

УДК 539.4

Н.П. ВЕЛИКАНОВА, П.Г. ВЕЛИКАНОВ

*Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева «КАИ», Россия***ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОСТНОЙ НАДЕЖНОСТИ ДИСКОВ  
ТУРБИН АВИАЦИОННЫХ ГТД В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

*В процессе длительной эксплуатации авиационных двигателей происходит износ деталей проточной части и вследствие этого ухудшаются их параметры. Это оказывает влияние на уровень нагруженности деталей двигателей и, в частности, на нагруженность таких его основных деталей как диски турбин. Кроме этого, по мере увеличения эксплуатационной наработки происходит изменение механических свойств и долговечности по параметру МЦУ материала дисков. В работе дана количественная оценка изменения запасов прочности и долговечности диска турбины в пределах эксплуатационной наработки 16000 часов.*

**Ключевые слова:** диск, турбина, двигатель, гражданская авиация, прочность, малоцикловая усталость, ресурс, надежность.

**Введение**

В процессе длительной эксплуатации диски турбин авиационных ГТД подвергаются циклическому термомеханическому нагружению. В связи с тем, что в авиации имеют место жесткие весовые требования к конструкции деталей, диски турбин как правило, являются высоконагруженными деталями. Действующие в них статические напряжения, особенно в зонах концентрации напряжений, превышают предел пропорциональности их материала, и в процессе циклического нагружения, характерного для авиационных двигателей, в опасном сечении дисков происходит накопление пластических деформаций, которое может привести к образованию трещин малоцикловой усталости. Под действием высоких напряжений и температуры в процессе эксплуатации происходит изменение механических характеристик материала дисков турбин [1].

Опыт эксплуатации отечественных и зарубежных авиационных двигателей показывает, что характеристики их в процессе выработки ресурса ухудшаются. Ухудшение характеристик происходит в основном в результате непрерывного износа деталей. Причиной износа являются механические и тепловые воздействия рабочего тела, сопровождающиеся выработкой воздушных и газовых уплотнений, эрозией и коррозией лопаток компрессора и турбины, изменением размеров проточной части двигателя, а также загрязнением его газозооного тракта. Вследствие этого изменяются основные параметры двигателя – уменьшается тяга двигателя, увеличивается скольжение роторов [2, 3]. Следовательно, в процессе эксплуатации изменяется и напряженно-деформированное состояние деталей турбин.

Из этого следует, что в процессе длительной эксплуатации изменяются запасы прочности и долговечности, которые являются характеристиками прочностной надежности.

Так как диски турбин представляют собой детали, разрушение которых приводит к опасным последствиям для самолета, то оценка их прочностной надежности на разных этапах эксплуатационной наработки является актуальной задачей.

Объектом исследования в данной работе является наиболее нагруженный диск турбины авиационного ГТД для гражданской авиации, эксплуатирующийся на двигателях НК-86 конструкции Генерального конструктора Н.Д. Кузнецова. Материал диска – жаропрочный сплав на никелевой основе ЭИ698-ВД.

**1. Условия нагружения**

При проведении расчетной оценки напряженного состояния диска турбины рассматривалась нагруженность от центробежных сил и неравномерного нагрева. Диск турбины рассчитывался при максимально возможной частоте вращения ротора при работе двигателя на взлетном режиме. Температура диска принималась по данным термометрирования на контурных двигателях в момент достижения максимального температурного перепада между ободом и ступицей диска.

Закон изменения температуры от ступицы к ободу диска принят линейным. Граничные условия на контурах диска задавались в напряжениях: на внешнем контуре задавали радиальные напряжения от центробежных сил лопаток и замковых частей обода диска; на внутреннем контуре напряжения

равнялись нулю, так как центральное отверстие диска свободно от нагрузки.

Характеристики материала диска – сплава ЭИ698-ВД приняты по данным ВИАМ.

Расчетное исследование напряженно-деформированного состояния диска определялось методом конечных элементов с использованием конечноэлементного комплекса ANSYS.

В результате расчета методом конечных элементов было установлено, что максимальные упругие окружные напряжения в опасном сечении диска составляют

$$\sigma_{\Sigma}^e = 1272 \text{ МПа},$$

эквивалентные упругие напряжения –

$$\sigma_{\text{ЭКВ}}^e = \sigma_1^e = 1203 \text{ МПа},$$

эквивалентные упругопластические напряжения –

$$\sigma_{\text{ЭКВ}}^p = \sigma_1^p = 783 \text{ МПа}.$$

Для определения циклической долговечности диска использовалось уравнение Мэнсона [4]:

$$\Delta \varepsilon = 3,5 \frac{(\sigma_B - \sigma_m)}{E} N_p^{-0,12} + \left( \ln \left( \frac{1}{1 - \psi} \right) \right)^{0,6} N_p^{-0,6}, \quad (1)$$

где  $\Delta \varepsilon$  – размах упругопластической деформации;

$\sigma_B$  – предел прочности материала диска;

$\sigma_m$  – среднее напряжение в цикле;

$E$  – модуль упругости Юнга материала диска;

$\psi$  – относительное сужение;

$N_p$  – число циклов нагружения до образования трещин малоциклового усталости.

