
Научная статья

УДК 620.179

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-115-124

ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ РЕМОНТА МОНОЛИТНЫХ ЗОН ВЕРТОЛЕТНЫХ ЛОПАСТЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.С. Бойчук¹, В.Ю. Чертищев¹, И.А. Диков¹, А.С. Генералов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Контроль ремонта монолитных конструкций из полимерных композиционных материалов в отличие от контроля при их производстве и эксплуатации требует особого подхода. Приведены результаты исследований ремонта монолитных образцов, имитирующих фрагмент лонжерона вертолетной лопасти. Исследования проведены с использованием ультразвукового эхо-импульсного метода. Показано, что контроль отремонтированной монолитной зоны в зависимости от схемы ремонта может включать контроль материала ремонтной заплатки и ее приклейки к основному материалу.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, вертолетная лопасть, монолитные зоны, ремонт, неразрушающий контроль, ультразвуковой эхо-импульсный метод

Для цитирования: Бойчук А.С., Чертищев В.Ю., Диков И.А., Генералов А.С. Особенности ультразвукового контроля ремонта монолитных зон вертолетных лопастей из полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2023. № 12 (130). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-115-124.

Scientific article

THE REPAIR MONOLITHIC ZONES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS HELICOPTER BLADES ULTRASONIC TESTING SPECIFICITY

A.S. Boychuk¹, V.Yu. Chertishchev¹, I.A. Dikov¹, A.S. Generalov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. A special approach is required for repair process as opposed to polymer composite materials monolithic structures testing for it production and operation. The results of repaired monolithic specimens simulating helicopter blade spar fragment research is described at the article. The researches were carried out by ultrasonic pulse-echo technique. It is shown that the repaired monolithic zone testing depending on the repair scheme can be divided into the repair patch material testing and quality testing of its gluing to the main material of the repaired object.

Keywords: polymer composite materials, helicopter blade, monolithic zones, repair, nondestructive testing, ultrasonic pulse-echo technique

For citation: Boychuk A.S., Chertishchev V.Yu., Dikov I.A., Generalov A.S. The repair monolithic zones of polymer composite materials helicopter blades ultrasonic testing specificity. *Trudy VIAM*, 2023, no. 12 (130), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-115-124.

Введение

Повышение весовой эффективности и ресурса различных конструкций (элементов фюзеляжа, лопастей рулевого и несущего винта и др.) вертолетной техники возможно за счет разработки полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1–5] и технологических решений для их изготовления [6–8]. В последнее время доля применения композитов в конструкциях современных вертолетов постоянно растет и может составлять до 40–50 %, разработчики изделий стремятся увеличить этот показатель [9]. Благодаря внедрению новых ПКМ и технологий их изготовления удается существенно упростить технологический процесс получения конструкций высоконагруженных вертолетных агрегатов, таких как лопасти несущего и рулевого винта, повысить показатели технологических и эксплуатационных характеристик, а также ресурс работы [10].

Вместе с тем при эксплуатации авиационная техника подвержена различным ударным воздействиям (попадание посторонних предметов, удар молнии и др.), к которым чувствительны конструкции из полимерных композитов. В результате ударного воздействия могут образоваться ударные повреждения, представляющие собой множественные расслоения, растрескивания и способные существенно снизить прочность изделия. Кроме того, под воздействием различных механических нагрузок и климатических факторов полученные повреждения могут расти и приводить к разрушению конструкции.

В настоящее время для ремонта монолитных зон изделий из ПКМ разрабатываются специальные материалы и технологии [11–13], позволяющие полностью или частично восстановить эксплуатационные характеристики. Анализ научно-технической литературы показывает, что в основном используются два способа ремонта – с применением клеев/связующего горячего отверждения и клеев холодного отверждения. Как правило, клеи/связующие горячего отверждения применяют при структурном, постоянном ремонте в условиях организации, эксплуатирующей авиационную технику. Цель такого ремонта – восстановление эксплуатационных характеристик агрегата (изделия). Ремонт толстостенных конструкций из ПКМ с повреждениями диаметром менее 10 мм проводится по схеме 1 путем высверливания повреждения, заполнения отверстия полимерным наполнителем и наложения ремонтной накладки (рис. 1, а). При повреждениях диаметром более 10–20 мм ремонт проводится по схеме 2, включающей механическую обработку изделия ступенчатым способом с целью дальнейшей послойной выкладки ремонтной заплаты на предварительно уложенный клей (рис. 1, б).

