

ПРОБЛЕМЫ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ДЕТАЛЕЙ ГТД

© 2012 А. Н. Петухов

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва

Рассматриваются возможные условия разрушения конструкционных материалов и деталей ГТД при комплексном нагружении, включающем совместное воздействие вибрационных нагрузок от МнЦУ при совместном действии МЦУ, эксплуатационных температур МнЦУ с циклическим изменением асимметрии цикла нагружения. Дается оценка влияния на МнЦУ технологических и конструктивных факторов.

Многоцикловая усталость (МнЦУ), напряжённно-деформированное состояние (НДС), малоцикловая усталость (МЦУ), основные детали, повреждения от попадания посторонних предметов – ППП, фреттинг, фреттинг-коррозия, фреттинг-усталость, технологические и конструктивные факторы.

Введение

Отечественный и зарубежный опыт разработки и эксплуатации авиационных ГТД показывает, что наибольшей трудоёмкости требует прочностная доводка, где значительная доля приходится на решение проблемы многоцикловой усталости (МнЦУ).

В процессе проектирования применяются методики расчётно-экспериментальной оценки МнЦУ основных деталей ГТД в детерминированном и вероятностном аспекте, которая опирается на результаты испытаний на усталость:

- стандартных образцов из конструкционных материалов, применяемых в современных ГТД, исследованных в широком диапазоне температур с учётом влияния асимметрии цикла нагружения, конструктивных и технологических факторов;
- натурных деталей в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным;
- элементов конструкций с сохранением основных концентраторов напряжений и состояние поверхностного слоя натурных деталей, т.е. с учётом реального влияния технологических, конструктивных и эксплуатационных факторов (силовых, температурных, коррозии, фреттинга, повреждений от попадания посторонних предметов – ППП и др.).

Испытания на МнЦУ натурных деталей включают профильные части лопаток компрессоров и турбин, замковые соединения лопаток, дисков и валов с учётом влияния не только конструктивных и технологических факторов, но и эксплуатационных повреждений. При оценке МнЦУ деталей используются статистически достоверные уравнения

кривых усталости, плотности распределения долговечностей N и пределов выносливости σ_{-1} для заданных N_6 , а также определение эквивалентных напряжений.

Требования, предъявляемые к современным конструкционным материалам

К важнейшим требованиям, предъявляемым к прочностным характеристикам конструкционных материалов для основных деталей ГТД, является обеспечение статистически достоверных характеристик по критериям длительной прочности, циклической долговечности - малоцикловой усталости (МЦУ) и многоцикловой усталости (МнЦУ). Традиционно основные характеристики прочности конструкционных материалов, необходимые для выполнения расчётов, получаются на стандартных образцах [2-4,7,8]. Параметры кривых МнЦУ определяются для долговечностей $N \gg 5 \cdot 10^7$ циклов.

Однако около 60% прочностных дефектов, возникающих при доводке и в эксплуатации ГТД, связаны с усталостными разрушениями, вызванными повышенным уровнем вибрационных напряжений [1-3,7,8]. По оценке ВВС США затраты на устранение усталостных разрушений в ГТД достигают сотен миллионов долларов в год [8]. Одна из причин разброса характеристик прочности конструкционных материалов связана с тем, что при формировании заготовок сложной формы для основных деталей ГТД (дисков, валов, лопаток вентиляторов) невозможно обеспечить одинаковую степень деформации материала в разных зонах заготовок (например, в ступице, полотне и ободной части диска), что в итоге отражается и на МнЦУ. В целом получаемые на стандартных

образцах характеристики прочности в полной мере не отражают роли технологических, конструктивных и эксплуатационных факторов, которые, в конечном счёте, оказываются ответственными за формирование МнЦУ, несущей способности деталей и эксплуатационной надёжности. Поэтому перед запуском в производство заготовки необходимо знать, как реализуются свойства материала в наиболее критичных зонах детали, где действуют максимальные эксплуатационные нагрузки и где могут проявиться наиболее опасные последствия влияния на деталь технологических операций повышенного риска [1-3].

