

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 629.7.03

### Ремонт конструкций воздушных судов из композиционных материалов

А.А. Шеху, Е.В. Малая

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

#### Аннотация

В статье рассматриваются методы и технологии, применяющиеся при ремонте конструкций воздушных судов, выполненных из композиционных материалов. В связи с ростом использования композитов в авиационной промышленности — вопросы диагностики повреждений, восстановления целостности и долговечности подобных конструкций приобретают особую значимость. Определены основные методы диагностики повреждений, технологии ремонта, а также современные тенденции в области восстановления прочностных характеристик композитных структур.

**Ключевые слова:** ремонт, композиционные материалы, авиация, диагностика, ультразвуковая диагностика, деламация, полимерные композиты, восстановление структур, безопасность, прочность

**Для цитирования.** Шеху А.А., Малая Е.В. Ремонт конструкций воздушных судов из композиционных материалов. *Молодой исследователь Дона*. 2026;11(2):11–15.

### Repair of Aircraft Structures Made of Composite Materials

Ahmad A. Shehu, Elena V. Malaya

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

#### Abstract

The article studies the methods and technologies used in the repair of aircraft structures made of composite materials. Due to increasing use of composite materials in the aviation industry, the issues of damage detection in such structures, restoration of their integrity, and durability are becoming increasingly important. The article identifies the main methods of damage detection, repair technologies, and current trends in restoring the strength properties of composite structures.

**Keywords:** repair, composite materials, aviation, detection, ultrasonic testing, delamination, polymer composites, restoration of structures, safety, mechanical strength

**For Citation.** Shehu AA, Malaya EV. Repair of Aircraft Structures Made of Composite Materials. *Young Researcher of Don*. 2026;11(2):11–15.

**Введение.** Композитные материалы, такие как соты или заполненные пеной конструкции, обычно применяются в отдельных частях самолёта для достижения баланса между снижением массы и структурной целостностью. Доля сотовых конструкций варьируется в зависимости от типа самолёта, его конструкции и конкретных компонентов [1]. Современные воздушные суда в значительной степени зависят от композитов, поскольку они обеспечивают высокую прочность при минимальной массе. Вместе с тем эксплуатационные нагрузки, воздействие окружающей среды и механические повреждения требуют эффективных методов ремонта — в отличие от традиционных металлических конструкций, ремонт композитов представляет собой более сложную процедуру, включающую детальную диагностику и применение специализированных технологий.

Композиты продолжают использоваться для создания крупногабаритных и высокоинтегрированных узлов как в автомобильной, так и в аэрокосмической промышленности. Автобусы Wrightbus New Routemaster для Лондона и самолёты Bombardier C-Series служат наглядными примерами пропитанных смолой композитных компонентов, разработанных и изготовленных в Северной Ирландии. Масштаб и степень интеграции таких изделий делают их замену особенно дорогостоящей и затруднительной при обнаружении повреждений или производственных дефектов. Следовательно, экономически эффективные методы ремонта критически важны как на этапе производства, так и в процессе технического обслуживания в течение всего срока службы.

Для восстановления композитных конструкций применяют различные подходы, выбор которых определяется не только конструктивными и эксплуатационными требованиями, но и длительностью операций, стоимостью и трудозатратами. Традиционные методы механического крепления направлены на быстрое восстановление прочности на сжатие и устойчивости к боковому выпучиванию, однако они усиливают концентрацию напряжений в просверленных отверстиях и приводят к избыточной массе. В качестве альтернативы клеевые соединения могут быть эффективными — они минимально влияют на профиль поверхности, но часто требуют значительной подготовки поверхности. Скошенные клеевые швы теоретически обеспечивают оптимальное восстановление прочности при минимальном увеличении массы и с сохранением профиля поверхности, но их выполнение предполагает существенное удаление материала и тщательную подготовку — процессы дорогостоящие, трудоёмкие и требующие высокой квалификации. В связи с этим возрастает интерес к быстрому и малоинвазивному инъекционному ремонту [3].

Цель исследования — проанализировать существующие методы диагностики и ремонта композитных конструкций воздушных судов, а также определить наиболее эффективные технологические подходы к восстановлению их прочностных и эксплуатационных характеристик.

