

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 628

### Ремонт композиционных материалов в современной авиации

Е.В. Малая, А.И. Саввин, А.В. Саввина

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

#### Аннотация

Рассматриваются современные методы и технологии ремонта композиционных конструкций, применяемых в авиационной промышленности. Основное внимание уделяется анализу преимуществ и недостатков каждого из методов, их влиянию на прочностные и эксплуатационные характеристики отремонтированных конструкций, а также необходимости обеспечения низкой пористости материалов для повышения их долговечности и надежности. Описаны процедуры подготовки зоны ремонта, укладки слоев заплат и использование вакуумного мешка для отверждения. Рассмотрены практические аспекты и технологические сложности, связанные с применением данных методов, а также рекомендации по их использованию в зависимости от типа повреждений и условий эксплуатации. Целью работы является анализ и оценка современных методов и технологий ремонта композиционных конструкций, используемых в авиационной промышленности, с акцентом на их влияние на прочностные и эксплуатационные характеристики, а также на повышение долговечности и надежности отремонтированных конструкций. Приведены примеры успешного применения различных методов на практике и результаты испытаний, подтверждающие эффективность предлагаемых решений.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, ремонт, предварительно отвержденные слои, газоимпульсная обработка, автоклавное формование, авиационная промышленность, углепластик, стеклопластик, прочность, долговечность

**Для цитирования.** Малая Е.В., Саввин А.И., Саввина А.В. Ремонт композиционных материалов в современной авиации. *Молодой исследователь Дона*. 2024;9(5):16–21.

### Repair of Composite Materials in Modern Aviation

Elena V. Malaya, Andrei I. Savvin, Aleksandra V. Savvina

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

#### Abstract

The article discusses modern methods and technologies for repairing composite structures used in the aviation industry. The main attention is paid to the analysis of the advantages and disadvantages of each method, their impact on the strength and performance characteristics of the repaired structures, as well as the need to ensure low porosity of materials to increase their durability and reliability. The paper describes the procedures for preparing the repair area, laying patch layers, and using a vacuum bag for curing. Practical aspects and technological difficulties associated with the application of these methods, as well as recommendations for their use depending on the type of damage and operating conditions are considered. The aim of the work is to analyze and evaluate modern methods and technologies for repairing composite structures used in the aviation industry, with an emphasis on their impact on the strength and performance characteristics, as well as on increasing the durability and reliability of the repaired structures. Examples of successful application of various methods in practice and test results confirming the effectiveness of the proposed solutions are given.

**Keywords:** composite materials, repair, pre-cured layers, gas pulse processing, autoclave moulding, aviation industry, carbon fibre reinforced plastics, fibreglass, strength, durability

**For citation.** Malaya EV, Savvin AI, Savvina AV. Repair of Composite Materials in Modern Aviation. *Young Researcher of Don*. 2024;9(5):16–21.

**Введение.** Современные композитные материалы (КМ) все чаще применяются в конструкции современных самолетов. В последние годы совершенствование методов ремонта клеевых технологий стало важным направлением в авиации [1]. Авиационные компании как отечественные, так и зарубежные активно разрабатывают новые процессы, позволяющие восстановить прочность ремонтируемых участков до уровня исходных конструкций. В условиях отсутствия специализированного оборудования часто используются жидкие и пастообразные клеи холодного отверждения, хотя их ресурс ограничен.

Для повышения эффективности предлагается использование высокопрочных пленочных клеев и клеевых препрегов для ремонта сотовых и монолитных конструкций. Жидкие и пастообразные клеи холодного отверждения подходят для заполнения пустот при небольших повреждениях и для ремонта отслоений обшивки. Вспенивающиеся клеи эффективны для вклеивания вставок сотового заполнителя. Пленочные клеи используются для приклеивания компенсирующих заплат к композитным материалам. Наиболее перспективными являются клеевые препреги, которые восстанавливают конструкции до уровня исходных свойств, обеспечивая высокую надежность и долговечность [2]. Целью данной работы является анализ и оценка современных методов ремонта композитных конструкций, применяемых в авиационной промышленности, с акцентом на использование клеевых технологий для восстановления прочностных характеристик поврежденных участков. Работа направлена на выявление наиболее эффективных подходов к ремонту, способных обеспечить долгосрочную надежность и безопасность эксплуатации воздушных судов, а также на разработку рекомендаций по выбору оптимальных материалов и технологий для различных типов повреждений и условий эксплуатации.