Следовательно, испытания на МнЦУ натуральных деталей либо элементов, вырезанных из конструкции с сохранением поверхностного слоя детали и критических зон конструкции, включающих галтели, отверстия [1-3,8], играют главную роль в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным по напряжённому-деформированному состоянию (НДС) и температуре. В случае испытаний модельных образцов необходимо наиболее полно воспроизводить критическую зону детали, сохраняя геометрию и идентичность технологии изготовления реальной детали. Вероятность разрушения деталей с учётом всех силовых факторов должна быть не ниже 1×10^{-7} на час полёта и полностью удовлетворять требованиям к безопасности на уровне системы. Надёжность полученных для конструкционного материала характеристик МнЦУ должна дополнительно подтверждаться стендовыми испытаниями двигателя.

Результаты испытаний оцениваются с применением методов статистического анализа, а характер и виды разрушений - с использованием физических, металлографических и фрактографических методов исследования. Кроме того, обязательным условием при испытаниях конструкционного материала детали с наличием присущих ему в исходном состоянии отклонений является воспроизведение типичных максимально допустимых в материале детали отклонений:

- дефектов, связанных с процессами получения полуфабрикатов (литья, штамповки);
- свойства поверхностного слоя, харак-

терные для окончательно готовых деталей;

- повреждения, возникающие в процессе эксплуатации от отдельного или совместного воздействия МнЦУ и МЦУ, фреттинга, фреттинг-усталости, повреждений посторонними предметами (ППП);

- коррозии и других факторов, вызванных окружающими условиями, воздействие которых приводит к снижению прочности конструкционных материалов по критериям МнЦУ, МЦУ, термического и термомеханического нагружения, статической и циклической ползучести, изменения условий эксплуатации двигателя.

В эксплуатации эти процессы могут действовать одновременно или чередоваться.

Кроме того, можно выделить:

- термическую усталость, вызываемую сменой теплового потока (поля), следствием чего является разрушение от термических деформаций в деталях;

- контактную усталость - поверхностное разрушение деталей в зоне контакта при циклическом контакте;

- фреттинг-усталость - разрушения деталей [2-7], находящихся номинально в неподвижном контакте, но в зоне контакта поверхности сопряжённых деталей совершают в пределах упругих деформаций относительно друг друга возвратные микросмещения (поступательные, вращательные, пульсирующие);

- коррозионная усталость - усталостное разрушение детали, повреждённой коррозией (при совместном действии статических и переменных напряжений процессы коррозии могут интенсифицировать).

К основным проблемам МнЦУ и МЦУ можно отнести достоверность сведений:

- НДС детали;
- значения параметров усталости σ_N , σ_{-1} и σ_v , которые нельзя получить, используя известные свойства стандартных механических характеристик материала, а можно получить лишь прямыми испытаниями деталей или образцов, форма которых и условия проведения испытаний стандартизованы.

Погрешность при оценке предела выносливости и долговечности расчётным методом, сделанная по результатам испытаний стандартных образцов, может значительно отличаться от реальной долговечности дета-

лей. Поэтому характеристики МнЦУ и МЦУ конструкционных материалов должны подтверждаться прямыми испытаниями деталей или их элементов. Образцы, предназначенные для испытаний на МнЦУ, должны иметь минимальные отличия для опасных сечений деталей по α_σ , а технологии их изготовления - максимально соответствовать технологии исследуемой детали, т.е. быть идентичными по состоянию параметров поверхностного слоя, получаемых при обработке детали.

Условия испытаний на усталость деталей или моделей по схеме силового нагружения и термическому состоянию должны максимально приближаться к эксплуатационным НДС детали. Достоверность полученных результатов испытаний на усталость и оценки долговечности должны подтверждаться статистически.

Кроме того, при проектировании конструкции требуется выполнение условий концепции “безопасного повреждения”, т.е. разрушение отдельного элемента или узла не должно приводить к опасным последствиям для всего изделия в целом, или хотя бы на заданный отрезок времени, необходимый для выполнения полётных заданий и безопасного их окончания с последующей диагностикой состояния критического узла (детали).

Таким образом, можно заключить, что сложность исследования явления МнЦУ конструкционных материалов и прогнозирования предела выносливости МнЦУ деталей при оценке запасов прочности связана:

- 1) с разнообразием происходящих процессов и факторов (конструктивных, НДС, технологических, эксплуатационных), оказывающих значительное влияние на предел выносливости;
- 2) с особенностями применяемых материалов, обладающих высокой чувствительностью к влиянию конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов;
- 3) с достоверностью прогнозирования в деталях ГТД знакопеременных напряжений σ_v , уровень которых связан с конкретными условиями эксплуатации, методами анализа результатов измерения, включая человеческий фактор. Кроме того, трудности прогнозирования интенсивности возбуждения на-

грузок σ_v связаны с оценкой рассеяния энергии (декремента колебаний) в системе колебаний, например, лопатка-диск.

