

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 629.7.03

Технологии восстановления лопаток компрессоров газотурбинных двигателей

Хашим Мохаммед Рияд Хашим, А.С. Решенкин

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

Аннотация

Восстановление работоспособности и продление сроков эксплуатации авиационных двигателей является актуальной задачей, особенно в условиях текущего санкционного давления со стороны западных стран. В этой связи анализ как новых, так и уже имеющихся технологий для их потенциального применения становится важной частью работы. Исследуя конструкции и эксплуатационные повреждения компрессоров авиационных двигателей, можно сделать вывод, что для эффективного восстановления функциональности поврежденных элементов необходимо грамотное сочетание современных технологий сварки, наплавки и пайки, а также внедрение инновационных материалов и оборудования.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, авиационные компрессоры, конструкция, технологии ремонта

Для цитирования. Хашим Мохаммед Рияд Хашим, Решенкин А.С. Технологии восстановления лопаток компрессоров газотурбинных двигателей. *Молодой исследователь Дона*. 2025;10(2):90–94.

Technologies for Restoring Compressor Blades of Gas Turbine Engines

Hashim Mohammed Riyad Hashim, Andrei S. Reshenkin

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

Abstract

Restoring the operability and extending the service life of aircraft engines is a crucial task at all times. This issue is particularly pressing at present, in light of the sanctions imposed by Western countries. Therefore, analyzing new and existing technologies for potential use is a significant task. Considering the design and operational damage to aircraft engine compressors, we can conclude that effectively restoring the functionality of damaged components requires a competent combination of modern welding, surfacing, and soldering techniques, as well as innovative materials and equipment.

Keywords: gas turbine engine, aircraft compressors, design, repair technologies

For Citation. Hashim Mohammed Riyad Hashim, Reshenkin AS. Technologies for Restoring Compressor Blades of Gas Turbine Engines. *Young Researcher of Don*. 2025;10(2):90–94.

Введение. С развитием технологий в области двигателестроения возникает необходимость решения множества задач, связанных с повышением надежности и долговечности газотурбинных двигателей. Основная цель заключается в одновременном снижении затрат на техническое обслуживание и ремонт [1], а также минимизации времени и трудозатрат на данные процессы. Особое внимание следует уделить наиболее критичным и дорогостоящим компонентам, таким как лопатки компрессоров, которые играют ключевую роль в функционировании двигателя. В последние годы наблюдается тенденция к применению монолитных конструкций рабочих колёс компрессоров. Это решение повышает прочность и надежность, однако также ставит перед инженерами новые вызовы, касающиеся обслуживания и ремонта. Повреждения лопаток компрессора в процессе эксплуатации остаются одной из основных причин досрочного вывода из эксплуатации множества двигателей. Основные факторы повреждения лопаток включают засасывание посторонних предметов с аэродромной поверхности, столкновения с птицами, попадание камней и льда. Эти факторы могут привести к серьёзным повреждениям, требующим немедленного ремонта или замены. Таким образом, восстановление лопаток компрессоров является актуальной задачей, направленной на повышение надежности и ресурса работы газотурбинных двигателей.

Основная часть. На сегодняшний день в авиастроении широко используются два основных типа компрессоров — центробежные и осевые. Центробежный компрессор достигает своей цели, забирая поступающий воздух и разгоняя его наружу за счёт центробежного воздействия. На рис. 1 представлен турбовинтовой двигатель Garrett TPE331 с двухступенчатым центробежным компрессором [2].

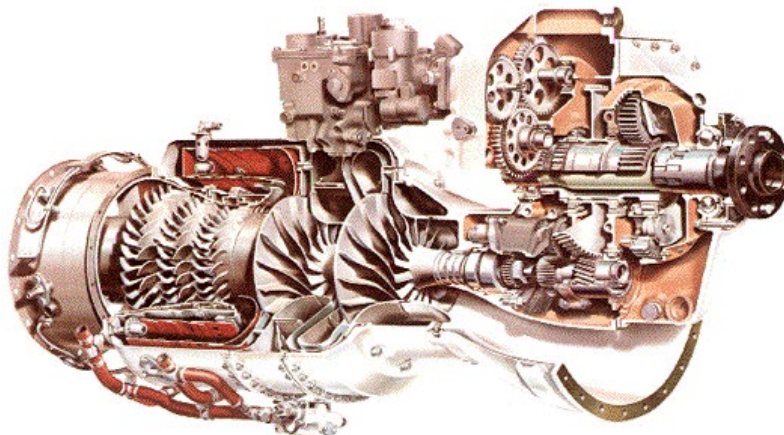


Рис. 1. Турбовинтовой двигатель Garrett TPE331 с двухступенчатым центробежным компрессором

Осевой компрессор сжимает воздух, в то время как он продолжает поступать в своём первоначальном направлении, таким образом избегая потерь энергии, вызванных поворотами. Компоненты каждого из этих двух типов компрессоров выполняют индивидуальные функции по сжатию воздуха для секции сгорания. Основная задача компрессора заключается в повышении давления.

