

УДК 629.7.036 : 539.4

А.В. ПЕТРОВ¹, А.В. ШЕРЕМЕТЬЕВ¹, Д.Ф. СИМБИРСКИЙ²¹*ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина*²*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНОЙ НАДЕЖНОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРОВ АВИАЦИОННЫХ ГТД С УЧЕТОМ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СОЕДИНЕНИЯХ

Предложен метод повышения точности оценок показателей прочностной надежности рабочих лопаток вентиляторов авиационных ГТД путем учета контактного взаимодействия в соединениях в трехмерных конечноэлементных моделях их НДС. Исследовано влияние условий контактного взаимодействия в соединениях, а также возможных технологических отклонений в последних на показатели прочностной надежности лопаток. Усовершенствован метод установления ресурсов рабочих лопаток вентиляторов на основе опыта проектирования, испытаний и эксплуатации двигателей-прототипов.

рабочая лопатка вентилятора, контактное взаимодействие, ресурсное проектирование, напряженно-деформированное состояние, технологические отклонения, ресурс, динамические характеристики, двигатели-прототипы.

Введение

Рост ресурсов современных авиадвигателей приводит к значительному увеличению продолжительности, а, следовательно, и стоимости стендовых испытаний, в частности, и ускоренных эквивалентно-циклических. Поэтому актуальным является совершенствование расчетных и расчетно-экспериментальных методов установления ресурса деталей авиационных ГТД, который является одним из показателей прочностной надежности [1]. В соответствии с отраслевой методологией [2], некоторые терминологические особенности которой уточнены в [3], к основным показателям прочностной надежности деталей следует относить их безотказность и долговечность (ресурс).

Рабочие лопатки вентиляторов относятся к числу основных деталей двигателя, которые определяют его прочностную надежность. Их конструктивной особенностью является близость и взаимное влияние критических зон (зон максимальных напряжений) и мест взаимодействия лопаток с диском и соседними лопатками в рабочем колесе. Кроме того, в силу невысоких рабочих температур их ресурс, в

основном, определяется циклической долговечностью.

Были уточнены существующие модели определения напряженно-деформированного состояния (НДС) и динамических характеристик рабочих лопаток вентиляторов за счет учета контактного взаимодействия в соединениях, что позволяет:

- увеличить точность расчетного определения НДС и циклической долговечности рабочих лопаток вентиляторов;
- оценить влияние возможных технологических отклонений в соединениях на НДС и циклическую долговечность;
- увеличить точность расчетного определения динамических напряжений в лопатках;
- усовершенствовать метод установления ресурсов на основе опыта проектирования, испытаний и эксплуатации двигателей-прототипов (ретроспективный метод).

В целом, результаты работы способствуют повышению прочностной надежности рабочих лопаток вентилятора авиационных ГТД в системе ресурсного проектирования двигателя [2].

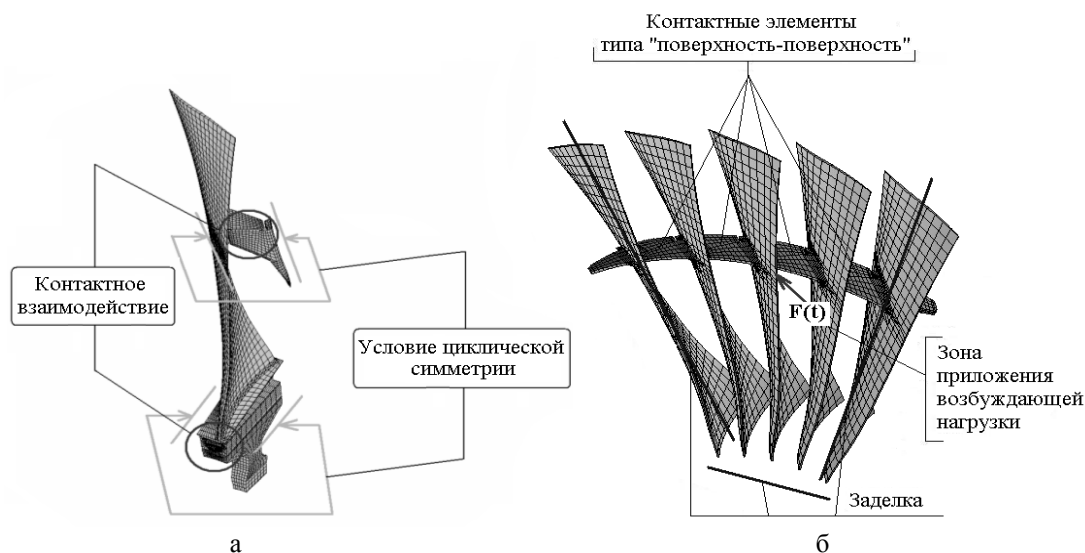


Рис. 1. Конечноэлементные модели и расчетные схемы рабочих лопаток вентиляторов: а – для определения НДС; б – для определения динамических характеристик

