

УДК 629.7.015.4

А.Н. ПЕТУХОВ

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», Москва, Россия

ПРОБЛЕМЫ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ В СОВРЕМЕННЫХ ГТД

Рассмотрены особенности конструкционных материалов, применяемых в современных газотурбинных двигателях, и требования, предъявляемые к деталям, изготовленным из этих материалов; необходимость учёта проблемы при выборе конструкционных материалов, особенностей технологии изготовления деталей и роли эксплуатационных факторов (повреждений от окружающей среды фреттинг-коррозией и др.), отрицательно влияющих на сопротивление многоциклового усталости, а также требования, предъявляемые к методам определения и прогнозирования пределов выносливости для конструкционных материалов на стандартных образцах и высоконагруженных деталей ГТД из них.

Ключевые слова: *предел выносливости, долговечность, многоцикловая усталость (МнЦУ), фреттинг, фреттинг-усталость, допустимые дефекты, напряжённо деформированное состояние (НДС).*

Введение

В работах [1, 2, 5 и др.] показано, что до 60% дефектов, возникающих при доводке и в эксплуатации ГТД, связаны с усталостными разрушениями. По признанию специалистов ВВС США ~ 25% потерь современных однодвигательных самолётов вызвано разрушениями деталей двигателей из-за повышенного уровня вибрационных напряжений. Внедрение мероприятий по устранению недостатков (инсекций, изменения конструкций или модификаций, уточнение режимов эксплуатации и др.) стоили сотни миллионов долларов и миллионы часов, затраченных на устранение дефектов. Разрушения наблюдались и при наработке парком двигателей миллионов часов в полёте при выполнении новых полётных заданий с увеличенной длительностью наработки деталей на режимах, которые до того были проходными.

Методы испытаний материалов для получения достоверных характеристик МнЦУ

К конструкционным материалам предъявляется комплекс требований, позволяющих обеспечить в условиях эксплуатации высокие характеристики длительной прочности, ползучести, малоциклового (МЦУ) и многоциклового усталости (МнЦУ), трещиностойкости (минимальные скорости роста трещины), сопротивление коррозионному растрескиванию и др. с целью реализации для основных деталей и двигателю в целом высокой надёжности в течение проектного ресурса в условиях эксплуатации. При

проектировании деталей свойства конструкционных материалов должны основываться на статистически обоснованных характеристиках прочности.

В процессе термопластической деформации заготовки деталей сложной формы, разные её зоны существенно различаются по степени деформации материала при штамповке особенно у диска. При механической обработке деталь подвергается различным силовым воздействиям, формирующим неоднородный по свойствам поверхностный слой детали, что, в конечном счёте, отражается на эксплуатационных свойствах и на МнЦУ. Поэтому проверку реализуемых в материале детали свойств следует проводить для этих зон, особенно для критических, как с точки зрения действующих эксплуатационных нагрузок, так с учётом последствий воздействия на деталь операций повышенного риска [2].

Для испытаний на МнЦУ следует применять модельные образцы (элементы конструкции), изготовленные по серийной технологии [2, 3, 5], либо вырезанные из детали образцы с сохранением её поверхностного слоя, критических зон: концентраторов напряжений (отверстий, радиусов перехода, пазов для крепления лопаток и др.). Испытания на проводят в условиях, приближенных к эксплуатации по температуре, НДС и др. [2, 5]. Виды нагружения при испытаниях должны определяться на базе вероятностного анализа статических, циклических и динамических нагрузок, действующих на деталь, для вероятности разрушения с учётом этих силовых факторов ниже 1×10^{-7} на час полета и условия, что требования к безопасности на уровне системы полностью удовлетворяются. Полученные характеристики МнЦУ для материала по результатам испытаний стандартных образцов и элементов деталей за-

тем подтверждается стендовыми испытаниями деталей и узлов в составе двигателя. На основе оценки сходимости полученных данных выполняют перенос результатов лабораторных испытаний стандартных образцов на деталь со статистической оценкой достоверности и уровня значимости допустимых значений для конкретного материала с учётом наиболее неблагоприятных комбинации уровней вибрационных и статических напряжений (влияния асимметрии цикла нагружения, частоты и числа циклов нагружения, температуры и др.). При испытаниях должны воспроизводиться повреждения, присущие материалу в исходном состоянии при наличии [2, 5]:

- типичных допустимых дефектов, связанные с процессами получения полуфабрикатов и деталей;

- дефектов, возникающих в процессе эксплуатации раздельно или совместно от МнЦУ и МЦУ, фреттинга, фреттинг-усталости, повреждений посторонними предметами (ППП) и др.;

- коррозии или других факторов, вызванных окружающими условиями, приводящих к снижению характеристик МнЦУ, МЦУ, термического и термомеханического нагружения, статической и циклической ползучести, изменения условий работы двигателя и т.п.).