**Основная часть.** Старение авиационного парка включает несколько аспектов:

– физическое старение компонентов и систем. Со временем компоненты и системы воздушного судна (ВС) подвергаются износу, коррозии и усталости материала, что требует более частого и тщательного технического обслуживания;

– моральное устаревание. Развитие новых технологий делает старые модели менее эффективными и более дорогими в эксплуатации. Например, новые самолеты более экономичны и экологичны, по сравнению с моделями предыдущих поколений;

– увеличение частоты и объема ремонта. По мере старения самолета увеличивается количество обнаруживаемых дефектов и неисправностей, что требует большего объема ремонтных работ.

Полимерные композитные материалы (далее — КМ) стали ключевым компонентом в современной авиационной технике благодаря своей легкости, высокой прочности и коррозионной стойкости [3]. Однако, несмотря на свои преимущества, композитные материалы также подвергаются старению.

Старение парка воздушных судов (ВС) и использование композитных материалов обуславливают необходимость более частого и тщательного технического обслуживания. Необходимы регулярные осмотры и использование неразрушающего контроля. Обслуживание включает в себя ультразвуковые, рентгенографические и другие методы контроля для выявления внутренних дефектов без разрушения конструкции. В современных технологиях ремонта используют препреги, пленочные и пастообразные клеи. Газоимпульсную обработку (ГИО) используют для улучшения адгезии и восстановления прочности композитных материалов. Применение систем мониторинга состояния конструкции и методов предсказательной аналитики помогает своевременно обнаруживать проблемы и планировать ремонтные работы. Важным также является создание и постоянное обновление стандартов и методик по ремонту и обслуживанию композитных материалов в авиации.

Основные особенности технологии ремонта с применением клеевых препрегов включают: выкладку композитной заплаты из слоев препрега в специальном коническом углублении в обшивке; использование вакуумного давления для формования заплат с применением вакуумных мешков из специальной пленки и герможгута; применение пастообразных, пленочных клеев и препрегов, отверждающихся при температуре 20–170 °С, для ремонта в эксплуатационных организациях.

Для улучшения ремонта сотовых и монолитных конструкций разработана технология и комплект оснастки, обеспечивающие давление до 0,1–0,15 МПа и температуру до 180 °С, что позволяет выполнять ремонт как в производственных помещениях, так и на открытом воздухе, включая низкие температуры [4].

Эти требования адаптируются для каждой конструкции, учитывая её особенности и условия эксплуатации. Оценка проводится через испытания на образцах с имитацией повреждений.

Основное требование — восстановление прочности и жесткости до уровня, близкого к исходному. Прочность должна быть не менее 90 % от исходного материала, а жесткость — аналогичной, чтобы не нарушить характеристики конструкции.

Второе требование при ремонте конструкций из полимерных композитных материалов (ПКМ) связано с качеством аэродинамической поверхности. Для критических зон допускаются неровности до 0,5 мм, но в некоторых случаях требования могут быть жестче. Методы ремонта должны минимизировать увеличение веса, особенно для рулевых поверхностей [5].

Материалы для ремонта должны сохранять прочность при эксплуатационных температурах и влажности. Ремонтируемые конструкции, которые уже эксплуатировались, могут содержать влагу, поэтому материалы и методы должны обеспечивать долговечность.

**Основная часть.** Главным критерием выбора между ремонтом и заменой конструкции являются затраты. Если запасные части доступны, ремонт может быть выгоднее. Время простоя также важно. Если ремонт займет много времени, замена может быть предпочтительнее. Быстрая восстановительная работа иногда делает замену более выгодной.

Изготовление конструкций из полимерных композитных материалов (ПКМ) зависит от множества взаимосвязанных факторов. Разрушение конструкций происходит постепенно и может быть вызвано местными дефектами и концентрацией напряжений.

Пустоты в ПКМ снижают прочность при растяжении и сжатии. Эксперименты показывают, что при наличии 5 % пустот в стеклопластике предел прочности при растяжении снижается в 1,15 раза, а при 10 % — в 1,25 раза [6].

Прочность связи между волокнами наполнителя и полимерной матрицей также важна. Химические связи и механическое «обжатие» волокон должны быть обеспечены для достижения необходимой прочности. Неправильная влажность наполнителей в препрегах и их некорректное хранение могут снизить прочностные свойства и привести к дефектам. Эти факторы подчеркивают необходимость строгого контроля качества производства ПКМ и регулярных проверок для предотвращения дефектов и обеспечения долговечности конструкций.

