

Научная статья

УДК 629.7.026.56

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-83-97

К ВОПРОСУ О РЕМОНТЕ ЛОПАСТЕЙ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТНОЙ ТЕХНИКИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

А.А. Баранников¹, Е.А. Вешкин¹, Ю.И. Судьин¹, В.Ю. Чертищев¹

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

Аннотация. Проанализированы конструктивно-силовые схемы лопастей несущего винта отечественной вертолетной техники и основные этапы технологического процесса их ремонта. По результатам анализа выявлены и представлены вводные параметры для разработки технологии ремонта лопастей несущего винта вертолетной техники из полимерных композиционных материалов в полевых условиях. Показаны направления развития ремонтных технологий и основные инновационные разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Ключевые слова: вертолетная техника, лопасть несущего винта, полимерные композиционные материалы, подготовка поверхности, плазма атмосферного давления, методы неразрушающего контроля, ремонт

Для цитирования: Баранников А.А., Вешкин Е.А., Судьин Ю.И., Чертищев В.Ю. К вопросу о ремонте лопастей несущего винта вертолетной техники из полимерных композиционных материалов в полевых условиях // Труды ВИАМ. 2024. № 4 (134). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-83-97.

Scientific article

TO THE ISSUE OF HELICOPTER ROTOR BLADES REPAIR FROM POLYMER COMPOSITE MATERIALS IN FIELD CONDITIONS

A.A. Barannikov¹, E.A. Veshkin¹, Yu.I. Sudin¹, V.Yu. Chertischev¹

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

Abstract. The article presents the results of the analysis of the design-force diagrams of the main rotor blades of the domestic helicopter equipment and the main stages of the technological process of their repair. According to the results of the analysis the input parameters for the development of the technology of repair of helicopter rotor blades from polymer composite materials in field conditions are revealed and presented. In the process of narration the directions of repair technologies development and main innovations of SIC «Kurchatov Institute» – VIAM are shown.

Keywords: helicopter equipment, main rotor blade, polymer composite materials, surface preparation, atmospheric pressure plasma, nondestructive testing methods, repair

For citation: Barannikov A.A., Veshkin E.A., Sudin Yu.I., Chertischev V.Yu. To the issue of helicopter rotor blades repair from polymer composite materials in field conditions. *Trudy VIAM*, 2024, no. 4 (134), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-83-97.

Введение

В настоящее время широкое применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в производстве летательных аппаратов – общемировая тенденция [1–5]. Использование ПКМ позволяет улучшить весовые характеристики, продлить жизненный цикл элементов конструкции, снизить трудоемкость производства, повысить экономическую эффективность и т. д. Одной из важнейших отраслей промышленности, в которой доля ПКМ достигает 90 %, является вертолетостроение [6].

В РФ вертолетная техника изготавливается в основном по двум схемам. Наиболее распространена одновинтовая схема с рулевым устройством (рулевой винт или рулевой винт в кольце (фенестрон)). По такой схеме выпускают вертолеты семейства «Ми», Ансат (АО «КВЗ») и Ка-62. В соответствии со второй схемой (с двумя несущими винтами, расположенными соосно) производят вертолеты семейства «Ка».

Одним из основных элементов несущего и рулевого винта является лопасть, определяющая летные характеристики и безопасность эксплуатации вертолета [7–15]. Для серийного производства лопастей применяются передовые методы проектирования, новейшие материалы и технологии. Все чаще отечественная вертолетная техника оснащается лопастями, полностью выполненными из ПКМ. Это способствует повышению надежности, ресурса, живучести лопастей и вертолета в целом.

В процессе эксплуатации лопастей несущего винта (ЛНВ), выполненных из ПКМ, могут возникнуть различные повреждения и дефекты, вызванные, как правило, чувствительностью ПКМ к ударным повреждениям. Они могут существенно ограничить дальнейшую эксплуатацию вертолетной техники вплоть до полного ее прекращения, поэтому необходимо проводить своевременный ремонт. Цель ремонта заключается в восстановлении поврежденной области для получения приемлемых характеристик лопасти (прочности, долговечности, жесткости, эксплуатационных качеств, безопасности, внешнего вида, срока службы и т. д.). Опыт эксплуатации ЛНВ как в нашей стране, так и за рубежом показывает, что вследствие ряда причин (высокая стоимость лопасти; трудоемкость демонтажа и замены; затраты на упаковку, транспортировку, ремонт в условиях производства и в результате простоя вертолета) необходимо разработать технологии, позволяющие проводить ремонт в полевых условиях.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [16].

Ремонт лопастей несущего винта в полевых условиях

Для разработки технологий ремонта ЛНВ в полевых условиях необходимо определить вводные параметры, для чего важно проанализировать:

- существующие и перспективные конструктивно-силовые схемы лопастей вертолетной техники;
- допустимые и недопустимые повреждения;
- существующие методы ремонта;
- существующие и перспективные материалы, оборудование и инструменты для проведения ремонта;
- методы контроля.

Существующие и перспективные конструктивно-силовые схемы лопастей вертолетной техники

В работах [7–15] показано, что в РФ наиболее широко применяется цельноком-
позитная лопасть, представляющая собой лонжерон с отдельной хвостовой секцией (секциями) с наполнителем, что характерно для I–III этапов развития конструктивно-

силовых схем (рис. 1). Для вертолетной техники семейства «Ми» лонжерон получают методом намотки лентами из стеклонитей или гибридными лентами из стеклонитей и углеродных жгутов, предварительно пропитанных связующим ЭДТ-10П или УП-2227Н. Лонжерон лопастей для вертолетной техники семейства «Ка» и Ансат изготавливается методом ручной выкладки из стеклотканей Т-39, Т-25(ВМ)-78 и углеродной ленты ЛУ-П-0,2, предварительно пропитанных связующим 5-211Б с последующим формованием. Хвостовая часть лопастей на большинстве изделий семейства «Ми», как правило, разрезная и представляет собой трехслойную конструкцию, выполненную в виде клина. В качестве обшивок используется органопластик марки Органит 11ТЛ или стеклопластик марки ВПС-7, заполнителем служит, как правило, сотопласт марки ПСП-1 или алюминиевый сотовый наполнитель АМг2Н. Обшивки соединяют с сотовым наполнителем с помощью клея ВК-51, хвостовой отсек с лонжероном – с помощью клея ВК-9 или ВК-27А. Для вертолетов семейства «Ка» и Ансат применяется аналогичная конструкция хвостового отсека, что и для машин семейства «Ми», но с другим набором материалов. В качестве обшивок хвостового отсека применяется стеклотекстолит СК-5-211БП, приклеенный к сотовому наполнителю марки ПСП-1 или АМг2Н с помощью клея ВК-51. Хвостовой отсек соединяется с лонжероном с помощью клея ВК-9 или клея ВК-9 с подслоем клея ВК-25.



