympus NDT, линейную фазированную решетку с рабочей частотой 5 МГц, секторную фазированную решетку с рабочей частотой 5 МГц, а также датчик пути Encoder и двухкоординатный X-Y-сканер. Для уменьшения неконтролируемых приповерхностных «мертвых» зон, при контроле использовали специальную линию задержки (призма) из полистирола. Величину линии задержки выбирали таким образом, чтобы второй отраженный эхо-импульс от торца линии задержки располагался на экране дефектоскопа на развертке типа А после эхо-импульса от донной поверхности объекта контроля (ОК). Эту величину можно приближенно считать с использованием следующего выражения:

$$L_3 \geq H_{\max} \frac{c_3}{c_y} + 1,$$

где  $c_3$  – скорость продольной волны в материале задержки, мм/мкс;  $c_y$  – скорость продольной волны при ее распространении в контролируемом углепластике поперек слоев, мм/мкс;  $H_{\max}$  – максимальная толщина исследуемого ОК.

### Результаты

При контроле монолитных образцов из углепластика настройку дефектоскопа осуществляли на чувствительность, эквивалентную выявлению плоскодонного отражателя диаметром 5 мм, и с использованием временной регулировки чувствительности по трем плоскодонным отражателям, расположенным на разных глубинах (ближний, средний и дальний), выполненных с донной поверхности в рабочем стандартном образце (PCO). Ближний отражатель располагался на глубине  $0,5 \pm 0,1$  мм от поверхности ввода PCO, средний – на глубине  $H/2 \pm 0,2$  мм (где  $H$  – толщина PCO), дальний – на глубине  $0,5 \pm 0,1$  мм от донной поверхности.

Электронное сканирование осуществляли группой из восьми элементов 64-элементной фазированной решетки, фокус ультразвукового пучка устанавливали на приповерхностную зону контролируемых образцов. Результаты сканирования образцов приведены на рис. 2 и 3.

Видно (рис. 2), что искусственные дефекты, имитирующие посторонние включения (различные технологические пленки), а также дефекты-имитаторы, имитирующие расслоения (плоскодонные отражатели и места закладывания с последующим удалением металлических клиньев), хорошо выявляются на частоте 5 МГц при использовании электронного сканирования группой из восьми элементов. Стоит также отметить, что при установке порогового уровня строга автоматической сигнализации дефекта -6 дБ относительно опорного уровня, границы дефектов обрисовываются на С-скане с точностью до 0,5–1 мм.

Результаты выявления повреждений от ударов молнией и копра представлены на рис. 3. Анализ данных, сохраненных в виде С-скана, показывает, что ударные повреждения, которые не видны полностью на поверхности образца после ударных воздействий, залегают в глубине материала и представляют собой множественные расслоения и трещины, распространяющиеся вдоль расположения слоев препрега, из которых состоит углепластик.

На практике часто встречаются конструкции из ПКМ, имеющие неровные поверхности, в частности цилиндрической формы переменного радиуса с приформованными элементами жесткости. Для решения задачи контроля деталей и конструкций из ПКМ с криволинейной поверхностью предложены и реализованы два способа создания акустического контакта между фазированной решеткой и криволинейной поверхностью объекта контроля из ПКМ [14, 15]:

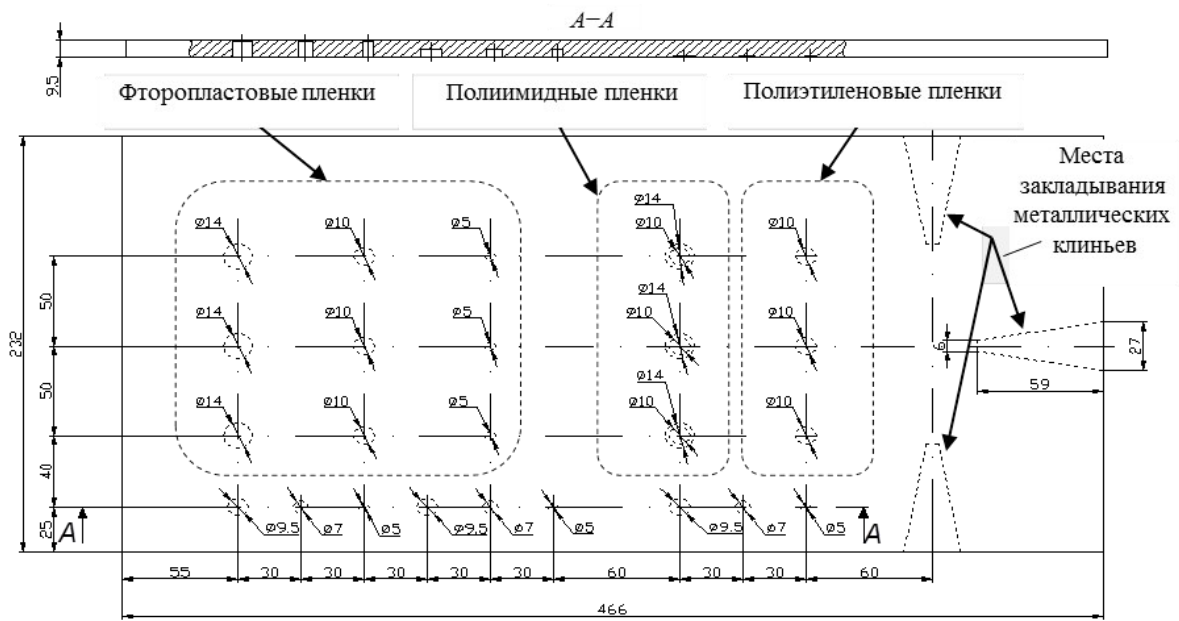
- изготовление специальной призмы из оргстекла с использованием в области между физической апертурой фазированной решетки и объектом контроля вставки из аквалена;

- использование специальной оправки с водной акустической линией задержки, которую за рубежом называют Waterbox; за рубежом для контроля ПКМ с неровными поверхностями также используют катящиеся фазированные решетки [16, 17].

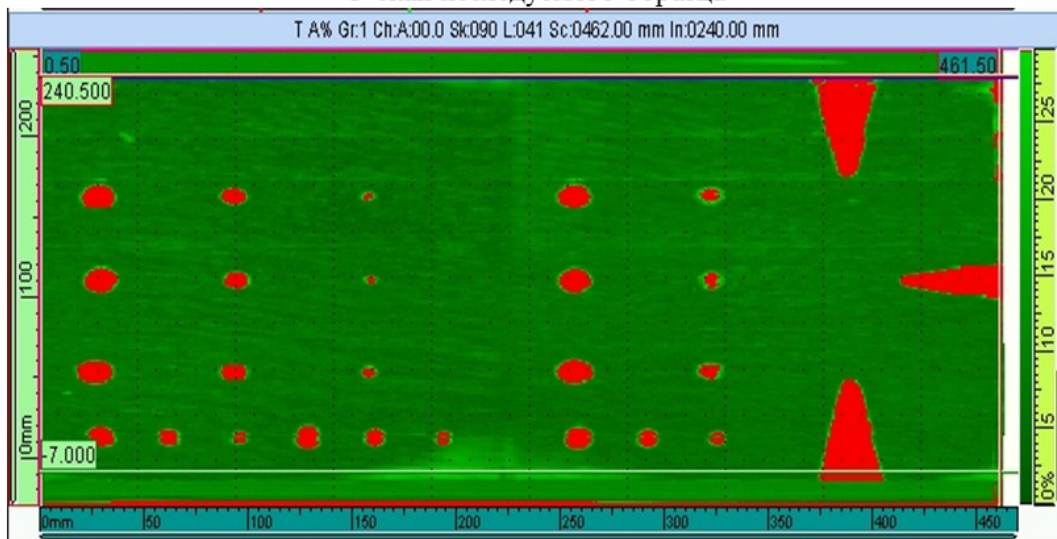
При исследовании возможности контроля радиусной зоны стрингерной панели использована секторная фазированная решетка, а для создания акустического контакта – разработана специальная оправка из оргстекла и аквалена (рис. 4), что позволяет контролировать такие зоны без создания локальной иммерсионной ванны или вообще без погружения детали в иммерсионную ванну.

Настройку при контроле радиусных зон, как и при контроле плоских панелей, осуществляли по плоскодонным отражателям диаметром 5 мм в плоском образце. Результаты контроля радиусных зон с заложенными в них искусственными дефектами представлены на рис. 5.

По результатам контроля и анализа данных в программе TomoView, установлено, что все искусственные дефекты, заложенные в радиусные зоны, выявлены, а размеры и глубина залегания – определены с высокой точностью.



