

*В. Ф. Лабунец, канд. техн. наук, проф.,  
А. П. Кудрин, канд. техн. наук,  
В. В. Жигинас,  
О. С. Супрунович, асп.,  
В. А. Тут,  
А. В. Мельник, асп.*

## **АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОТЕРИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ТРУЩИХСЯ УЗЛОВ АВИАТЕХНИКИ И МЕТОДОВ ИХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ**

Национальный авиационный университет

*Выполнен анализ причин и факторов, вызывающих потерю работоспособности деталей авиационной техники, работающих в узлах трения. Отмечено, что множество деталей, изготовленных из легких сплавов, нуждаются в разработке эффективных технологий их восстановления. Указаны методы, применяющиеся для поверхностного упрочнения и восстановления деталей узлов трения АТ.*

**Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами.** Для интенсификации технической эксплуатации авиационной техники (АТ) на основе достижений научно-технического прогресса, экономии материальных, топливно-энергетических и трудовых ресурсов необходимо дальнейшее совершенствование технического обслуживания и ремонта самолетов и авиадвигателей, повышения их надежности и долговечности.

При этом предусматривается сокращение времени подготовки самолетов и авиадвигателей к ремонту и внедрение эффективных технологических процессов оптимизации процедуры ремонта АТ и сокращение его сроков. В решении этих задач важное значение имеет своевременное и полное обеспечение ремонтных предприятий запасными частями.

Потребность в запасных частях возникает из-за интенсивного старения АТ, а их изготовление на ремонтных предприятиях связано с определенными трудностями, поскольку данный вид работ не характерен для ремонтной организации и отвлекает ее материальные и трудовые ресурсы. Кроме этого, обеспечение предприятий

импортными запчастями не решает проблему, из-за их высокой стоимости. В связи с этим актуальной и важной народнохозяйственной задачей является восстановление изношенных деталей. Оно позволяет экономить материальные, трудовые ресурсы, высвободить производственные мощности за счет использования деталей по прямому назначению. Следует отметить, что во многих случаях восстановленные детали более долговечны, чем серийные, в случаях применения современных технологий поверхностного упрочнения и нанесения износостойких покрытий.

**Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем.** Анализ статистических данных дефектации деталей АТ во время выполнения капитального ремонта позволяет утверждать, что наибольшее их количество бракуется по причине повышенного износа, усталостного разрушения и интенсивной коррозии [1].

Согласно [2], анализ элементов, характеризующих способ восстановления как параметр системы, показывает, что знание дефектов и причин их образования в условиях эксплуатации является одним из основных критериев разработки и выбора оптимального способа восстановления.

Как известно, износ является результатом процесса разрушения и отделения частиц материала от рабочей поверхности детали при трении и проявляется в постепенном изменении ее размеров и формы. Выбору оптимального способа восстановления предшествует определение величины износа, характера процесса изнашивания и причин, вызывающих его развитие.

Номенклатура материалов, используемых для изготовления авиационных конструкций, весьма обширная. Это легированные стали и сплавы различных классов (конструкционные, шарикоподшипниковые, жаропрочные, жаростойкие, коррозионностойкие и др.), антифрикционные и фрикционные материалы, полимерные, композиционные и многие другие. Согласно [3], при выборе материала для трущихся деталей конкретного узла, работающего в определенных условиях нагружения, наряду со свойствами износостойкости учитывают и другие характеристики материала, обеспечивающие необходимую прочность деталей.

Аналізу разрушений деталей узлов трения АТ посвящены исследования многих ученых [1; 3–7 и др.]. Однако подавляющее боль-

шинство этих исследований посвящено изучению процессов изнашивания деталей АТ, изготовленных из сплавов на основе железа.

Учитывая тот факт, что с каждым годом количество деталей, изготовленных из легких сплавов, увеличивается, научный и практический интерес представляет анализ причин разрушения деталей узлов трения АТ, изготовленных из сплавов на основе алюминия, титана и магния.

**Цель работы** – провести анализ причин разрушения деталей узлов трения АТ, изготовленных из легких сплавов, и технологических процессов поверхностного упрочнения и восстановления изношенных деталей.