1. Напряженно-деформированное состояние рабочих лопаток вентиляторов с учетом контактного взаимодействия в соединениях

В результате проведенного анализа известных методов расчетного определения НДС рабочих лопаток вентиляторов и компрессоров авиационных ГТД был сделан вывод, что в решении этой проблемы наиболее перспективным направлением является применение моделей высокого уровня на основе МКЭ в трехмерной постановке с учетом контактного взаимодействия в соединениях и геометрической нелинейности. В связи с этим был проведен выбор расчетной схемы и соответствующей конечноэлементной модели лопаток (рис. 1). Контактное взаимодействие моделировалось специальными конечными элементами типа "поверхность-поверхность". Задача решалась методом Ньютона-Рафсона в конечноэлементной постановке, нормальная и тангенциальная контактная жесткости определялись по методу множителей Лагранжа, использовалась модель трения Кулона-Амонтона. Реализация данной модели потребовала проведения ее адаптации к конкретным задачам, а именно: выбора типа конечного элемента и степени густоты сетки, граничных условий и способа приложения нагрузок.

Был проведен значительный объем вариантных расчетов НДС рабочих лопаток вентиляторов с последующей проверкой в натуральных условиях. Установлено, что наилучшую сходимость с данными эксперимента (относительная погрешность не превышает 3%) имеют результаты, полученные по расчетной схеме, учитывающей одновременно геометрическую и контактную нелинейности [5].

Также установлено, что неучет контактного взаимодействия или применение упрощенных подходов к его моделированию приводит к погрешности определения напряжений в критических зонах лопаток по сравнению с данными эксперимента до 25%. При определении циклического ресурса, например, по формуле Мэнсона это приводит к примерно пятикратной погрешности.

В целом, необходимо констатировать, что решение контактной задачи лопатки с диском в трехмерной постановке с учетом циклической симметрии наиболее полно отражает реальную картину НДС в лопатке и диске (рис. 1, а).

2. Влияние технологических отклонений на НДС и циклический ресурс лопаток

Технологические отклонения формы при изготовлении хвостовиков лопаток и пазов диска (даже в

пределах допуска) могут иметь неблагоприятные сочетания при сборке этих деталей и оказывать влияние на НДС в замковых соединениях и ресурс лопаток в целом. Решение задач данного типа потребовало всестороннего анализа возможных технологических отклонений и разработки расчётных методик, позволяющих учитывать указанные особенности контактного взаимодействия в соединениях.

На основании выбранной расчетной методики был проведен анализ влияния возможных технологических отклонений в замковых соединениях (в пределах допуска) на НДС рабочих лопаток вентилятора. По результатам анализа технологических процессов изготовления замковых соединений лопаток были определены четыре основных типа возможных технологических отклонений формы в замковых соединениях лопаток вентиляторов [4 – 6]:

- 1) невыдерживание размеров поперечных сечений по длине хвостовика;
- 2) непараллельность рабочих поверхностей хвостовика;
- 3) несовпадение углов наклона рабочих поверхностей хвостовика и диска;
- 4) отклонение от плоскостности рабочих поверхностей хвостовика.

На основании этих типов технологических отклонений были выбраны 11 расчетных случаев, моделирующих самые неблагоприятные сочетания технологических отклонений и оказывающих наиболее сильное влияние на напряженность в критических зонах лопаток. Результаты расчетов для каждого расчетного случая представлялись в виде распределений эквивалентных и контактных напряжений вдоль доньшек впадин гребенки хвостовика.

Установлено, что возможные технологические формы деталей, входящих в замковые соединения лопаток вентиляторов (в пределах допуска) приводят к увеличению эквивалентных напряжений до 30%, а контактных – до 120% [4]. При этом снижение циклического ресурса лопаток достигает 33% по

отношению к случаю контактного взаимодействия деталей номинальной формы [6].

3. Определение динамических характеристик рабочих лопаток вентиляторов с учетом контактного взаимодействия

Известно, что различные условия взаимодействия в межлопаточных связях существенным образом влияют на частоты и формы колебаний, а также распределения динамических напряжений при колебаниях бандажированных рабочих колес турбомашин [7].

Для решения этой задачи была предложена модель вынужденных колебаний бандажированных лопаток вентиляторов, позволяющая учитывать контактное взаимодействие в бандажных соединениях и получать уточненные распределения динамических напряжений (рис. 1, б) [5].

Основное уравнение движения решалось методом прямого интегрирования Ньюмарка. Нелинейные явления, связанные с контактом учитывались при помощи метода Ньютона – Рафсона. Нормальная и тангенциальная контактные жесткости определялись по методу множителей Лагранжа. Полученную сходимость расчетных данных по предложенной модели с экспериментом можно характеризовать погрешностью в 1 – 2% – по первой изгибной форме и в 2 – 6% – по другим формам [5].