Современные методы ремонта обеспечивают гладкуюлицевую поверхность, соответствующую требованиям аэродинамической гладкости, и применимы к различным типам конструкций, включая сэндвич-панели. Универсальные схемы установки заплат обеспечивают возможность восстановления прочности на уровне 90–100 % при различных типах повреждений. Для оценки пригодности конструкций к эксплуатации фиксируются все дефекты и ремонты на схемах агрегатов, которые хранятся в течение всего срока эксплуатации.

Для создания пластин с низкой пористостью и возможностью долгосрочного хранения без охлаждения используется предварительное отверждение в автоклаве. Эти пластины гибки и могут использоваться для формирования малых радиусов, включая переднюю кромку. Перед ремонтом определяется количество тонких предварительно отвержденных слоев, которые соединяются посредством «ступенчатого клина». В исследовании, проведенном в Центральном институте авиационных технологий (ЦИАТ), были проведены лабораторные испытания на образцах из углепластика, отвержденного в автоклаве. В рамках эксперимента применялись различные давления и температуры для минимизации пористости материала. Экспериментальные данные показали, что образцы, прошедшие отверждение в автоклаве при давлении 0,5 МПа и температуре 180 °С, имели коэффициент восстановления прочности около 97 % от исходной прочности композитной структуры. Было отмечено значительное снижение количества микротрещин и расслоений, по сравнению с материалами, отвержденными при атмосферных условиях. Неразрушающий контроль помогает определить наличие неклеевых зон, а ремонт проводится слой за слоем [7]. Преимущества включают высокое качество и низкую пористость материала, а также возможность использования на поверхностях с различными формами. Однако требуется аккуратная подгонка каждого слоя, техника может быть неудобной для работ с сложными поверхностями. Данный вид ремонт рекомендуется для несложных повреждений композитных элементов, когда нет срочности и есть возможность полного демонтажа поврежденной части.

Применение высокого давления в автоклаве предпочтительно для получения материалов с низкой пористостью, по сравнению с отверждением в вакууме, что часто приводит к более высокой пористости. Airbus активно применяет метод автоклавного отверждения под высоким давлением для ремонта композитных конструкций на своих же самолетах. Ремонт включает восстановление монолитных углепластиковых панелей фюзеляжа и крыльев с использованием слоев препрега, отверждаемых при высоком давлении. В ходе испытаний были достигнуты высокие показатели восстановления прочности — более 95 % от исходного уровня. Уровень пористости в материале после автоклавной обработки составил менее 2 %, что позволило существенно увеличить долговечность восстановленных участков. Кроме того, применяемое давление в 0,8–1,2 МПа обеспечивало улучшение адгезии между слоями композитного материала, что особенно важно для многослойных структур [8]. Оптимальная пористость обычно достигается при давлении, значение которого лежит между указанными выше двумя зна-

чениями. Метод автоклавного отверждения под высоким давлением рекомендуется для ремонта крупных и критически важных элементов конструкции самолета, требующих восстановления прочностных характеристик близко к первоначальным значениям. Процесс определения оптимального давления для минимизации пористости можно разбить на два этапа:

- определение количества препреговых материалов при различных давлениях в сочетании с вакуумом для достижения низкой пористости;
- разработка метода, который позволит применять необходимое общее давление при проведении ремонта на месте.

Преимущества данного метода заключаются в возможности укрепления поврежденной области с помощью новых слоев материала, сохраняя структуру и свойства исходного материала, а также в достижении низкой пористости в зоне ремонта. Недостатки кроются в необходимости специализированных форм коробок для работы с поверхностями сложной формы и малым радиусом кривизны, а также возможной чувствительности тонкой обшивки к вакууму, что повышает риск разрушения.

Технический результат достигается ремонтом монолитных изделий из полимерных композиционных материалов. Сначала определяют границы повреждения и вырезают поврежденную зону, создавая сквозное отверстие. Затем делается ступенчатое углубление вокруг сквозного отверстия для подготовки к ремонту. Базовый слой, состоящий из ткани, пропитанной клеем, укладывается вдоль контура ступенчатого углубления для герметичности дна повреждения. Для улучшения сцепления между слоями каждый из них подвергается обработке пульсирующим газовым потоком без нагрева. Этот процесс длится 2,5–10 минут при переменном звуковом давлении и поперечном расположении изделия относительно потока. Затем в центральной части ткани помещается клеевая линза из смеси клея и волокон, а поверх нее укладывается первый слой компенсирующей заплаты. Этот слой выравнивает поверхность для последующего вышлифовывания конического углубления. После отверждения базового слоя коническое углубление заполняется слоями компенсирующей заплаты, которые также подвергаются обработке газовыми импульсами и отверждаются под вакуумным мешком. Слои заплаты могут быть уложены в коническую выемку от меньшего к большему или на разделительной пленке в обратном порядке внахлест. После сборки заплата обрабатывается газовыми потоками, переворачивается и помещается в зону повреждения.