С-скан исследуемого образца



В-скан исследуемого образца в сечении А-А

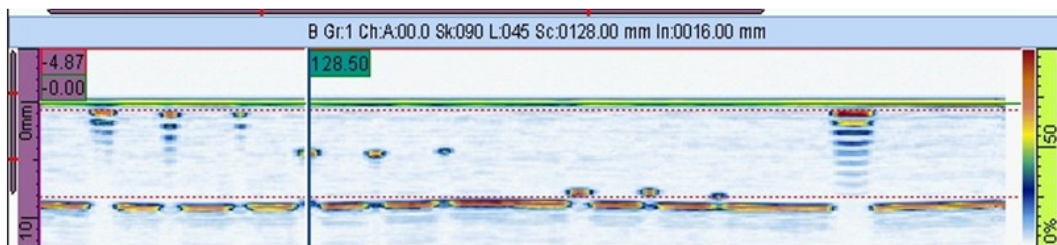


Рис. 2. Результат сканирования плоского образца с искусственными дефектами



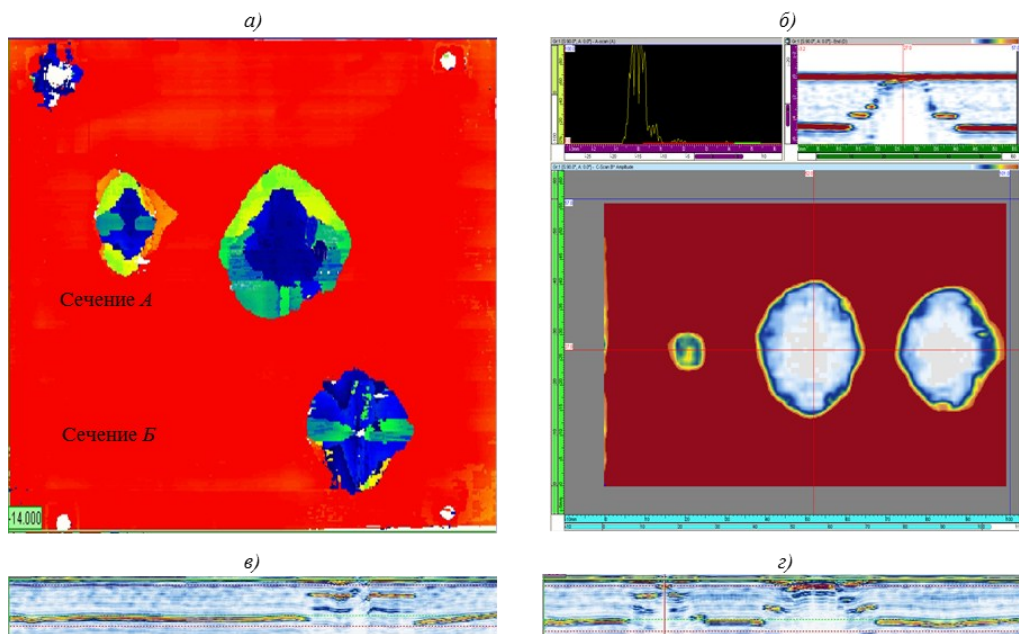


Рис. 3. Результаты сканирования образцов из углепластика с повреждениями от ударов молнией и копра: а – С-скан образца из углепластика с повреждениями от удара молнией; б – А-, S- и С-сканы образца из углепластика с повреждениями от удара копра; в – В-скан в сечении Б; г – В-скан в сечении А



Рис. 4. Оправка из оргстекла и аквалена

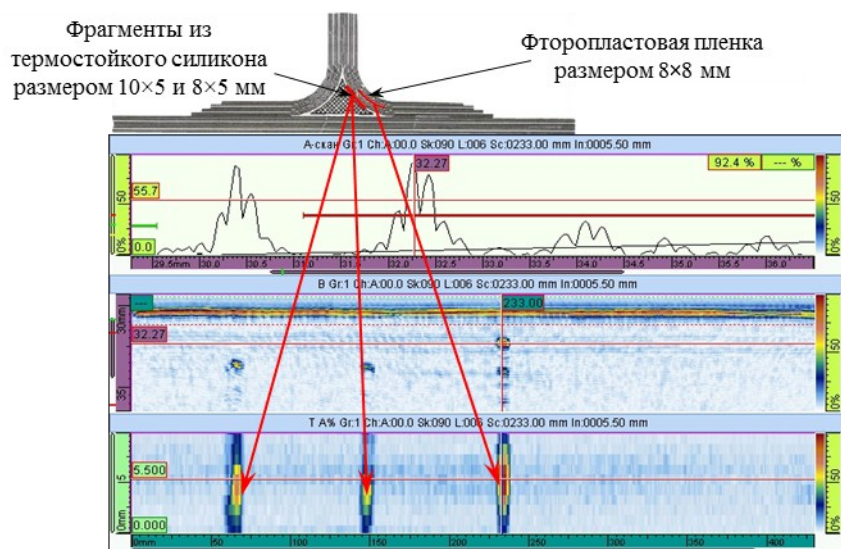


Рис. 5. Результаты контроля радиусных зон с заложенными в них искусственными дефектами

Проведен также расчет производительности контроля ПКМ при использовании фазированных решеток, которая составила порядка 20–40 м<sup>2</sup>/ч.