Только знание значений обобщённых коэффициентов влияния факторов на σ_{-1} конструкционных материалов:

- **конструктивных** (формы детали, её размеров, наличие концентраторов напряжений);
- **технологических** (влияние физического и структурного состояния материала, степени истощения пластической деформации, остаточных напряжений в поверхностном слое и во всём объёме детали);
- **основных эксплуатационных** (напряжённо-деформированное состояние, тепловое поле, окружающая среда), влияющих на сопротивление МнЦУ, позволяет получить надёжные оценки пределов выносливости деталей и выбирать наиболее эффективные мероприятия, направленные на повышение сопротивления МнЦУ детали, узла, конструкции и снижение эксплуатационных значений σ_v .

Характеристики сопротивления МнЦУ конструкционных материалов при симметричных и асимметричных циклах нагружения

В общем случае при испытаниях на МнЦУ конструкционных материалов или деталей напряжение изменяется по закону, близкому к гармоническому, и является суммой постоянного (среднего) напряжения σ_m и напряжения с амплитудой σ_a , изменяющегося по синусоиде. Циклом напряжений называют совокупность последовательных значений переменных напряжений за период процесса их изменения.

Испытания на МнЦУ при асимметричном цикле нагружения проводятся с целью разработки моделей МнЦУ (или *HCF*) и совместно с малоцикловой усталостью (МЦУ или *LCF*) необходимы для получения расчётных характеристик для прогнозирования ресурса и надёжности основных деталей ГТД из современных конструкционных материалов. На рис.1 приводятся схемы испытаний на МнЦУ стандартных образцов или деталей при различных видах асимметрии и форм нагружения.

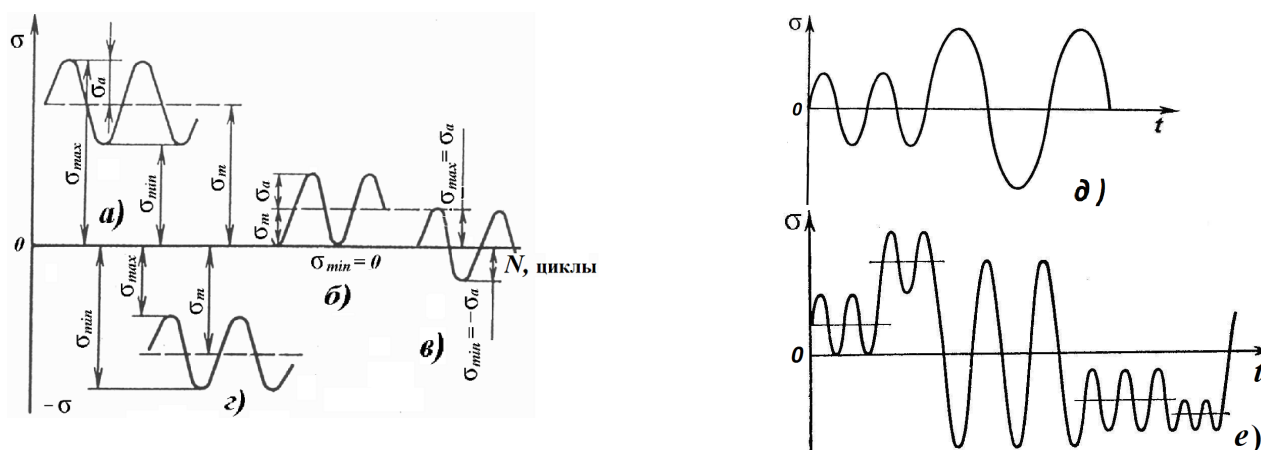


Рис.1. Схемы циклов нагружений и параметры циклов:

а – асимметричный цикл $R > 0$ со средним растягивающим напряжением; *б* – отнулевой цикл $R = 0$; *в* – симметричный цикл $R = -1$; *г* – асимметричный цикл, со средним сжимающим напряжением $R < 0$; *д* и *е* – более сложные циклы нагружения

Исходными материалами для разработки моделей МнЦУ и МЦУ являются полученные экспериментально для конкретных конструкционных материалов:

- предельные диаграммы максимальных амплитуд для МнЦУ в координатах $\sigma_{a \max} - N$ для долговечности $N \gg 10^8$ циклов и заданной вероятности неразрушения;
- диаграммы предельных напряжений для МЦУ в координатах $\sigma_{a \max} - \sigma_m$ для заданной вероятности неразрушения;
- предельные диаграммы для МнЦУ и МЦУ с учётом фактора концентрации напряжений с оценкой вероятности неразрушения;
- закономерности суммирования повреждений при совместном действии МнЦУ и МЦУ;
- зависимости влияния на пределы выносливости для конкретных $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ (коэффициента асимметрии цикла нагружения) частоты нагружения для МнЦУ и при совместном действии МнЦУ и МЦУ;
- влияния на пределы выносливости для конкретных значений R (коэффициента асимметрии цикла нагружения), частоты нагружения, окружающей среды (температуры, коррозии);
- влияния на сопротивление усталости для конкретных R фреттинг-коррозии и технологических факторов и условий эксплуатации.

Полученные зависимости остаются справедливыми, если в них заменить нор-

мальные напряжения σ на касательные τ , т.е. как при действии нормальных, так и касательных напряжений. Разность максимального и минимального напряжений цикла $\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 2\sigma_a$ называют *размахом напряжений*. Циклы, в которых (рис.1, *а*, *б*) максимальные и минимальные напряжения по абсолютной величине различны, называют *асимметричными*, а цикл, у которого максимальное и минимальное напряжения равны по абсолютной величине ($\sigma_a = \sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$; при $\sigma_m = 0$), но противоположны по знаку, называют *симметричным*. Большинство деталей ГТД в эксплуатации подвергается совместному воздействию статических и вибрационных нагрузок, т. е. они находятся в условиях асимметричного цикла нагружения σ_a и σ_m .

Результаты часто представляют также в виде диаграмм предельных напряжений и предельных амплитуд напряжений (рис.2). Для построения предельных диаграмм применяют два способа. В первом способе сохраняют постоянным среднее напряжение цикла σ_m для всех испытанных образцов, но меняют амплитуду σ_a . В результате находят предельную амплитуду при асимметричном цикле σ_{ap} , под которой принимается наибольшее значение амплитуды, не вызывающее разрушения при заданных σ_m и базе испытаний N_0 .

Во втором способе сохраняется постоянным коэффициент асимметрии цикла R , но при переходе от образца к образцу изменя-

ются σ_m и σ_a так, чтобы циклы оставались подобными ($R = \text{const}$).

Под предельной амплитудой σ_{ap} в данном случае понимают то наибольшее её зна-

чение, которое при заданном коэффициенте асимметрии не вызовет разрушения на заданной базе N_b . Предел выносливости, следовательно, будет равен $\sigma_R = \sigma_m + \sigma_{ap}$.

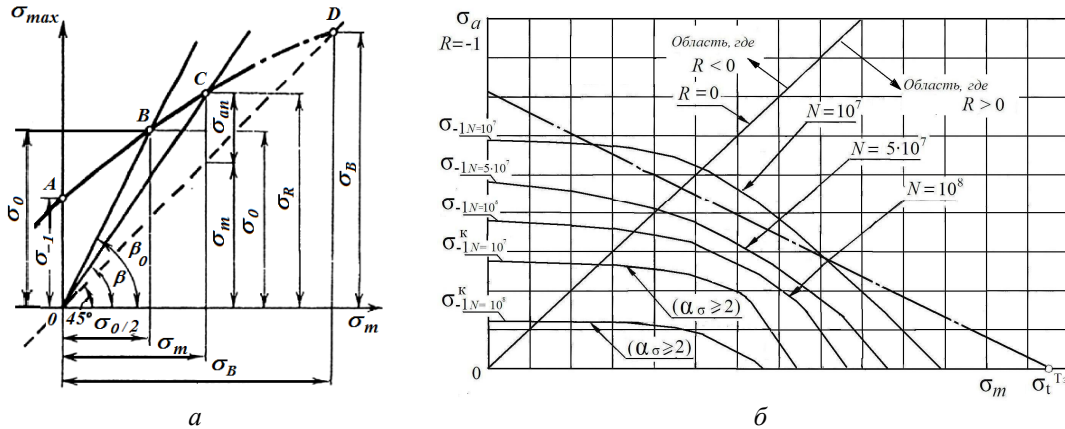


Рис.2. Примеры диаграмм предельных амплитуд для различных долговечностей N_b , для различных значений α_σ и R