**Основная часть.** Заливка смолой (Resin Injection Repair) применяется при локальных повреждениях, когда общая структура материала сохранена, но имеются микротрещины или небольшие расслоения. Метод заключается во введении специальной эпоксидной или полиуретановой смолы в зону дефекта, что позволяет восстановить целостность материала и предотвратить дальнейшее развитие дефектов.

Данный способ широко используется для ремонта деламинатов и небольших пустот, образовавшихся вследствие механического воздействия. Процесс включает несколько этапов:

- подготовка поверхности и выявление границ повреждения;
- создание отверстий для введения смолы;
- вакуумирование для удаления воздуха и заполнения пустот;
- контролируемая полимеризация при оптимальной температуре и давлении.

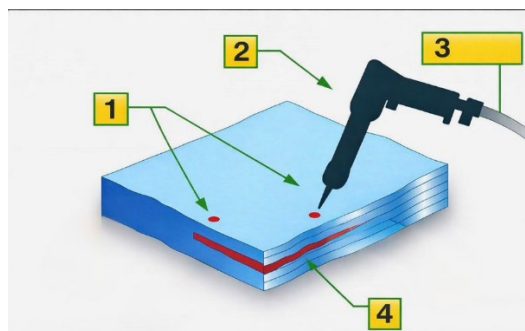


Рис. 1. Заливка смолой: 1 — просверленные отверстия; 2 — инъекционный пистолет; 3 — давление воздуха — 20 фунтов на квадратный дюйм; 4 — впрыскиваемая смола [2]

Преимуществами данного подхода являются минимальное вмешательство в структуру материала, сохранение механических характеристик и относительная технологичность выполнения. Однако область применения метода ограничена незначительными повреждениями и он не пригоден для восстановления при серьёзных разрушениях композитной структуры.

Слоевое восстановление (Scarf Repair) — один из наиболее результативных при ремонте композитов способов, особенно в случаях значительных дефектов, захватывающих несколько слоёв. Суть метода заключается в поэтапном удалении повреждённых слоёв под заданным углом, что обеспечивает плавный переход между оригинальным и восстанавливаемым участком. После подготовки в повреждённую зону послойно укладывают новые композитные пластины с применением клеевых систем и вакуумной прессовки.

Композитные материалы подвержены разнообразным типам повреждений; основные из них включают:

- деликвесцентные микротрещины;
- разделение слоёв (деламинация);
- волокнистые разрывы;
- ударные повреждения.

**Методы ремонта композитных конструкций.** Ремонт элементов авиационных конструкций из композиционных материалов предполагает выполнение нескольких ключевых операций:

- очистка повреждённого участка;
- удаление разрушенной части материала;
- нанесение заплаты или послойная замена композиционного слоя;
- применение адгезивных составов и прессование;
- термообработка для фиксации восстановленного участка.

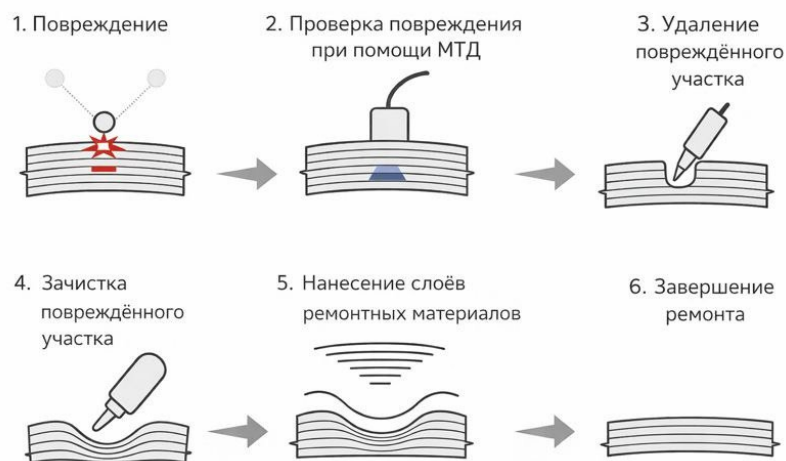


Рис. 2. Процесс ремонта шва для поврежденных композитных материалов

Основные этапы слоевого восстановления:

- определение границ повреждения и подготовка ремонтируемого участка;
- удаление поврежденных слоев материала под оптимальным углом (обычно 5:1 или 10:1 в зависимости от требований);
- послойное нанесение новых композитных материалов с ориентацией волокон, соответствующей исходной конструкции;
- прессование и термообработка для достижения прочности и адгезии нового слоя.