#### Обсуждение и заключения

Проведенные ультразвуковые исследования образцов из углепластика с использованием фазированных решеток показали, что данная технология позволяет выявлять все наиболее опасные производственные и эксплуатационные дефекты ПКМ, определять их размеры и положение с вы-

сокой точностью. Существенно увеличиваются производительность контроля крупногабаритных панелей по сравнению с использованием традиционных методов контроля (в ~10–15 раз) благодаря применению широкозахватного многоэлементного преобразователя, полнота (с помощью секторных фазированных решеток появляется возможность проконтролировать радиусные зоны Т-образного соединения стрингера с панелью) и достоверность результатов контроля [18].

#### 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Тростянская Е.Б., Михайлин Ю.А., Бухаров С.В. Тенденции применения и развития композиционных материалов в самолетостроении // *Авиационная промышленность*. 2002. №2. С. 18–22.
3. Донецкий К.И., Коган Д.И., Хрульков А.В. Свойства полимерных композиционных материалов, изготовленных на основе плетеных преформ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №3. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.04.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-5-5.
4. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Куцевич К.Е. Клеевые препреги на основе тканей Porcher – перспективные материалы для деталей и агрегатов из ПКМ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №6. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.04.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-10-10.
5. Полиимидное связующее для армированных пластиков, препрег на его основе и изделие, выполненное из него: пат. 2394857 Рос. Федерация; опубл. 07.05.09.
6. Эпоксидное связующее, препрег на его основе и изделие, выполненное из него: пат. 2424259 Рос. Федерация; опубл. 22.10.09.
7. Тимошков П.Н., Хрульков А.В. Современные технологии переработки полимерных композиционных материалов, получаемых методом пропитки расплавленным связующим // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №8. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.04.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-4-4.
8. Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е. Свойства и назначение композиционных материалов на основе клеевых препрегов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №8. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.04.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-6-6.
9. 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.
10. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ // *Авиационная промышленность*. 2009. №4. С. 36–46.
11. Generalov A.S., Dalin M.A., Boychuk A.S. CFRP inspection by ultrasonic high-frequency pulse-echo method // 10-th European conference on non-destructive testing. 2010. Part 2. P. 285.
12. Бойчук А.С., Генералов А.С., Степанов А.В., Южакова О.В. Неразрушающий контроль ПКМ с использованием ультразвуковых фазированных решеток // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2013. №2. С. 54–58.
13. 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.
14. Бойчук А.С., Степанов А.В., Генералов А.С. Ультразвуковой контроль криволинейных поверхностей конструкций современных самолетов из полимерных композиционных материалов с помощью преобразователя на фазированной решетке и специальных приспособлений // *Сб. тез. докл. XIX Междунар. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»*. Гурзуф. 2011. С. 129–130.
15. Бойчук А.С., Генералов А.С., Степанов А.В. УЗК деталей и конструкций из ПКМ с криволинейной поверхностью при использовании фазированных решеток // *Сб. тез. докл. XX Междунар. науч.-технич. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»*. М., 2014. Т. 2. С. 102.
16. Компания Olympus IMS: офиц. сайт. URL: <http://www.olympus-ims.com/ru/rollerform/> (дата обращения: 10.04.2015).
17. Компания Sonatest: офиц. сайт. URL: [http://www.sonatest.ru/products/DFD/DFD-special/units\\_10.html](http://www.sonatest.ru/products/DFD/DFD-special/units_10.html) (дата обращения: 10.04.2015).
18. Бойчук А.С., Генералов А.С., Ложкова Д.С., Степанов А.В. Оценка вероятности обнаружения дефектов в углепластиках при ультразвуковой дефектоскопии с использованием фазированных решеток // *Сб. тез. докл. XIX Междунар. науч.-технич. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»*. М.: НИУ МЭИ, 2013. С. 106.