Для определения параметров цикла упругопластического деформирования материала диска  $\Delta \varepsilon$  и  $\sigma_m$  использована предложенная в работе [5] схематизированная диаграмма построения цикла упругопластического деформирования материала диска. Расчет циклической долговечности диска выполнялся по программе, разработанной в ЦИАМ.

## 2. Влияние эксплуатационной наработки на параметры работы двигателя

В процессе длительной эксплуатации происходит изменение состояния деталей проточной части двигателя и, как следствие, ухудшение параметров работы двигателя. Для двигателя НК-86 в соответствии с законом регулирования частота вращения ротора турбины поддерживается постоянной, а температура газов растет.

Количественно это выражается следующими соотношениями [3]:

$$\begin{cases} \overline{\Delta n} = 0; \\ \Delta t_6^* = 0,687 \tau^{0,3765}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\overline{\Delta n}$  – приращение среднего значения частоты вращения ротора турбины;

$\Delta t_6^*$  – приращение среднего значения температуры газов за турбиной;

$\tau$  – эксплуатационная наработка в часах.

При проведении капитального ремонта параметры работы двигателя восстанавливаются до исходного уровня, т.е. до тех значений, с которыми двигатель начинал летную эксплуатацию.

## 3. Влияние эксплуатационной наработки на механические свойства и циклическую долговечность материала диска

Длительная эксплуатационная наработка способствует накоплению пластических деформаций в опасном сечении диска, вызывает деформационное старение материала. Это приводит к изменению механических свойств материала, особенно к снижению его пластических характеристик [1, 6]. Прочностные характеристики материала диска, такие, как предел прочности и предел текучести, остаются неизменными. Сопротивление материала дисков малоциклового усталости в процессе наработки снижается [7], т.к. эта характеристика зависит от уровня пластичности материала.

Для количественной оценки снижения пластичности материала диска была построена регрессионная модель:

$$\overline{\Psi}_{\tau} = \overline{\Psi}_{\text{исх}} \tau^{-0,0176}, \quad (3)$$

где  $\overline{\Psi}_{\text{исх}}$  – среднее значение относительного сужения сплава ЭИ698-ВД в исходном состоянии;

$\tau$  – эксплуатационная наработка в часах.

## 4. Запасы прочности и циклической долговечности дисков турбин как характеристики прочностной надежности и их изменение в процессе эксплуатации

Для оценки прочности и надежности дисков в течение требуемого ресурса действующие в диске напряжения и число циклов нагружения сравнивают с предельными значениями, допустимыми для их материала. Отношение предельного значения любого из этих параметров к действующему в конструкции представляет собой коэффициент запаса  $K_p$  по данному параметру  $p$ .

Запасы прочности дисков регламентируются специальными нормами. При оценке прочности и циклической долговечности запасы  $K$  сравнивают с минимально допустимой величиной.

Для рассматриваемой конструкции диска запас прочности по напряжениям определяется соотношением:

$$\hat{E}_\sigma = \sigma_B / \sigma_i, \quad (4)$$

так как температура в опасном сечении не превышает  $t=150^\circ\text{C}$  и вместо  $\sigma_{\text{дл}}$  можно использовать  $\sigma_B$ .

Для дисков турбины авиационных двигателей регламентируется также запас по циклической долговечности:

$$\hat{E}_N = N_p / N, \quad (5)$$

где  $N_p$  – число циклов до образования трещин малоциклового усталости;  $N$  – число циклов нагружения в процессе эксплуатации.

Для выбранных уровней эксплуатационной наработки проведена оценка запасов прочности и долговечности с учетом зависимостей (1)...(5).

В табл. 1, 2 приведены результаты расчета.