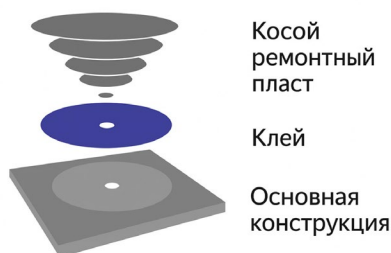


Рис. 3. Ремонт композитных материалов методом заплатки-шарфа

Преимущества метода:

- высокая механическая прочность восстановленного участка;
- минимальное влияние на аэродинамические характеристики конструкции;
- возможность восстановления сложных геометрических форм.

Однако данный метод требует высокой точности выполнения и применения специализированного оборудования, что делает его более сложным по сравнению с другими способами ремонта.

Латочный ремонт (Patch Repair) — один из наиболее распространённых методов восстановления композитных конструкций при значительных повреждениях, когда требуется замена части материала без демонтажа всей конструкции. Метод заключается в установке заплат (латок) на повреждённую область с использованием клеевых составов, а также болтовых или заклёпочных соединений. В зависимости от характера дефекта латочный ремонт может выполняться с наружной стороны конструкции (наружная заплатка) либо с обеих сторон повреждённого участка (двусторонняя заплатка).

Основные этапы латочного ремонта:

- определение границ повреждения и подготовка поверхности (очистка, шлифовка);
- изготовление заплаты из аналогичного композиционного материала;
- нанесение клеевого состава и установка заплаты с последующей прессовкой;
- альтернативный вариант — механическое крепление (например, с использованием заклёпок);
- термическая обработка для закрепления материала и восстановления прочностных характеристик.

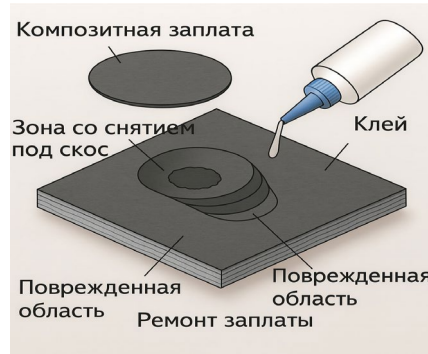


Рис. 4. Латочный ремонт

Преимущества метода:

- возможность восстановления значительных повреждений без полной замены детали;
- относительная простота и скорость выполнения ремонта;
- высокая прочность соединения при корректном подборе материалов.

Вместе с тем латочный ремонт может изменить распределение нагрузок в конструкции и требует точных расчётов, чтобы исключить ослабление механических характеристик воздушного судна.

**Современные тенденции в области ремонта композитных материалов.** С развитием технологий растёт применение автоматизированных и роботизированных систем для диагностики и восстановления композитных конструкций. Использование 3D-печати и новых полимерных материалов позволяет ускорить и удешевить процессы ремонта. Ведутся также исследования самовосстанавливающихся композиционных материалов, способных автоматически заполнять трещины и микроповреждения.

Композитные материалы стали предпочтительными в аэрокосмической промышленности, ветроэнергетике и современном строительстве благодаря своей малой массе, высокой удельной прочности и широким возможностям конструирования. Вместе с тем вибрационное поведение композитных конструкций под динамическими нагрузками характеризуется значительной анизотропией, сложными демпфирующими механизмами и эффектами межмасштабной связи — это создаёт серьёзные вызовы для их динамических характеристик, усталостной надёжности и шумоподавления.

Этот специальный выпуск журнала «Материалы» посвящён вибрационному поведению композитных конструкций и призван объединить наиболее инновационные теоретические достижения, методы численного моделирования и экспериментальные методики характеристики в данной области. Особое внимание уделено контролю и оптимизации вибраций, включая технологии пассивного и активного управления, применение интеллектуальных материалов и оптимизацию с использованием машинного обучения. В выпуске приветствуются оригинальные исследования современных композитных систем и их инженерных приложений.