Рис. 1. Пример сечения существующих лопастей несущего винта (I–III этап развития конструктивно-силовых схем)

В настоящее время отечественные конструкторские бюро работают над проблемой повышения скоростных показателей вертолетов. Это объясняется расширением спектра военных и гражданских задач, связанных напрямую со скоростными показателями техники (например, срочная доставка жизненно важных грузов, в том числе в труднодоступные места, быстрая эвакуация тяжелораненных, больных и т. п.).

Разработка ремонтных составов для ЛНВ осложняется тем, что, согласно расчетным данным, ранее созданные аэродинамические компоновки, обеспечивающие заданную скорость, приемлемый уровень нагрузок и вибраций вертолета, не позволяют использовать отработанные методы изготовления лопастей из ПКМ.

По итогам опытно-конструкторских работ, проведенных с целью повышения скорости существующих вертолетов и достижения скорости перспективных изделий ~400 км/ч, принято следующее решение. Лопасти несущего винта будут представлять собой цельнокомпозитное изделие из ПКМ нового поколения, изготовленное от наружного аэродинамического контура как одно целое (IV этап развития). В качестве основных материалов для изделий семейства «Ми» предусматриваются препреги на основе связующего ВСР-3М, семейства «Ка» – препреги на основе связующего ВСЭ-34. В качестве основного материала наполнителя рассматривается пеноакрилимид или синтактный пенопласт (рис. 2).

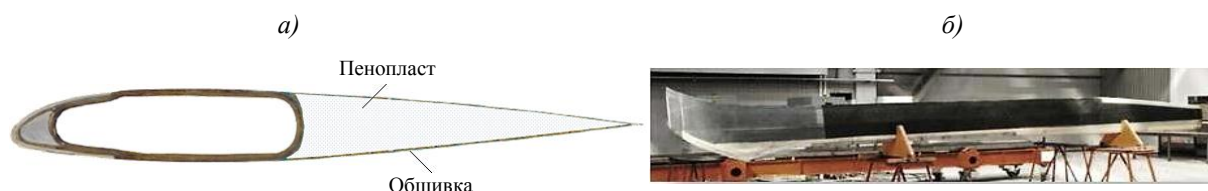


Рис. 2. Сечение (а) и общий вид (б) перспективной лопасти для изделий семейства «Ми»

Допустимые и недопустимые повреждения

Любой технологический процесс ремонта начинается с обнаружения и оценки повреждений (дефектов). Анализ научно-технической литературы [7–23] позволил классифицировать повреждения, при которых существующие лопасти подлежат и не подлежат ремонту (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Повреждения лопасти несущего винта в зоне лонжерона, не подлежащие ремонту

Повреждение	Характеристика повреждения
Забоина	Локальное углубление с острыми краями размером >0,5 мм
Вмятина	Поврежденная область, которая представляет собой углубление размером >0,5 мм, вызванное механическим воздействием
Трещина	Щелевое несквозное (затрагивающее часть слоев)/сквозное нарушение целостности лонжерона
Прокол	Сквозное повреждение диаметром <5 мм
Пробоина	Разрушение стенок лонжерона
Деформация	Изменение профиля и теоретического контура лонжерона

Таблица 2

Повреждения лопасти несущего винта в зоне лонжерона и хвостового отсека, подлежащие ремонту

Повреждение	Характеристика повреждения
Лонжерон	
Выкрашивание связующего	Результат внешнего воздействия при отсутствии расслоений
Забоина	Локальное углубление с острыми краями глубиной $\leq 0,5$ мм при отсутствии расслоений
Вмятина	Поврежденная область, которая представляет собой углубление размером $\leq 0,5$ мм, вызванное механическим воздействием, при отсутствии расслоений
Оголение стеклоуглепластика, углепластика и стеклопластика	Результат абразивного износа, механического или химического воздействия при отсутствии расслоений
Абразивный износ	Результат трения в процессе внешнего воздействия при отсутствии расслоений
Царапина	Щелевое несквозное углубление размером $\leq 0,5$ мм при отсутствии расслоений
Хвостовой отсек	
Выкрашивание связующего	Результат внешнего воздействия
Оголение стеклоуглепластика, углепластика и стеклопластика	Результат абразивного износа, механического или химического воздействия
Абразивный износ	Результат трения в процессе внешнего воздействия

Окончание таблицы 2

Повреждение	Характеристика повреждения
Царапина	Щелевое несквозное углубление размером $\leq 0,5$ мм
Забоина	Локальное углубление с острыми краями глубиной $\leq 0,5$ мм при отсутствии расслоений
Вмятина	Поврежденная область, которая представляет собой углубление, вызванное механическим воздействием
Вспучивание	Результат ухудшения адгезии на границе раздела обшивки и заполнителя или механического воздействия
Трещина	Щелевое несквозное (затрагивающее часть слоев)/сквозное нарушение целостности хвостового отсека
Прокол	Сквозное повреждение диаметром < 5 мм, в том числе образовавшееся вследствие удаления влаги
Пробоина	Разрушение обшивок (с любой стороны или насквозь) с повреждением заполнителя
Надлом или вырыв задней кромки хвостового отсека	Разрушение, вызванное износом и/или внешним воздействием
Отслоение обшивки хвостового отсека от лонжерона	Результат ухудшения адгезии на границе раздела обшивки и лонжерона и/или внешнего воздействия
Накопление влаги	Наличие влаги в трехслойной сотовой конструкции хвостового отсека деталей из полимерных композиционных материалов

Информация о допустимых и недопустимых повреждениях перспективных лопастей в открытом доступе отсутствует. Можно предположить, что повреждения таких изделий будут схожи с повреждениями существующих ЛНВ.