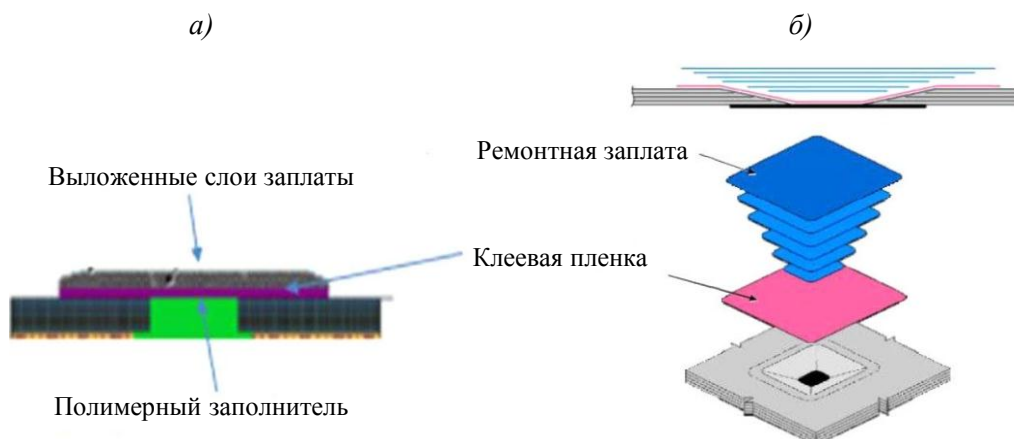


Рис. 1. Ремонт толстостенных монолитных конструкций из полимерных композиционных материалов по схемам 1 (а) и 2 (б)

Для безопасной эксплуатации воздушных судов после ремонта необходимо оценивать качество проведенных мероприятий методами неразрушающего контроля, обеспечивающими своевременное и надежное выявление дефектов в монолитных и многослойных конструкциях из ПКМ [14–19]. Для контроля изделий из композитов главным образом используют методы, основанные на возбуждении и распространении в исследуемом объекте упругих колебаний ультразвукового диапазона. К ним относятся акустические (импедансный и свободных колебаний) и ультразвуковые (эхо-импульсный и теневой) методы.

Акустический импедансный метод учитывает изменения механического импеданса материала контролируемого объекта. Это наиболее простой и распространенный в промышленности способ, позволяющий обнаруживать зоны повреждений как монолитных элементов конструкций, так и многослойных с различными видами заполнителей (сотами, пеной и др.). Акустический метод свободных колебаний, основанный на возбуждении упругих колебаний широкого диапазона частот в контролируемой зоне и регистрации изменения спектра применяемых сигналов, используют для контроля клееных многослойных конструкций с обшивками из полимерных композитов толщиной более 2 мм. Теневой метод основан на излучении и приеме ультразвуковых колебаний, однократно прошедших через контролируемый объект. Признаком обнаружения дефекта является уменьшение амплитуды прошедшего сигнала до уровня ниже порога чувствительности. Для контроля данным методом необходим двухсторонний доступ к конструкции и строгая соосность акустических осей излучающего и приемного преобразователей. Теневой метод можно использовать для контроля монолитных и многослойных конструкций, а также клеевых соединений. Эхо-импульсный метод, или метод отражения, основан на излучении и приеме ультразвуковых импульсов, отраженных от различных неоднородностей в материале объекта контроля, и анализе величины амплитуды и времени ее появления на экране дефектоскопа. Эхо-импульсный метод наиболее распространен при контроле монолитных зон и верхних обшивок многослойных конструкций толщиной более 1–2 мм.

