

Кочерова Е.Е., Суртуганова Ю.Н., Киселёв П.Е., Кужахметов Б.Л.

## ОЦЕНКА МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ДЕТАЛЕЙ НА БАЗЕ ИСПЫТАНИЙ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ОТНУЛЕВОМ ЦИКЛЕ «МЯГКОГО» НАГРУЖЕНИЯ

Для проведения расчёта долговечности деталей газотурбинных двигателей (ГТД), повреждаемых по малоцикловой усталости (МЦУ), согласно «Нормам прочности газотурбинных двигателей...» ФГУП ЦИАМ, необходимо проводить испытания вырезанных из соответствующих деталей (или заготовок) образцов при «жёстком», то есть с заданным циклом деформации, нагружении с различными коэффициентами асимметрии цикла деформирования и с различными выдержками при максимальной деформации цикла для учёта влияния ползучести при повышенных температурах. Для обеспечения достоверности расчёта испытания должны быть проведены в необходимом для статистической обработки объёме.

Для проведения анализа МЦУ основных деталей, для которых ресурс устанавливается в часах и циклах на стадии предварительных и сравнительных оценок, рекомендована методика расчётного определения циклической долговечности  $N$  детали (образца) с использованием модифицированного уравнения Мэнсона-Коффина [1]

$$\Delta \varepsilon_i = \left[ \ln \frac{1}{1 - \psi(t, T)} \right]^{0.6} N^{-0.6} + \frac{3,5 [\sigma_{ds}(t, T) - \sigma_m]}{E(T)} N^{-0.12},$$

где  $\Delta \varepsilon_i$  – интенсивность размахов деформаций в опасной точке детали, приведённая к деформированному состоянию гладких образцов;  $\psi(t, T) = \psi_0(T) \cdot t^m$  – коэффициент поперечного сужения материала, соответствующий максимальной температуре  $T$  и времени  $t$ ;  $\psi_0(T)$  – коэффициент поперечного сужения в исходном состоянии (нулевом цикле);  $m$  – постоянная, характеризующая скорость охрупчивания материала, которая для дисковых жаропрочных сплавов при отсутствии экспериментальных данных  $\psi_0$  может быть принята:  $m = -0,1$  при  $T \geq 650^\circ\text{C}$  и  $m = 0$  при  $T < 650^\circ\text{C}$ ;  $\sigma_{ds}(t, T)$  – предел длительной прочности, соответствующий максимальной температуре  $T$  и времени  $t$  действия расчётного режима;  $\sigma_m$  – интенсивность среднего напряжения цикла (среднее напряжение цикла учитывается только в случае, если  $\sigma_m > 0$ );  $E(T)$  – модуль продольной упругости при максимальной температуре  $T$  цикла в рассчитываемой точке детали.

Значения величин  $\sigma_{si}(t, T)$ ,  $\sigma_{mi}$  и  $E(T)$ , используемые в уравнении Мэнсона-Коффина, принимаются средними.

Целью данной работы является подтверждение возможности достижения достаточной достоверности оценки долговечности деталей, повреждаемых по механизму МЦУ, с использованием модифицированного уравнения Мэнсона-Коффина и формирование предложений по порядку его использования. Вначале определяются группы испытанных образцов. Перечислим признаки принадлежности к конкретной группе, которые должны быть одинаковыми:

- материал;
- принадлежность к детали;
- радиус в основании концентратора;
- температура испытаний.

Предложен следующий порядок действия для каждой группы испытанных образцов:

- формирование осесимметричной конечно-элементной модели стандартного образца без резьбовых захватов в САЕ пакете ANSYS в концентраторе, густота сети 20-30 узлов на радиусе концентратора вполне достаточна;
- формирование необходимого набора свойств материала для температуры испытания, в том числе «истинных» кривых деформирования в мультилинейной форме с определением для материала гипотезы кинематического упрочнения;
- формирование условий закрепления образца по одному из торцев;
- формирование нескольких (обычно достаточно 3-4 для получения установившегося цикла нагружения) пилообразных отнулевых (так как практически все эксперименты проводились с таким нагружением) циклов нагружения образца каждым осевым усилием, соответствующим экспериментам;
- проведение квазистатического анализа нагружения модели образца на каждом уровне осевого усилия;
- определение для установившегося цикла деформирования компонентов тензоров упругих и пластических деформаций для состояний нагрузки и разгрузки, а также интенсивностей размахов упругой, пластической и полной деформации;
- получение из модифицированного уравнения Мэнсона-Коффина расчётного значения циклической долговечности для каждого уровня нагружения.

Ранее применявшиеся подходы к анализу долговечности по сопротивлению МЦУ строились на использовании результатов циклических испытаний вырезанных из деталей

стандартных гладких образцов и образцов с V-образными концентраторами различного радиуса (с различными коэффициентами концентрации напряжений) в основании надреза, полученными при «мягком», то есть с заданным циклом изменения нетто напряжения, нагружении образца.

Эти экспериментальные данные, наряду с достаточно малочисленными случаями разрушения деталей по механизму МЦУ, являются уникальным материалом для оценки качества работы модифицированного уравнения Мэнсона-Коффина и возможной необходимости его коррекции.

В работе проведена обработка большого объёма результатов испытаний образцов на МЦУ. Выполнено моделирование проведённых испытаний средствами коммерческого САЕ пакета ANSYS v14 с целью получения необходимых для расчёта долговечности параметров уравнения Мэнсона – Коффина.

Сравнение расчётных кривых МЦУ образцов на моделях и кривых МЦУ, полученных в экспериментах, показало пригодность использования уравнения в приведённом виде для жаропрочных никелевых и титановых дисковых сплавов и, соответственно, достаточную точность расчёта долговечности по МЦУ с использованием модифицированного уравнения Мэнсона-Коффина.

#### **Библиографический список**

1. Менсон, С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость [Текст] / С. Менсон. – М.: Машиностроение. – 1974. – 344 с