

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО НАГРУЖЕНИЯ СТАНДАРТНЫХ ГЛАДКИХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАЛОЦИКЛОВОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД

© 2006 А.М. Портер, Г.П. Матвеев, С.А. Букатый, А.Л. Хохрин

ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

Изложены результаты апробирования методики определения малоциклового долговечности деталей ГТД по результатам испытаний стандартных гладких образцов на основе использования характеристик интенсивности размаха деформаций цикла нагружения.

Малоцикловая усталость (МЦУ) определяет долговечность основных деталей ГТД и, следовательно, надежность и ресурс всего двигателя. Расчетно-экспериментальный метод определения ресурса, основанный на использовании кривых МЦУ, предполагает, что механизм накопления повреждений в гладких образцах и в зонах концентрации напряжений и деформаций основных деталей (ОД) одинаков. Однако, результаты экспериментальных исследований [1] свидетельствуют о значительном расхождении (превышении) фактической долговечности натуральных деталей и стандартных круглых образцов. Одной из причин такого расхождения является существенное отличие не только по размерам, но и по однородности напряженно-деформированного состояния (НДС) области с максимальными напряжениями в гладких образцах и в зонах концентрации напряжений ОД. При этом циклы деформаций в зонах концентрации напряжений ОД приближаются к условиям жесткого нагружения.

Известно, что МЦУ деталей существенно зависит от пластических свойств материала и образование трещин в какой-либо локальной зоне происходит после исчерпания способности материала пластически деформироваться. Поэтому в данной работе рассматривается решение проблемы прогнозирования долговечности ОД на основе использования характеристики интенсивности размаха деформаций цикла нагружения.

На основе анализа НДС детали при рабочих и экстремальных условиях эксплуатации выявляют критические области с наибольшей по величине концентрацией напряжений и деформаций. На основе ре-

шения упруго-пластической задачи (например, в пакете ANSYS) определяют максимальные значения, размахи главных деформаций и коэффициент асимметрии цикла с разделением деформаций на упругую и пластическую составляющие. Затем вычисляют для обеих составляющих интенсивности размахов деформаций:

$$\Delta \varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\Delta \varepsilon_1 - \Delta \varepsilon_2)^2 + (\Delta \varepsilon_2 - \Delta \varepsilon_3)^2 + (\Delta \varepsilon_3 - \Delta \varepsilon_1)^2}.$$

Чтобы получить величину эквивалентного размаха продольной деформации при одноосном напряженном состоянии выразим соответствующие размахи деформаций в направлении главных осей:

$$\Delta \varepsilon_1 = \varepsilon, \quad \Delta \varepsilon_2 = \Delta \varepsilon_3 = -\mu \Delta \varepsilon_1 = -\mu \Delta \varepsilon,$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Подставляя эти выражения в формулу для $\Delta \varepsilon_i$, получаем

$$\Delta \varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\Delta \varepsilon(1+\mu)^2 + 0 + \Delta \varepsilon(1+\mu)^2} = \Delta \varepsilon \frac{2(1+\mu)}{3}.$$

Следовательно,

$$\Delta \varepsilon = \frac{3}{2(1+\mu)} \Delta \varepsilon_i.$$

Тогда, учитывая, что при пластической деформации $\mu = 0,5$, величину эквивалентного размаха продольной деформации для стандартных образцов можно представить следующим образом:

$$\Delta \varepsilon = \frac{3}{2(1+\mu)} \Delta \varepsilon_i^y + \Delta \varepsilon_i^n,$$

где $\Delta \varepsilon_i^y$ $\Delta \varepsilon_i^n$ – соответственно упругая и пластическая составляющие интенсивности размаха деформаций.

Искомую долговечность детали определяют по найденной $\Delta \varepsilon$ и кривой МЦУ, по-

строенной по результатам испытаний гладких стандартных образцов. В соответствии с рекомендациями ЦИАМ эта деформация $\Delta \epsilon$ может быть использована при определении долговечности деталей по формуле Мэнсона [2].

Апробацию данной методики проводили на натуральных образцах-сегментах (рис. 1), вырезанных из ободной части дисков 4 ступени ТНД. Одним из наиболее нагруженных и опасных мест дисков является дно впадины замка, являющееся концентратором напряжений и деформаций.

Поэтому в качестве нагружения был выбран изгиб, при котором создавалось напряженно-деформированное состояние материала дна, максимально приближенное к реальным условиям. Размеры образцов, схема и устройство для их нагружения показаны на рис.2 и 3.

Расчет НДС образца проводился на основе объемной конечно-элементной модели состоящей из 8-ми узловых объемных элементов (SOLID45). Центральная часть елочного паза, показанная на рис.4, разбита

20-ти узловыми объемными элементами (SOLID95). Общее количество элементов составило 144800 шт. При дальнейшем уменьшении размеров элементов существенного изменения результатов расчета НДС образца не происходило.