Оценка качества ремонта изделий из слоистых пластиков методами неразрушающего контроля заметно отличается от контроля при производстве и эксплуатации конструкции: контролепригодность отремонтированных зон может быть существенно снижена, появляются новые типы дефектов. Так, контроль ультразвуковым эхо-импульсным методом монолитных зон конструкций из углепластика после ремонта, проведенного по схемам 1 и 2, может включать контроль наличия в монолитных зонах расслоений и клеевых соединений, образованных при приклейке ремонтной заплаты к основному материалу. Особенно это выражено при использовании материала заплаты и клеевой пленки с акустическими свойствами, отличными от акустических свойств основного материала контролируемого объекта.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ 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») [20].

Материалы и методы

Качество ремонта монолитных зон конструкций вертолетной техники из ПКМ оценивали методами неразрушающего контроля на образцах из гибридного стеклоуглепластика, имитирующих фрагмент лонжерона вертолетной лопасти. На образцах просверлены отверстия диаметрами 10 и 30 мм и проведен их ремонт по схемам 1 и 2.

В качестве ремонтной заплаты и накладки использовали материалы как с одинаковыми, так и с отличными от основного материала образцов акустическими свойствами. На рис. 2 представлен вид изготовленных образцов с ремонтом.

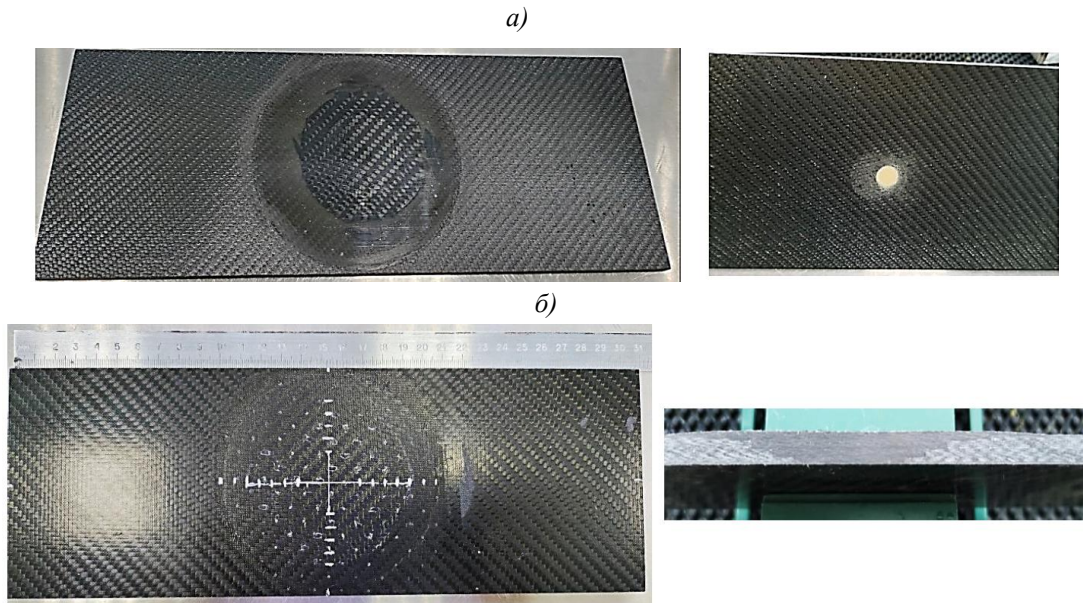


Рис. 2. Образцы, отремонтированные по схемам 1 (а) и 2 (б)

Поверхность образцов, отремонтированных по схеме 2 (рис. 1, б), для облегчения исследований размечена белым маркером в соответствии со ступенчатым способом выкладки ремонтной заплаты. В этих образцах также просверлены плоскодонные отверстия диаметром 10 мм, засверленные в материал ремонтной заплаты.

Для исследования образцов использовали ультразвуковой дефектоскоп, поддерживающий режим работы с фазированными решетками, 64-элементную линейную фазированную решетку с рабочей частотой 3,5 МГц, призму из эластомерного материала, двухкоординатный сканер и специальное программное обеспечение для анализа результатов. В качестве контактной жидкости применяли дистиллированную воду.

