

## Ремонт элементов авиационных двигателей

Макин Ю.Н., доктор технических наук, профессор

**Износ при трении** - процесс разрушения поверхностных слоев изделий при трении, приводящий к изменению размеров, формы и состояния сопряженных поверхностей конструкции. На процесс изнашивания влияют величина и характер нагрузки, состояние поверхности, скорости относительного перемещения и другие воздействия. Наиболее характерными являются: абразивный, гидрогазоабразивный, окислительный, эрозионный, усталостный износы и износ при фреттинг коррозии.

Период износа ремфонда характеризуется сравнительным постоянством условий трения, что определяет постепенное накопление износа с постоянной скоростью. Но накопление износа меняет условия трения, могут возникнуть ударные нагрузки, ухудшиться условия смазки. Это приводит к резко прогрессирующему увеличению скорости износа, которая ускоряет наступление критического износа сопровождающегося разрушением поверхностей.

**Усталость материала** - процесс постепенного накопления повреждений в материале конструкции под воздействием переменных во времени напряжений. При усталости протекают необратимые изменения свойств материала, которые приводят к зарождению, развитию трещин и разрушению. Она бывает малоцикловой, когда разрушение наступает при числе циклов  $10^2 \dots 10^5$ , если больше - многоцикловая (вибрационная) усталость.

**Малоцикловая усталость** - сопровождается значительными упруго-пластическими деформациями.

**Вибрационная** - разрушение происходит без заметных следов пластической деформации.

**Большинство конструктивных элементов АД:** лопатки, диски, валы и другие работают в условиях циклического нагружения и опасные разрушения в основном связаны с усталостью, в том числе и малоцикловой. Концентраторы напряжений (риски, отверстия, галтели, радиусы закругления и другие) снижают усталостную прочность. Коррозия, фреттинг-коррозия - снижают сопротивление усталости, поскольку сопровождаются появлением и развитием коррозионных микротрещин - дополнительных концентраторов напряжений.

**Состояние поверхности** деталей АД - является важным фактором способным увеличить сопротивление усталости: уменьшение шероховатости поверхности и повышение механических свойств вследствие создания в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия существенно повышают предел выносливости.

**Термическая усталость** - появление трещин и разрушение конструкции при действии циклических термических напряжений. Общей причиной появления термических напряжений являются препятствия термическому расширению или сжатию конструкции при изменении температуры, неравномерный нагрев деталей приводит к термическим напряжениям вследствие градиента температуры по сечению, свободному расширению более нагретых участков будут препятствовать менее нагретые.

Циклические термические напряжения возникают в конструкциях, подвергающихся в процессе эксплуатации воздействию многократно повторяющихся нагревов и охлаждений.

**Термостойкость** - способность материала сопротивляться воздействию многократно повторяющихся термических циклов. Лопатки турбин, жаровые трубы камер сгорания прогреваются с высокими скоростями, например, для лопаток до  $90^\circ\text{C}/\text{сек}$ , вследствие чего, на выходной и входной кромках, которые нагреваются и охлаждаются с наибольшей скоростью,

возникаю трещины. Термическая усталость является основной причиной короблений и трещин жаровых труб камер сгорания.

**Физической природой** термической усталости является повреждение материала вследствие протекания процессов упрочнения и разупрочнения, которые могут усиливаться, например, коррозией, газовой эрозией и другими повреждениями.

**Ползучесть** - изменение во времени размеров нагруженных при высокой температуре конструкций. Это повреждение "парируется" таким свойством конструкционного материала как **длительная прочность**. Ползучему разрушению подвержены диски и лопатки турбин. Ползучесть дисков, вытяжка и уменьшение закрутки лопаток приводили к тому, что «выбирались» зазоры между статорной и роторной частями ГТД. "Чирканье" титановых лопаток по корпусу приводило к титановым пожарам, элементы конструкции повреждались и разрушались. Уменьшение натягов в соединениях приводило к увеличению вибраций конструкции.

**Деформация** - изменение формы или размеров деталей в связи с возникновением остаточных напряжений и деформаций, структурных и объемных изменений из-за воздействия силовых и тепловых нагрузок. Это может привести к появлению остаточной деформации - «короблению», вытяжке, наклепу, смятию жаровых труб камер сгорания, конуса соплового аппарата, вытяжке лопаток, усадке корпуса турбины.

**Механические повреждения**, например, обрыв лопатки, попадание посторонних предметов в газоздушный тракт, приводят к лавинообразным разрушениям.

**Эрозия** - процесс поверхностного разрушения конструкционного материала под воздействием внешней среды: при газодинамическом воздействии твердых (**абразивная**), жидких (**кавитационная**), газообразных (**газовая**) частиц или при электрических разрядах (**электрическая**).

Вследствие ударов микролитов о поверхностный слой конструкции происходит его разрушение. Характер разрушения поверхности разнообразен: продольные бороздки различной формы и размеров ориентированные, как правило, в направлении потока; очаги округлой формы, если поток движется перпендикулярно к поверхности.

