

граничные условия. Сначала были импортированы сеточные модели крыльчатки и воздуховода, заданы тип анализа и граничные условия. После этого задавались параметры решения (количество итераций, величина невязки по сходимости решения и т.д.). На следующем этапе выполнялось решение. Созданная математическая модель воздушного центробежного компрессора позволила провести анализ внутреннего течения в

каналах всасывающей камеры, рабочего колеса и направляющего аппарата, а также получить интегральные характеристики – перепад давления на ступени компрессора.

В результате высокая информативность результатов численного моделирования способствует более глубокому анализу процессов протекающих в двигателе внутреннего сгорания.

УДК 621.452-226:620.191

КОМПЛЕКСНАЯ ФРАКТОДИАГНОСТИКА ФЛАТТЕРА РАБОЧИХ КОЛЁС КОМПРЕССОРОВ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ

Сачин В.М., Туманов Н.В., Лаврентьева М.А., Черкасова С.А.

Центральный институт авиационного моторостроения (ЦИАМ), г. Москва

COMPLEX FAILURE ANALYSIS OF AERO ENGINE COMPRESSOR BLADES

Sachin V.M., Tumanov N.V., Lavrentyeva M.A., Cherkasova S.A. Techniques for blade flutter diagnostics using stationary transducers and microfractographic observations are presented. Both these methods have been applied for compressor blade failure analysis of preproduction aero engines. As a result the cause and kinetics of the failures have been established.

Флаттер (динамическая аэроупругая неустойчивость) является наиболее опасным типом аэроупругих колебаний рабочих колёс (РК) компрессоров авиадвигателей. Возникновение флаттера на рабочих режимах должно быть исключено в процессе проектирования и доводки РК. Это обуславливает актуальность проблемы обнаружения флаттера при испытаниях опытных РК – как на безопасном уровне вибронпряжений, так и при разрушении РК. В последнем случае вибронпряжения достигают такой величины, что расположенные на РК тензодатчики выходят из строя, и для диагностики разрушения (фрактодиагностики) необходимо анализировать записи виброакустических процессов в окрестности РК (с использованием методов бесконтактной виброакустической диагностики флаттера (БВАДФ)) и микрорельеф поверхности разрушения.

Используемые в настоящей работе методы БВАДФ базируются на закономерностях флаттера РК как волнового процесса [1-

7]. В системе координат, связанной с РК, флаттер поворотно-симметричного РК при связанных колебаниях по форме с m узловыми диаметрами и круговой частотой ω_m происходит в виде волны перемещений лопаток, бегущей в направлении вращения колеса с угловой скоростью ω_m/m . Это приводит к возмущению окружного распределения статического давления потока вблизи РК в виде волны давления, которая воздействует на элементы статора (корпус компрессора, лопатки направляющих аппаратов), вызывая соответствующие волны перемещений и деформаций. В неподвижной системе координат угловая скорость указанных волн превышает угловую скорость ω_m/m флаттерной волны в рабочем колесе на величину его угловой скорости ω_p . Поскольку число m пространственных периодов волн не изменится при переходе от связанной с РК системы координат к неподвижной, частота генерируемых флаттером диагностических сигналов (ДС), фиксируемая установленными на статоре датчиками (пульсаций дав-

ления, вибраций или вибродеформаций корпуса и т.д.), $\omega_{*m} = m(\omega_m/m + \omega_p) = \omega_m + m\omega_p$.

При отклонении РК от поворотной симметрии флаттер с частотой ω_i описывается не одной вперед бегущей волной, а суперпозицией вперед и назад бегущих волн. В этом случае наряду с основным ДС на частоте ω_{*m} , которая соответствует числу диаметров m превалярующей вперед бегущей волны, статорные датчики фиксируют также побочные ДС на частотах $\omega_{*i} \pm j\omega_p$; где $j=0, 1, 2, \dots, (s-1+\delta)/2$; $\delta=1$ при четном и $\delta=0$ при нечетном числе s лопаток в РК.

Помимо диагностирования флаттера применяемые методы позволяют определять амплитуду вибронпряжений σ_v в РК при флаттере на основании измерения амплитуды ДС и использования предварительно определенной калибровочной зависимости между ней и σ_v .

Разрушение РК при флаттере происходит в результате зарождения и развития усталостной трещины. Вибронпряжения при этом бывают настолько велики, что уже вблизи очага разрушения реализуется вторая стадия развития трещины, связанная с действием на её фронте механизма периодического расслаивания-разрыва [8]. Последний формирует микрорельеф поверхности разрушения в виде усталостных бороздок, шаг которых (расстояние между бороздками) S , характеризует подрастание трещины в цикле нагружения и связан с размахом в этом цикле коэффициента интенсивности напряжений ΔK . Таким образом, электронно-микроскопический фрактографический анализ позволяет определить не только период роста усталостной трещины (по количеству бороздок), но и уровень вибронпряжений при зарождении трещины (по шагу бороздок вблизи очага разрушения). Для решения последней задачи проводится расчётное моделирование напряженного состояния РК с трещиной при колебаниях по той форме, по которой реализовался флаттер: трещина располагается вблизи очага разрушения в области измерения величины S , её конфигурация устанавливается на основании фрактографических исследований. Далее по зависимости $S(\Delta K)$ вычисляется значение ΔK , определяется соответствующая этому значению амплитуда колебаний лопатки, а затем

находится величина σ_v в области зарождения трещины.