Методы оценки повреждений, допустимых в эксплуатации

Степень повреждения материала, которую следует учитывать в процессе проектирования, включает, анализ результатов расчетов для всех критических условий (с учётом накопленного опыта проектирования и эксплуатации), которые могут ограничивать долговечность материала детали или привести к условиям, требующим введения периодического контроля или замены детали («на крыле» или при ремонте) через установленные интервалы. Повреждения, накопленные в детали за промежуток между сроками проведения контроля или периодического регламентного обслуживания, должны рассматриваться с точки зрения их влияния на степень снижения МнЦУ материала детали. Допустимые переменные напряжения должны по критерию МнЦУ обеспечить надёжную эксплуатацию детали с повреждением, которое не достигло критической величины за принятый промежуток между контролем.

Кроме того, при проектировании и нормировании допустимых повреждений для детали необходим анализ наиболее вероятных комбинаций, которые в течение ресурса могут привести к разрушению детали от МнЦУ (ППП, фреттинга, коррозии и т.п.). Для этого требуется база результатов испытаний материалов, деталей и опыт эксплуатации подобных конструкций с повреждениями. Заключение

о возможности безопасной эксплуатации конструкции базируется на испытаниях образцов, вырезанных из детали, изготовленной по технологии серийного производства, опыта эксплуатации деталей, близких размеров, технологии изготовления и условий нагружения. Допустимые значения изменения свойств материала детали должны учитывать возможные комбинации амплитуды средних и переменных напряжений или эквивалентные значения напряжений для условий сложного (многоосного) напряженного состояния. Для этого необходимо располагать диаграммами предельных амплитуд напряжений, построенным по результатам испытаний образцов из конкретного материала (с заданной технологией изготовления) при различных асимметриях цикла нагружения, соответствующими концентраторами напряжений и температурой. В процессе испытаний целесообразно регистрировать накопление деформаций деталей с целью установлении допустимых значений в эксплуатации. Это особенно важно для титановых сплавов, ползучесть которых проявляется даже при нормальной температуре.

Фреттинг-усталость

Процесс фреттинга и фреттинг-усталость возникают в деталях, находящихся в постоянном контакте (прессовые посадки подшипника или втулки на вал; замковые соединения лопаток; болтовые, заклёпочные и фланцевые соединения и др.) при воздействии вибрационных напряжений, или, если детали периодически вступают в контакт (подшипники, шарнирные соединения, регуляторы, клапаны и клеммы и т.п.) [2, 4]. Одним из внешних признаков фреттинга является скопление у границы контакта деталей продуктов повреждения в виде окислов материалов. Эти окислы по составу и цвету отличаются от тех, которые образуются при окислении материалов в обычных условиях. Например, окислы алюминия белого цвета, а при фреттинге – чёрного. Такие отличия характерны для окислов и гидратов железа, титана и др. Объём образовавшихся окислов часто превышает объём повреждённого металла и при наличии препятствий для выхода продуктов повреждения из зоны контакта, скопление окислов может сопровождаться многократным ростом местного давления, способствующим локальному изменению структуры и свойств материала. При свободном выходе продуктов повреждения натяг между сопряжёнными деталями уменьшается, что может приводить изменению вибрационных напряжений. Мехсвойства окислов также значительно отличаются от основного материала. Так твёрдость окислов Al выше закалённых или азотированных сталей, и приближаясь к твёрдости алма-

за. Поэтому окислы могут значительно влиять на механизм фреттинга и характер повреждений поверхностей контакта [2, 4].

Известно, что фреттинг возникает и при контакте металлических поверхностей с неметаллическими, а также в армированных металлом композитных материалах. Тяжелыми последствиями являются усталостные разрушения прессовых и малоподвижных соединений, вызванные повреждением материала детали фреттингом. Предел выносливости у замковых соединений лопаток компрессоров ГТД из-за фреттинга снижается в 3...5 раз, являясь основной причиной их разрушений в эксплуатации [2, 4].

Для повреждений контактирующих поверхностей часто употребляют понятие «фреттинг-усталости», но строгое определение фреттинг-усталости ограничивается амплитудами относительных перемещений $10 < A_{отн} < 100$ мкм. Поэтому повреждения, полученные при $A_{отн} \geq 100$ мкм, называемые «фреттинг-усталостью», это следствие фреттинг-износа. Собирательное название «фреттинг» скорее объясняет желание сохранить преемственность с ранними изданиями ENSIP стандартов США, где термин «фреттинга» (или при его переводе) применяют для всех видов повреждений контакта, что может исказить реальные причины дефектов и к ошибкам при выборе методов их устранения. При расчёте малоподвижных или прессовых соединений, а также замковых соединения типа ласточкин хвост, нередко акцентируют внимание на контактных напряжениях, определяемых МКЭ, не позволяющим точно вычислить такие напряжения. Причиной разрушения соединений является фреттинг-усталость. Об этом свидетельствуют [2, 4]: эпюры переменных напряжений на контактной грани, получаемые при тензометрировании хвостовиков; повреждения фреттингом и положение сечений, где группируются разрушения.

