

5. В и р г е р И.А., Ш о р р Б.Ф., Ш н е й д е р о в и ч Р.М. Расчет на прочность деталей машин. - М.: Машиностроение, 1966. - 702 с.

6. Т и м о ш е н к о С.П. Сопротивление материалов. Т. I. - М.: Физматгиз, 1960. - 521 с.

7. Б о р и с о в В.А. Влияние самоуплотнения и упругости прокладок на герметичность неподвижных соединений //Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Сб. науч.тр. - Куйбышев: КуАИ, 1972. - Вып. 51. - С. 149-160.

8. Е д е л ь к и н Ф.В. Коэффициент податливости радиальных уплотнений контактирующих фланцевых соединений //Там же, 1984. - Вып. II. - С. 70-78.

УДК 620.18:669

Д.С.Еленевский, М.Е.Колотников, К.Р.Святышев

#### ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЛОПАТОК ГТД В УСЛОВИЯХ СОВМЕСТНОГО ДЕЙСТВИЯ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОГО И ВИБРАЦИОННОГО НАГРУЖЕНИЯ

Лопатки турбин современных высокотемпературных ГТД являются одними из основных элементов, определяющих и регламентирующих надежность и ресурс изделия.

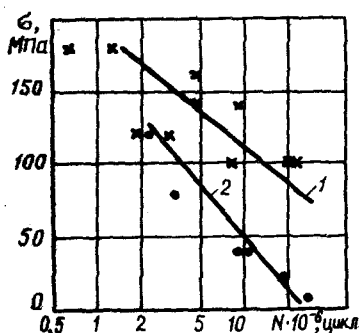
В процессе эксплуатации лопатки турбин подвергаются сложному многокомпонентному нагружению, включающему в себя термоциклические, статические и вибрационные нагрузки. Исследования долговечности лопаток турбин в условиях воздействия каждого из указанных факторов в отдельности дают возможность определить первичные характеристики сопротивляемости материала и конструкции данному виду нагружения, но не вскрывают влияния на эти характеристики одновременности воздействия двух или более факторов, хотя это влияние может быть весьма значительным.

Авторами настоящей статьи были проведены исследования долговечности охлаждаемых лопаток одного из высокотемпературных ГТД при одновременном воздействии термоциклических и вибрационных нагрузок. Исследования проводились в три этапа.

Первый этап заключался в определении первичных характеристик

сопротивления усталости лопаток при температуре  $T = 1050^{\circ}\text{C}$ . Второй этап исследований был связан с определением первичных характеристик сопротивления термической усталости лопаток при изменении температуры в цикле нагружения в интервале  $350 \dots 1050^{\circ}\text{C}$ . Третий этап был посвящен определению долговечности лопаток при совместном термоциклическом и вибрационном нагружении, изучению степени влияния на долговечность одного компонента нагружения при воздействии другого и формированию критериального уравнения, описывающего предельное состояние лопаток при двухкомпонентном термовибрационном нагружении.

Усталостные испытания лопаток проводились в изотермическом поле при температуре  $1050^{\circ}\text{C}$  при колебаниях лопатки по первой изгибной форме. В качестве возбудителя резонансных колебаний использовался электродинамический вибростенд, на рабочем столе которого в специальной установке монтировалась лопатка. Нагрев лопатки до требуемых температур осуществлялся с помощью печи сопротивления на силитовых стержнях. Испытания проводились стандартным методом с определением предела выносливости на базе  $N = 20 \cdot 10^6$  циклов. Результаты испытаний приведены в виде первичной кривой усталости лопаток на рис. 1.



Р и с. 1. Кривые усталости лопаток турбины: 1 - испытания при  $T = 1050^{\circ}\text{C}$ ; 2 - испытания при термонагружении в интервале температур  $350 \dots 1050^{\circ}\text{C}$  с размахом деформаций  $\Delta \varepsilon_T = 0,5\%$

Термическую усталость лопаток исследовали на специальном стенде ВЛ-2, разработанном совместно с СКТБ ИПП АН УССР и обеспечивающем проведение и программирование термоусталостных испытаний в широком диапазоне изменения температур, скоростей нагрева и охлаждения  $|I|$ .

Испытания лопаток проводились при изменении температуры в пределах от  $350$  до  $1050^{\circ}\text{C}$ . Возникавшие при испытаниях размахи температурных напряжений  $\Delta \sigma_T$  и упругопластических деформаций  $\Delta \varepsilon_T$  определялись расчетным методом, который заключался в последовательном решении задачи нестационарной теплопроводности и упругостатической задачи. Задачу нестационарной теплопроводности решали в

одномерной постановке путем разбиения исследуемого сечения лопатки на участки, представляющие собой плоскую стенку. Считалось, что перетекание тепла от участка к участку отсутствует. Краевые условия для задачи теплопроводности определялись экспериментально при проведении термометрирования лопатки в исследуемом сечении пера при термоциклировании.