Существующие методы ремонта

Для ремонта ЛНВ, выполненных из ПКМ, в основном используется клеевой метод с применением материалов горячего или холодного отверждения [23–50]. Данный метод позволяет обеспечить жесткие требования к прочности, аэродинамической гладкости и долговечности отремонтированной конструкции ЛНВ в заданном диапазоне температур и может быть реализован непосредственно на ЛНВ, в том числе без демонтажа – в полевых условиях.

За рубежом ремонт с применением материалов горячего отверждения проводится при структурном, постоянном ремонте в условиях эксплуатирующей организации авиационными техниками и инженерно-авиационной службой с целью восстановления эксплуатационных характеристик лопастей [19–22]. При наличии соответствующего оборудования и материалов инженерно-авиационная служба может проводить клеевой ремонт в полевых условиях, что позволяет использовать отремонтированные лопасти в течение ограниченного времени для выполнения текущей задачи.

Для ремонта в полевых условиях в основном применяют материалы холодного отверждения. Однако зарубежная и отечественная практика показывает, что клеевой ремонт с применением материалов холодного отверждения обеспечивает полное восстановление эксплуатационных характеристик ЛНВ, т. е. позволяет проводить постоянный структурный ремонт.

Материалы, оборудование и инструменты для проведения ремонта

В настоящее время в отечественной практике структурный ремонт ЛНВ осуществляют только в зоне хвостового отсека. Как правило, с этой целью применяют материалы холодного отверждения – клеи ВК-9 и ВК-27, конструкционный стеклянный армирующий наполнитель с поверхностной плотностью 290 г/м^2 или листовой органо-пластик. В качестве заполнителя, помимо сотового заполнителя в конструкции ЛНВ, используют пенопласты.

Однако появление новых конструкций требует современных подходов к проведению ремонта ЛНВ. Для структурного ремонта конструкций из ПКМ за рубежом разработаны специализированные материалы и технологии. Например, к таким материалам можно отнести препреги на основе стеклянного и углеродного наполнителя, полимерной матрицы M20 (компания Hexcel), BT250E-6 (компания Toray) и др., отличительными особенностями которых являются повышенная энергоэффективность (отверждение происходит при температуре 120–130 °С) и универсальность. При создании данных материалов разработчики руководствовались необходимостью снижения издержек при ремонте конструкций из ПКМ за счет:

- сокращения продолжительности цикла отверждения, т. е. времени выхода на заданную температуру отверждения ремонтного материала;
- сокращения количества электроэнергии, необходимой для выхода на заданную температуру отверждения ремонтного материала;
- сокращения номенклатуры материалов (так как в различных изделиях авиационной техники применяются широкий спектр материалов на основе различных видов полимерных матриц и армирующих наполнителей) и перехода к универсальным системам. Это позволит проводить ремонт конструкций из ПКМ независимо от вида исходного материала и, как следствие, сократить площадь складских помещений, оборудованных холодильными и морозильными камерами, и затрачиваемые на их эксплуатацию издержки, а также исключить необходимость постоянной перепроверки материалов на соответствие требованиям нормативной документации;
- исключения дорогостоящего оборудования, применяемого в процессе ремонта – автоклавов и электропечей;
- возможности применения так называемых мобильных технологий ремонта.

В настоящее время в РФ специализированные материалы для проведения структурного ремонта отсутствуют. Однако в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана линейка материалов на основе стеклянных и углеродных наполнителей, а также связующего с повышенной энергоэффективностью (ВСЭ-34), не уступающих по своим характеристикам материалам на основе связующего M20 (табл. 3).

Таблица 3

**Свойства углепластиков марок M20/40%/G904
и ВКУ-45/УМТ-3К.РТН на основе связующего ВСЭ-34**

Свойства	Значения свойств для углепластика	
	M20/40%/G904 (углеродная ткань G904)	ВКУ-45/УМТ-3К.РТН (углеродная ткань АСМ С200Т)
Поверхностная плотность наполнителя, г/м ²	193	200
Массовое содержание связующего, %	40–48	38
Плотность волокна, г/см ³	1,78	1,78
Ширина препрега, мм	1000	1000
Объемное содержание наполнителя в полимерном композиционном материале, %	52–60	53
Толщина монослоя, мм	0,211	0,215
Температура стеклования, °С	155	155
Предел прочности при растяжении при температуре 20 °С в направлении приложения нагрузки [0°], МПа	877	750
Модуль упругости при растяжении при температуре 20 °С в направлении приложения нагрузки [0°], ГПа	65	74

Для формирования ремонтного материала и сушки зоны ремонта за рубежом используют мобильные системы ремонта, представляющие собой автоматизированные системы контроля температуры и давления с комплектом нагревательных матов и термопар (рис. 3).

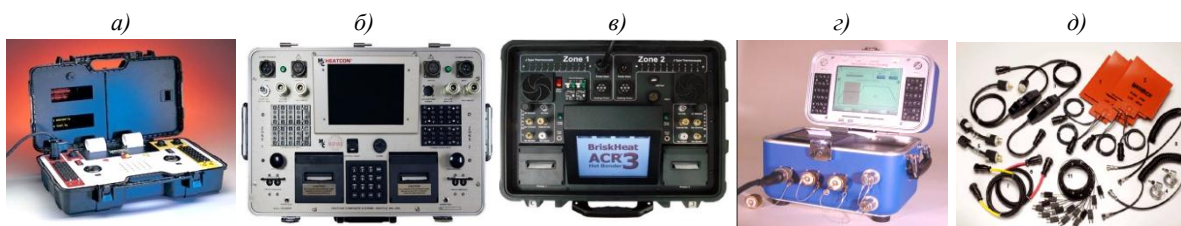


Рис. 3. Оборудование для мобильного ремонта: *а* – NB-2 Composite Repair System; *б* – HCS9200B Dual Zone Hot Bonder; *в* – ACR 3 Hot Bonder; *г* – GMIEZ0901 Anita bonding console; *д* – комплект нагревательных матов и термопар

В 2019 г. с целью исключения зависимости от продукции иностранного производства в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны оборудование и технология ремонта конструкций из ПКМ с основными характеристиками на уровне мировых аналогов.

Оборудование и технологическое оснащение, которое используется при проведении ремонта эксплуатирующими организациями и инженерно-авиационными службами как в зарубежной, так и отечественной практике, схожи. Как правило, в качестве инструмента для проведения механической обработки (подготовки зоны ремонта) применяются ручные пневматические шлифовальные (со скоростью вращения ≤ 13000 об/мин) и сверлильные машины (≤ 3000 об/мин). Это обусловлено рекомендациями производителей режущего инструмента для ПКМ. В качестве режущего инструмента применяются борфрезы, специальные сверла для ПКМ, абразивные головки, лепестковые шлифовальные круги и другие инструменты.

Наряду с механизированными способами обработки поверхности при проведении клевого ремонта используют стандартные методы подготовки (обезжиривание, зашкуривание, применение жертвенных слоев). Однако классические методы являются трудоемкими, приводят к значительному количеству отходов, а получаемые результаты в значительной степени зависят от квалификации специалиста. Разработаны новые более эффективные способы подготовки поверхности, такие как обработка плазмой атмосферного давления и лазерная обработка. Метод обработки плазмой атмосферного давления разработан в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, выпущена необходимая нормативная документация. Следует отметить, что в отдельных эксплуатирующих организациях стали появляться автоматизированные и роботизированные комплексы для механической обработки зоны ремонта с модулями неразрушающего контроля, позиционирования и плазмы атмосферного давления, такие как ULTRASONIC mobileBLOCK DMG, CAIRE, AGFM's (PS/CRS) и др. (рис. 4).

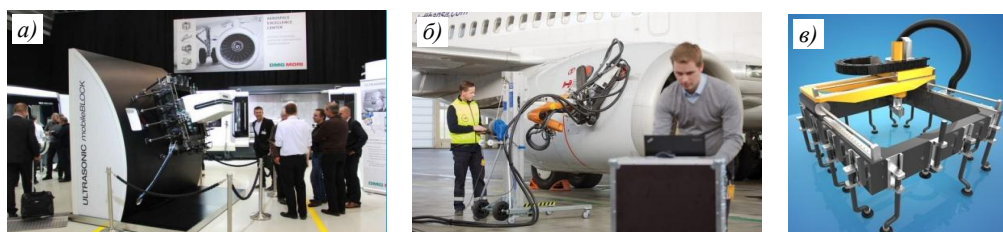


Рис. 4. Автоматизированные и роботизированные устройства для подготовки зоны ремонта: *а* – ULTRASONIC mobileBLOCK DMG; *б* – CAIRE; *в* – AGFM's (PS/CRS)

Методы контроля

Анализ научно-технической литературы показал, что вопросы использования неразрушающих методов контроля зон ремонта конструкций из ПКМ (монолитных и трехслойных), применяемых в лопастях вертолетной техники, в доступных источниках информации освещены недостаточно. Так, в работе [49] описано применение ультразвукового эхо-импульсного метода для контроля ремонта монолитных образцов из углепластика, а в работе [50] упоминается об использовании ультразвуковых методов и радиографии при ремонте. Несмотря на это, требования к методам и средствам неразрушающего контроля можно сформулировать на основании анализа способов и материалов, используемых для ремонта конструкций из ПКМ применительно к лопастям несущего и рулевого винта вертолетной техники.

Лонжерон перспективной лопасти вертолета будет представлять собой монолитную конструкцию из ПКМ. Ремонт монолитных конструкций осуществляется путем выфрезеровывания дефектной зоны и наложения заплата из аналогичного ПКМ и клея горячего или холодного отверждения. Исходя из этого, для контроля зон ремонта в данном случае можно применять ультразвуковые методы неразрушающего контроля. При сравнительно невысоком коэффициенте затухания ультразвука в материале ремонтной заплата предпочтительно использовать ультразвуковой эхо-импульсный метод, который требует лишь одностороннего доступа к объекту контроля. Для реализации данного метода при контроле ремонта в полевых условиях подойдут как стандартные ультразвуковые дефектоскопы с одноэлементными пьезоэлектрическими преобразователями, так и дефектоскопы, работающие с фазированными решетками. При контроле зон ремонта эхо-импульсным методом можно выявить непроклеи, расслоения, посторонние включения с чувствительностью, эквивалентной выявлению искусственных отражателей диаметром от 5 до 10 мм.

Хвостовая часть лопасти, как правило, представляет собой трехслойную конструкцию с сотовым или вспененным наполнителем. Ремонт таких зон проводится путем вырезания поврежденного участка, вклеивания нового наполнителя и восстановления обшивок. Для контроля качества ремонта таких зон применяется акустический низкочастотный импедансный метод с использованием стандартных импедансных дефектоскопов (например, ДАМИ-С). В качестве преобразователей используется совмещенный или раздельно-совмещенный преобразователь (в зависимости от толщины обшивок). Импедансный метод обеспечивает выявление нарушений сплошности типа расслоений и непроклеев между монолитными обшивками и вспененным и/или сотовым наполнителем минимальным диаметром от 10 мм (в зависимости от типа конструкции и места расположения дефекта).

Заключения

Разрабатываемая технология должна обеспечить возможность проведения ремонта ЛНВ в полевых условиях с применением клеевого метода. При этом должны использоваться отечественные основные и вспомогательные материалы, оборудование и режущие инструменты.

Оборудование для контроля должно выявлять расслоения, посторонние включения, другие характерные производственные и эксплуатационные дефекты в монолитных зонах лонжерона и непроклеи с минимальным линейным размером ≥ 10 мм; трещины и раковины в пенопласте, расслоения во внутренних (не выходящих на наружную поверхность лопасти) стенках лонжеронов размером более 2 % от толщины.

Для механической обработки зоны ремонта следует применять пневмо- (минимальное рабочее давление 6 ат (0,6 МПа)) и электроинструменты (с защитой от попадания

углеродной и стеклянной пыли). В качестве режущего инструмента необходимо использовать средства, предназначенные для механической обработки ПКМ. При этом важно учитывать возможность подготовки поверхности ПКМ под склеивание без механического воздействия.