Методы оценки допустимых в эксплуатации повреждений

Степень повреждения конструкционного материала, которую следует учитывать в процессе проектирования, включает анализ результатов расчётов 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 промежутки между сроками проведения контроля при периодическом регламентном обслуживании, должны рассматриваться с точки зрения их влияния на степень снижения МнЦУ материала детали. Допустимые переменные напряжения должны обеспечить по критерию МнЦУ надёжную эксплуатацию детали, получившую повреждение, развитие которого не достигнет критической величины за промежутки времени, установленный между контролями. В процессе проектирования при нормировании допустимых значений повреждений для детали (дополнительно к вышеуказанному) необходимо рассмотреть наиболее вероятные комбинации, которые в течение ресурса детали могут привести к её разрушению от МнЦУ (повреждение посторонними предметами - ППП, фреттинг, коррозией). Это требует наличия базы данных по результатам испытаний материалов,

деталей или эксплуатации подобных конструкций с ППП. Окончательное определение возможности безопасной эксплуатации конструкции базируется на испытаниях образцов, вырезанных из детали, изготовленной по технологии серийного производства, деталей данной конструкции с ППП, а также опыта эксплуатации деталей, близких по размерам и технологии изготовления и условиям нагружения в эксплуатации.

Допустимые значения снижения свойств материала детали должны учитывать возможные комбинации амплитуды средних и переменных напряжений или эквивалентные значения напряжений для условий сложного (многоосного) НДС. Для этого необходимо располагать диаграммами предельных амплитуд напряжений, построенными по результатам испытаний образцов из конкретного материала (с заданной технологией изготовления) при различных асимметриях цикла нагружения с соответствующими концентраторами напряжений и эксплуатационных температурах. В процессе испытаний дисков целесообразно регистрировать накопление деформаций с целью установления допустимых значений повреждений в эксплуатации. Это особенно важно для материалов, ползучесть которых проявляется даже при нормальной температуре, например, у титановых сплавов.

Механизм фреттинга и фреттинг-усталость

Процесс фреттинга возникает при экс-

плутации деталей, находящихся в постоянном контакте (прессовая посадка подшипника или втулки на вал; замковые соединения лопаток с диском; болтовые, заклёпочные и фланцевые соединения) при воздействии вибрационных напряжений или когда детали периодически вступают в контакт (роликовые и шариковые подшипники, шарнирные соединения, регуляторы, клапаны и клеммы).

Одним из внешних признаков фреттинга является скопление продуктов повреждения в виде окислов материалов у границы контакта сопряжённых деталей. Эти окислы по составу и цвету отличаются от тех, которые образуются при окислении материалов в обычных условиях. Например, окислы алюминия в обычных условиях имеют белый цвет, а при фреттинге – чёрный. Подобные отличия характерны для окислов и гидратов железа, титана. Объём образовавшихся окислов может превышать объём повреждённого металла. Поэтому при возникновении препятствия для выхода продуктов повреждения из зоны контакта, скопление окислов сопровождается многократным ростом местного давления, способствующим локальному изменению свойств материала. При свободном выходе продуктов повреждения натяг между сопряжёнными деталями уменьшается, что может способствовать повышению вибрационных напряжений. Кроме того, механические свойства окислов значительно отличаются от основного материала. Так, твёрдость окислов Al выше закалённых или азотированных сталей и приближается к твёрдости алмаза. Поэтому окислы могут в значительной мере влиять на механизм фреттинга и характер повреждений поверхностей контакта [4-8].

Следует отметить, что фреттинг может возникать и при контакте металлических поверхностей с неметаллическими или в армированных металлом композиционных материалах. Последствиями этого процесса являются усталостные разрушения (фреттинг - усталость) прессовых и малоподвижных соединений, вызванные значительным снижением предела выносливости из-за повреждений материала детали фреттингом.

Например, предел выносливости замковых соединений лопаток компрессоров ГТД снижается из-за фреттинг-усталости в 3-

5 раз, что является основной причиной их разрушений [4-7]. При описании процесса износа двух контактирующих поверхностей часто употребляется термин «фреттинг-усталость», хотя это строгое определение процесса ограничивает размах относительных перемещений в зоне контакта величиной существенно менее 100 мкм. Поэтому повреждения в ГТД, вызываемые «фреттинг-усталостью» и возникающие при относительных перемещениях, приближающихся к 100 мкм, являются следствием процесса фреттинг-износа. Применение такого собирательного названия можно объяснить тем, что стандарты с целью сохранения приемственности с предыдущими изданиями ENSIP используют термин «фреттинг-усталость» для описания других видов износа, что приводит не только к искажению причин образования дефектов, но и к ошибкам при выборе мероприятий по их устранению.