Исследования проводили контактным ультразвуковым эхо-импульсным методом с использованием продольных акустических волн.

Поверхности отремонтированных зон подвергали механической обработке. На поверхности зон ремонта не должно быть натеков связующего (клея) и различных неровностей, препятствующих обеспечению акустического контакта между поверхностью призмы и объектом контроля при проведении ультразвуковых исследований.

Результаты и обсуждение

Исследование образца с ремонтом по схеме 1

Ультразвуковое исследование образца 1 с ремонтом, проведенным в соответствии со схемой 1 (рис. 1, а), заключалось в настройке дефектоскопа на настроечном образце, предназначенном для контроля монолитных зон лопастей без ремонта, по плоскодонным отражателям диаметром 10 мм и оценке степени приформовки накладки в зоне ремонта. Ремонтная накладка состояла из трех слоев препрега углепластика и была приформована к основному материалу образца через слой клеевой пленки. Данная настройка необходима, поскольку в качестве накладки использовали материал с акустическими свойствами, схожими с акустическими свойствами основного материала образца. Результаты исследования в виде В- и С-сканов приведены на рис. 3.

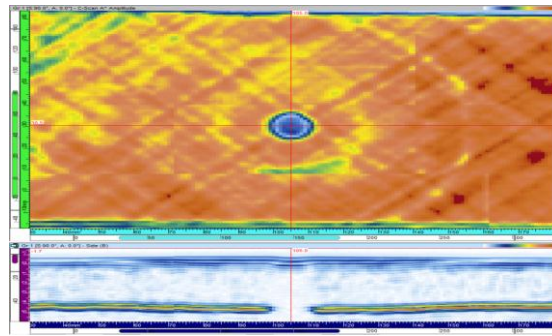


Рис. 3. В- и С-сканы образца 1 с зоной ремонта по схеме 1

Зону, заполненную полимерным наполнителем, не контролировали, так как пена и ее приклейка к углепластиковой накладке при использовании эхо-импульсного метода становятся неконтролепригодными.

Следует отметить, что в случае отличия акустических свойств материала приформовываемой накладки и клеевой пленки от свойств основного материала контроль осуществляли бы аналогичным образом, но для настройки использовали настроечный образец с аналогичной приформованной накладкой.

Исследование образцов с ремонтом по схеме 2

Наибольший интерес представляет контроль зон ремонта, проведенного по схеме 2 (рис. 1, б). В данном случае ультразвуковые исследования проводили на образцах с ремонтными заплатами из материалов с разными акустическими свойствами. Для сравнительной оценки отличия акустических свойств материалов заплаты и образца проведен замер параметра усиления дефектоскопа, при котором величина амплитуды донного эхо-сигнала на экране А-скана составляла 80 %. Замер усиления проводили в пяти точках в зонах без ремонта (зона 1) и с ремонтом со сквозной вырезкой (зона 2) для двух разных материалов заплаты (рис. 4). Результаты представлены в таблице.

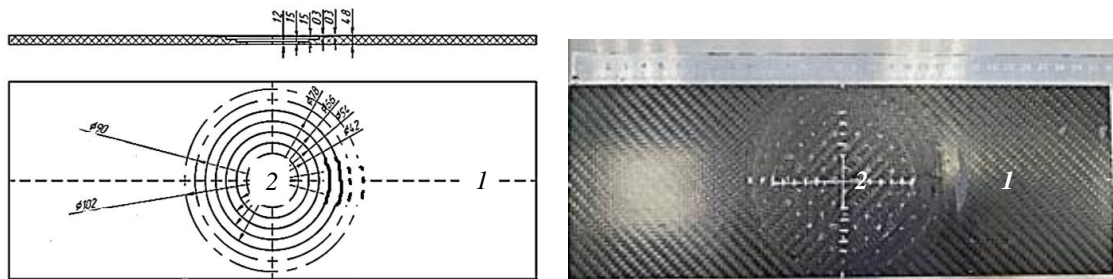


Рис. 4. Зоны замера амплитуд донных эхо-сигналов

Усиления дефектоскопа в зонах без ремонта (зона 1) и с ремонтом со сквозной вырезкой (зона 2)