Оборудование, применяемое для обеспечения заданной температуры и давления в зонах ремонта, должно обладать следующими характеристиками:

Максимальная температура нагрева, °С	250
Разрежение под вакуумным мешком, МПа (не более)	–0,095
Допустимая мощность, кВт	6
Напряжение сети, В	220
Габаритные размеры, мм (не более)	350×220×260
Масса, кг (не более)	12

При выборе материалов для ремонта ЛНВ необходимо учитывать следующие факторы:

- возможность применения клеев холодного и горячего отверждения (с температурой формования до 135 °С);
- возможность использования препрегов на основе углеродной ткани с поверхностной плотностью 200 г/м² и на основе стеклоткани с поверхностной плотностью 290 г/м² (конечная температура формования до 135 °С);
- возможность формования под вакуумным давлением;
- срок хранения препрега в морозильной камере при температуре –18 °С – до 2 лет;
- диапазон рабочих температур при эксплуатации – от –60 до +80 °С;
- диапазон температур для работы с препрегом – от 10 до 35 °С;
- физико-механические характеристики ПКМ на основе углеродной ткани: предел прочности при растяжении ≥ 740 МПа, модуль упругости при растяжении ≥ 55 ГПа, предел прочности при межслойном сдвиге ≥ 70 МПа; ПКМ на основе стеклоткани: ≥ 550 МПа, ≥ 40 ГПа и ≥ 50 МПа соответственно.

Применение технологии ремонта лопастей несущего и рулевого винта вертолетной техники из ПКМ в полевых условиях позволит:

- повысить качество работ (снижение объемной доли пор, повышение прочностных показателей на границе раздела заплат и ремонтируемого элемента конструкции и т. д.) за счет применения вакуумного давления в процессе формования заплат;
- сократить продолжительность технологического цикла (за счет проведения ремонта непосредственно на ЛНВ без выемки из состава вертолета, применения материалов с коротким циклом отверждения и т. д.);
- сократить издержки при ремонте конструкций из ПКМ (за счет применения материалов с коротким циклом отверждения, сокращения номенклатуры материалов, исключения из процесса дорогостоящего оборудования – автоклавов, электропечей и др.).

Использование неразрушающих методов контроля позволит обнаруживать скрытые повреждения и оценивать фактический размер скрытых и видимых повреждений, а также выявлять непрочности, расслоения и другие дефекты, характерные для зон ремонта монолитных и трехслойных конструкций из ПКМ.

Список источников

1. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 90. No. 2. P. 225–228.
2. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.

3. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
4. Ерасов В.С., Сибяев И.Г. Схема разработки и оценки свойств конструкционных авиационных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
5. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
6. Вертолет NH-90 на службе ВС Германии. URL: <https://topwar.ru> (дата обращения: 14.11.2023).
7. Дорошенко Н.И. Применение ПКМ в конструкции лопастей винтов вертолетов // Материалы Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы для авиакосмической отрасли». М.: ВИАМ, 2019. С. 23–41.
8. Гребеников А.Г., Дьяченко Ю.В., Коллеров В.В. и др. Конструктивно-технологические особенности несущих поверхностей вертолета из полимерных композиционных материалов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2019. № 84. С. 4–49.
9. Башаров Е.А., Вагин А.Ю. Анализ применения композиционных материалов в конструкции планеров вертолетов // Труды МАИ. 2017. № 92. С. 1–33.
10. Богданов Ю.С., Михеев Р.А., Скулков Д.Д. Конструкция вертолетов: учебник для авиационных техникумов. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.
11. Завалов О.А., Башаров Е.А. Методические указания к лабораторной работе «Конструкция лопастей несущих и рулевых винтов». URL: <http://elibrary.mai.ru/MegaPro/Download/ToView/15843?idb=NewMAI2014> (дата обращения: 14.11.2023).
12. Слюсарь Б.Н., Флек М.Б., Гольдберг Е.С. и др. Технология вертолетостроения. Технология производства лопастей вертолетов и авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов. Ростов н/Д: ЮНЦ РАН, 2013. 230 с.
13. Завалов О.А. Конструкция несущих и рулевых винтов вертолетов: учеб. пособие к курсовому и дипломному проектированию. М.: МАИ, 2019. 72 с.
14. Mikheyev S.V., Bourtsev V.N., Danilkina V.L. et al. Kamov Composite Blades // 31st European Rotorcraft Forum. Florence, 2015. P. 1650–1672p.
15. Тополев В.В. Конструкция и эксплуатация вертолета Ми-171: учеб. пособие. Тюмень: НП «Центр подготовки персонала», 2008. 158 с.
16. 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.
17. Постнов В.И., Вешкин Е.А., Макрушин К.В., Судьин Ю.И. Технологические особенности изготовления из полимерных композиционных материалов лопастей несущего винта для легкого вертолета // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
18. Вертолет Ми-8. Инструкция по технической эксплуатации. URL: <https://tehclub.site/storage/products/07-20/vertolet-mi-8-instruktsiya-po-tekhnicheskoy-ekspluatatsii.pdf> (дата обращения: 04.12.2023).
19. Aviation unit and aviation intermediate maintenance manual. CH-47D helicopter. URL: http://www.chinook-helicopter.com/Publications/CH-47D_Technical_Publications/23_Series/TM_55-1520-240-23-1.pdf (дата обращения: 04.12.2023).
20. Helicopter maintenance by Joe Schafer. URL: <https://linguisticstudentindonesia.files.wordpress.com/2020/08/helicopter-maintenance.pdf> (дата обращения: 04.12.2023).