При проектировании и расчёте деталей, образующих малоподвижные или прессовые соединения, в частности замковые соединения типа «ласточкин хвост», нередко акцентируют внимание на местных контактных напряжениях, определяемых МКЭ. Однако стандартный расчёт МКЭ не позволяет вычислить такие напряжения точно. Исследования показали [3,7], что причиной разрушения замковых соединений является фреттинг-усталость, о чём свидетельствуют:

- распределения переменных напряжений на контактных гранях хвостовиков и их эпюры, полученные при тензометрировании;
- зоны повреждения контактных граней фреттингом и расположение сечений, где группируются разрушения хвостовиков.

Установлено, что величина предела фреттинг-выносливости замкового соединения, зависит от конструктивного вида сопряжения выступа диска с хвостовиком лопатки.

Напряжённость хвостовика и поверхности контакта в значительной мере определяется углом наклона контактной грани.

Именно эти конструктивные факторы оказывают основное влияние на величину предела фреттинг-выносливости соединения, а, например, двукратное повышение давления на площадке контакта сопровождается снижением предела фреттинг-выносливости

[3,4,7] примерно на 10%. Кроме того, при проектировании малоподвижных соединений необходимо учитывать электрохимическое сродство или различие применяемых пар материалов, изотропию и анизотропию свойств материалов [7,8].

Методы повышения сопротивления фреттинг-вынослivosti

Известно, что поверхностное упрочнение сопровождается формированием в поверхностном слое сжимающих напряжений, способствующих повышению фреттинг-вынослivosti. Наибольший положительный эффект достигается при одновременном применении поверхностного упрочнения и защитных покрытий, устраняющих прямой контакт сопряжённых поверхностей деталей. При оценке ресурса детали дополнительно могут учитываться благоприятные воздействия остаточных напряжений от поверхностной обработки. Однако при значительных ресурсах и действии повышенных температур остаточные напряжения релаксируют. Для правильного выбора уровня остаточных напряжений необходимо подтвердить сохранение их уровня в процессе эксплуатации при прогнозируемой скорости развития дефекта не более 1×10^{-7} на час полёта. Особенно важно это для деталей, эксплуатирующихся при повышенных температурах.

Аналогичным образом могут учитываться преимущества применения покрытий. Экспериментально достаточная износостойкость покрытия подтверждается, если оно способно выдержать хотя бы один интервал между ремонтами. Нужно иметь в виду, что процесс снятие покрытия может привести к снижению предела вынослivosti, потеря которого должна быть компенсирована применением специальных технологий. Формальное применение методов защиты даже для материалов одного класса без учёта того, какую роль выполняет деталь (передающая момент или воспринимающая момент), без экспериментального подтверждения может дать отрицательный результат [3,4,7].

Допустимое НДС вблизи зоны контакта при совместном действии статического и вибрационного нагружения должно обеспечивать нераспространение микротрещины, имеющей размеры с соотношением поверхностной длины к глубине как 10:1. Если это

условие не выполнено, то необходимо определить тип и характер повреждений фреттинг-усталости, приводящих к снижению предела вынослivosti при действующем на деталь в эксплуатации уровне вибрационных напряжений, а также граничные условия, при которых могут возникать разрушения детали от фреттинг-усталости.

Определение предела фреттинг-вынослivosti следует проводить при типичном уровне контактных давлений и сил трения с приложением вибрационных напряжений, реализуемых при эксплуатации в зоне возникновения фреттинга, включая взаимодействие МнЦУ и МЦУ. Следует заметить, что характер повреждений контактирующих поверхностей при фреттинге очень разнообразен и неоднороден по признакам повреждения: наличие каверн, участки схватывания материала, бороздки износа, макро- и микротрещины, которые часто покрыты плотным слоем окислов и продуктов повреждения. Поэтому для выявления опасных признаков повреждения фреттингом требуется установить вид механизма повреждения поверхности контакта, который должен быть подтверждён экспериментальными исследованиями в условиях, идентичных эксплуатационным.