Решение нестационарной задачи теплопроводности проводили на ЭВМ "СМ-2М", для чего была составлена программа, реализующая разработанный метод решения задач такого класса, изложенный в работе /2/. При решении сформированной задачи рассчитывались распределения температур в исследуемом сечении лопатки в дискретные моменты времени цикла термонагружения. Информация о тепловом состоянии сечения в фиксированный момент времени цикла нагружения являлась исходной для расчета температурных напряжений и упругопластических деформаций, возникающих в данный момент времени в исследуемом сечении лопатки.

Расчет температурных напряжений  $\sigma_T$  и упругопластических деформаций  $\epsilon_T$  проводили по стержневой теории в квазистатической постановке в соответствии с деформационной теорией термопластичности. При таком подходе возникающие в сечении лопатки температурные напряжения в заданный момент времени полностью определяются тепловым состоянием исследуемого сечения в этот момент и не зависят от скорости нагружения. Нормальные температурные напряжения вдоль оси лопатки рассчитывались по уравнению (I) в среднем сечении пера:

$$\sigma_T = E \left( \frac{\int_F E \alpha T dF}{\int_F E dF} + \frac{\eta \int_F E \eta \alpha T dF}{\int_F E \eta^2 dF} + \frac{\xi \int_F E \xi \alpha T dF}{\int_F E \xi^2 dF} - \alpha T \right), \quad (I)$$

где  $E$  - модуль упругости;

$\eta, \xi$  - координаты точек среднего сечения вдоль его приведенных главных осей;

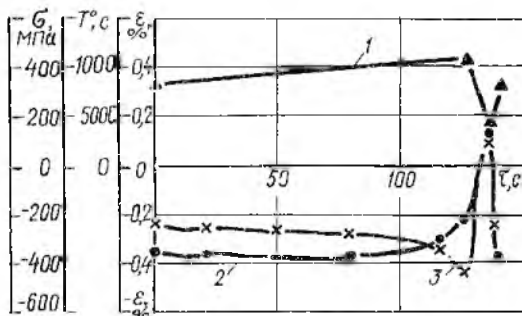
$\alpha$  - коэффициент теплового расширения;

$F$  - площадь среднего сечения;

$T$  - температура.

При расчете в пластической области использовался метод переменных параметров упругости, предложенный И.А.Биргером.

Напряжения и упругопластические деформации по уравнению (I) рассчитывались численным методом, причем программы расчета напряжений и определения теплового состояния были объединены. Огибающие, проведенные через рассчитанные значения напряжений и упругопластических деформаций в дискретные моменты цикла термонагружения определяют цикл изменения соответственно напряжений и деформаций при испытаниях. На рис. 2 изображены циклограммы изменения температур, напряжений и деформаций в месте разрушения лопаток при испытаниях по одному из режимов термонагружения.



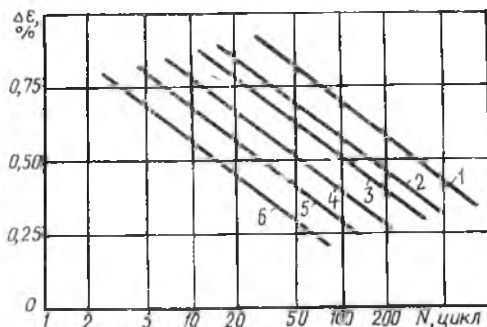
Р и с. 2. Циклограммы изменения температур (1), напряжений (2) и деформаций (3) в месте разрушения при проведении термоциклических испытаний

На рис. 3 приведена первичная кривая термоусталости лопаток при изменении температуры в диапазоне 350...1050<sup>0</sup>С (вибрационное нагружение отсутствовало).

Испытания лопаток в условиях совместного действия термоциклических нагрузок и вибрации проводились также на стенде ВЛ-2. При испытаниях с помощью электродинамического вибростенда возбуждались резонансные колебания лопатки. Величина переменных напряжений задавалась и поддерживалась в течение всего времени испытаний постоянной. Контроль и поддержание режима испытаний осуществлялись с помощью специальной системы регулирования. Одновременно лопатка подвергалась термоциклическому нагружению по заданной программе.

Испытания выявили существенное взаимное влияние действующих факторов на долговечность лопаток.

На рис. 1 изображена кривая усталости лопаток, построенная по результатам испытаний, проведенных стандартным методом, при одновременном воздействии термоциклического нагружения с размахом упругопластических деформаций в месте разрушения  $\Delta \epsilon = 0,5\%$ . Видно, что термоциклическое нагружение привело к значительному снижению предела выносливости лопаток на базе  $N = 20 \cdot 10^6$



Р и с. 3. Влияние виброн нагружения на термоциклическую долговечность: 1 - кривая термоусталости,  $\sigma_V = 0$ ; 2 -  $\sigma_V = 10$  МПа; 3 -  $\sigma_V = 20$  МПа; 4 -  $\sigma_V = 40$  МПа; 5 -  $\sigma_V = 80$  МПа; 6 -  $\sigma_V = 120$  МПа

циклов относительно предела выносливости, определенного по результатам испытаний лопаток в изотермических условиях при температуре  $1050^\circ\text{C}$ . С другой стороны, наличие вибрационного нагружения, даже с очень низким уровнем переменных напряжений, приводит к сильному уменьшению термоциклической долговечности (см. рис. 3). Так, наложение вибрационного нагружения с уровнем переменных напряжений  $\sigma_V = \pm 20$  МПа приводит к уменьшению термоциклической долговечности лопаток при размахе упругопластических деформаций  $\Delta \epsilon = 0,5\%$  в три раза.