21. Bell 212. Maintenance manual. URL: https://www.bellcustomer.com/Bulletins/Download?FileName=212-Inspection_and_Airworthiness_Limitations.pdf&CategoryID=139 (дата обращения: 04.12.2023).
22. Bell 429. Maintenance planning information. URL: https://www.bellcustomer.com/Bulletins/Download?FileName=429-Airworthiness_Limitations_and_Scheduled_Maintenance.pdf&CategoryID=-1&categoryname=Airworthiness%20Limitations%20and%20Scheduled%20Maintenance (дата обращения: 04.12.2023).
23. Joachim T. Repair and Substantiation of the NH90 Sandwich Composite Bottom Shell. URL: <https://www.sto.nato.int/publications/pages/results.aspx?k=Repair%20and%20Substantiation%20of%20the%20NH90%20Sandwich%20Composite%20Bottom%20Shell&s=Search%20All%20STO%20Reports> (дата обращения: 04.12.2023). DOI: 10.14339/STO-MP-AVT-266-05-PDF.
24. Mazza J.J., Storage K.M. Bonded Repair in the United States Air Force and Work to Expand Future Capability. URL: <https://www.sto.nato.int/publications/pages/results.aspx?k=Bonded%20Repair%20in%20the%20United%20States%20Air%20Force%20and%20Work%20to%20Expand%20Future%20Capability&s=Search%20All%20STO%20Reports> (дата обращения: 04.12.2023). DOI: 10.14339/STO-MP-AVT-266-04-PDF.
25. Xie Z., Li X., Wang S. Parametrical study on stepped-lap repair of composite laminates. URL: http://www.i-asem.org/publication_conf/structures16/11.ICAAS16/M4J.2.AS703_1256F1.pdf (дата обращения: 04.12.2023).
26. Xie Z., Wang S., Li X. Composite Tapered Scarf Joint Repair: Analytical Model and Experimental Validation. Amsterdam: Atlantis Press, 2016. P. 720–726.
27. Orsatelli J.-P., Paroissien E., Lachaud F., Schwartz S. Bonded flush repairs for aerospace composite structures: A review on modelling strategies and application to repairs optimization, reliability and durability // *Composite Structures*. 2023. Vol. 304. Part 2. Art. 116338. DOI: [10.1016/j.compstruct.2022.116338](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116338).
28. Campilho R., Pinto A., Moura M. et al. Taper angle optimization of scarf repairs in carbon-epoxy laminates. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Taper-angle-optimization-of-scarf-repairs-in-Campilho-Pinto/c2222dcdaa9b3ac70d9bd79dd24e6b820e424ce3> (дата обращения: 04.12.2023).
29. Collombet F., Davila Y., Avila S. et al. Proof of a composite repair concept for aeronautical structures: a simplified method // *Mechanics & Industry*. 2019. No. 20 (8). P. 812. DOI: [10.1051/meca/2020056](https://doi.org/10.1051/meca/2020056).
30. Marrón A. Scarf joint modeling and analysis of composite materials. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/36698412.pdf> (дата обращения: 04.12.2023).
31. Mollenhauer D., Storage K., Czabaj M. et al. United States Air Force Investigation and Evaluation of Composite Scarf Repairs. URL: <https://www.sto.nato.int/publications/pages/results.aspx?k=United%20States%20Air%20Force%20Investigation%20and%20Evaluation%20of%20Composite%20Scarf%20Repairs&s=Search%20All%20STO%20Reports> (дата обращения: 04.12.2023). DOI: 10.14339/STO-MP-AVT-266-14-PDF.
32. Ghafafian C., Popiela B., Trappe V. Failure Mechanisms of GFRP Scarf Joints under Tensile Load // *Materials*. 2021. Vol. 14 (7). P. 1806. DOI: [10.3390/ma14071806](https://doi.org/10.3390/ma14071806).
33. Sun C., Zhao W., Zhou J. et al. Mechanical behaviour of composite laminates repaired with a stitched scarf patch // *Composite Structures*. 2021. Vol. 255. P. 112928. DOI: [10.1016/j.compstruct.2020.112928](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112928).
34. Gungner M., Ramström M. Robust repair methods of primary structures in composite. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:632489/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 04.12.2023).
35. Xie Z., Li X., Yan Q. Scarf Repair of Composite Laminates // *MATEC Web of Conferences*. URL: https://www.researchgate.net/publication/304575167_Scarf_Repair_of_Composite_Laminates (дата обращения: 04.12.2023). DOI: [10.1051/matecconf/20166105019](https://doi.org/10.1051/matecconf/20166105019).
36. Tomblin J., Salah L., Yang C. Effects of repair procedures applied to composite airframe structures. URL: https://depts.washington.edu/amtas/events/jams_06/Salah_Repair.pdf (дата обращения: 04.12.2023).

37. Budhe S., Banea M.D., De Barros S. Bonded repair of composite structures in aerospace application: a review on environmental issues // *Applied Adhesion Science*. 2018. Vol. 6. Art. 3. DOI: 10.1186/s40563-018-0104-5.
38. Halliwell S. Repair of fibre reinforced polymer structures. URL: <https://compositesuk.co.uk/wp-content/uploads/2021/12/repairoffrpstructures.pdf> (дата обращения: 04.12.2023).
39. Ashfort C., Ipcwicz L. Certification of Bonded Aircraft Structure and Repairs. URL: <https://www.sto.nato.int/publications/pages/results.aspx?k=Cynthia%20Ashfort&s=Search%20All%20STO%20Reports> (дата обращения: 04.12.2023).
40. Helicopter components, sections and systems. URL: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/helicopter_flying_handbook/hfh_ch04.pdf (дата обращения: 04.12.2023).
41. Seneviratne W., Tomblin J., Saathoff C. Evaluation of aged bonded rotor blades. URL: https://www.wichita.edu/industry_and_defense/NIAR/Documents/jams-presentations-2021/Evaluation-of-Aged-Bonded-Rotor-Blades-Seneviratne.pdf (дата обращения: 04.12.2023).
42. Ipcwicz L., Cheng L. FAA composite guidance and relevant resource. URL: <https://www.aviation.govt.nz/assets/aircraft/composite-seminar/faa-composite-guidance.pdf> (дата обращения: 04.12.2023).
43. Salah L. CACRC depot bonded repair round robin investigation. URL: https://www.wichita.edu/industry_and_defense/NIAR/Documents/CACRCDepotBondedLSalah.pdf (дата обращения: 04.12.2023).
44. Composite Repair of Military Aircraft Structures. Neuilly sur Seine: AGARD, 1995. 24 p.
45. Sałaciński M., Kowalski R., Szmidi M., Augustyn S. A New Approach to Modelling and Testing the Fatigue Strength of Helicopter Rotor Blades during Repair Process // *Fatigue of Aircraft Structures*. 2019. Vol. 11. P. 56–67. DOI: 10.2478/fas-2019-0006.
46. Lewis A. Making composite repairs to the 787. URL: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/3851.pdf> (дата обращения: 04.12.2023).
47. Fualdes C. Experience and lessons learned of a composite aircraft. URL: <https://icas.org/media/pdf/ICAS%20Congress%20General%20Lectures/2016/2016%20Composite%20Aircraft%20Fualdes.pdf> (дата обращения: 04.12.2023).
48. Баранников А.А., Постнов В.И., Вешкин Е.А., Старостина И.В. Связь энергетических характеристик поверхности стеклопластика марки ВПС-53К с прочностью клеевого соединения на его основе // *Труды ВИАМ*. 2020. № 10 (92). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-40-50.
49. Pieczonka L., Staszewski W.J. et al. Nondestructive testing of composite patch repairs // 11th European Conference on Non-Destructive Testing. Prague, 2014. DOI: 10.13140/2.1.1691.8723.
50. Антипов В.В., Бойчук А.С., Чертищев В.Ю., Яковлева С.И., Баранников А.А. Выявление эксплуатационных повреждений лопастей несущего и рулевого винта из ПКМ в условиях эксплуатации // *Труды ВИАМ*. 2023. № 7 (125). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-93-103.