Изложенный комплекс методов (БВАДФ, электронно-микроскопический фрактографический анализ, расчётное моделирование напряженного состояния) применён при фрактодиагностике РК компрессоров создаваемых двигателях манёвренной авиации. Установлено, что причиной разрушения РК был флаттер, определены режимы, на которых он реализовался, идентифицированы форма (число узловых диаметров) и частота колебаний РК, двумя методами (БВАДФ и расчётно-фрактографическим) определены уровень наиболее интенсивных вибронпряжений и продолжительность их действия.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют об эффективности используемых методов и необходимости комплексного подхода к фрактодиагностике, обеспечивающего надёжное определение причины разрушения и достоверную реконструкцию его развития.

Библиографический список

1. Kurkov A., Dicus J. Synthesis of blade flutter vibratory patterns using stationary transducers. ASME Paper №78-GT-160. 1978г. 8р.
2. Иванов, В.П. К вопросу об автоколебаниях рабочего колеса турбомшины как системы с конструктивной поворотной симметрией / В.П. Иванов, В.М. Сачин // Проблемы прочности. 1980. №5. С.91-96.
3. Сачин, В.М. Некоторые особенности аэроупругих колебаний рабочих колес турбомашин / В.М. Сачин // Аэроупругость лопаток турбомашин. Вып.1. М.: ЦИАМ. 1981. С. 267-287.
4. Сачин В.М., Шатохин А.Г. Способ обнаружения автоколебаний осевой турбомшины в рабочих условиях // Авт. свидетельство СССР №974184. 1982.
5. Сачин В.М., Туманов Н.В., Шатохин А.Г. Способ обнаружения автоколебаний осевой турбомшины в рабочих условиях // Авт. свидетельство СССР №1136593. 1984.
6. Сачин В.М., Туманов Н.В., Шатохин А.Г. Бесконтактная вибродиагностика флаттера рабочих колес компрессоров // Аэроуп-

ругость лопаток турбомашин. Вып.4. М.: ЦИАМ, 1987. С.195-206.

7. Сачин В.М. Прогресс в раннем диагностировании флаттера рабочих колес компрессоров авиадвигателей // Современные методы обеспечения прочностной надежности деталей авиационных двигателей. Под ред. Б.Ф. Ножницкого, Б.Ф. Шорра, И.Н.

Долгополова. М.: Торус-Пресс, 2010. С. 215-223.

8. Туманов Н.В. Стадийность кинетики усталостных трещин и механизм периодического расслаивания-разрыва // Деформация и разрушение материалов: Труды Первой международной конференции. В 2-х томах. Т.1. М.: ИМЕТ РАН, 2006. С. 85-87.

УДК 621.43

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНОЙ НАДЕЖНОСТИ И РЕСУРСА ДИСКОВ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Ножницкий Ю.А., Каримбаев К.Д. Потапов С.Д.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (ЦИАМ), г.Москва

DESIGN AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR PROVISION OF HIGH RELIABILITY AND LIFE TIME OF AVIATION GAS TURBINE ENGINES DISKS

Nozhnitskiy Yu.A., Karimbaev K.D., Potapov S.D. Certification requirements for aviation gas turbine disks; design and technological solutions for provision of disks high reliability and life time; methods of confirmation of disks compliance to requirements are considered.

Диски относятся к числу критических по последствиям разрушения деталей авиационных маршевых ГТД. Кроме того, масса дисков во многом определяет массу и удельный вес двигателя в целом. В связи с этим при создании, сертификации, производстве и эксплуатации двигателей оптимальному проектированию и обеспечению прочностной надежности этих деталей уделяется особое внимание.

В докладе рассматриваются сертификационные требования к дискам; конструктивно-технологические решения, обеспечивающие повышение прочностной надежности, ресурса и снижение массы дисков; методы подтверждения соответствия дисков сертификационным требованиям.

Так как диски маршевых двигателей относятся к основным (критическим по последствиям разрушения) деталям двигателя, то разрушение дисков в процессе эксплуатации должно быть практически невероятным событием.

В последние годы сертификационные требования к дискам были конкретизированы и в значительной степени ужесточены. Изданы, в частности, циркуляры FAA по технологии изготовления заготовок основных (критических по последствиям разрушения) деталей из деформируемых титановых и никелевых сплавов, по подтверждению ресурса титановых дисков с учетом металлургических дефектов и дисков из различных сплавов с учетом возможных при изготовлении отверстий технологических дефектов. Издана поправка 33-26 к FAR33, включающая изменение требований к прочности роторов турбин, компрессоров, вентиляторов и турбоагрегатов, введено требование к разработке и реализации инженерно-технического плана обеспечения прочностной надежности основных деталей на всех стадиях их жизненного цикла.

Для обеспечения низкой массы для изготовления дисков используются высокопрочные титановые сплавы, стали и никелевые сплавы (гранулируемые и