Очевидно, что взаимное влияние на долговечность вибрационного и термоциклического нагружений не укладывается в рамки простого линейного суммирования долей повреждения, а описывается более сложными закономерностями.

Одним из возможных подходов к описанию долговечности лопаток при совместном действии термоциклических и вибрационных нагрузок является использование обобщенной диаграммы (рис. 4), где во 2-м и 4-м квадрантах построены кривые соответственно термической и механической усталости в относительных координатах, а в 3-м квадранте - предельная кривая для случая одновременного воздействия обоих факторов, которая может быть описана соотношением

Экспериментальные частотные зависимости продольных колебаний СК с учетом нелинейности можно аппроксимировать следующим выражением:

$$f = f_0 K_{\omega} . \quad (4)$$

Здесь  $f$  - частота колебаний при заданном виброускорении;  $f_0$  - собственная частота колебаний;

$$K_{\omega} = 1 - 0.1 \left( \frac{d_y}{90} \right)^{0.5} \left( \frac{z}{3} \right)^{0.8} \left( \frac{n_r}{\pi_r} \right)^{0.85} \frac{1}{j} \lg \omega , \quad (5)$$

где  $z$  - число слоев гофрированной оболочки;  $n_r$  - количество гофров;  $j$  - номер форм колебаний ( $\omega \gg 1$  м/с<sup>2</sup>).

Как видно из выражения (5), СК является системой с "мягкой" нелинейностью.

Демпфирующие свойства СК оцениваются коэффициентом поглощения

$$\psi = \frac{\Delta \Pi}{\Pi} ,$$

где  $\Delta \Pi$  - энергия, необратимо рассеянная за цикл колебаний (площадь петли гистерезиса);  $\Pi$  - амплитудное значение потенциальной энергии (площадь треугольника  $OMN$ , см. рис. 1).

Коэффициент  $\psi$  связан с логарифмическим декрементом колебаний  $\sigma$  соотношением [3]

$$\psi = 2\sigma . \quad (6)$$

Экспериментальное определение декрементов колебаний  $\sigma$  СК проводилось на электродинамическом вибростенде ВЭДС-400А. Декремент колебаний можно вычислить по формуле

$$\sigma = \frac{\omega}{4\pi f_p^2 A_p} . \quad (7)$$

Универсальность и удобство выражения (7) заключается в том, что для определения декремента необходимо знать только резонансные частоту  $f_p$  и амплитуду  $A_p$ .

Аналитическая зависимость декремента от амплитуды колебаний и конструктивных параметров имеет следующий вид:

$$\sigma = B_1 (z-1)^{0.5} d_y + B_2 \left( 1 + \frac{22}{\pi_r} \right) A^{\sigma} , \quad (8)$$

## Библиографический список

1. Т р о щ е н к о В.Г., Ц е й т л и н В.И., Ф л е н е в с к и й Д.С. и др. Автоматизированная система исследований несущей способности рабочих лопаток ГТД в условиях программного силового и теплового нагружения //Научные основы и методы повышения надежности и долговечности газострубинных двигателей. - Киев: Наукова думка, 1979. - С. 140-149.

2. К о л о т н и к о в М.Е., С т р и л е ц С.Ю., К о с т ы л е в В.Г., К и с е л е в Д.М. Оценка теплонапряженного состояния охлаждаемых лопаток турбин при термоциклических испытаниях //Автоматизированные моделирующие системы в технологических задачах. - Куйбышев: КПТИ, 1984. - С. 50-55.

УДК 629.7.036.017.1

И.И.Епишев, В.А.Кочуров

МЕТОД ПУЗЕЛОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ГТД  
ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Диагностирование авиационных ГТД с использованием термодинамических параметров в качестве носителей диагностической информации является одним из перспективных направлений работ по повышению надежности и увеличению сроков службы авиадвигателей. Применение методов параметрической диагностики позволяет обнаружить неисправности на ранней стадии их развития, до появления вторичных разрушений.

Неисправность, как правило, первоначально появляется в одном из узлов проточной части. При этом отклонение измеряемых термодинамических параметров, связанное с изменением состояния одного узла, может быть невелико и находиться в пределах допуска. Следовательно, необходимо вести постоянный контроль за уровнем параметров и проводить диагностирование и в тех случаях, когда значения измеряемых параметров находятся в пределах технических норм, но произошло одновременное отклонение нескольких из них от базовых значений.