References

1. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90, no. 2, pp. 225–228.
2. Kablov E.N. Formation of domestic space materials science. *Vestnik RFFI*, 2017, no. 3, pp. 97–105.
3. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
4. Erasov V.S., Sibayev I.G. Scheme for the development and evaluation of properties of structural aviation composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 04, 2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2023-0-1-61-81.
5. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 04, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.

6. *Helicopter NH-90 in service with the German Armed Forces*. Available at: <https://topwar.ru> (accessed: November 14, 2023).
7. Doroshenko N.I. Application of PCM in the design of helicopter rotor blades. *All-Rus. sci-tech. conf. «Polymer composite materials for the aerospace industry»*. Moscow: VIAM, 2019, pp. 23–41.
8. Grebenikov A.G., Dyachenko Yu.V., Kollerov V.V. et al. Structural and technological features of helicopter load-bearing surfaces made of polymer composite materials. *Otkrytye informatsionnye i kompyuternye integrirovannye tekhnologii*, 2019, no. 84, pp. 4–49.
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.
10. Bogdanov Yu.S., Mikheev R.A., Skulkov D.D. *Helicopter design: a textbook for aviation technical schools*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1990, 272 p.
11. Zavalov O.A., Basharov E.A. *Guidelines for laboratory work «Design of main and tail rotor blades»*. Available at: <http://elibrary.mai.ru/MegaPro/Download/ToView/15843?idb=NewMAI2014> (accessed: November 14, 2023).
12. Slyusar B.N., Fleck M.B., Goldberg E.S. et al. *Helicopter technology. Technology for the production of helicopter blades and aircraft structures from polymer composite materials*. Rostov-on-Don: YuNTs RAS, 2013, 230 p.
13. Zavalov O.A. *Design of rotors and tail rotors of helicopters: textbook. A guide to coursework and diploma design*. Moscow: MAI, 2019, 72 p.
14. Mikheyev S.V., Bourtsev B.N., Danilkina V.L. et al. Kamov Composite Blades. *31st European Rotorcraft Forum*. Florence, 2015, pp. 1650–1672.
15. Topolev V.V. *Design and operation of the Mi-171 helicopter: textbook, allowance*. Tyumen: NP «Personnel Training Center», 2008, 158 p.
16. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
17. Postnov V.I., Veshkin E.A., Makrushin K.V., Sudin Yu.I. Technological features of manufacturing polymer composite materials of main rotor blades for a light helicopter. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 04, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
18. *Mi-8 helicopter. Technical Operation Instructions*. Available at: <https://tehclub.site/storage/products/07-20/vertolet-mi-8-instruksiya-po-tekhnicheskoy-ekspluatatsii.pdf> (accessed: December 04, 2023).
19. *Aviation unit and aviation intermediate maintenance manual. CH-47D helicopter*. Available at: http://www.chinook-helicopter.com/Publications/CH-47D_Technical_Publications/23_Series/TM_55-1520-240-23-1.pdf (accessed: December 04, 2023).
20. *Helicopter maintenance by Joe Schafer*. Available at: <https://linguisticstudentindonesia.files.wordpress.com/2020/08/helicopter-maintenance.pdf> (accessed: December 04, 2023).
21. *Bell 212. Maintenance manual*. Available at: https://www.bellcustomer.com/Bulletins/Download?FileName=212-Inspection_and_Airworthiness_Limitations.pdf&CategoryID=139 (accessed: December 04, 2023).
22. *Bell 429. Maintenance planning information*. Available at: https://www.bellcustomer.com/Bulletins/Download?FileName=429-Airworthiness_Limitations_and_Scheduled_Maintenance.pdf&CategoryID=-1&categoryname=Airworthiness%20Limitations%20and%20Scheduled%20Maintenance (accessed: December 04, 2023).
23. Joachim T. *Repair and Substantiation of the NH90 Sandwich Composite Bottom Shell*. Available at: <https://www.sto.nato.int/publications/pages/results.aspx?k=Repair%20and%20Substantiation%20of%20the%20NH90%20Sandwich%20Composite%20Bottom%20Shell&s=Search%20All%20STO%20Reports> (accessed: December 04, 2023). DOI: 10.14339/STO-MP-AVT-266-05-PDF.
24. Mazza J.J., Storage K.M. *Bonded Repair in the United States Air Force and Work to Expand Future Capability*. Available at: <https://www.sto.nato.int/publications/pages/results.aspx?k=Bonded%20Repair%20in%20the%20United%20States%20Air%20Force%20and%20Work%20to%20Expand%20Future%20Capability&s=Search%20All%20STO%20Reports> (accessed: December 04, 2023). DOI: 10.14339/STO-MP-AVT-266-04-PDF.