Особенности

монокристаллических материалов

Используемые в современных ГТД монокристаллические конструкционные материалы должны обладать достаточными эксплуатационными свойствами (длительной прочностью, сопротивлением ползучести, МЦУ и МнЦУ, трещиностойкостью – низкой скоростью развития трещины, сопротивлением газовой коррозии и коррозии под напряжением, термомеханической усталостью, жаростойкостью), чтобы детали из них могли удовлетворить эксплуатационным требованиям в течение заданного ресурса двигателя. В отличие от лопаток из традиционных изотропных (поликристаллических) материалов, при проектировании лопатки из монокристаллов учитывают анизотропию свойств кристалла, так как они изменяются по каждой из осей ориентаций: как по главным, так и вторичным [4]. Кроме того, необходимо учитывать изменение осей ориентации материала под воздействием на деталь

эксплуатационных нагрузок и температуры. Изменения ориентации основных и вторичных осей могут быть связаны и с технологическим процессом изготовления. Отклонение основных осей при этом может достигать до 10° от номинального значения, а ориентация вторичных - ещё больших величин. В результате таких отклонений могут измениться сопротивление МнЦУ, характеристики ползучести и возрасти скорость роста трещины.

Поэтому ориентация первичных и вторичных осей должна тщательно контролироваться, а при проектировании детали следует учитывать возможность получения дополнительного превышения допустимых отклоне-

ний за счёт процесса изготовления.

Анизотропия свойств монокристаллов наиболее ярко выражается при умеренных температурах, что в первую очередь проявляется в смешанном характере разрушений, так как наиболее «слабым звеном» в кристалле оказываются плоскости скольжения, по которым происходит ускоренный рост усталостных трещин. Такие разрушения наблюдаются при стандартных испытаниях моносплавов (*In100*, ЖС30) на МЦУ при растяжении - сжатии [4] и МнЦУ как при симметричном изгибе [5] и в условиях умеренных температур соответственно 610 и 650°C .

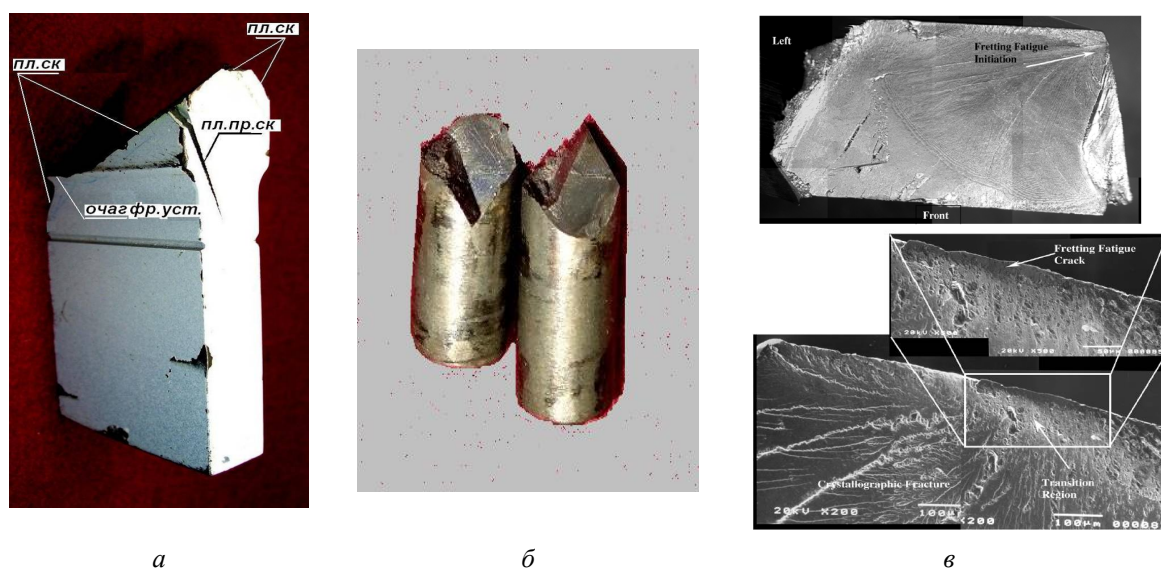


Рис.3. Примеры разрушения образцов из монокристаллических сплавов при испытаниях на МнЦУ и МЦУ при температуре $T_{исп} = 600...650^\circ\text{C}$: а - сплав ЖС6Ф образец с концентратором напряжений, $\alpha_\sigma = 3$, симметричный изгиб. Очаг разрушения фреттинг на границе контакта [5]; б - разрушение от фреттинга иштифта (сплав ЖС30МОНО) для крепления образца при испытаниях на МЦУ[5]; в - разрушение от фреттинга плоского образца из сплава IN100 - моно [4] при испытаниях на МЦУ