Ремонт композитных конструкций воздушных судов — сложный и многоступенчатый процесс, требующий высокой точности и специализированных знаний. Применение передовых методов диагностики, таких как ультразвуковая дефектоскопия, термография и рентгеновская томография, позволяет выявлять даже скрытые дефекты, способные привести к критическим повреждениям в эксплуатации.

Современные технологии ремонта — заливка смолой, послойное восстановление и латочный ремонт — обеспечивают надёжное восстановление прочностных характеристик конструкции и продление срока службы воздушного судна. Однако каждый метод имеет ограничения и должен выбираться с учётом типа и масштаба повреждения.

Инновационные разработки в области композитных материалов — самовосстанавливающиеся полимерные структуры и автоматизированные ремонтные системы — открывают новые перспективы для авиационной промышленности. Применение роботизированных комплексов и 3D-печати повышает точность и эффективность ремонтных работ.

Внедрение новых технологий и совершенствование существующих методов ремонта критически важны для поддержания безопасности и надёжности воздушных судов. В условиях роста применения композитных материалов в авиации дальнейшие исследования будут способствовать созданию более совершенных и экономически эффективных решений для обслуживания и восстановления авиационных конструкций.

Ремонт композитных конструкций воздушных судов остаётся технологически насыщенным процессом, требующим точных методов диагностики и высокотехнологичных решений. Современные подходы к диагностике и ремонту позволяют существенно продлить срок службы авиационных конструкций и повысить безопасность полётов.

**Заключение.** Ремонт конструкций воздушных судов из композиционных материалов представляет собой сложный технологический процесс, требующий применения высокоточных диагностических методов и специализированных технологий восстановления. Рассмотренные методы — заливка смолой, послойное восстановление и латочный ремонт — обеспечивают эффективное возвращение прочностных характеристик и продление ресурса авиационных конструкций. Современные тенденции, включая автоматизацию ремонтных процессов, использование 3D-печати и развитие самовосстанавливающихся материалов, открывают перспективы для повышения надёжности и экономичности технического обслуживания. В дальнейшем совершенствование технологий ремонта будет играть ключевую роль в обеспечении безопасности полётов и устойчивого развития авиационной отрасли.

#### Список литературы

1. Шеху А.А., Малая Е.В. Методы контроля сотовых структур авиационного оборудования в рабочем состоянии. В: *Сборник статей Международной научно-практической конференции «Современные исследования и тренды в науке»*. Пенза, 25 января 2024 год. Пенза: МЦНС «Наука и просвещение»; 2024. С. 44–46. URL: <https://naukaip.ru/wp-content/uploads/2024/01/MK-1923.pdf> (дата обращения: 12.01.2026).
2. *Aircraft Systems Tech. Damage Classification in Sandwich Composite Structures*. URL: <https://www.aircraftsystemstech.com/2019/06/damage-classification-sandwich.html> (дата обращения: 06.2019).
3. Pierce RS, Campbell WC, Falzon BG. Injection Repair of Composites for Automotive and Aerospace Applications. In: *Proceedings of the 21st International Conference on Composite Materials. Xi'an, August 20–25, 2017*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/319310174\\_Injection\\_repair\\_of\\_composites\\_for\\_automotive\\_and\\_aerospace\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/319310174_Injection_repair_of_composites_for_automotive_and_aerospace_applications) (дата обращения: 12.01.2026).

#### Об авторах:

**Ахмад Адаму Шеху**, магистрант кафедры «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и наземного оборудования» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ahmerdrarer@gmail.com](mailto:ahmerdrarer@gmail.com)

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

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

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

#### About the Authors:

**Ahmad Adamu Shehu**, 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), [ahmerdrarer@gmail.com](mailto:ahmerdrarer@gmail.com)

**Elena V. Malaya**, Cand.Sci. (Engineering), 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), [elevicma@mail.ru](mailto:elevicma@mail.ru)

**Conflict of Interest Statement:** the authors declare no conflict of interest.

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