На рис.5 приведено распределение интенсивности деформаций по центральному сечению паза. Расчеты показывают, что при указанной выше схеме нагружения максимальные напряжения действуют в центральной части дна паза образца. При этом зона образования трещины, полученной при испытаниях натуральных образцов обода диска, и данные анализа случаев обнаружения трещин по дну паза в дисках ТНД в процессе эксплуатации совпали с расчетной зоной максимальных напряжений.

Испытания натуральных образцов проводились при мягком цикле нагружения (т.е. при $P=\text{const}$) на установке МТС-322 мощностью (с максимальным усилием) 250 кН.



Рис.1. Опытные образцы замок-елка

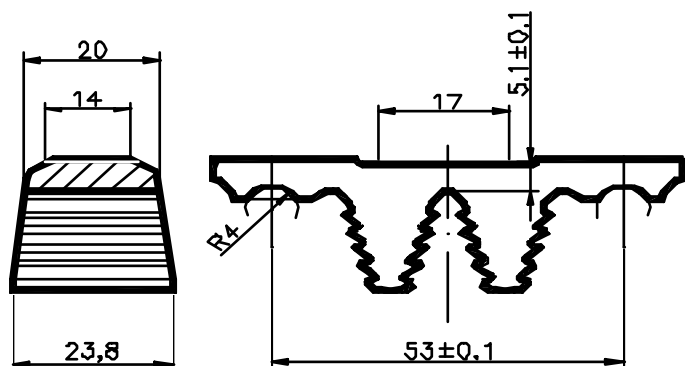


Рис.2. Схема нагружения

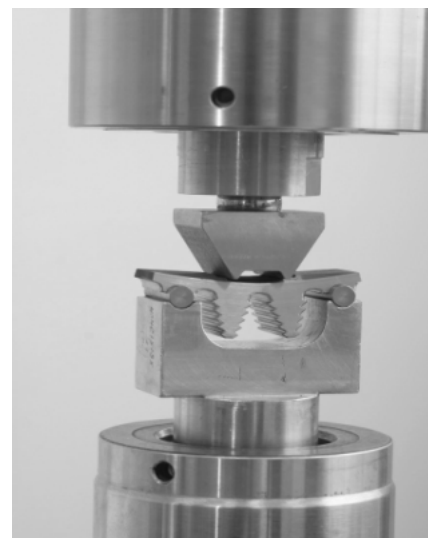


Рис.3. Устройство для нагружения

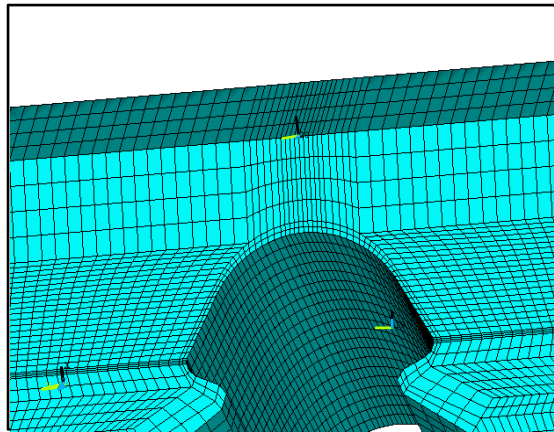


Рис.4. Разбивка центрального паза

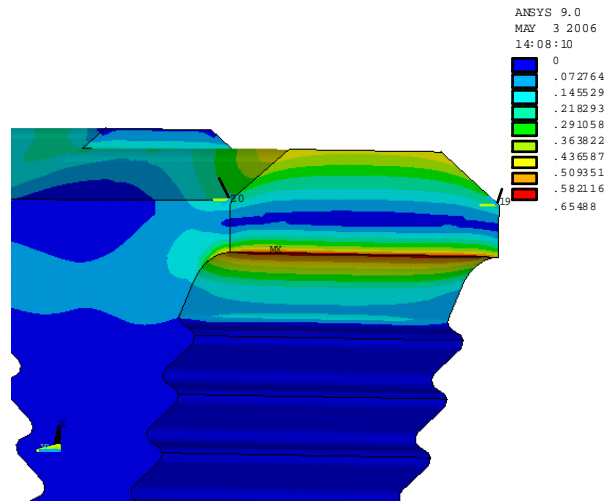


Рис.5. Распределение интенсивности деформаций

В процессе нагружения образцов постоянной нагрузкой осуществлялось измерение их прогибов. Для удобства анализа результатов зависимость текущих прогибов a_i от количества циклов N отображается в относительных величинах $f = a_i / a_{cp}$, где

$$a_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$$

На рис.6 показана типичная зависимость $f(N)$ при $P=15000$ Н для образцов, вырезанных из нового (1) и бывшего в эксплуатации (2) дисков (БЭ). Результаты измерений прогибов образцов под нагрузкой в процессе циклирования показали, что ма-

териал в зоне концентрации напряжений и деформаций работает в условиях, близких к жесткому нагружению. Это обусловлено тем, что область пластических деформаций составляет не более 5 % от общей площади поперечного сечения образца. По этой же причине различие между НДС образца и реального диска в зонах концентрации напряжений можно считать незначительным. Только с момента образования в образце трещины начинается прогрессирующее увеличение прогибов, завершающееся доломом.