Эрозии подвержены: рабочие и сопловые лопатки газовых турбин; жаровые трубы камер сгорания; силовые стойки и детали газосборников; элементы форсажных камер и сопловых устройств; системы реверса тяги и шумоглушения ГТД. Для поршневых АД характерной является газовая эрозия выхлопных патрубков, клапанов газораспределения и их седел. Эрозионное разрушение составляет существенную часть износа поршневых колец, поршня и зеркала цилиндра.

Кавитационной эрозии подвержены детали топливных, гидравлических и масляных насосов, запорные устройства в трубопроводах и другие.

Абразивно-эрозионное изнашивание характерно для гильз цилиндров, узлов нагнетателей и карбюраторов поршневых АД, а также для деталей воздухозаборников и компрессоров вертолетных ГТД.

**Коррозия** - разрушение металлов и сплавов вследствие химического или электрохимического воздействия на них внешней среды. О ней мы уже говорили.

**Ремонт всегда является следствием выявленных дефектов**, поэтому ремонт ГТД направлен на устранение указанных выше повреждений конструкции.

**Лопатки.**

**Очистка. Анодное травление** лопаток из литейных сплавов в щелочных ваннах с удалением размягчающегося нагара может струёй воды, волосяной щеткой, кистью. С

помощью электрохимической обработки удаляется нагар с лопаток, изготовленных из деформируемых сплавов. **Виброшлифовка и виброполировка** в течение 1,5—2,0 час.; в состав шихты входят: моющие растворы, шлифовальные камни, стальные, фарфоровые и стеклянные шарики.

#### **Восстановление.**

**Роторные и статорные лопатки компрессора, лопатки турбины и соплового аппарата:** механические повреждения, износ, наклеп, коррозия, эрозия устраняются зачисткой, шлифовкой и полировкой; удлинение и вытяжка - шлифовкой торцов, деформации и погнутости - правкой; при наличии трещин, сколов, порыва лопаток или значительных величин указанных выше неисправностей и дефектов целесообразно производить предварительную зачистку, запилровку повреждений, а затем механическую и термическую обработку для соблюдения необходимой прочности и структуры материала. Необходимо восстановить антикоррозионное покрытие (анодирование, цинкование). Лопатки с трещинами и другими значительными неисправностями вырезаются и заменяются на новые. Мелкие дефекты устраняются зачисткой. Лопатки, имеющие качку более допустимой, восстанавливаются хромированием, нанайкой латуной или меднением с последующим никелированием. Так же восстанавливаются хромированием замка лопаток.

#### **Основные технологические процессы при ремонте лопаток:**

**Зачистка** забоин, царапин, рисок, следов износа, коррозии на лопатках шаберами, абразивными брусками, камнями, кругами и мягкой шлифовальной шкуркой.

**Виброконтактное полирование** - является разновидностью механического полирования и производится на станках: лопатке придается вибрация между двумя абразивными лентами.

**Абразивно-жидкостное полирование** применяется для удаления нагара перед люминесцентным контролем. Этот вид полирования исключает появление микротрещин и прижогов материала, как это имеет место при механическом полировании, так как процесс идет в охлаждаемой среде. Кроме этого, матовая поверхность лопаток после такой полировки облегчает их дефектацию. Недостатками этого способа являются неравномерность снятия металла, возникновение остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое лопатки.

**Виброабразивное полирование** - это одновременный механический и химико-механический процессы сглаживания микронеровностей и снятия мелких частиц металла с лопатки частицами рабочей абразивной среды, совершающими колебательные движения.

**Электролитическое полирование** лопаток основано на использовании растворения поверхностных слоев анода в процессе электролиза. При этом на поверхности лопатки образуется пленка солей, защищающая микровпадины от действия тока, но не препятствующая растворению выступов.

**Электрохимическим шлифованием** можно производить локальную обработку поверхности лопаток.

**Восстановление утраченного конструкционного материала производится:** детонационным и другими видами напыления, наплавки, сварки, пайки.

**Деформационное упрочнение и поверхностно-пластическое деформирование** производится для повышения усталостной прочности и выносливости после операций восстановления; осуществляется с помощью пневмо и гидродинамической обдувки дробью, стеклянными шариками виброгалтовки, обкатки роликами или сочетанием этих методов.

**Для лопаток турбины необходимы также:** замена дефлекторов охлаждаемых лопаток; снятие разупрочненного слоя в местах, где чаще всего образуются трещины; проверка рабочих лопаток на частоту собственных колебаний и при необходимости проведение соответствующей

доработки; восстановление на пере термодиффузионных покрытий; восстановление или замена жаростойких эмалей; отжиг лопаток для снятия остаточных напряжений; поверхностное упрочнение елочных пазов хвостовиков рабочих лопаток; тщательный заключительный контроль технического состояния лопаток.

Предотвращение газовой коррозии профильных частей рабочих лопаток эффективно обеспечивается диффузионными покрытиями: цирконийалитированием и вольфрамоалитированием. Эти комплексные покрытия являются более эффективными по сравнению с алитированными.

**Восстановление размеров бандажных полок рабочих лопаток** производится наплавкой с последующей механической обработкой и термообработкой. Это будет в лабораторной работе.

**Восстановление торца пера рабочих лопаток**, имеющих износ из-за касания об уплотнительный материал, производится наплавкой аргонодуговой сваркой с последующей механической обработкой до допустимых размеров.

**Упрочнение хвостовиков рабочих лопаток** в местах перехода пазов к торцам производится обработкой дробью на специальных установках.

**Нанесение стеклокристаллических покрытий для защиты от окислительного износа** производится силикатными эмалями.

**Электроискровое легирование при ремонте рабочих и сопловых лопаток** производится для увеличения износостойкости контактных поверхностей, для восстановления изношенных мест.

**Восстановление лопаток соплового аппарата и турбин высокотемпературной пайкой в вакууме** производится при наличии трещин на уплотнительных гребешках бандажных полок, окислительного износа поверхностного профиля.

**Защита лопаток от окисления достигается химикотермической обработкой:**— алитированием, эмалированием, и хромоалитированием.

#### **Ремонт компрессора.**

На деталях устраняются поверхностные дефекты, восстанавливаются размеры, форма и взаимное расположение поверхностей. Зачищаются налет коррозии, риски, задиры, приподнятости материала у забоин, фреттинг-коррозия. Зачищенные места полируются и подвергаются антикоррозионной обработке, форма тонкостенных деталей (рабочих колец, полуколец направляющих аппаратов) восстанавливается рихтовкой (правкой). Форма и размеры центрирующих и посадочных поверхностей дисков, валов, допустимые биения торцовых опорных поверхностей обеспечиваются механической обработкой и покрытиями (чаще всего шлифованием и хромированием). Диски, барабаны, валы балансируются. Изношенные отверстия навариваются, в них нарезается новая резьба.

**В процессе капитального ремонта производятся доработки конструкции улучшающие эксплуатационную надежность изделия**, например, нанесение покрытий на основе молибдена или серебра на замки лопаток, предотвращающих надир; для предупреждения и устранения наклепа и износа - наплавка торцов направляющих аппаратов. Восстанавливаются уплотнительные покрытия.

#### **Ремонт турбины**

Устраняются поверхностные дефекты, восстанавливаются посадочные и базовые поверхности и лабиринты. Объемные дефекты служат признаком отбраковки. При обнаружении перегрева лопаток диск проверяется по ободу на твердость и, если твердость низка, бракуется. Риски, забоины в отдельных местах диска и на лабиринтах зачищаются.

При ремонте турбины в принципе используются все процессы, что и при ремонте компрессора. Особенностью является проверка площади проходного сечения соплового аппарата проливкой водой или продувкой воздухом. В случае несоответствия производится доработка или замена лопаток.

#### **Ремонт камер сгорания и выхлопных устройств**

В первую очередь, это восстановление формы, устранение трещин и прогаров. Технологической особенностью является преобладание узловой обработки, что обусловлено большим количеством неразъемных неподвижных соединений в узлах камер сгорания и выхлопных устройств. При восстановлении таких соединений широко используется сварка.

Корпуса в процессе узловой обработки подвергаются проверке на герметичность по сварным швам, испытаниям, контролю и восстановлению размеров и формы рабочих и посадочных поверхностей, устранению поверхностных дефектов и трещин. Герметичность сварных швов определяется методом проникающих жидкостей. Если трещины не обнаруживаются, шов считается герметичным. В противном случае шов подваривается и проверка повторяется. Некоторые корпуса после проверки швов на герметичность проходят пневмо- или гидроиспытания. Выявленные искажения формы и размеров устраняются слесарными методами, механической обработкой, покрытиями. При повреждении эмалевого покрытия жаровые трубы переэмалируются.

#### **Ремонт редукторов, приводов агрегатов и коробок приводов**

Ремонт содержит операции по устранению поверхностных дефектов, замене обойм под подшипники; промывке и прокачке внутренних каналов корпусов маслом и контролю. При наличии трещин корпус может быть восстановлен сваркой. Зубчатые колеса - восстанавливаются посадочные поверхности и рабочие поверхности зубьев. Поверхностные дефекты (точечное выкрашивание, налет коррозии, риски, забоины, следы схватывания и другие), не превышающие размеров, установленных эталонами, зачищаются и заполировываются.

Посадочные поверхности восстанавливаются хромированием. Дефекты на шлицах (выработка, небольшие раковины и язвы) допустимых размеров устраняются зачисткой. Для предотвращения схватывания производится меднение шлицев.

#### **Ремонт агрегатов**

Особенностями ремонта являются: малые износы деталей и соответствующие малые допуски зазоров (это заставляет применять точные измерительные средства); индивидуальный подбор ответственных деталей — плунжерных и золотниковых пар (что резко повышает объем доводочных работ); испытания узлов и агрегатов с индивидуальной настройкой и регулировкой по большому числу рабочих параметров (это требует разнообразного испытательного оборудования); многообразие конструкций агрегатов (это приводит к необходимости типизации технологических процессов, требует высокой квалификации персонала).

**Сборка** - узловая, общая горизонтальная и вертикальная на стапелях, обвязка.

**Испытания** - мотороиспытательные станции, стендовые испытания, автоматизация испытаний (в том числе по вибрациям), возможность послеремонтных испытаний в эксплуатации.