Таблица 1  
Результаты расчета

Наработка	$\tau=0$	$\tau=5000\text{ч}$	$\tau=10500\text{ч}$	$\tau=16000\text{ч}$
n, об/мин	5500			
$\Delta t, ^\circ\text{C}$	227	235	236	236
$\sigma_\Sigma^e, \text{МПа}$	1272	1286	1288	1288
$\sigma_i, \text{МПа}$	783	785	786	786
$\sigma_B, \text{МПа}$	1240			
$K_\sigma$	1,58	1,579	1,577	1,577

Таблица 2  
Результаты расчета

Наработка	$\tau=5000\text{ч}$	$\tau=10500\text{ч}$	$\tau=16000\text{ч}$
$\psi, \%$	26,2	25,9	25,7
$N_p, \text{цикл}$	24800	24700	24500
$N_q, \text{цикл}$	2500	5250	8000
$K_N$	9,92	4,7	3,06

Из результатов расчета следует, что для рассматриваемой конструкции диска турбины запас по статическим напряжениям  $K_\sigma$  в процессе длительной эксплуатации практически не изменяется. Для этой конструкции диска определяющим фактором является сопротивление малоциклового усталости: запас диска по циклической долговечности  $K_N$  в процессе эксплуатации изменяется более, чем в 3 раза при увеличении наработки с 5000 до 16000 часов.

### Выводы

При оценке работоспособности дисков турбин авиационных двигателей необходимо учитывать изменение их нагруженности и механических свойств материала в процессе длительной эксплуатации.

### Литература

1. Великанова Н.П. Влияние длительной эксплуатационной наработки на характеристики долговечности жаропрочных сплавов для деталей турбин / Н.П. Великанова, Н.А. Протасова // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2008. – № 3. – С. 41-45.
2. Влияние наработки в летной эксплуатации на изменение характеристик ТРДД / А.А. Мухин, Е.Д. Нестеров, Э.Л. Симкин, Г.С. Первозкин // Испытания авиационных двигателей. Межвуз. научн. сб. № 3. – Уфа, 1975. – С. 180-187.
3. О влиянии наработки в летной эксплуатации на ухудшение параметров двухконтурных турбореактивных двигателей / А.П. Буточников, Е.Д. Нестеров, С.С. Акимов, Э.Л. Симкин // Труды ЦИАМ. – 1975. – № 731. – С. 11.
4. Мэнсон С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость / С. Мэнсон; пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
5. Демьянушко И.В. Определение циклической долговечности при проектировании роторов авиационных ГТД / И.В. Демьянушко, Ю.М. Темис // В сб.: Проблемы прочности и динамики в авиадвигателестроении. – 1982. – Вып. 2. – С. 24-38 (ЦИАМ. Труды № 996).
6. Демьянушко И.В. Прочность и долговечность дисков авиационных двигателей и энергетических установок. Учебн. пос. / И.В. Демьянушко, Н.П. Великанова. – Казань, КГТУ им. А.Н. Туполева, 2008. – 143 с.

Поступила в редакцию 1.06.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры Б.Г. Мингазов, Казанский государственный технический университет, Казань.

### **ЗМІНА ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНІСНОЇ НАДІЙНОСТІ ДИСКІВ ТУРБІН АВІАЦІЙНИХ ГТД В ПРОЦЕСІ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

*Н.П. Великанова, П.Г. Великанов*

В процесі тривалої експлуатації авіаційних двигунів відбувається знос деталей проточної частини і внаслідок цього погіршуються їх параметри. Це робить вплив на рівень навантаженості деталей двигунів і, зокрема, на навантаженість таких його основних деталей як диски турбін. Окрім цього, у міру збільшення експлуатаційного напрацювання відбувається зміна механічних властивостей і довговічності по параметру МЦУ матеріалу дисків. У роботі дана кількісна оцінка зміни запасів міцності і довговічності диска турбіни в межах експлуатаційного напрацювання 16000 годин.

**Ключові слова:** диск, турбіна, двигун, цивільна авіація, міцність, малоциклова втома, ресурс, надійність.

### **CHANGE OF THE CHARACTERISTICS OF RELIABILITY FOR DISKS OF TURBINES AIR GTE DURING LONG OPERATION**

*N.P. Velikanova, P.G. Velikanov*

During long operation of air engines occurs of deterioration of details of a flowing part and thereof their parameters are worsened. It renders influence on a level loadings of details engines and, in particular, on loadings of such its basic details as disks of turbines. Besides, in process of increase of an operational operating time there is a change of mechanical properties and durability on parameter LCF of a material of disks. In work the quantitative estimation of change of safety factors and durability of a disk of the turbine is given within the limits of an operating time 16000 hours.

**Key words:** disk, turbine, engine, civil aircraft, durability, LCF, resource, reliability.

**Великанова Нина Петровна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры авиационных двигателей и энергетических установок Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева «КАИ», Казань, Россия, e-mail: adeu@adeu.kstu-kai.ru.

**Великанов Петр Геннадьевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры авиационных двигателей и энергетических установок Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева «КАИ», Казань, Россия, e-mail: pvelikanov@mail.ru.