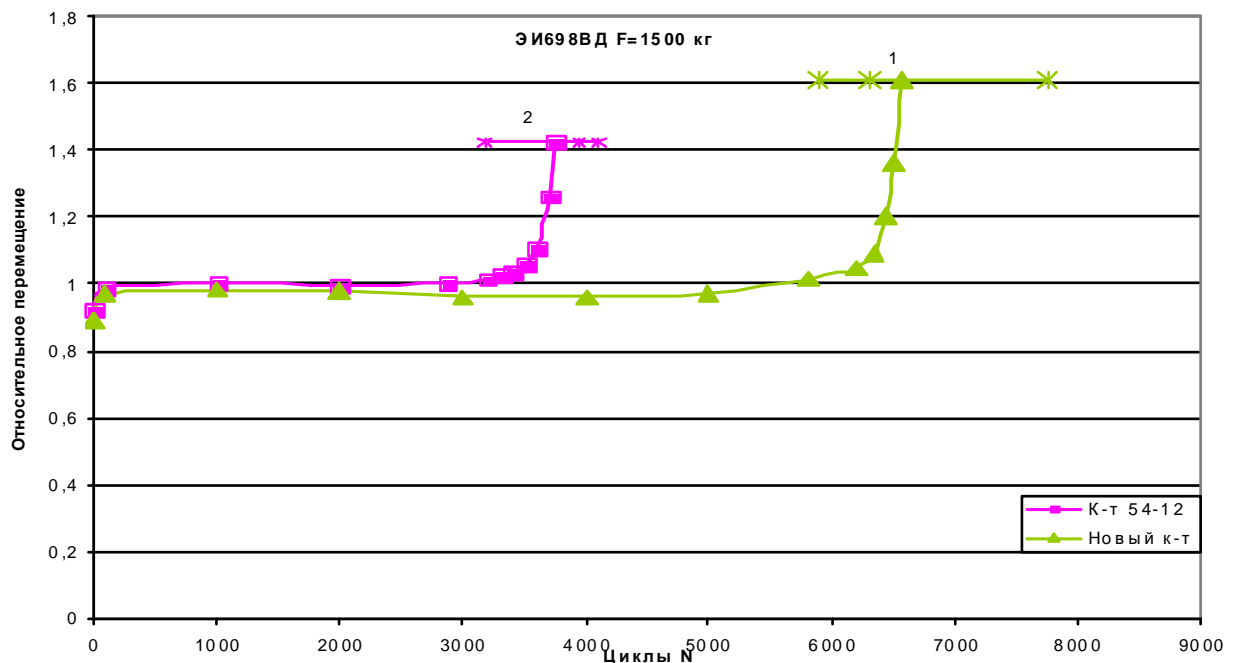


Рис.6. Относительные величины прогибов натуральных образцов из материала ЭИ698ВД новых –1 и БЭ –2 дисков при $P=15000$ Н при циклическом нагружении

Наблюдающееся в процессе циклирования некоторое уменьшение прогибов образцов из нового диска свидетельствует об упрочнении материала при пластической деформации. Отсутствие упрочнения на образцах из дисков БЭ говорит о существенно меньшей пластичности материала и истощении его способности к упрочнению, о чем свидетельствует и уровень относительных прогибов образцов в момент разрушения: ~1,4 и ~1,6 соответственно для дисков БЭ и нового диска. Снижение пластических свойств материала приводит к уменьшению циклической долговечности образцов, которое, например, при $P=15000$ Н составляет почти 100 %, т.е. в 2 раза.

Испытания стандартных гладких образцов проводились по жесткому циклу нагружения при нормальных условиях ($t = +20^{\circ}\text{C}$) с частотой нагружения $f = 0,1$ Гц по отнулевому трапецеидальному циклу до полного разрушения образца. На каждом уровне нагружения испытывалось по 3 образца, и по средним значениям для каждого варианта строились зависимости $\sigma = F(N_{ц})$.

Результаты экспериментальных исследований, показанные в таблице и на рис. 7, показывают хорошую сходимость средних значений долговечностей, определяемых расчетно-экспериментальным методом с использованием кривой МЦУ и путем испытания натуральных образцов-сегментов.

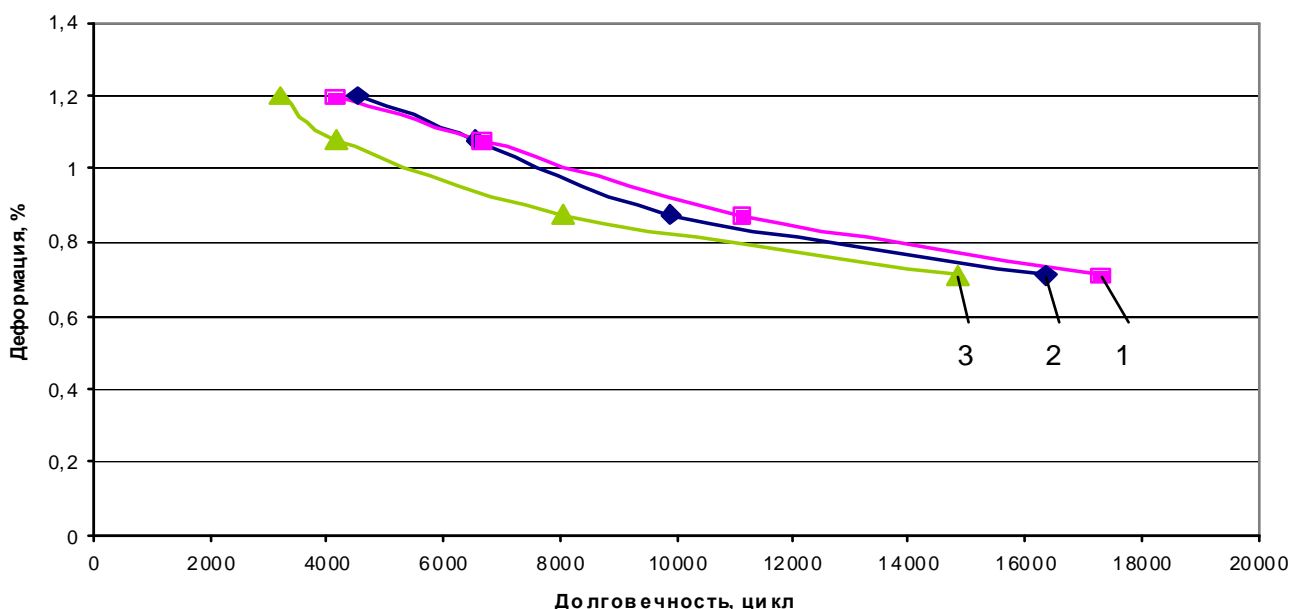


Рис. 7. Результаты испытаний гладких стандартных образцов и натуральных образцов-сегментов 1 – натуральный образец; 2 – стандартный образец; 3 – расчет по формуле Мэнсона

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований

Размах эквивалентных деформаций образцов $\Delta\epsilon$, %	Циклическая долговечность гладкого образца. N циклов	Циклическая долговечность образцов из ободной части диска ТНД N циклов	Расчет циклической долговечности дисков по модифицированной формуле Мэнсона N циклов
1,2	4549	4097	3215
1,078	6565	6652	4178
0,876	9916	11096	8050
0,712	16339	17262	14818

По результатам расчета НДС выполнен расчет циклической долговечности дисков в зонах концентрации напряжений. По модифицированной формуле Мэнсона:

$$\Delta \varepsilon_t = \left(\ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0.6} \cdot N^{-0.6} + \frac{3.5}{E} \cdot (\sigma_B - \sigma_M) \cdot N^{-0.12},$$

где $\Delta \varepsilon_t$ – размах продольной деформации гладкого образца при одноосном растяжении-сжатии за цикл нагружения; N – прогнозируемая долговечность до появления трещины; σ_M – среднее напряжение в цикле.

Из таблицы 1 видно, что результаты расчета по формуле Мэнсона дают существенно заниженные величины долговечности.

Список литературы

1. Шереметьев А.В. Прогнозирование циклической долговечности и установление ресурсов основных деталей авиационных ГТД. Материалы X Международного конгресса двигателестроителей. Авиационно-космическая техника и технология, № 8, 2005.–5с.
2. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. –702с.

ON SELECTION OF EQUIVALENT LOADING OF STANDARD SMOOTH SPECIMENS FOR DETERMINING LOW-CYCLE DURABILITY OF GAS-TURBINE ENGINE MAJOR COMPONENTS

© 2006 A.M. Porter, G.P. Matveyenko, S.A. Bukatyi, A.L. Khokhrin

The results of the procedure for determining low-cycle durability of gas-turbine engine parts evaluation are presented. The evaluation is based on the results of standard smooth specimens tests, with application of the loading cycle deformation amplitude intensity characteristics.