

**Н.Н. Вассерман, Ю.П. Сметанников**

Пермский государственный технический университет

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНОЙ ГЛУБИНЫ ТРЕЩИНЫ НА ОСТАТОЧНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ДИСКА ГТД В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОГО СПЕКТРА НАГРУЗКИ**

Представлены данные, подтверждающие, что при учете принципа допустимости повреждения при проектировании двигателей ГТД необходимо иметь достоверные способы определения спектра действующей нагрузки, глубокие исследования трещиностойкости материалов в зависимости от эксплуатационных факторов и качественную модель расчета живучести диска при рабочей нагрузке.

По уровню механических, тепловых, аэродинамических повторных нагрузок диски ГТД относят к элементам машин, работающих в экстремальных условиях, когда в наиболее нагруженных зонах напряжения близки к пределу текучести материала. В подобных условиях трещины в образцах появляются после первых десятков циклов [1, 2], а период развития трещин до разрушения занимает 80 % долговечности образца. И хотя сложившаяся практика проектирования дисков ГТД решает задачу исключения возможности появления макротрещин, логично предположить, что диски все-таки работают с неконтролируемыми трещинами и их безопасная эксплуатация не гарантирована. Напрашивается и другой вывод. Если 80 % долговечности диска приходится на период развития трещины, то часть последнего без ущерба для безопасности полетов можно использовать для увеличения ресурса при условии, что поведение трещины тщательно изучено и его можно прогнозировать в каждом конкретном случае. По такому пути пошли в авиационной промышленности США, где в 1984 г. при проектировании ГТД был принят принцип допустимости повреждений [3]. Он предусматривает эксплуатацию двигателя с дефектами материала и производства типа трещин. В результате повышена безопасность полетов, увеличен ресурс двигателя. Достигнут ресурс 12 000 полетных циклов. Отношение достигнутой экономии к дополнительным расходам, связанным с исследованиями для реализации принципа допустимости повреждений, равно 40.

В настоящей работе делается попытка определить зависимость остаточной долговечности диска ГТД из сплава ЭП742ИД от начальной глубины трещины в условиях реального спектра нагрузки, а также оценить влияние циклической и статической составляющих спектра нагрузки на живучесть

диска. Выбор материала диска обусловлен тем, что для сплава ЭП742ИД проведены достаточно подробные исследования влияния на скорость развития трещины таких эксплуатационных факторов, как уровни циклической и статической нагрузок, температура, асимметрия цикла, частота циклирования, длительность действия статической нагрузки [4, 5]. Результаты экспериментального исследования зависимости скорости роста трещин в сплаве ЭП742ИД от эксплуатационных факторов (диаграммы развития трещин) были обобщены и приведены к виду:

$$V = V_0 \left( \frac{K_1 - K_{t0}}{K_{fc} - K_1} \right)^m \quad (1)$$

при циклической нагрузке и

$$V_n = V_{0n} \left( \frac{K_1 - K_{t0n}}{K_c - K_1} \right)^{m1} \quad (2)$$

при статической нагрузке.

Здесь  $V, V_n$  – скорости роста трещины соответственно при циклической и статической нагрузке;

$K_1$  – максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН);

$V_0, V_{0n}$  – коэффициент, имеющий размерность скорости роста трещины;

$K_{t0}, K_{t0n}$  – пороговое значение КИН соответственно при циклической и статической нагрузке;

$K_{fc}, K_c$  – критическое значение КИН соответственно при циклической и статической нагрузке;

$m, m1$  – показатели степени.

Методами регрессивного анализа результатов экспериментальных исследований получены зависимости параметров кривой скорости развития трещины усталости от асимметрии цикла  $R$  и температуры  $T$ :

$$V_0(R, T) = 10^{(-5,28 - 2,4 \cdot 10^{-3} T - 2,6R + 2,7 \cdot 10^{-6} T^2 - 3,05 \cdot 10^{-3} RT - 8,5 \cdot 10^{-1} R^2)},$$

$$K_{t0}(R, T) = 16,26 - 4,9R - 6,4 \cdot 10^{-3} T + 31,9 \cdot 10^{-4} RT - 1,4 \cdot 10^{-6} T^2,$$

$$m(R, T) = 2,07 + 1,1 \cdot 10^{-3} T - 2,7R - 3,5 \cdot 10^{-6} T^2 + 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot RT + 1,3R^2.$$

Критическое значение КИН при циклической нагрузке не зависит от температуры и асимметрии цикла и принималось равным  $K_{fc} = 126 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ .

Параметры диаграммы развития трещины при статической нагрузке приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры диаграммы развития трещины  
при статической нагрузке**

Температура, °С	$V_{оп}$ , м/ч	$Kt_{оп}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	$m1$	$K_c$ , МПа·м <sup>1/2</sup>
600	0,0001	74	0,8	140
700	0,0206	24	1,8	130

Спектр нагрузки ГТД в полетном цикле, определяемый на основании измерений с помощью датчиков, установленных непосредственно на деталях двигателя, состоит из чередования блоков циклической нагрузки с различными коэффициентами асимметрии и температурой и блоков выдержек при постоянных напряжениях, зависящих от меняющихся рабочих условий, связанных со взлетом, маневрированием, горизонтальным полетом и посадкой.

В табл. 2 представлен типичный спектр нагрузки диска ГТД в полетном цикле. Именно этот спектр использовали при расчете остаточной долговечности диска с трещиной различной начальной длины.

Таблица 2

**Типичный спектр нагрузки диска ГТД в полетном цикле**

№ блока	Максимальное напряжение цикла, МПа	Коэффициент асимметрии цикла $R$	Число циклов в блоке	Температура в блоке, °С	Статическое напряжение в блоке, МПа	Продолжительность блока, ч
1	104,6	0,636	4	200	0	0
2	209,2	0,318	1	500	0	0
3	642	0	1	700	642	0,05
4	532	0,127	1	300	532	0,6
5	242,5	0,725	50	500	456	0,49
6	299,5	0,419	15	300	0	0
7	351,8	0,189	5	300	0	0
8	399,4	0,833	50	500	0	0
9	456,4	0,604	15	600	0	0
10	508,7	0,439	5	700	350	0,05
11	368,2	0,846	1	200	100	0,63

Средствами Mathcad составлена программа расчета числа полетных циклов до разрушения в зависимости от размера начальной полуэллиптической трещины.

При расчете была использована гипотеза линейного суммирования скоростей роста трещины от циклической и статической нагрузки. И хотя такая гипотеза не всегда правомерна, она позволяет оценить влияние отдельных составляющих спектра нагрузки на остаточную долговечность диска.

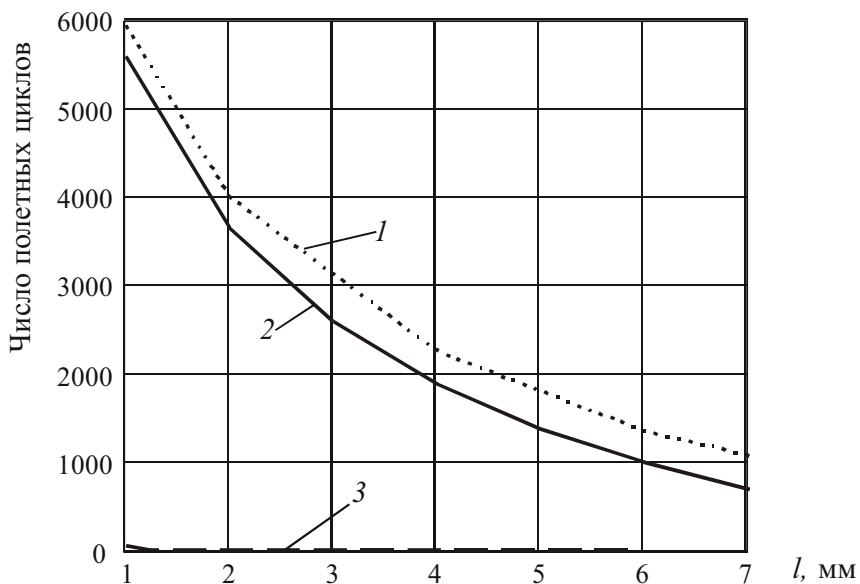


Рис. 1. Зависимость числа полетных циклов до разрушения от глубины начальной трещины: 1 – число полетных циклов до разрушения только от спектра циклической нагрузки; 2 – число полетных циклов до разрушения от спектра циклической нагрузки и спектра статической нагрузки при температуре 600 °С; 3 – число полетных циклов до разрушения от спектра циклической нагрузки и спектра статической нагрузки при температуре 700 °С

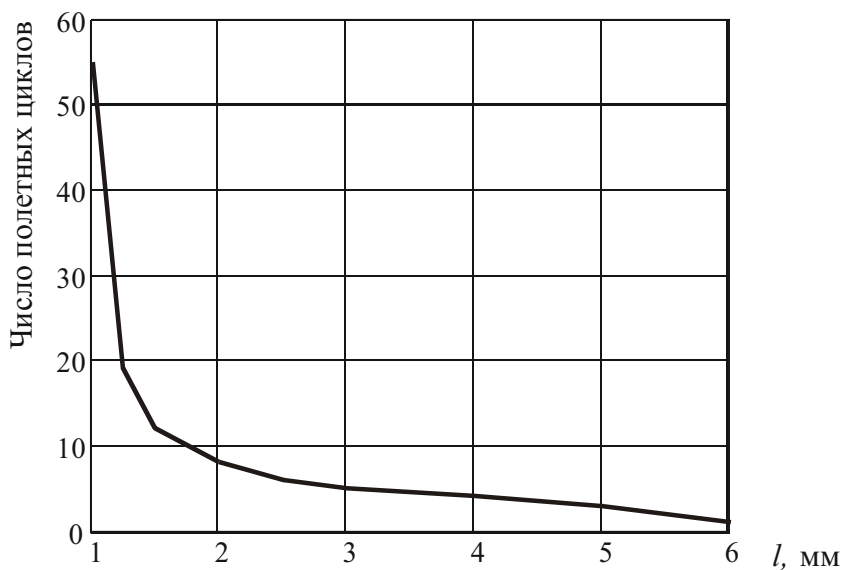


Рис. 2. Зависимость числа полетных циклов от начальной глубины трещины при совместном действии статических блоков спектра нагружения при температуре 700 °С и циклических блоков

Для решения поставленной задачи рассчитывали остаточную долговечность диска в зависимости от размера трещины для трех типов спектра нагрузки: при действии только блоков циклической нагрузки полетного цикла (рис. 1, кривая 1), при действии циклической нагрузки и статической нагрузки при температуре 600 °С (рис. 1, кривая 2) и, наконец, при действии циклической нагрузки и статической нагрузки при температуре 700 °С (рис. 1, кривая 3, рис. 2).

Анализ результатов расчета показывает, что остаточная долговечность диска с трещиной в значительной степени зависит от глубины начальной трещины и от температуры статической составляющей спектра нагрузки. Причем влияние статической составляющей спектра нагрузки усиливается с увеличением глубины трещины. Так, при температуре 600 °С при глубине трещины, равной 1 мм, долговечность диска за счет статической составляющей уменьшилась на 7 %, при трещине 4 мм – на 15 %, при трещине 7 мм – на 40 %. Повышение температуры статической составляющей на 100° привело к снижению живучести диска более чем на два порядка, и уже при глубине трещины, равной 2 мм, остаточная долговечность равна восьмиполетним циклам, т.е. живучесть диска в этом случае полностью определяется статической составляющей спектра нагружения.

Полученные результаты расчета свидетельствуют о том, что для введения при проектировании двигателей ГТД принципа допустимости повреждения необходимы достоверные способы определения спектра действующей нагрузки, глубокие исследования трещиностойкости материалов в зависимости от эксплуатационных факторов и качественная модель расчета живучести диска при рабочей нагрузке. Отсутствие любого из этих требований может привести к нежелательным последствиям при эксплуатации изделий.

### **Список литературы**

1. Механика малоциклового разрушения / М.А. Махутов [и др.]. – М.: Наука, 1986. – 264 с.
2. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
3. Требования ВВС США к авиационным двигателям с учетом принципа допустимости повреждений // Новости зарубежной науки и техники. Серия: авиационное двигателестроение. – 1987. – № 1. – С. 17–23.
4. Влияние частоты циклического нагружения и длительности выдержки при статической нагрузке на характеристики трещиностойкости материалов дисков ГТД при повышенных температурах / Н.Н. Вассерман [и др.] // Динамика и прочность механических систем; Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1993. С. 23–28.
5. Закономерности развития усталостных трещин в материалах дисков ГТД / Н.Н. Вассерман [и др.] // Динамика и прочность механических систем; Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1990. – С. 30–35.

Получено 28.04.2010