4. Установление циклических ресурсов рабочих лопаток вентиляторов

В соответствии с ретроспективным методом, циклический ресурс N_H детали нового двигателя на основании установленного ресурса N_{np} детали двигателя-прототипа вычисляется следующим образом [1]:

$$N_H = N_{np} \cdot \eta_M \cdot \eta_{ктэ} \cdot \eta_\sigma, \quad (1)$$

где η_M , $\eta_{ктэ}$, η_σ – комплексы, учитывающие влияния материала, конструктивных, технологиче-

ских и эксплуатационных факторов и вибрационных напряжений нового двигателя и двигателя-прототипа соответственно.

В данной работе производится уточнение ретроспективного метода, заключающееся в определении НДС и комплексов влияния на основе учета контактного взаимодействия в соединениях и применения моделей высокого уровня, а именно:

- при определении НДС в критических зонах;
- при определении комплекса влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов;

– при определении циклической долговечности по кривым МЦУ или формуле Мэнсона на основании величин напряжений в критических зонах лопаток, полученных с учетом контактного взаимодействия.

На основании проведенного компьютерного моделирования и анализа влияния возможных технологических отклонений на напряжения в критической зоне и циклический ресурс рабочих лопаток вентиляторов, комплекс влияния конструктивно-технологических факторов предложено вычислять по следующей формуле [6]:



Рис. 2. Учет контактного взаимодействия при ресурсном проектировании рабочей лопатки вентилятора

$$\eta_{квтэ} = \left[1 - \frac{(\Delta N_{mex}^H)_{cp}}{(\Delta N_{mex}^{np})_{cp}} \right] \cdot \xi_{э} = 0,67 \cdot \xi_{э}, \quad (2)$$

где $(\Delta N_{mex}^H)_{cp}$, $(\Delta N_{mex}^{np})_{cp}$ – средние изменения циклической долговечности детали, при возможных технологических отклонениях нового двигателя и двигателя-прототипа соответственно; $\xi_{э}$ – коэффициент учета отличия повреждаемости в полетном цикле.

Выводы

1. Предложено решение задачи определения НДС рабочих лопаток вентиляторов авиационных ГТД, отличающееся учетом контактного взаимодействия в соединениях и применением трехмерных конечно-элементных моделей, моделирующих работу лопаток наиболее близко к реальной.

2. Получены количественные оценки влияния возможных допускаемых технологических отклонений формы сопрягаемых деталей замковых соединений лопаток вентиляторов на напряженность и циклический ресурс.

3. Разработана модель вынужденных колебаний бандажированных лопаток вентиляторов ТРДД, которая, в отличие от известных, учитывает контактное взаимодействие в бандажных связях и позволяет определять относительные величины динамических напряжений.

4. Усовершенствован ретроспективный метод установления циклических ресурсов рабочих лопаток вентилятора путем более точного определения комплекса влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на ресурс создаваемого двигателя.

В целом, полученные результаты позволили существенно повысить точность оценок показателей прочностной надежности рабочих лопаток вентилятора, что отражено в приведенной на рис. 2 схеме и нашло практическое внедрение применительно к ТРДД большой степени двухконтурности [5].

Литература

1. Муравченко Ф.М., Шереметьев А.В. О методе определения циклических ресурсов авиадвигателей // Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкций: Тр. Межд. конф. – К.: НАНУ; Ин-т пробл. прочности, 2000. – Т. 2. – С. 831-836.
2. Ресурсное проектирование авиационных ГТД. – М.: ЦИАМ, 1990. – 208 с.
3. Симбирский Д.Ф., Олейник А.В. Прочностная надежность и ресурсное проектирование элементов конструкции авиационных ГТД (терминологический аспект) // Авиационно-космическая техника и технология: Научн.-техн. журнал. – 2006. – № 10 (36). – С. 48-51.
4. Муравченко Ф.М., Шереметьев А.В., Петров А.В. Анализ напряженно-деформированного состояния деталей авиационных ГТД с учетом возможных технологических отклонений // Вестник двигателестроения: Научн.-техн. журнал. – 2005. – № 1. – С. 23-28.
5. Петров А.В. Ресурсное проектирование рабочих лопаток вентиляторов авиационных ГТД с учетом контактного взаимодействия в соединениях: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 – Х., 2006. – 20 с. (ХАИ).
6. Шереметьев А.В., Петров А.В. Учет влияния свойств материала, конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов при установлении ресурсов деталей авиационных ГТД // Вестник двигателестроения: Научн.-техн. журнал. – 2006. – № 1. – С. 91-94.
7. Воробьев Ю.С., Канило С.П., Янецки С. Колебания лопаток турбомашин с межлопаточными связями // Динамика роторных систем: Сб. тр. 2-й Междунар. конф. – Каменец-Подольский, 1998. – С. 133-136.

Поступила в редакцию 21.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Олейник, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков