

УДК 629.7.036:539.4

А.Г. ОЛЕЙНИК, Т.И. ПРИБОРА

ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ПРОДЛЕНИЯ РЕСУРСА ДИСКОВ КОМПРЕССОРОВ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Рассмотрены расчетно-конструкторские предложения по снижению напряженности критических зон дисков компрессоров с целью увеличения ресурса двигателей, приведены конкретные схемы и результаты численной оценки

надежность, ресурс, напряженно-деформированное состояние, межпазовый выступ, операции до-работки, фреттинг-износ

Введение

Конкурентоспособность и экономическая эффективность авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) определяется уровнем их надежности. Уровень надежности двигателя характеризуется количественными показателями, определяемыми на основании статистических данных результатов эксплуатации и расчета; он закладывается при проектировании двигателя и контролируется в процессе всего его существования. Заданный уровень надежности должен обеспечиваться в течение всего ресурса двигателя, т.е. его наработки с установленными основными данными. Ресурс двигателя задается при проектировании в зависимости от его назначения и закладывается конструктором при расчете всех узлов и деталей на прочность. Диски роторов (компрессоров) являются наиболее ответственными и определяющими элементами конструкции газотурбинных двигателей. От совершенства конструкции дисков зависят надежность, легкость конструкций авиационных двигателей. Они входят в перечень основных деталей двигателя и являются определяющими в назначении межремонтного и назначенного ресурсов авиационных газотурбинных двигателей.

Современные авиационные газотурбинные двигатели должны иметь ресурс с заданным уровнем надежности в течение не менее 20000 ... 100000 часов эксплуатации.

Ресурсы такого порядка можно обеспечить при условии снижения уровня действующих переменных (динамических) и повторно-статических напряжений в критических зонах деталей двигателя путем совершенствования их конструктивной формы, применения новых более легких и прочных материалов, использования более совершенной и точной технологии их изготовления.

1. Формулирование проблемы

В настоящей статье рассматриваются частные случаи снижения уровня напряжений в одной из критических зон диска – в основании межпазового выступа замкового соединения лопатка - диск. Снижение уровня максимальных эквивалентных напряжений критической зоны диска – основной путь повышения его циклической долговечности.

Определение с высокой степенью достоверности напряженно-деформированного состояния (НДС) и ресурса основных деталей авиационных ГТД стало возможно в результате использования современных средств вычислительной техники, внедрения численных методов, в том числе метода конечных элементов. При решении задач по определению напряженно-деформированного состояния проектируемых и находящихся в эксплуатации дисков компрессоров используются расчетные модели высокого уровня.

2. Решение проблемы

Расчету по определению НДС диска на модели высокого уровня, предшествует расчет всего ротора, в состав которого входит конкретный диск. Расчет ротора выполняется в двухмерной постановке с учетом всех эксплуатационных факторов влияющих на напряженное состояние, а именно: температурные поля, газовые силы, давления, центробежные силы, условия взаимодействия деталей в роторе. Из полученного расчета для модели конкретного диска формируются граничные условия для выполнения расчета напряженного состояния диска в трехмерной постановке с учетом всех конкретных особенностей конфигурации диска.

Характер распределения напряжений по диску носит неравномерный характер. Выделяются зоны концентрации напряжений, которые принято называть критическими зонами детали. Как правило, в дисках эти зоны располагаются у основания межпазовых выступов. Напряженность критических зон определяет циклический ресурс детали.

В зонах концентрации напряжений реализуется трехмерное НДС, компоненты которого определяются расчетом. В качестве критерия напряженности диска в местах концентрации напряжений принимаем критерий интенсивности напряжений Губера – Мизеса (1):

$$\sigma_{\text{экв}} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + \\ + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)] \dots \end{array} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ – нормальные и касательные напряжения в трех, взаимно перпендикулярных площадках, нормали к которым обозначены x, y, z ; $\sigma_{\text{экв}}$ – эквивалентные напряжения в рассматриваемой зоне диска.

Циклическая долговечность диска тем больше, чем меньше величина действующих эквивалентных напряжений. Поскольку тема увеличения циклической долговечности двигателя в целом, и дисков

компрессоров, в частности, очень актуальна, целью коллектива разработчика является отработка мероприятий по снижению напряжений в местах концентрации, без дополнительного увеличения веса конструкции.

В данной работе представляем мероприятия по уменьшению напряжений концентрации в основании межпазового выступа путем разнесения компонент эквивалентного напряжения по различным зонам рассматриваемого участка поверхности доньшка паза диска (рис. 1).

Суть мероприятия сводится к разделению окружных напряжений возникающих в ободной части от вращения диска и радиальных напряжений от сил, действующих со стороны лопаток. Эффект уменьшения величины эквивалентных напряжений был достигнут за счет изменения геометрии доньшка паза диска с плоского на скругленное, что, в свою очередь, позволило увеличить радиус перехода от доньшка паза к рабочим поверхностям диска и тем самым уменьшить коэффициент концентрации в уголках межпазового выступа.

На рис. 2 показан характер модификации доньшка паза. Проведенные расчеты НДС исходной и модифицированной геометрии доньшка паза диска подтвердили снижение уровня напряжений.

На рис. 1 представлено в виде графиков распределение радиальных (S_x), окружных (S_y) и эквивалентных ($S_{\text{экв}}$) напряжений в узлах, лежащих по линии, образующей контур доньшка на входе в паз. Зона А выбрана в радиусе сопряжения со стороны острого угла межпазового выступа, здесь происходит концентрация напряжений. Зона Б находится примерно в середине доньшка паза, зона В расположена в радиусе сопряжения со стороны тупого угла.

На рис. 2 видно, что при исходном профиле доньшка паза в зоне А имеем максимум как радиальных, так и окружных напряжений, поэтому и эквивалентные напряжения достаточно велики.

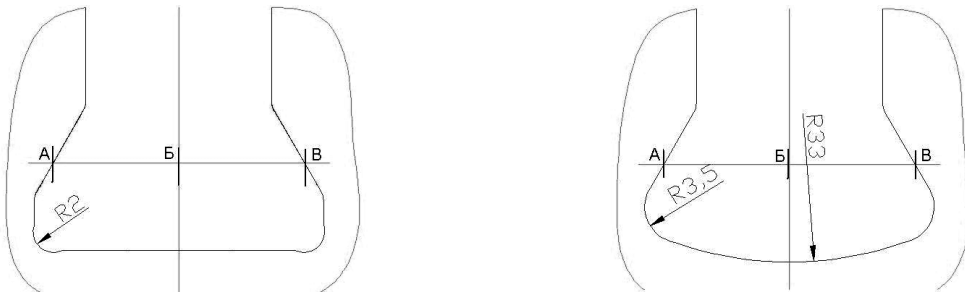


Рис. 1. Характер модификации доньшка паза

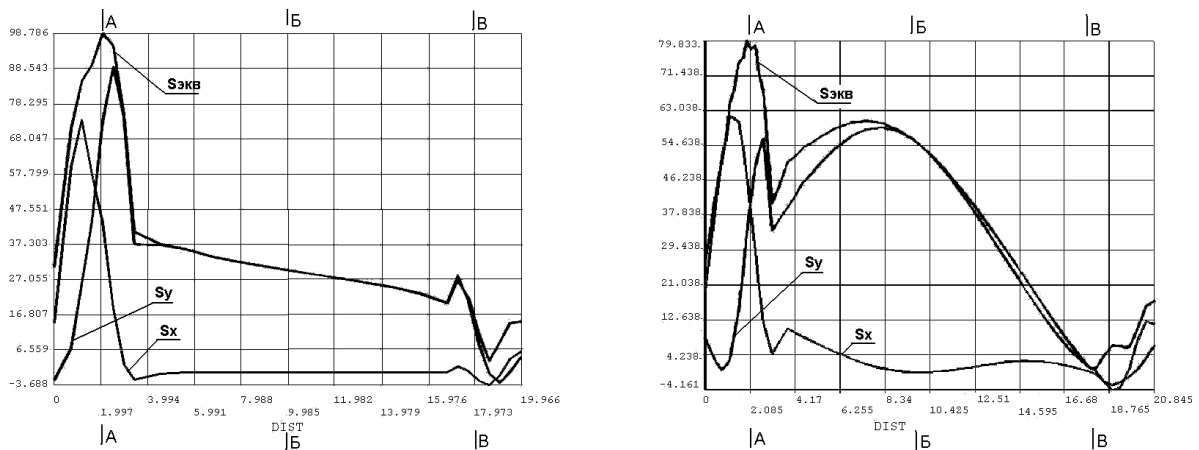


Рис. 2. Характер распределения радиальных, окружных и эквивалентных напряжений в исходном исполнении доньшка паза (слева) и в модифицированном исполнении доньшка паза (справа)

С переходом на модифицированное доньшко, пик максимальных окружных напряжений перемещается ближе к середине доньшка, тем самым, снижая величину эквивалентных напряжений в зоне острого угла.

Эффект мероприятия – снижение действующих эквивалентных напряжений в области острого угла на 12%.

Еще один пример увеличения ресурса диска связан с необходимостью доработки контактных поверхностей пазов «притиром» при ремонте для удаления следов от фреттинг – износа возникающего в процессе эксплуатации. В результате ремонта контактных поверхностей у основания межпазового выступа образуется уступ от инструмента.

Указанный уступ является дополнительным концентратором напряжений от изгиба и среза фрагмента выступа, может привести к зазору, линейно-

му контакту и недопустимым напряжениям смятия в соединении «ласточкин хвост» (если при перешлифовке не контролировать размеры «притира»), может ограничить ресурс детали двигателя.

Во избежании перечисленных выше недостатков, конструкторами было предложено мероприятие, состоящее в организации у основания площадки контакта зоны выхода инструмента при осуществлении операции притирки контактных поверхностей паза в процессе ремонта (рис. 3). Расчетчиками смоделированы предложенные мероприятия и оценена их эффективность. Расчеты подтвердили эффективность подобной доработки. Было сделано встречное предложение по доработке доньшка паза, как было описано выше. Результат совместных мероприятий выражается в снижении напряжений концентрации на 10%, ожидаемом увеличении ресурса детали на 16% (рис. 4).



Рис. 3. Вид последовательного введения в профиль паза конструктивных изменений

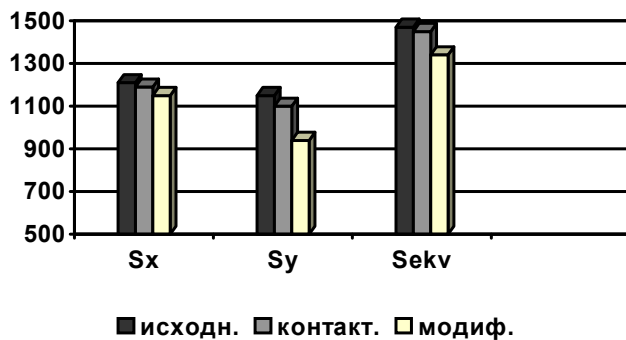


Рис. 4. Снижение радиальных (S_x), окружных (S_y) и эквивалентных (S_{ekv}) напряжений по мере введения в профиль паза конструктивных мероприятий

Заключение

Представленные конструктивные решения по снижению уровня напряжений в критической зоне диска компрессора, а именно, в основании межпазового выступа, просты в реализации и позволяют значительно повысить надежность и ресурс дисков, и соответственно самого двигателя.

Современный уровень численного анализа позволяет оперативно и с высокой достоверностью оценить уровень напряжений – в реальных конструкциях, определить зоны локализации напряжений, разработать и реализовать мероприятия по увеличению надежности конструкции.

Литература

1. Ресурсное проектирование авиационных ГТД. Руководство для конструкторов. Труды ЦИАМ. № 1275. Вып. 3. – М.: ЦИАМ, 1991. – 372 с.

2. Баженов В.Г., Тростенюк Ю.И. Применение МКЭ для исследования НДС роторов ГТД // Проблемы прочности. – 1988. – № 5. – С. 88 – 92.

3. Колесников В.И., Шереметьев А.В. Прогнозирование надежности на основе расчетно-экспериментального анализа термонапряженного состояния узлов авиационных ГТД // Прогресс – Технология – Качество: Тр. Второго конгресса двигателестроителей Украины с иностранным участием. – Киев-Харьков-Рыбачье. – 1997. – С. 282 – 286.

4. Исследование динамики циклически симметричных несущих конструкций гидротурбин / Б.Я. Кантор, И.С. Веремеенко, Т.Ф. Медведовская и др. // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Труды Международной научно-технической конференции. – Х.: ИПМаш НАН Украины. – 1997. – С. 503 – 506.

5. Михайлов А.Л. Критерии несущей способности дисков ротора турбины ГТД на основе математического моделирования объемного НДС // Вестник двигателестроения. – 2003. – № 2. – С. 105 – 109.

Поступила в редакцию 3.06.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Д.Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.