**Содержание и результаты исследований.** Большинство узлов трения авиационных конструкций, детали которых работают в различных условиях контактного взаимодействия, имеют достаточно высокую износостойкость и обеспечивают надежную работу авиационных трибосистем в течение заданных ресурсов. Однако, как свидетельствуют результаты дефектации трущихся деталей, случаи преждевременного выхода из строя трибоузлов по вине повышенного износа неодинокими. Результатом интенсивного изнашивания в этих случаях является снижение работоспособности пары трения, а следовательно, и снижение ее долговечности, что в некоторых случаях приводит к отказам в работе. Рассмотрим некоторые примеры повышенного изнашивания деталей из легких сплавов различных узлов АТ, его причины и характерные особенности трибоповреждений.

Газоабразивному изнашиванию подвергаются детали, работающие в потоке газа или газоабразива. К ним относятся лопасти винтов авиадвигателей, обтекатели, детали входных устройств газозоодушного тракта двигателей.

Особенно ярко, как отмечается в [3], газоабразивное изнашивание проявляется на деталях газозоодушного тракта вертолетных газотурбинных двигателей и лопастях несущих винтов вертолетов, эксплуатирующихся на грунтовых посадочных площадках и в районах с большой запыленностью. При работе вертолета в наземных условиях, или при зависании на небольшой высоте, от воздушного потока, отбрасываемого вращающимся винтом, пыль и песок легко поднимаются в воздух и удерживаются во взвешенном состоянии,

образуя пылевое облако. В результате этого во всасывающую систему двигателя попадает воздух, содержащий большое количество абразивных частиц, которые вызывают повышенный износ рабочих лопаток и направляющих аппаратов газоздушного тракта. Также это пылевое облако вызывает интенсивный износ лопастей несущего винта.

Проведенный нами анализ причин и характера повреждений лопастей воздушного винта АВ-72, изготовленного из алюминиевого высокопрочного сплава В95, авиадвигателя АИ-24 показал, что на ее рабочей поверхности развивается процесс газоабразивного изнашивания, интенсивность которого усиливается воздействием коррозионной среды. Вращаясь со скоростью около 1265 об/мин, лопасть винта подвергается воздействию потока твердых частиц (пыль, песок, мелкие камушки, частицы льда и др.). При работе авиадвигателя на земле воздушный винт создает перед собой разрежение, что стимулирует увеличение скоростного потока, содержащего твердые частицы, которые, ударяясь о лопасть, повреждают лакокрасочное покрытие и вызывают хрупкое разрушение. Многократные удары твердых частиц способствуют полидеформационному разрушению поверхностного слоя алюминиевого сплава. На поверхности видны сколы, вырывы (рис. 1). Степень повреждения лопастей воздушного винта зависит от условий эксплуатации (наличия твердых частиц, влажности, температуры и др.).



Рис. 1. Лопасть воздушного винта авиадвигателя АИ-24 с поврежденной поверхностью

Газоабразивному виду изнашивания подвергаются также рабочие и направляющие лопатки компрессора, изготовленные из

алюминиевого сплава. Твердость частиц, мелких камней, песка и пыли значительно выше твердости алюминиевого сплава, из которого изготавливаются лопатки. Осуществляя царапающее воздействие на более мягкий алюминиевый сплав и срезая острыми углами частички сплава, лопатка утоньшается по задней кромке. При дальнейшей эксплуатации таких лопаток в результате многократных ударов твердых частиц происходит отделение мелких кусочков алюминиевого сплава, что приводит к уменьшению размера лопатки по хорде. Интенсивность изнашивания лопаток в пределах одного диска не изменяется, в то же время лопатки компрессора последних ступеней изнашиваются более интенсивно, чем первых.

На рис. 2 представлена комель лопасти воздушного винта АВ-68ДМ, которая повреждена в результате фреттинг-коррозии. Она изготовлена из алюминиевого сплава В95.