Образец	Зона	Усиления дефектоскопа, при которых величина амплитуды донного эхо-сигнала на экране А-скана составляет 80 %, дБ, при замере					Среднее значение
		1	2	3	4	5	
2	1	27,0	26,9	26,8	28,2	27,5	27,3
	2	41,6	43,2	42,4	43,1	44,6	42,3
3	1	25,0	24,0	25,8	25,1	24,9	25,0
	2	25,0	24,7	24,9	25,2	24,8	24,9

Для образца 2 акустические свойства материалов заплата и изделия различались довольно существенно (средняя разница усиления дефектоскопа составляет 15 дБ). При настройке усиления и временной регулировке чувствительности при контроле материала заплата такое отличие свойств может привести к появлению на экране дефектоскопа эхо-сигналов от структуры основного материала объекта контроля с амплитудой, превышающей уровень срабатывания автоматической сигнализации дефекта (АСД). Контроль данной зоны без стробирования по толщине ремонтной заплата может привести к перебраковке. Для образца 3 акустические свойства материалов заплата и изделия практически совпадали, а значит, при близких значениях акустического импеданса материалов можно контролировать так же, как и зону без ремонта.

На рис. 5 приведены результаты ультразвукового исследования зон ремонта образцов 2 и 3 в виде *B*- и *C*-сканов при настройках чувствительности по трем плоскодонным отражателям диаметром 10 мм, засверленным в материал заплата со стороны донной поверхности и расположенных вблизи поверхности, в середине и вблизи дна исследуемых образцов. Результаты представлены для разных положений и ширины строба АСД, соответствующих ступеням ремонтной заплата.

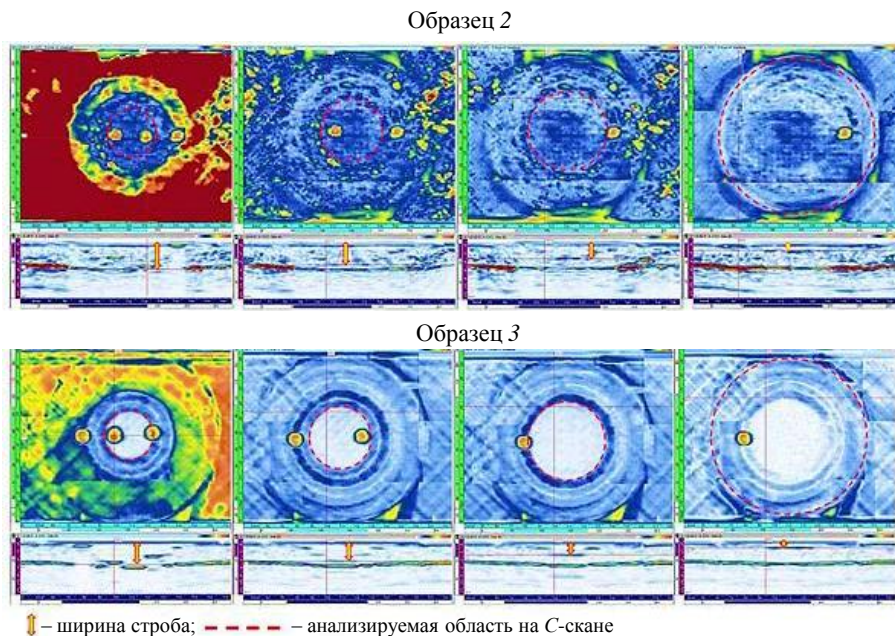


Рис. 5. *B*- и *C*-сканы образцов с ремонтом, изготовленных ступенчатым способом, при стробировании по толщине ремонтной заплата

Результаты исследований, представленные на рис. 5, подтверждают ранее сделанные выводы. При отличии акустических свойств материалов ремонтной заплата и объекта контроля на *B*- и *C*-сканах вместе с появлением образов от плоскодонных отражателей диаметром 10 мм появляются образы структуры основного материала с амплитудой эхо-сигналов, превышающей порог обнаружения дефектов (образец 2). Поэтому контроль и анализ *C*-сканов в данном случае необходимо проводить по зонам путем стробирования. Для образца 3 в зоне ремонта ложные эхо-сигналы при любом положении строба АСД отсутствовали. В данном случае можно проводить контроль и анализ *C*-скана при одном положении строба АСД, установленного по ширине от поверхностного эхо-сигнала до донного.