Центробежный компрессор состоит из рабочего колеса (ротора), диффузора (статора) и компрессорного коллектора. Центробежные компрессоры имеют высокий перепад давления на каждой ступени, который может составлять около 8:1. Они, как правило, имеют не более двух ступеней из соображений эффективности. Два основных функциональных элемента здесь — это рабочее колесо и диффузор.

Диффузор представляет собой отдельный узел, который устанавливается внутри и крепится болтами к коллектору; весь узел (диффузор и коллектор) часто называется диффузором. При анализе компрессора узлы рассматриваются по отдельности. Рабочее колесо, обычно изготовленное из ковального алюминиевого сплава, проходит термическую обработку, механическую обработку и сглаживание для минимизации ограничения потока и турбулентности. В большинстве случаев рабочее колесо изготавливается из цельной заготовки, и его функция заключается в захвате и ускорении потока воздуха, направляя его к диффузору. Рабочие колеса бывают двух типов: с одним входом и с двумя входами. Основные различия между этими двумя типами заключаются в размере и расположении воздухопроводов. Рабочее колесо с двумя входами имеет меньший диаметр, но обычно работает с более высокой скоростью вращения, чтобы обеспечить достаточный поток воздуха. Рабочее колесо с одним входом (рис. 2) позволяет удобно подводить воздуховод непосредственно к отверстию рабочего колеса (лопаткам направляющего аппарата), в отличие от более сложного воздуховода, необходимого для подвода воздуха к задней стороне рабочего колеса с двумя входами. Несмотря на то, что рабочее колесо с одним входом может быть немного эффективнее в плане забора воздуха, его диаметр должен быть больше для обеспечения того же объёма воздуха, что создаёт дополнительное давление на общую конструкцию двигателя.



Рис. 2. Крыльчатка центробежного компрессора

В состав воздуховода для компрессоров с двойным всасыванием входит нагнетательная камера. Для таких компрессоров необходима камера, расположенная почти под прямым углом к оси двигателя, чтобы обеспечить положительный поток, который требует, чтобы воздух поступал в компрессор под положительным давлением. В этих устройствах в состав нагнетательной камеры входят вспомогательные воздухозаборные створки (впускные дверцы), которые пропускают воздух в моторный отсек во время наземной эксплуатации, когда потребность двигателя в воздухе превышает поток, проходящий через воздухозаборники. При неработающем двигателе створки удерживаются пружинами в закрытом положении, а при падении давления в моторном отсеке ниже атмосферного пружины автоматически открывают створки. Давление встречного потока воздуха в моторном отсеке помогает пружинам удерживать створки закрытыми во время взлета и полета.

Диффузор представляет собой камеру с несколькими лопастями, образующими ряд расходящихся каналов, ведущих в коллектор. Лопастей диффузора направляют поток воздуха от крыльчатки в коллектор под углом, который рассчитан на сохранение максимального количества энергии, передаваемой крыльчаткой. Они подают воздух в коллектор со скоростью и давлением, достаточными для использования в камерах сгорания.

Коллектор компрессора направляет воздух из диффузора в камеры сгорания и имеет выпускные отверстия для каждой камеры для равномерного распределения воздуха. Выпускной патрубок крепится к каждому выходному отверстию, и такие отверстия, выполненные в виде каналов, известны под разными названиями, например, выпускные каналы, выпускные патрубки или впускные каналы камер сгорания. Несмотря на различия в терминологии, все эти выпускные каналы выполняют очень важную часть процесса диффузии, ведь они изменяют радиальное направление воздушного потока на осевое направление, в котором процесс диффузии завершается после поворота. Для эффективного выполнения этой функции в некоторые колена иногда устанавливаются поворотные лопасти (каскадные лопасти), которые обеспечивают гладкую поворотную поверхность.

Осевой компрессор — это устройство, предназначенное для сжатия газов, в частности воздуха, с использованием осевого потока. Основными конструктивными элементами осевого компрессора являются ротор и статор. Ротор компрессора — это подвижная вращающаяся часть, на которой закреплены лопатки, выполненные из специальных сплавов. Статор — неподвижная часть компрессора, состоящая из рядов лопаток, которые жёстко закреплены внутри корпуса. Все лопатки статора расположены радиально к оси ротора и плотно прилегают к каждой ступени лопаток ротора. Компрессор одновального ТРД изображен на рис. 3 [3].