Рис. 2. Комель лопасти воздушного винта с поврежденной рабочей поверхностью

В процессе эксплуатации и работы авиадвигателя возникает вибрация, которая стимулирует развитие процессов фреттинг-коррозии в местах контактируемых поверхностей. При этом активизируются коррозионные процессы на поверхности алюминиевого сплава, что приводит к образованию оксидов алюминия, имеющего большое сродство к кислороду. Оксид алюминия по твердости значительно превышает алюминиевый сплав и, как результат, в процессе относительного перемещения контактируемых поверхностей царапает их, стимулируя процессы изнашивания.

Развитие процессов фреттинг-коррозии сопровождается зарождением микротрещин в середине полос скольжения, и, в случае дальнейшего деформирования, обусловленного повторным нагружением, эти микротрещины сливаются и образуют трещины большой длины, которые можно увидеть невооруженным глазом. Аналогичные явления наблюдаются в [1] при исследовании деталей узлов трения АТ, изготовленных из легированных сталей. Следует отметить, что даже незначительное повреждение фреттинг-коррозией приводит к снижению циклической прочности и более интенсивному усталостному разрушению.

На рис. 3, *а* изображен сектор блока цилиндров КТ-192А, тормозной системы самолетов АН-32, АН -72, АН-74. Материал блока – магниевый сплав МЛ-10, рабочей средой его является масло АМГ-10 с давлением  $85 (\pm 5)$  кгс/см<sup>2</sup>. Дефектация данной детали показала, что причиной утраты работоспособности блока является фреттинг-коррозия внутренней кольцевой поверхности посадки его на сопряженную деталь (рис. 3, *а*). При рассмотрении мест контакта с увеличением (рис. 3, *б*) видны следы фреттинг-коррозии – многочисленные раковины и глубокие каверны, что сопровождается общим увеличением диаметра в месте контакта по сравнению с исходным. Такой износ приводит к ослаблению посадки блока на сопряженную деталь и, как результат, к передаче нагрузок на несилловые крепежные элементы. Это приводит к возникновению усталостных трещин и разрушению детали (рис. 3, *в*).

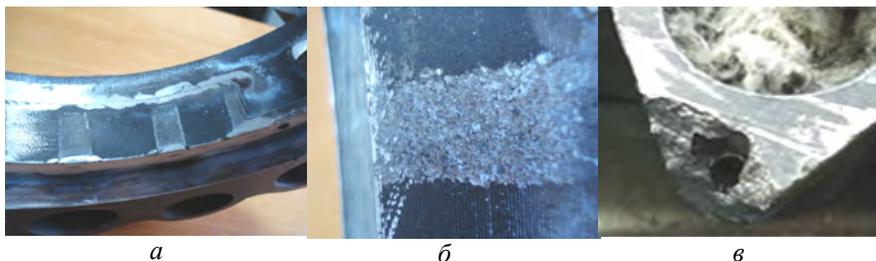


Рис. 3. Поврежденные фрагменты блока цилиндров

На рис. 4, *а* изображен диск втулки обтекателя воздушного винта из магниевого сплава. Данная деталь имеет ярко выраженные дефекты в виде усталостных трещин околотовулочной части корпуса (рис. 4, *б*).

Анализ условий работы детали показывает, что она подвержена значительным вибрациям от воздушного потока, а также от двигателя и воздушного винта. Магниевые сплавы, как правило, имеют хорошие демпфирующие свойства, поэтому возникновение трещин можно связать с отклонением условий работы детали от расчетных. Втулка, изображенная на рис. 4, б, впрессована в корпус и работает в паре с болтом. Логично предположить, что сопряжения болт – втулка, а также втулка–корпус подвергаются фреттинг-коррозии, в результате которого ослабевают натяг в местах посадки и возникают усталостные трещины. Под дальнейшим воздействием вибраций трещины увеличиваются и в наиболее тонких местах, которые являются своего рода концентраторами напряжений, превращаются в сквозные. Восстановление такого рода дефектов на сегодняшний день не производится и деталь снимают с эксплуатации.



Рис. 4. Диск обтекателя воздушного винта

Развитие процессов фреттинг-коррозии наблюдалось на рабочих поверхностях рейки механизации крыла, изготовленной из титанового сплава ВТ22, кронштейна крепления руля управления, изготовленного из магниевого сплава МЛ-5 в местах его крепления, а также в местах контакта кожуха и жаровой трубы, изготовленной из титанового сплава (рис. 5).



