

3. Краснов С.Е., Семеряк Л.И. Исследование численным методом влияния случайных пульсаций потока на границу устойчивости работы компрессора ГТД. - Труды ЦИАМ, 1977, с. 56.

УДК 539.319:620.178.3

Г.Н.Г у т м в и

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
ЭЛЕМЕНТА ОБОДА ДИСКА ТУРБИНЫ
ПРИ УПРУГОМ И УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ

К числу ответственных деталей газотурбинного двигателя относятся диски турбины, разрушение которых приводит к тяжелым последствиям. На ряде дисков, наработка которых в составе изделия составила 4000-6000 ч, наблюдалось растрескивание усталостного характера у основания межпазовых выступов [1,2]. Имеет место также повреждение дисков в местах концентрации напряжений, в частности в зоне замковых соединений, связанные с малоцикловою усталостью [3].

Сопротивление усталости дисков турбины повышается после обработки микрошариками [4] или после термoplastического упрочнения пазов диска [5].

Экспериментальное исследование прочностных свойств полноразмерного диска имеет определенные трудности. Поэтому часто испытывают элементы обода диска с двумя-тремя межпазовыми выступами. Максимальные напряжения, действующие в зоне концентрации, определяются по формуле

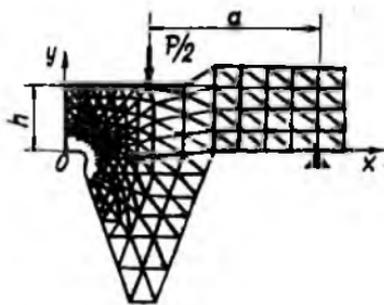
$$\sigma_{\max} = \alpha_{\sigma} \sigma_{\text{ном}}, \quad (1)$$

где $\alpha_{\sigma} = \alpha_{\sigma \text{упр}}$ - коэффициент концентрации упругих напряжений изгиба. Поскольку в литературе нет расчетных значений α_{σ} для елочных пазов дисков, коэффициент концентрации определяют экспериментально, например, по данным тензометрирования укрупненных моделей [4].

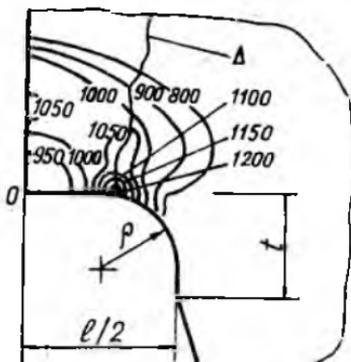
При испытаниях на малоцикловою усталость максимальные напряжения в зоне концентратора также могут быть подсчитаны по формуле (1), если принять α_{σ} равным коэффициенту концентрации упругопластических напряжений $\alpha_{\sigma \text{упр-пл}}$. Однако в отличие от $\alpha_{\sigma \text{упр}}$ коэффициент концентрации упругопластических напряжений зависит от уровня номинальных напряжений σ , следовательно, не может быть определен на укрупненной модели.

В настоящей статье кратко излагается методика и приводятся результаты расчета напряженного состояния и коэффициентов $\alpha_{\text{упр}}$ и $\alpha_{\text{упр-пл}}$ для элемента обода диска из сплава ЭИ698 методом конечных элементов (МКЭ).

Испытаниям на малоцикловую усталость подвергаются симметричные относительно середины паза образцы по симметричной схеме нагружения, поэтому для расчета использовалась половина образца (рис.1). При этом были сделаны некоторые упрощения профиля межпазового выступа вдали от зоны концентрации. Точки опоры и приложения нагрузки отмечены на рис. 1 треугольником и стрелкой соответственно. Расстояние между точками опоры равнолось 76 мм, $a = 26$ мм, $h = 10$ мм, ширина обода ≈ 20 мм, ширина паза $l = 6$ мм (рис.2).



Р и с. 1. Геометрические параметры и схема разбиения на конечные элементы половины исследуемого образца



Р и с. 2. Уругопластические напряжения σ_{xx} (МПа) в зоне концентратора (расчет) и расположение усталостной трещины Δ при номинальном напряжении 975 МПа

Указанная область разбивалась на треугольные конечные элементы с узловыми точками, расположенными в вершинах треугольника. Общее число конечных элементов составило 384, узловых точек - 226. Размеры элементов в зоне концентрации напряжений равнялись 0,2 - 0,3 мм. Численный расчет проводился в предположении, что при испытании образца реализуется плоское деформированное состояние, поскольку ширина элементов обода примерно в два раза больше его высоты в испытываемом сечении.

На первом этапе расчета определялись упругие напряжения в элементе обода. На втором этапе для расчета уругопластических напряжений использовалась обобщенная кривая уругопластического деформирования $\sigma_i - \epsilon_i$. На каждой итерации в соответствии с ал-

горитмом метода переменных параметров упругости [7] определялись новые значения модуля упругости E и коэффициента Пуассона μ для каждого треугольного элемента. Затем решалась упругая задача с найденными параметрами упругости, определялись упругопластические деформации и напряжения в элементах. Если относительное изменение интенсивности деформации по сравнению с предыдущей итерацией во всех конечных элементах не превышало 2%, расчет заканчивался, в противном случае выполнялась следующая итерация.

Изложенная методика расчета была реализована в виде комплекса программ на языке ФОРТРАН-4 для ЭВМ ЕС-1022. Анализ результатов расчета упругого и упругопластического состояния образца при изменении параметров t/l и p/l в пределах 0,1-0,5 и 0,17-0,33 соответственно позволил сделать следующие выводы:

1. Уровень напряжений в межпазовом выступе исследуемого элемента диска не превышает 10% от номинального. Следовательно, замена элочного профиля прямолинейным не вносит существенной погрешности в расчет напряжений в области дна паза элемента диска.

2. В средней части образца, исключая зону концентрации, реализуется напряженное состояние, близкое к чистому изгибу. На поверхности, противоположной дну паза, напряжения сжатия равны номинальным, вычисленным по формуле для изгиба балок прямоугольного сечения. Напряжения растяжения в зоне концентратора существенно выше номинальных. Максимум упругих растягивающих напряжений σ_{xx} достигается в месте перехода дна паза к его радиусной части.

3. Сопоставление результатов упругого и упругопластического расчетов показывает, что при увеличении нагрузки в образце последовательно образуются две зоны пластических деформаций. Сначала в месте перехода дна паза к его радиусной части возникает зона пластических деформаций растяжения. С ростом нагрузки первая зона увеличивается, полностью захватывая дно паза, а у противоположной поверхности возникает зона пластических деформаций сжатия. Наличие двух зон пластической деформации подтвердилось при испытаниях.

4. Зарождение усталостной трещины по данным расчета наиболее вероятно в месте перехода дна паза к радиусной части у основания межпазового выступа. Рассчитанное с помощью МКЭ поле напряжений на рис. 2 совмещено с трещиной Δ , полученной при экспериментальном исследовании сопротивления образца малоциклового разрушению. Совпадение расчетных и экспериментальных данных хорошее.

5. Коэффициент концентрации упругих напряжений определяется шириной и глубиной паза и радиусом галтели. Увеличение радиуса гал-

тели и уменьшение глубины паза при его неизменной ширине приводит к снижению коэффициента концентрации $\alpha_{\text{упр}}$ (рис. 3).

6. Аналогичный характер имеет зависимость коэффициента концентрации упруго-пластических напряжений от геометрии образца. Если $\alpha_{\text{упр}} \sigma_{\text{ном}} \leq \sigma_{\text{пл}}$, то оба коэффициента совпадают. Увеличение же уровня номинальных напряжений при той же геометрии приводит к уменьшению $\alpha_{\text{упр-пл}}$ по сравнению с $\alpha_{\text{упр}}$. Для описания полученных результатов при $\alpha_{\text{упр}} \sigma_{\text{ном}} > \sigma_{\text{пл}}$ и $\sigma_{\text{ном}} \leq 1000$ МПа предлагается следующая формула:

$$\alpha_{\text{упр-пл}} = \frac{\alpha_{\text{упр}}}{1 + 0,63 \left(\frac{\sigma_{\text{ном}}}{\sigma_{\text{пл}}} - \frac{1}{\alpha_{\text{упр}}} \right)^{1,43}}, \quad (2)$$