Известны случаи подобных разрушений хвостовиков лопаток в эксплуатации. Это явление обостряет проблему сопротивления усталости замковых соединений и внутренней полости монокристаллических лопаток, требуя разработки мероприятий, а также осложняет вопрос возможности эффективного применения демпферов. Подобные разрушения связаны с высокой чувствительностью монокристалла к повреждению фреттингом. Даже при появлении первых признаков развития фреттинг-процесса он может сопровождаться разрушением по плоскостям скола (рис.3). Величина разрушающего напряжения при этом снижается

примерно в 5 раз, а скорость распространения увеличивается многократно.

Таким образом, обеспечение отсутствия разрушений от МнЦУ требует комплексных исследований широкого круга проблем, связанных как с МнЦУ и МЦУ, так с исследованием процессов возникновения, накопления и развития повреждений до критических размеров. Эти исследования включают лабораторные, стендовые и специальные испытания стандартных, модельных образцов и натурных деталей в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным.

Библиографический список

1. Кузнецов, Н.Д. Технологические методы повышения надёжности деталей машин [Текст]: справочник / Н.Д. Кузнецов, В.И. Цейтлин, В.И. Волков. - М.: Машиностроение, 1993. - 304 с.
2. Петухов, А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД [Текст] / А.Н. Петухов. - М.: Машиностроение, 1993. - 240 с.
3. Петухов, А.Н. Многоцикловая усталость материалов и деталей газотурбинных двигателей [Текст] / А.Н. Петухов // Проблемы прочности. – 2005. - №3 (375). - С.5-21.
4. Farris T.N., Murthy H. High Temperature Fretting Fatigue of Single Crystal Nickel. // Proc.10th Nation. Turbine Engine HCF Conference, New Orleans. LA, March 8-11, 2005.
5. Петухов, А.Н. Механизм фреттинга и фреттинг-усталость малоподвижных деталей

ГТД [Текст] / А.Н. Петухов.- М.: ЦИАМ. 2008. (Тр. ЦИАМ, № 1338). - 204 с.

6. Petukhov, A.N. Multicyclic fatigue (HFC) of materials and of Details GTE. International Conference. S.- Peterburg, Russia, 17-20 June, 2008. Volum 1, S.- Peterburg, Russia, Polytechnical Publishing House 2008. - P.282-285

7. Petukhov, A.N. Problem fretting – fatigue in GTE. // RELMAS-2008. Assessment of Reliability of Materials and Structures: Problems and Solutions. International Conference. S.- Peterburg, Russia, 17-20 June, 2008. Volum 1. S.- Peterburg, Russia, Polytechnical Publishing House. 2008. - P. 285-288

8. T. Nicholas High Cycle Fatigue. A Mechanics of Materials Perspective. Elsevier Ltd All rights reserved. 2006. - 640p.

PROBLEMS FATIGUE (HCF) OF CONSTRUCTIONAL MATERIALS AND DETAILS GTE

© 2012 A. N. Petukhov

Central institute of aviation motors named after P.I. Baranov, Moscow

At formation of preparations of details of the difficult form, different zones of preparations essentially differ on degree of deformation of a material (for example, a nave, a cloth and a disk rim), that is reflected and in properties CHF. Check of properties of a material realised in a detail is spent for the most critical zones of a detail where are shown influence consequences on a detail of operations of the raised risk and the maximum operational loadings operate.

High-cyclic fatigue (FHC), technological heredity, properties of a surface, constructional materials, addition reliability.

Информация об авторах

Петухов Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор, начальник сектора «Многоцикловая усталость конструкционных материалов и деталей ГТД», Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: pan_ustalost@ciam.ru. Область научных интересов: многоцикловая и малоцикловая усталость конструкционных материалов и деталей ГТД в широком диапазоне температур с учётом технологических и эксплуатационных факторов (фреттинг, фреттинг-усталость).

Petukhov Anatoly Nikolaevich, professor, chief department “High-cycle fatigue materials and component GTE”. Central Institute of aviation Motors, Moscow. E-mail: pan_ustalost@ciam.ru. Area of research: 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, fretting-fatigue.