

УДК 621.45.037

Н.В. ГОНЧАР, Д.В. ПАВЛЕНКО

*Запорожский национальный технический университет, Украина*

## ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕЖПАЗОВЫХ ВЫСТУПОВ ДИСКА КОМПРЕССОРА С ПАЗАМИ ТИПА "ЛАСТОЧКИН ХВОСТ"

Исследовано влияние конструктивных особенностей межпазовых выступов диска компрессора с пазами типа "ласточкин хвост" на теоретический коэффициент концентрации напряжений. Выполнен расчет величины переменных и постоянных составляющих цикла нагружения межпазового выступа диска в месте наиболее вероятного разрушения от многоциклового усталости.

**концентратор напряжений, межпазовый выступ, диск компрессора высокого давления, напряженно-деформированное состояние, модель прочностной надежности, метод конечных элементов.**

### Введение

В настоящее время в авиадвигателестроении находят широкое применение модели прочностной надежности высоконагруженных деталей ротора, ограничивающих ресурс работы газотурбинных двигателей (ГТД). Использование моделей позволяет учитывать влияние на величину запаса прочности как конструктивных особенностей деталей так и особенностей технологии их обработки, что способствует уменьшению числа натурных экспериментов и сокращению сроков доводки двигателей [1].

### 1. Формулирование проблемы

Основным затруднением на этапе оценки составляющих эксплуатационных нагрузок является отсутствие возможности оценки напряженно-деформированного состояния детали непосредственно в местах конструктивных концентраторов напряжений, которые, как правило, являются местом наиболее вероятного разрушения деталей. Недостатком существующих способов оценки напряженно-деформированного состояния в местах концентрации напряжений является то, что способы, основанные на определении величины теоретического концентратора напряжений по таблицам и номограммам Р. Петерсона [2] и Дж. Коллинза [3],

не позволяют в полной мере учитывать взаимодействие наиболее сильных концентраторов. В то же время способы, основанные на построении крупномасштабных моделей деталей [4] являются весьма дорогостоящими и требуют для своей реализации длительного времени.

Перспективным направлением в определении величины концентрации напряжений от геометрических особенностей сложноспрофильных деталей ГТД является оценка их напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов.

### 2. Решение проблемы

Задачей настоящего исследования являлось определение величины теоретического концентратора напряжений, создаваемого острым углом межпазового выступа диска компрессора высокого давления с пазами типа "ласточкин хвост" (рис. 1) при различных схемах нагружения и расчет постоянной и переменной составляющей цикла нагружения межпазового выступа диска.

Для расчета напряженного состояния использовали результаты тензометрирования дисков компрессора на двигателе при его работе на номинальном режиме. Тензодатчики с базой 3 мм наклеивали на дно паза и боковую поверхность межпазового выступа.

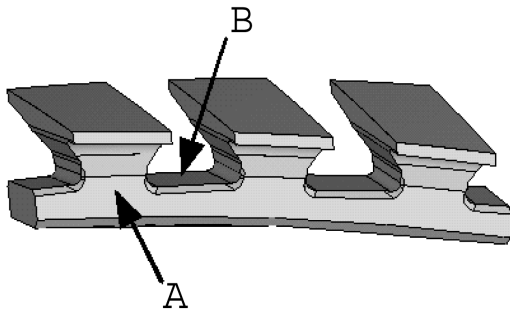


Рис. 1. Фрагмент ободной части диска компрессора высокого давления с пазами типа "ласточкин хвост": А – боковая поверхность ножки межпазового выступа, В – доньшко паза.

Особенностью концентрации напряжений в пазах типа "ласточкин хвост" является суперпозиция концентрации от радиуса перехода рабочей поверхности к доньшку паза ("выкружки"), обеспечиваемой инструментом при протягивании и концентрации напряжений, вызываемых наличием острых кромок, которые скругляют или притупляют фаской различной величины. Так, согласно ремонтной технологии, радиус "выкружки" также оказывается переменным и увеличивается при перепротягивании паза от 0,6 до 1 мм. При работе диска компрессора и испытании на усталость образца, вырезанного из ободной части диска (рис. 1), наиболее сильным концентратором является кромочная поверхность на "выкружке" паза в остром углу межпазового выступа. Таким образом, имеет место влияние двух наиболее сильных и определяемых технологией изготовления диска концентраторов: "выкружки" и кромки, имеющей радиус скругления, обеспечиваемый слесарной обработкой.

Для оценки напряженно-деформированного состояния в зоне конструктивного концентратора напряжений паза были созданы твердотельные модели ободной части диска, имеющие различные радиусы "выкружки" и радиусы скругления кромок. Для расчета методом конечных элементов в модели была создана регулярная сетка из 20-ти узловых конечных элементов высшего порядка типа Solid 95. В зоне концентрации напряжений размер элементов не превышал 0,2 мм. При этом общее число конечных

элементов в модели составляло 15000...16000 шт. Учитывая, что при тензометрировании дисков на разгонных стендах определяют постоянную ( $\sigma_m$ ) и переменную ( $\sigma_a$ ) составляющую напряжений на дне паза и на боковой поверхности ножки межпазового выступа соответственно (В и А, рис. 1), для повышения точности расчета выполнялось сгущение сетки конечных элементов в этих зонах. Для определения величины теоретического концентратора напряжений ободную часть диска подвергали консольному изгибу и растяжению с такой амплитудой, при которой максимальные напряжения в "выкружке" паза не превышали предела текучести сплава. Величину теоретического концентратора напряжений определяли как отношение среднего значения максимальных напряжений по Мизесу в "выкружке" к напряжению на поверхности дна паза и на боковой поверхности ножки межпазового выступа:

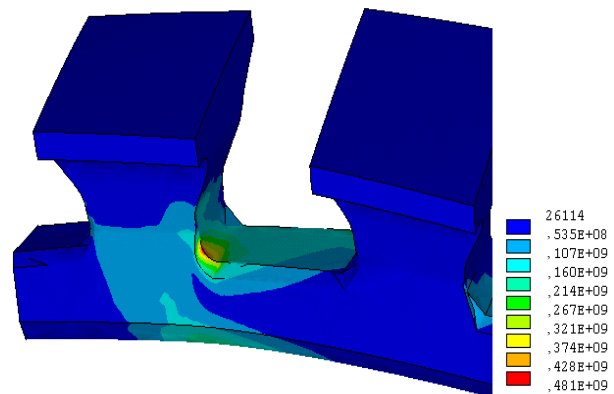


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений (Па) в ободной части диска компрессора высокого давления при консольном изгибе

Для определения постоянной составляющей цикла нагружения межпазового выступа, которая вызывается центробежными силами как самого выступа, так и за счет действия центробежных сил от лопаток, межпазовый выступ нагружали давлением со стороны опорных поверхностей. Значение теоретического коэффициента концентрации напряжений при растяжении определяли аналогично.

Коэффициенты концентрации напряжений оп-

ределяли для ободной части диска с различными конструктивными особенностями: без фаски скругления, с фаской, и для образца, повторно протянутого по ремонтной технологии с увеличенным радиусом "выкружки" у основания межпазового выступа. Результаты расчетов, величина переменных напряжений действующих на дне паза и постоянных напряжений на боковой поверхности ножки межпазового выступа, определенные путем тензометрирования диска компрессора, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Теоретические коэффициенты концентрации напряжений от "выкружки" паза и составляющие эксплуатационных напряжений паза

| № п/п | Вариант технологии | $\sigma_a^*$ , МПа | $\alpha^*$ | $\sigma_a$ , МПа | $\sigma_m^*$ , МПа | $\alpha^{**}$ | $\sigma_m$ , МПа |
|-------|--------------------|--------------------|------------|------------------|--------------------|---------------|------------------|
| 1     | Пр (без фаски)     | 10,0               | 2,73       | 27,3             | 171,2              | 2,78          | 476,0            |
| 2     | Пр + Сл            |                    | 1,38       | 13,8             |                    | 1,51          | 258,5            |
| 3     | Пр + Сл + ПСА      |                    | 1,38       | 13,8             |                    | 1,51          | 258,5            |
| 4     | Пр + Сл + УЗУ      |                    | 1,38       | 13,8             |                    | 1,51          | 258,5            |
| 5     | ППр + Сл + УЗУ     |                    | 1,22       | 12,2             |                    | 1,29          | 220,9            |

Примечание:

$\sigma_a^*$  – амплитуда переменных напряжений на поверхности дна паза диска;

$\sigma_m^*$  – постоянные напряжения, действующие на торцевой поверхности ножки межпазового выступа;

$\alpha^*$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений при изгибе;

$\alpha^{**}$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений при растяжении;

Пр – протягивание пазов с радиусом "выкружки" 0,6...0,8 мм;

ППр – повторное протягивание по ремонтной технологии с радиусом "выкружки" 1,0...1,2 мм;

Сл – слесарная обработка, скругление кромок фаской 0,5...0,8 мм;

УЗУ – ультразвуковое упрочнение стальными шариками Ø0,68 мм;

ПСА – обработка в псевдосжиженном слое абразива.

### Заключение

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния в выкружке паза диска компрессора типа "ласточкин хвост" позволили определить вели-

чину теоретического коэффициента концентрации напряжений, создаваемого суперпозицией концентраций напряжений непосредственно от "выкружки" паза и радиуса скругления кромок. Установлено, что скругление кромок паза и увеличение радиуса "выкружки" в исследованном диапазоне приводят к снижению величины концентрации напряжений и, следовательно, к снижению величины эксплуатационных нагрузок.

Полученные результаты позволили определить постоянную и переменную составляющие эксплуатационных напряжений, действующих в зоне зарождения усталостных трещин и наиболее вероятного разрушения диска компрессора с учетом особенностей технологии его изготовления, что может быть использовано для построения модели прочностной надежности ободной части дисков компрессоров с пазами типа "ласточкин хвост".

### Литература

1. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей / И.А. Биргер, Б.Ф. Балашов, Р.А. Дульнев, и др. / Под ред. И.А. Биргера и Б.Ф. Балашова. – М.: Машиностроение, 1981. – 222 с.
2. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений: (Графики и формулы для расчета конструктивных элементов на прочность). – М.: Мир, 1977. – 302 с.
3. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях, анализ, предсказание, предотвращение / Пер. с англ. – М.: Мир. – 1984. – 624 с.
4. Брондз Л.Д. Технология и обеспечение ресурса самолетов. – М.: Машиностроение, 1986. – 184 с.

Поступила в редакцию 1.06.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Я. Качан, ОАО "Мотор Сич", Запорожье.