Предел фреттинг-выносливости соединения, в первую очередь, зависит [2, 4], от конструкции сопряжения выступа диска с хвостовиком лопатки (вал-втулка), а напряжённость хвостовика и поверхности контакта определяется углом наклона контактной грани. Именно эти факторы оказывают основное влияние на предел фреттинг-выносливости замкового соединения. Двукратное повышение давления на площадке контакта по сравнению с перечисленными факторами снижает предел фреттинг-выносливости лишь на 10%. При проектировании малоподвижных соединений необходимо учитывать также химическое сродство контактирующих материалов и анизотропию свойств [4]. Известно, что упрочнение поверхности сопровождается формированием в поверхностном слое сжимающих напряже-

ний, способствующих повышению фреттинг-выносливости. Наибольший эффект достигают применением поверхностного упрочнения и защитных покрытий, устраняющих прямой контакт сопряжённых деталей. При оценке ресурса детали могут учитываться благоприятные воздействия остаточных напряжений от поверхностной обработки. Однако при больших ресурсах и действии повышенных температур остаточные напряжения релаксируют. Поэтому выбранный уровень остаточных напряжений, следует подтвердить, показав, что прогнозируемая скорость релаксации не превысит 1×10^{-7} на час полёта, что важно для высокотемпературных деталей. Так подтверждают и эффективность покрытий хотя бы на один интервал между ремонтами и возможность повторного нанесения их при ремонтах. Формальное применение методов защиты даже для одного класса материалов может дать отрицательный результат. Принимается, что НДС вблизи зоны дефекта при совместном действии статического и вибрационного нагружения должно обеспечивать нераспространение трещины с соотношением размера поверхностной длины к глубине как 10:1. При невыполнении условия, следует определить тип и характер повреждений, приводящие к снижению предела выносливости при действующем на деталь в эксплуатации уровне вибрационных напряжений, а также условия, при которых могут возникать разрушения детали.

Заключение

Определение предела выносливости МЦУ деталей (моделей) должно проводиться при типичном НДС и максимальных переменных напряжениях, которые реализуются в эксплуатации в зоне возникновения дефекта, включая взаимодействие МЦУ и МЦУ. Характер повреждений поверхностей контакта при фреттинге очень разнообразен и неоднороден по признакам повреждения. Он включает каверны, участки схватывания материала, износа, макро- и микротрещины, которые часто покрыты плотным слоем окислов и продуктами повреждения. Поэтому выявление опасных признаков повреждения фреттингом требует разработки методологии, основанной на выявлении ведущего механизма разрушения поверхности контакта, подтверждённого экспериментально и в эксплуатации.

Литература

1. Кузнецов Н.Д. Надёжность машин / Н.Д. Кузнецов // *Научные основы прогрессивной техники и технологии: сб. ст.* – М.: Машиностроение, 1986. – С. 87-97.

2. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД: монография / А.Н. Петухов. – М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.

3. Петухов А.Н. Многоцикловая усталость материалов и деталей газотурбинных двигателей / А.Н. Петухов // Проблемы прочности. – 2005. – № 3 (375). – С. 5-21.

4. Петухов А.Н. Фреттинг и фреттинг-

усталость высоконагруженных малоподвижных соединений ГТД и ЭУ: монография / А.Н. Петухов. – М.: ЦИАМ, 2008. (ЦИАМ / Тр. 1338). – 210 с.

5. Петухов А.Н. Вопросы многоциклового усталости для материалов и деталей современных ГТД и ЭУ / А.Н. Петухов // Деформация и разрушение материалов. – 2009. – № 10. – С. 30-35.

Поступила в редакцию 01.06.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры Ю.И. Павлов, Московский авиационный технологический институт им. К.Э. Циолковского, Москва, Россия.

ПРОБЛЕМИ БАГАТОЦИКЛОВОЇ ВТОМИ В СУЧАСНИХ ГТД

А.М. Петухов

Розглянуто особливості конструкційних матеріалів, вживаних в сучасних газотурбінних двигунах, і вимоги, що пред'являються до деталей, виготовлених з цих матеріалів; необхідність обліку проблеми при виборі конструкційних матеріалів, особливостей технології виготовлення деталей і ролі експлуатаційних чинників (пошкоджень від навколишнього середовища фреттинг-корозією та ін.), що негативно впливають на опір багаточислової втоми, а також вимоги, що пред'являються до методів визначення і прогнозування меж витривалості для конструкційних матеріалів на стандартних зразках і високонавантажених деталях ГТД з них.

Ключові слова: межа витривалості, довговічність, багаточислова втома, фреттинг, фреттинг-втома, допустимі дефекти, напружено деформований стан.

PROBLEMS OF HIGH-CICLE FATIGUE IN MODERN GTE

A.N. Petukhov

Account problems at stages of a choice of constructional materials of features of manufacturing techniques of details and the operational factors influencing HFC are considered. At stage of development main factors effecting on bearing strength of GTE components subject to high cycle fatigue is considered.

Key words: high-cicle fatigue (HCF), life to failure, fatigue (HCF), fretting, fretting- fatigue, stress deformation state

Петухов Анатолий Николаевич – д-р техн. наук, проф., начальник сектора отделения «Динамика и прочность двигателей» Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», Москва, Россия, e-mail: petukhov.an@mail.ru.