25. Xie Z., Li X., Wang S. *Parametrical study on stepped-lap repair of composite laminates*. Available at: http://www.i-asem.org/publication_conf/structures16/11.ICAAS16/M4J.2.AS703_1256F1.pdf (accessed: December 04, 2023).
26. Xie Z., Wang S., Li X. *Composite Tapered Scarf Joint Repair: Analytical Model and Experimental Validation*. Amsterdam: Atlantis Press, 2016, pp. 720–726.
27. Orsatelli J.-P., Paroissien E., Lachaud F., Schwartz S. Bonded flush repairs for aerospace composite structures: A review on modelling strategies and application to repairs optimization, reliability and durability. *Composite Structures*, 2023, vol. 304, part 2, art. 116338. DOI: [10.1016/j.compstruct.2022.116338](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116338).
28. Campilho R., Pinto A., Moura M. et al. *Taper angle optimization of scarf repairs in carbon-epoxy laminates*. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Taper-angle-optimization-of-scarf-repairs-in-Campilho-Pinto/c2222cdcaa9b3ac70d9bd79dd24e6b820e424ce3> (accessed: December 04, 2023).
29. Collombet F., Davila Y., Avila S. et al. Proof of a composite repair concept for aeronautical structures: a simplified method. *Mechanics & Industry*, 2019, no. 20 (8), pp. 812. DOI: [10.1051/meca/2020056](https://doi.org/10.1051/meca/2020056).
30. Marrón A. *Scarf joint modeling and analysis of composite materials*. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/36698412.pdf> (accessed: December 04, 2023).
31. Mollenhauer D., Storage K., Czabaj M. et al. *United States Air Force Investigation and Evaluation of Composite Scarf Repairs*. Available at: <https://www.sto.nato.int/publications/pages/results.aspx?k=United%20States%20Air%20Force%20Investigation%20and%20Evaluation%20of%20Composite%20Scarf%20Repairs&s=Search%20All%20STO%20Reports> (accessed: December 04, 2023). DOI: [10.14339/STO-MP-AVT-266-14-PDF](https://doi.org/10.14339/STO-MP-AVT-266-14-PDF).
32. Ghafafian C., Popiela B., Trappe V. Failure Mechanisms of GFRP Scarf Joints under Tensile Load. *Materials*, 2021, vol. 14 (7), pp. 1806. DOI: [10.3390/ma14071806](https://doi.org/10.3390/ma14071806).
33. Sun C., Zhao W., Zhou J. et al. Mechanical behaviour of composite laminates repaired with a stitched scarf patch. *Composite Structures*, 2021, vol. 255, pp. 112928. DOI: [10.1016/j.compstruct.2020.112928](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112928).
34. Gungner M., Ramström M. *Robust repair methods of primary structures in composite*. Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:632489/FULLTEXT01.pdf> (accessed: December 04, 2023).
35. Xie Z., Li X., Yan Q. Scarf Repair of Composite Laminates. *MATEC Web of Conferences*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/304575167_Scarf_Repair_of_Composite_Laminates (accessed: December 04, 2023). DOI: [10.1051/mateconf/20166105019](https://doi.org/10.1051/mateconf/20166105019).
36. Tomblin J., Salah L., Yang C. *Effects of repair procedures applied to composite airframe structures*. Available at: https://depts.washington.edu/amtas/events/jams_06/Salah_Repair.pdf (accessed: December 04, 2023).
37. Budhe S., Banea M.D., De Barros S. Bonded repair of composite structures in aerospace application: a review on environmental issues. *Applied Adhesion Science*, 2018, vol. 6, art. 3. DOI: [10.1186/s40563-018-0104-5](https://doi.org/10.1186/s40563-018-0104-5).
38. Halliwell S. *Repair of fibre reinforced polymer structures*. Available at: <https://compositesuk.co.uk/wp-content/uploads/2021/12/repairoffrpstructures.pdf> (accessed: December 04, 2023).
39. Ashfort C., Ilcewicz L. *Certification of Bonded Aircraft Structure and Repairs*. Available at: <https://www.sto.nato.int/publications/pages/results.aspx?k=Cynthia%20Ashfort&s=Search%20All%20STO%20Reports> (accessed: December 04, 2023).
40. *Helicopter components, sections and systems*. Available at: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/helicopter_flying_handbook/hfh_ch04.pdf (accessed: December 04, 2023).
41. Seneviratne W., Tomblin J., Saathoff C. *Evaluation of aged bonded rotor blades*. Available at: https://www.wichita.edu/industry_and_defense/NIAR/Documents/jams-presentations-2021/Evaluation-of-Aged-Bonded-Rotor-Blades-Seneviratne.pdf (accessed: December 04, 2023).

42. Ilcewicz L., Cheng L. *FAA composite guidance and relevant resource*. Available at: <https://www.aviation.govt.nz/assets/aircraft/composite-seminar/faa-composite-guidance.pdf> (accessed: December 04, 2023).
43. Salah L. *CACRC depot bonded repair round robin investigation*. Available at: https://www.wichita.edu/industry_and_defense/NIAR/Documents/CACRCDepotBondedLSalah.pdf (accessed: December 04, 2023).
44. *Composite Repair of Military Aircraft Structures*. Neuilly sur Seine: AGARD, 1995, 24 p.
45. Sałaciński M., Kowalski R., Szmidi M., Augustyn S. A New Approach to Modelling and Testing the Fatigue Strength of Helicopter Rotor Blades during Repair Process. *Fatigue of Aircraft Structures*, 2019, vol. 11, pp. 56–67. DOI: 10.2478/fas-2019-0006.
46. Lewis A. *Making composite repairs to the 787*. Available at: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/3851.pdf> (accessed: December 04, 2023).
47. Fualdes C. *Experience and lessons learned of a composite aircraft*. Available at: <https://icas.org/media/pdf/ICAS%20Congress%20General%20Lectures/2016/2016%20Composite%20Aircraft%20Fualdes.pdf> (accessed: December 04, 2023).
48. Barannikov A.A., Postnov V.I., Veshkin E.A., Starostina I.V. Link between the energy characteristics of the surface of fiberglass of the VPS-53K brand and the strength of the adhesive joint based on it. *Trudy VIAM*, 2020, no. 10 (92), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 14, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-40-50.
49. Pieczonka L., Staszewski W.J. et al. Nondestructive testing of composite patch repairs. *11th European Conference on Non-Destructive Testing*. Prague, 2014. DOI: 10.13140/2.1.1691.8723.
50. Antipov V.V., Boichuk A.S., Chertishchev V.Yu., Yakovleva S.I., Barannikov A.A. Identification of operational damage from blades of rotors and tail rotors made of PCM in operating conditions. *Trudy VIAM*, 2023, no. 7 (125), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 14, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-93-103.

Информация об авторах

Баранников Александр Александрович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Вешкин Евгений Алексеевич, начальник УНТЦ, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Судьин Юрий Иванович, инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Information about the authors

Alexander A. Barannikov, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeny A. Veshkin, Head of USTC, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Yuri I. Sudin, Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 24.01.2024; получена после доработки 02.04.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 02.04.2024.
The article was submitted 24.01.2024; received in revised form 02.04.2024; approved and accepted for publication after reviewing 02.04.2024.