Газоимпульсная обработка улучшает адгезию, прочность и долговечность материалов, а также повышает их герметичность и защитные свойства.

Изделие из углепластика обрабатывается сочетанием газовых импульсов и звуковых колебаний без предварительного нагрева. Процесс занимает до 10 минут, при этом газовые импульсы направляются перпендикулярно слоям материала. Например, образцы углепластика КМУ-4Л обдуваются воздушным потоком с частотой около 1000 Гц и звуковым давлением около 115 дБ в течение 10 минут. После такой обработки прочность углепластика на растяжение увеличивается на 34 % [9, 10]. Испытания на растяжение до разрыва углепластика, обработанного таким методом, показали увеличение предела прочности материала на 34 % благодаря газоимпульсной обработке (рис. 1) [10].

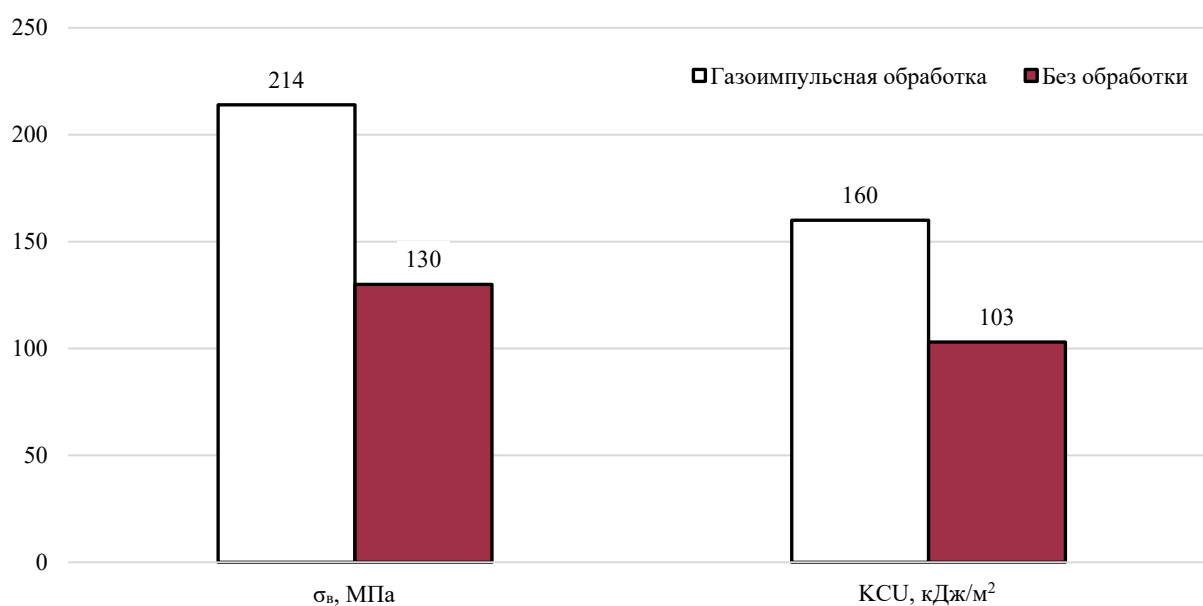


Рис. 1. Свойства углепластика КМУ-4Л после газоимпульсной обработки [10]

Газоимпульсная обработка (ГИО) играет важную роль в повышении адгезии композитных конструкций самолетов. Она активирует поверхность материалов, создавая микрорельеф и увеличивая их поверхностную энергию. Это значительно улучшает сцепление материалов, особенно в случаях, когда поверхность углепластика гладкая или непроницаемая [11]. ГИО больше подходит для срочного ремонта повреждений на месте эксплуатации самолета, когда демонтаж конструкции невозможен или требует слишком много времени и ресурсов, а также для ремонта сложных и труднодоступных областей конструкции.

**Заключение.** Проведенный анализ позволил выявить наиболее эффективные подходы к ремонту композитных конструкций, способные обеспечить долгосрочную надежность и безопасность эксплуатации воздушных судов.

Рекомендации по выбору оптимальных материалов и технологий для различных типов повреждений следующие:

- для крупных и критически важных элементов самолета, таких как панели фюзеляжа и конструктивные элементы крыла, которые требуют восстановления прочностных характеристик максимально близко к исходным, рекомендуется использовать метод автоклавного отверждения под высоким давлением. Этот метод обеспечивает долговечность, структурную целостность и высокую адгезию слоев, что важно для безопасности и надежности самолета. Однако есть ограничения и условия применения. Из-за сложности и потребности в специальном оборудовании, метод подходит только для стационарных условий. Ремонт рекомендуется выполнять в специальных цехах с доступом к автоклавному оборудованию. Требуется достаточное время на проведение ремонта, поэтому метод не подходит для оперативных или полевых ремонтов из-за необходимости демонтажа и подготовки. Он применим для ремонта, где важна долговечность и прочность, так как позволяет максимально восстановить свойства крупной композитной структуры;

- для срочного ремонта повреждений на месте эксплуатации самолетов рекомендуется метод газоимпульсной обработки. Он обеспечивает высокую скорость восстановления, возможность ремонта труднодоступных участков и минимизирует временные и финансовые затраты. При этом важно учитывать необходимость квалифицированного подхода и предварительной оценки состояния конструкции для обеспечения эффективности метода.

#### Список литературы

1. Гладунова О. Система мониторинга состояния композитного крыла для МС-21. URL: <https://compositeworld.ru/articles/app/id636b9cf8fb445b0019831be0> (дата обращения: 30.08.2024).
2. Ривин Г.Л. *Ремонт конструкций из полимерных композиционных материалов летательных аппаратов*: Учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ; 2000. 75 с.
3. Федотов А.А. *Методика восстановления элементов авиационных конструкций с эксплуатационными повреждениями с помощью клеевых соединений*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва: МГТУГА; 2022. 16 с.
4. Скрыбин В.А., Схиртладзе А.Г. Ремонт пластинчатых насосов. *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2017;2:3–8.
5. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. *Композиционные материалы*: Справочник. Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. Москва: Машиностроение; 1990. 512 с.
6. Ривин Г.Л. *Ремонт конструкций из полимерных композиционных материалов летательных аппаратов*: Учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ; 2000. 75 с.
7. Бойчук А.С., Чертищев В.Ю., Диков И.А. Изготовление тест-образцов из углепластика с различной пористостью для разработки методик оценки пористости неразрушающим методом. *Труды ВИАМ*. 2017;1(49):90–96.
8. *Repair of Aircraft Composite Structures and Components*. URL : <https://www.aircraftsystemstech.com/2019/11/layups-techniques-and-curing-composite.html> (дата обращения: 30.10.2024).
9. Иванов Д.А. *Воздействие нестационарных газовых потоков на структуру и свойства материалов, используемых в авиационной промышленности*. Санкт-Петербург; СПбГУГА: 2017. 328 с.
10. Иванов Д.А., Петрова Т.В., Давыдов И.А., Давыдов И.А. Композиционные материалы в современной авиации, использование и контроль за их состоянием в эксплуатации. *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации*. 2019;4(25):108-121.
11. Иванов Д.А., Засухин О.Н. *Способ обработки изделий из углепластика*. Патент РФ №2678022 С1. 2019. 4 с.

#### Об авторах:

**Андрей Игоревич Саввин**, магистрант кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и наземного оборудования Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [drrunya228@gmail.com](mailto:drrunya228@gmail.com)

**Александра Викторовна Саввина**, магистрант кафедры промышленное и гражданское строительство Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [yata.romanova.00@mail.ru](mailto:yata.romanova.00@mail.ru)

**Елена Викторовна Малая** кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и наземного оборудования Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [elvicma@mail.ru](mailto:elvicma@mail.ru)

***Конфликт интересов:*** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

***Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.***

***About the Authors:***

**Andrei I. Savvin**, Master's Degree Student of the Department of Technical Operation of Aircraft and Ground Equipment, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [drrunya228@gmail.com](mailto:drrunya228@gmail.com)

**Aleksandra V. Savvina**, Master's Degree Student of the Department of Industrial and Civil Engineering, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [yata.romanova.00@mail.ru](mailto:yata.romanova.00@mail.ru)

**Elena V. Malaya**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technical Operation of Aircraft and Ground Equipment, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [elvicma@mail.ru](mailto:elvicma@mail.ru)

***Conflict of Interest Statement:*** the authors do not have any conflict of interest.

***All authors have read and approved the final manuscript.***