На *B*- и *C*-сканах образцов, отремонтированных по схеме 2, можно также заметить, что на границе приклейки ремонтной заплата к основному материалу образца (ступеньки) появляются дополнительные эхо-сигналы. Они возникают независимо от

схожести акустических свойств материалов заплата и образца. Эти эхо-сигналы обусловлены также акустическими свойствами используемой клеевой пленки. Поэтому границы раздела «материал заплата–основной материал образца» необходимо дополнительно контролировать так же, как и клеевые соединения типа «лист–лист».

Заключения

Результаты исследования монолитных образцов из гибридного стеклоуглепластика, имитирующих фрагмент лонжерона вертолетной лопасти с ремонтными заплатами, изготовленными по двум разным схемам, показывают необходимость особого подхода к проведению их неразрушающего контроля. Особую сложность вызывает контроль зон ремонта при отличии акустических свойств материалов заплата и изделия. Дополнительные изменения по сравнению с контролем монолитных зон без ремонта также обусловлены применением клеевой пленки.

Основная особенность ремонта, проведенного по схеме 1, заключается в оценке качества проформовки и приклейки ремонтной накладки на поверхность объекта контроля в зоне ремонта. Зона, заполненная полимерным наполнителем, в данной схеме становится неконтролепригодной при использовании ультразвукового эхо-импульсного метода. Основным материалом объекта контроля под ремонтной накладкой после ремонта остается контролепригодным, однако необходим настроечный образец с такой же накладкой.

Результаты исследований образцов с ремонтом по схеме 2 позволяют сделать следующие выводы:

– при отличии акустических свойств материалов объекта контроля, заплата и/или клеевой пленки контроль зоны ремонта необходимо проводить в два этапа: сначала контролируют наличие несплошностей в материале ремонтной заплата, затем – наличие непроклеев в приклейке заплата к основному материалу изделия. Причем контроль материала ремонтной заплата необходимо проводить по зонам (важно заранее нанести разметку на поверхность зоны ремонта в соответствии со схемой) путем изменения ширины строка в соответствии с толщиной ремонтной заплата. Следует отметить, что в процессе эксплуатации изделия в данном случае контроль основного материала под ремонтной заплатой ультразвуковым эхо-импульсным методом невозможен, если отсутствует доступ к объекту контроля со стороны, противоположной стороне заплата;

– в случае схожести акустических свойств материалов объекта контроля, заплата и клеевой пленки контроль зоны ремонта можно проводить аналогично контролю зоны без ремонта – при одном положении строка АСД.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексахин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
2. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
3. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. № 5. С. 7–27.
4. Сидорина А.И. Мультиаксиальные углеродные ткани в изделиях авиационной техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.05.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.
5. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Быстрикова Д.В., Грачева А.Д. Углепластик на основе объемно-армирующей плетеной преформы для элемента лопасти воздушного винта // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-27-38.

6. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор). Часть 1. Автоматизированная выкладка лент (ATL) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 06.06.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
7. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор). Часть 2. Автоматизированная выкладка волокон (AFP) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 3 (64). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 06.06.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-117-127.
8. Баранников А.А., Постнова М.В., Крашенинникова Е.В., Васюков А.Н. Применение новых технологий в производстве лопастей несущего винта вертолета // *Труды ВИАМ*. 2021. № 11 (105). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.06.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-91-102.
9. Башаров Е.А., Вагин А.Ю. Анализ применения композиционных материалов в конструкции планеров вертолетов // *Труды МАИ*. 2017. № 92. С. 1–33. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/analiz-primeneniya-kompozitsionnyh-materialov-v-konstruktsii-planerov-vertoletov> (дата обращения: 13.06.2023).
10. Дорошенко Н.И. Применение ПКМ в конструкции лопастей винтов вертолетов // *Полимерные композиционные материалы для авиакосмической отрасли: материалы Всерос. науч.-техн. конф.* М.: ВИАМ, 2019. С. 23–41. URL: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1234.pdf> (дата обращения: 19.06.2023).
11. Ривин Г.Л. Ремонт конструкций из полимерных композиционных материалов летательных аппаратов: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2000. 75 с.
12. Katnam K.B., DaSilva L.F.M., Young T.M. Bonded repair of composite aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities // *Progress in Aerospace Sciences*. 2013. No. 61. P. 26–42. URL: https://www.researchgate.net/publication/258240754_Bonded_repair_of_composite_aircraft_structures_A_review_of_scientific_challenges_and_opportunities (дата обращения: 19.06.2023).
13. Баранников А.Б. Материалы, технологии и оборудование НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для ремонта конструкций из ПКМ // *Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России: материалы III Междунар. науч.-техн. конф.* М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2022. С. 167–190. URL: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1497.pdf> (дата обращения: 19.06.2023).
14. *Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева*. М.: Машиностроение, 2004. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. 864 с.
15. 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: материалы X Всерос. конф.* М.: ВИАМ, 2018. С. 18–31. URL: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1063.pdf> (дата обращения: 08.06.2023).
16. Диков И.А., Бойчук А.С., Чертищев В.Ю., Далин М.А., Генералов А.С. Опыт автоматизированного ультразвукового контроля монолитных и сотовых конструкций из ПКМ // *ТестМат. Цифровые технологии, моделирование и автоматизация процессов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли. Проблемы и перспективы внедрения: материалы XIII Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов*. М.: ВИАМ, 2021. С. 157–180. URL: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1063.pdf> (дата обращения: 20.06.2023).
17. Чертищев В.Ю., Оспенникова О.Г., Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С. Определение размера и глубины залегания дефектов в многослойных сотовых конструкциях из ПКМ по величине механического импеданса // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 72–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-72-94.
18. Rusakov D., Chernushin V., Shelkovoy A. Theoretical and practical justification of high-precision of defects in multilayer polymer honeycomb structures by the honeycomb filler height reduction method // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1636. Available at: http://www.researchgate.net/publication/346163891_Theoretical_and_practical_justification_of_high-precision_of_defects_in_multi-layer_polymer_honeycomb_structures_by_the_honeycomb_filler_height_reduction_method (дата обращения: 19.07.2023).

19. Kuryatin A., Rusakov D., Chernushin V. Identification of defect type in non-destructive testing of polymer composite structures // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1636. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1636/1/012020> (дата обращения: 19.07.2023).
20. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № S. С. 7–17.

References

1. Kablov E.N., Valueva M.I., Zelenina I.V., Khmelniitskiy V.V., Aleksashin V.M. Carbon plastics based on benzoxazine oligomers – perspective materials. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 12, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
2. Kablov E.N. What will the future be made of? New generation materials, technologies for their creation and processing – the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
3. Kablov E.N. Materials for aerospace technology. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2007, no. 5, pp. 7–27.
4. Sidorina A.I. Multiaxial carbon fabrics in the products of aviation technology (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 12, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.
5. Donetskii K.I., Karavaev R.Yu., Bystrikova D.V., Gracheva A.D. Carbon fiber based on a volume-reinforcing braided preform for an element of a propeller blade. *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 12, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-27-38.
6. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. The development of automated laying: from the beginning to our days (review). Part 1. Automated Tape Laying (ATL). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 06, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
7. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. The development of automated laying: from the beginning to our days (review). Part 2. Automated Fiber Placement (AFP). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 06, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-117-127.
8. Barannikov A.A., Postnova M.V., Krashennnikova E.V., Vasyukov A.N. Application of new technologies in the production of helicopter main rotor blades. *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 06, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-91-102.
9. Basharov E.A., Vagin A.Yu. Analysis of the use of composite materials in the design of helicopter airframes. *Trudy MAI*, 2017, no. 92, pp. 1–33. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/analiz-primeneniya-kompozitsionnyh-materialov-v-konstruktsii-planerov-vertoletov> (accessed: June 13, 2023).
10. Doroshenko N.I. Application of PCM in the design of helicopter rotor blades. *Polymer composite materials for the aerospace industry: All-Rus. materials. scientific-technical conf. Moscow: VIAM, 2019. P. 23–41. Available at: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1234.pdf> (accessed: June 19, 2023).*
11. Rivin G.L. *Repair of structures made of polymer composite materials of aircraft: a textbook*. Ulyanovsk: UISTU, 2000, 75 p.
12. Katnam K.B., DaSilva L.F.M., Young T.M. Bonded repair of composite aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities. *Progress in Aerospace Sciences*, 2013, no. 61, pp. 26–42. Available at: https://www.researchgate.net/publication/258240754_Bonded_repair_of_composite_aircraft_structures_A_review_of_scientific_challenges_and_opportunities (accessed: June 19, 2023).
13. Barannikov A.B. Materials, technologies and equipment of the National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM for the repair of structures made of PCM. *New materials and technologies for deep processing of raw materials – the basis of innovative development of the Russian economy: materials of the III Int. scientific-technical conf. Moscow: National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM, 2022. P. 167–190. Available at: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1497.pdf> (accessed: June 19, 2023).*

14. *Non-destructive testing*: a reference book in 7 vol. Ed. V.V. Klyueva. Moscow: Mashinostroyeniye, 2004, vol. 3: Ultrasonic testing, 864 p.
15. Boychuk A.S., Generalov A.S., Dalin M.A., Dikov I.A. Inspection of monolithic parts and structures of aircraft manufactured from PCM by ultrasonic non-destructive testing using phased arrays. *TestMat. Main trends, directions and prospects for the development of non-destructive testing methods in the aerospace industry*: materials of the X All-Rus. conf. Moscow: VIAM, 2018, pp. 18–31. Available at: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1063.pdf> (accessed: June 08, 2023).
16. Dikov I.A., Boychuk A.S., Chertishchev V.Yu., Dalin M.A., Generalov A.S. Experience in automated ultrasonic testing of monolithic and honeycomb structures made of PCM. *TestMat. Digital technologies, modeling and automation of non-destructive testing processes in the aerospace industry. Problems and prospects for implementation*: materials of the XIII All-Rus. conf. on testing and research of materials properties. Moscow: VIAM, 2021, pp. 157–180. Available at: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1063.pdf> (accessed: June 20, 2023).
17. Chertishchev V.Yu., Ospennikova O.G., Boichuk A.S., Dikov I.A., Generalov A.S. Determination of the size and depth of defects in multilayer PCM honeycomb structures based on the mechanical impedance value. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 72–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-72-94.
18. Rusakov D., Chernushin V., Shelkovoy A. Theoretical and practical justification of high-precision of defects in multilayer polymer honeycomb structures by the honeycomb filler height reduction method. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1636. Available at: http://www.researchgate.net/publication/346163891_Theoretical_and_practical_justification_of_high-precision_of_defects_in_multilayer_polymer_honeycomb_structures_by_the_honeycomb_filler_height_reduction_method (accessed: July 19, 2023).
19. Kuryatin A., Rusakov D., Chernushin V. Identification of defect type in non-destructive testing of polymer composite structures. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1636. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1636/1/012020> (accessed: July 19, 2023).
20. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.

Информация об авторах

Бойчук Александр Сергеевич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чертищев Василий Юрьевич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Диков Иван Алексеевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Генералов Александр Сергеевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alexander S. Boychuk, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vasiliy Yu. Chertishchev, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ivan A. Dikov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander S. Generalov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 27.10.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 31.10.2023.
The article was submitted 27.10.2023; approved and accepted for publication after reviewing 31.10.2023.