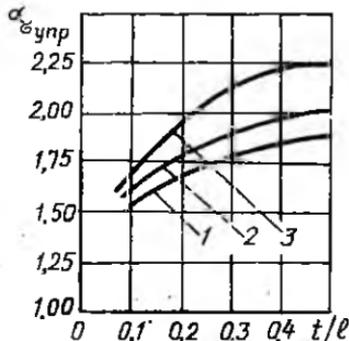
где $\sigma_{\text{пл}}$ - значение предела пропорциональности материала образца.

7. Экспериментально определенное в работе [4] значение коэффициента $\alpha_{\text{упр}}$ при $\rho/l = 0,25$; $t/l = 0,42$ равно 2,0; расчетное значение $\alpha_{\text{упр}} = 1,98$. Это подтверждает правильность применяемой методики и всего расчета.

Найденные коэффициенты концентрации упругих и упругопластических напряжений могут быть использованы при определении предела выносливости элементов обода диска турбины при испытаниях на много- и малоцикловую усталость.

Л и т е р а т у р а

1. Гецов Л.Б. Детали газских турбин (материалы и прочность). - Л.: Машиностроение, 1982. - 296 с.
2. Брагина Т.К., Ларичева Л.М. - Проблемы прочности, 1976, № 8, с. 78-87.
3. Демьянушко И.В., Биргер И.А. Расчет на прочность вращающихся дисков. - М.: Машиностроение, 1978. - 248 с.
4. Балашов Б.Ф., Петухов А.Н. - Проблемы прочности, 1979, № 9, с. 38-41.
5. Кравченко Б.А., Трофимов Н.Г., Крамаровский Б.И. и др. Повышение усталостной прочности деталей газотурбинных двигателей с кон-



Р и с. 3. Коэффициент концентрации упругих напряжений в дне паза диска в зависимости от его геометрии: 1 - $\rho/l = 0,33$; 2 - $\rho/l = 0,25$; 3 - $\rho/l = 0,17$

центраторами. - В кн.: Вибрационная прочность и надежность авиационных двигателей. Тез. докл. УШ Всесоюзной науч.-техн. конференции. - Куйбышев: КуАИ, 1981, с. 80.

6. Сегерлянд Л. Применение метода конечных элементов. - М.: Мир, 1979. - 392 с.

7. Термопрочность деталей машин /Под ред. И.А.Биргера и Б.Ф.Шора. - М.: Машиностроение, 1975. - 455 с.

УДК 621.778

А.М.Жижкин, Е.А.Иажуров, А.И.Онуфриенко

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ФИТИЛЕЙ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ИЗ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА МР

В настоящее время в машиностроении нашли широкое применение теплопередающие устройства на основе тепловых труб (ТТ). Большой интерес к таким устройствам проявляется при проектировании летательных аппаратов и их энергетических установок [1].

Одним из важнейших конструктивных элементов ТТ является фитиль. Условно различают три основных типа его конструкций: системы с открытыми канавками, пористые структуры с взаимосвязанными порами и составные конструкции, представляющие собой комбинацию первых двух типов.

Теплопередающие характеристики ТТ зависят от капиллярных гидравлических и теплофизических свойств фитилей.

Результаты исследования теплопередающих и эксплуатационных свойств ТТ показали технологические и экономические преимущества фитилей из МР в сравнении с традиционно используемыми [2] и позволили определить области их эффективного применения. Широкое внедрение в конструкцию ТТ фитилей из МР требует разработки технологии их изготовления и исследования влияния технологических факторов на работоспособность.

Анализ существующей технологии изготовления изделий из МР [3] показал невозможность использования традиционных методов для создания тонкостенных конструкций с большим соотношением длины L_f к поперечному размеру D_f ($L_f/D_f \geq 500$). В связи с этим целью работы является разработка способов изготовления фитилей ТТ из материала МР с соотношением $L_f/D_f \geq 500$.