Рис. 5. Жаровая труба со следами износа

Многие детали АТ, изготовленные из легких сплавов, подвергаются изнашиванию от смешанных процессов. Так, например, деталь, работающая на трение скольжения без смазки, может претерпевать и фреттинг-износ. На рис. 6 изображена часть корпуса замка створки основной ноги шасси самолета АН-24, изготовленная из магниевого сплава МЛ-5. Во время открытия и закрытия створки шасси по корпусу замка скользит язычок. Как видно из рис. 6, поверхность скольжения гладкая и ровная, что свидетельствует о нормальном режиме изнашивания. В закрытом положении язычок замка под воздействием вибраций изнашивает поверхность, на которой лежит большую часть времени. Постоянно действующая вибрация и прижимающее усилие между корпусом и язычком замка приводят к развитию фреттинг-коррозии. Как результат, на рабочей поверхности возникает углубление, что может вызвать заедание в работе замка и невозможность открытия створки шасси. Износ поверхности скольжения вызывает ослабление прижатия створки, в результате чего возникают сильные вибрации, что интенсифицирует процессы фреттинг-коррозии и может привести к серьезным поломкам.



Рис. 6. Рабочая поверхность корпуса замка створки шасси самолета Ан-24

Для поверхностного упрочнения и восстановления изношенных деталей в настоящее время на авиаремонтных предприятиях применение находят такие технологические методы, как поверхностное пластическое деформирование, химико-термическая обработка (ХТО), электроискровое легирование (ЭИЛ), различные технологии напыления и многие другие.

Приоритетным направлением в технологических процессах

поверхностного упрочнения и восстановления деталей узлов трения современных технических устройств являются комплексные методы, которые предполагают как последовательное, так и одновременное использование двух и более методов. Представителями таких технологий необходимо считать: газотермическое напыление с дальнейшей лазерной обработкой; поверхностную механотермическую обработку; электромагнитную наплавку с одновременным поверхностно-пластическим деформированием и др. [8].

Одним из наиболее распространенных методов поверхностного упрочнения, которые используются в авиационных технологиях, является поверхностное пластическое деформирование. Перспективность этого метода заключается в использовании его в сочетании с другими технологическими методами.

Из покрытий широкое распространение при ремонте АТ находят гальванические и электролитические. К ним относятся: хромирование, цинкование, никелирование, кадмирование, фосфатирование, латунирование, никель-фосфорное покрытие и др.

Каждый вид нанесения покрытий имеет свое назначение. Так, например, никель-фосфорное покрытие наносят с целью повышения износостойкости трущихся поверхностей деталей, работающих в условиях трения без смазки, а также защиты от газовой коррозии деталей, эксплуатируемых при температуре 700–800 °С.

Дальнейшему развитию этих методов способствует активизация научных исследований в новом научном направлении – композиционные электролитические покрытия (КЭП). Эти покрытия получают из суспензий, представляющих собой электролиты, в которые добавляют определенное количество высокодисперсных порошков. В качестве катода используют упрочняемую деталь. Во время прохождения через электролит электрического тока на детали осаждается металл (первая фаза или матрица) и частицы порошка (вторая фаза) [9].

Для нанесения КЭП на алюминиевые и магниевые сплавы их рабочие поверхности предварительно покрывают электропроводящим полимерным слоем.

Основным методом химико-термической обработки деталей АТ, работающих в условиях трения, является азотирование. Этот метод конкурирует с вакуумно-плазменным нанесением покрытий, который имеет ряд преимуществ по сравнению с ХТО [10].

При выборе метода поверхностного упрочнения деталей АТ необходимо учитывать следующее: наукоемкость технологического обеспечения поверхностного упрочнения; ресурсозатраты на технологическое обеспечение нанесения упрочняющих защитных покрытий; обеспечение роста прибыли при увеличении инвестиций в данное направление.