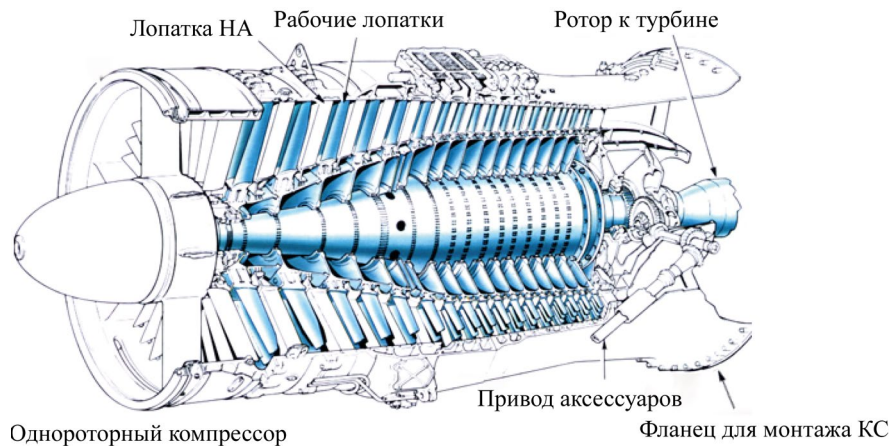


Рис. 3. Компрессор одновального ТРД

Корпус компрессора выполнен разъёмным из двух половин, что позволяет обеспечить доступ для обслуживания или замены лопаток. Одним из главных преимуществ осевых компрессоров является их высокая эффективность при больших объемах воздуха. Авиационные осевые компрессоры имеют компактные размеры и относительно низкий вес. Основным недостатком осевых компрессоров является низкая эффективность при небольшом расходе воздуха; кроме того, высокая точность изготовления является обязательным требованием.

В процессе эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей на лопатки компрессоров воздействует небольшое количество факторов, которые существенно влияют на их работоспособность и долговечность. Все эти факторы можно условно разделить на две основные категории: силовые факторы и факторы окружающей среды. Силовые факторы в большинстве случаев определяются конфигурацией лопаток и влиянием внешних сил (статические, газодинамические и вибрационные нагрузки). Эта категория факторов прогнозируется и учитывается на стадии проектирования. Однако вторая категория факторов более сложная. Она обусловлена особенностями окружающей среды, в которой функционирует двигатель.

К таким факторам можно отнести попадание посторонних предметов, коррозию, перепады температуры, эрозию, износ и фреттинг-коррозию. Попадание различных предметов в компрессор может привести к серьёзным повреждениям лопаток, что неизбежно вызовет отказ двигателя [4]. Например, попадание птиц, града или мелких деталей и инструмента, оставленных при обслуживании, может привести к образованию забоин и трещин на поверхности лопаток. Эрозия, вызванная воздействием мелких частиц, таких как песок, может привести к изменению аэродинамической формы лопаток и снижению их эффективности. Это особенно актуально в условиях эксплуатации в регионах с высоким уровнем запыленности воздуха.

Коррозия также может существенно повлиять на работоспособность лопаток. Она возникает в результате воздействия агрессивных сред, таких как соли, кислоты или другие химические вещества, которые могут находиться в атмосфере или образовываться в процессе работы двигателя. Коррозия ослабляет материал, что снижает его усталостную прочность и может привести к преждевременному выходу из строя. Фреттинг-коррозия возникает из-за микродвижений между контактирующими поверхностями и тоже негативно сказывается на состоянии лопаток. Эти микродвижения могут приводить к образованию трещин и повреждений, что, в конечном итоге, также может стать причиной отказа детали.

Наиболее распространённые неисправности компрессоров связаны именно с попаданием в двигатель посторонних предметов [5–7], о чем свидетельствуют многочисленные статистические данные о летных происшествиях. Например, согласно исследованиям, проведённым в авиационной отрасли, более 30 % инцидентов с двигателями связано с повреждениями, вызванными попаданием птиц. Это явление может приводить к серьёзным повреждениям, требующим немедленного ремонта или замены лопаток.

На основании вышеизложенного восстановление геометрии и функциональности лопаток компрессора критически важно для поддержания работоспособности двигателя и увеличения его ресурса. Среди наиболее эффективных методов ремонта можно выделить сварку, наплавку и пайку, каждая из которых обладает своими преимуществами и сферами применения.

Сварка трением — это метод, получивший широкое распространение, позволяющий создавать прочные и высококачественные соединения без использования присадочного материала. Его ключевое преимущество заключается в минимальном термическом воздействии на основную деталь, что снижает риск образования микротрещин и деформаций. Ярким примером инновационного применения сварки трением является технология, разработанная компанией United Technologies Corporation (UTC) [8]. Эта компания разработала ресурсоэффективный метод сборки рабочих колёс типа «блиск», где диск и лопатки изготавливаются отдельно, а затем соединяются методом сварки трением. Это позволяет значительно сократить количество отходов и повысить производительность, что особенно актуально в условиях растущей стоимости материалов и стремления к экологически чистой промышленности.

В свою очередь, компания General Electric (GE) предложила усовершенствованную технологию сварки трением [9]. Их подход заключается в создании специального профиля на краю диска — выступов, напоминающих гребень волны, с продольными прямоугольными канавками. Эта модификация способствует лучшему замыканию и пластической деформации металла в зоне соединения, что обеспечивает повышенную прочность и сопротивляемость усталостным нагрузкам при высоких температурах и давлениях. Такой подход позволяет компенсировать концентрацию напряжений и повысить надёжность работы всего узла.

Если требуется восстановление изношенных или повреждённых поверхностей лопаток, эффективным методом является наплавка, заключающаяся в нанесении на поверхность детали расплавленного присадочного материала с заданными характеристиками. Наплавка позволяет восстанавливать геометрию, износостойкость и жаропрочность лопаток, значительно продлевая срок их службы.

Пайка применяется для ремонта трещин или сколов на кромках лопаток. Основным отличием от сварки является использование припоя с более низкой температурой плавления, чем у основного материала. Пайка обеспечивает высокую герметичность соединения, хотя ее прочность ниже, чем у сварных швов. Это применимо в тех случаях, когда необходимо максимально снизить термическое воздействие на деталь, обеспечивая при этом высокую точность соединения.

Заключение. В заключение следует отметить, что для выбора оптимального метода восстановления лопаток газотурбинных двигателей требуется учитывать характер и степень повреждения, тип материала лопаток и требования к прочности и надёжности соединения. Сочетание современных технологий сварки, наплавки и пайки, а также использование инновационных материалов и оборудования, позволит эффективно восстанавливать функциональность лопаток, значительно увеличивая ресурс и срок службы авиационных газотурбинных двигателей.

Список литературы

- ГОСТ 18322–78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. Центр аттестации и экспертизы. URL: https://www.centrattek.ru/normativnye_dokumenty/gosty1/gost-18322-78-sistema-tekhnicheskogo-i-remonta-i/ (дата обращения: 22.01.2025).
- Турбовинтовой двигатель Garrett TPE331 с двухступенчатым центробежным компрессором. URL: <http://avia-simply.ru/kompressori-aviacionnih-gtd/> (дата обращения: 22.01.2025).
- Компрессор одновального ТРД. URL: <http://avia-simply.ru/kompressori-aviacionnih-gtd/> (дата обращения: 22.01.2025).
- Белоусов М.Г., Цуркаль А.А. Исследование факторов, влияющих на повреждаемость и разрушение лопаток компрессоров авиационных двигателей. *Электронный журнал «Труды МАИ»*. 2013;(65):1–14. URL: <https://mai.ru/upload/iblock/12f/12fedd7f43827822b63847294dd0ce65.pdf> (дата обращения: 12.02.2025).
- Лозицкий Л.П., Ветров А.Н., Дорошко С.М., Иванов В.П., Коняев Е.А. *Конструкция и прочность авиационных газотурбинных двигателей*. Москва: Воздушный транспорт; 1992. 535 с.
- Петухов А.Н. *Сопротивление усталости деталей ГТД*. Москва: Машиностроение; 1993. 231 с.
- Методология установления и увеличения ресурсов авиационных двигателей и их элементов. Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова URL: <https://ciam.ru/research/strength-reliability/resource/> (дата обращения: 12.02.2025).
- Walker H, Hilton SA, Barbieri JoAnn, Fournier JP, Trask RD. *Method for Linear Friction Welding and Product Made by Such Method*. United States Patent, No. US 6,219,916 B1. 2001. 14 p. URL: <http://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US6219916.pdf> (accessed: 01.04.2025).
- Crall DW, Kelley JR, Prentice IF, McNulty GS, Toye MdeW. *Fluted Blisk*. United States Patent, No. US 6,478,545 B1. 2002. 13 p. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US6478545.pdf> (accessed: 01.04.2025).

Об авторах:

Хашим Мохаммед Рияд Хашим, магистрант кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и наземного оборудования Донского государственного технического университета (344023, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Страны советов, 1), mmhm2400@gmail.com

Андрей Станиславович Решенкин, заведующий кафедрой технической эксплуатации летательных аппаратов и наземного оборудования Донского государственного технического университета (344023, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Страны советов, 1), reshenkin@list.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Hashim Mohammed Riyad Hashim, Master's Degree Student of the Department of Technical Operation of Aircraft and Ground Equipment, Don State Technical University (1, Strana Sovetov Str., Rostov-on-Don, 344023, Russian Federation), mmhm2400@gmail.com

Andrei S. Reshenkin, Head of the Department of Technical Operation of Aircraft and Ground Equipment, Don State Technical University (1, Strana Sovetov Str., Rostov-on-Don, 344023, Russian Federation), reshenkin@list.ru

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

All authors have read and approved the final manuscript.