Этим требованиям отвечает технология электроискрового легирования, которая обладает технологической простотой, обеспечивает многократное повышение износостойкости деталей машин в различных условиях изнашивания, использует широкую номенклатуру материалов покрытия. Эффективность этого метода повышается при использовании композиционных оксидных электродов вместо дорогостоящих вольфрамсодержащих твердых сплавов [11]. В сравнении с традиционной ХТО метод ЭИЛ имеет энергозатраты на три порядка меньше при стоимости оборудования меньшей, чем ХТО, на один порядок [12].

Из газотермических методов нанесения покрытий применение находят плазменное, детонационное и газопламенное напыление. Так, например, плазменное напыление осуществляется на установке УПУ-8М, а детонационное – на установке ДЕКОМ. Плазменным напылением восстанавливают направляющие и сопловые аппараты двигателя ДЗ6 и другие детали. Восстановление деталей методом плазменного напыления осуществляется путем занижения размера ремонтируемого участка на толщину рабочего слоя покрытия с последующим нанесением слоя с припуском на механическую обработку.

Одним из перспективных методов поверхностного упрочнения и восстановления деталей является лазерная обработка. Особый научный и практический интерес представляют процессы лазерной обработки покрытий, полученных другими методами. Исследования в этом направлении проводятся на ГП 3-д 410 ГА совместно с ИПМ НАНУ.

Широкое внедрение технологических методов поверхностного упрочнения и восстановления деталей из легких сплавов будет способствовать решению важнейших народнохозяйственных задач, связанных с экономией энергии, снижением материалоемкости изделий, повышению производительности труда, улучшению экологии.

## Список литературы

1. *Кудрін А.П.* Особливості руйнування деталей вузлів тертя авіаційної техніки в процесі її експлуатації / А.П. Кудрін, В.В. Жигинас // Проблеми тертя та зношування: Наук. техн. зб.–К.: НАУ, 2006. – Вип. 45.– С. 63–71.
2. *Молодцов Н.С.* Восстановление изношенных деталей судовых механизмов. –М.: Транспорт, 1986. – 182 с.
3. *Крылов К.А.* Долговечность узлов трения самолетов / К.А. Крылов, М.Е. Хаймзон. –М.: Транспорт, 1976. –184 с.
4. *Аксенов А.Ф.* Износостойкость авиационных топливно-гидравлических агрегатов / А.Ф. Аксенов, В.Н. Лозовский. –М.: Транспорт, 1986. –240 с.
5. *Голего Н.Л.* Схватывание в машинах и методы его устранения. – К.: Техніка, 1971. – 240 с.
6. *Цытак В.И.* Анализ эксплуатационных повреждений зубчатых соединений приводных валов-рессор и рекомендации по повышению их долговечности // Вісн. Двигунобуд. – 2004. – № 4. – С. 61–65.
7. *Богуслаев В.А.* Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД / В.А. Богуслаев, В.К. Яценко, В.Ф. Притченко.– К.: Манускрипт, 1993. – 329 с.
8. *Лабунец В.Ф.* Износостойкие боридные покрытия / В.Ф. Лабунец, Л.Г. Ворошнин, М.В. Киндрачук. –К.: Техніка, 1989. –158 с.
9. *Лабунец В.Ф.* Тенденції створення захисних структур триботехнічного призначення // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. –К.: НАУ, 2006. – Вип. 45. – С. 107–118.
10. *Мирненко В.І.* Вакуум-плазмовий метод нанесення багатофункціональних покриттів на лопатки компресора силових установок літальних апаратів // Зб. наук. пр. «Труды академии».– К.: НАОУ. – 2004. – № 50. – С. 276–282.
11. *Юречко Д.В.* Інженерія зносостійкої поверхні сплавів алюмінію при їх електроіскровому легуванні матеріалами на основі системи  $AlN-Ti(Zr)B_2$  та  $LaB_6-ZrB_2$ : Автореф... канд. дис. – К.: ІПМ НАНУ, 2006. – 20 с.
12. *Соловых Е.К.* Модернизация машиностроения Украины по технологиям поверхностного упрочнения / Е.К. Соловых, Б.А. Ляшенко, А.Д. Соколов // Вісник інженерної академії України. –К., 2007. –Вип. 2. – С. 112–118.

Стаття надійшла до редакції 31.03.09.