

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ МЭНСОНА-КОФФИНА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ

Для проведения расчёта долговечности деталей ГТД, повреждаемых по малоцикловой усталости (МЦУ), по «Нормам прочности газотурбинных двигателей» ФГУП ЦИАМ [1], 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 достаточном для статистической обработки объёме.

Автором предлагается методика оценки МЦУ на базе испытаний стандартных образцов при отнулевом цикле «мягкого нагружения» с использованием модифицированной зависимости Мэнсона–Коффина.

Введение. Работы по формированию банка данных по материалам не могут быть выполнены в короткое время. По самым скромным подсчётам на это уйдет от 10 до 15 лет. Сложность создания базы в условиях лабораторий большинства предприятий отрасли обусловлена отсутствием или недостаточностью специального дорогостоящего оборудования, его обязательной аттестацией, разработкой и аттестацией технологии подготовки образцов. Не отрицая необходимости создания качественной базы данных по сопротивлению МЦУ, указанной в [1], необходимо до её полного формирования иметь достоверные методики оценки МЦУ, базирующиеся на менее затратных и простых подходах.

В данной работе описан один из таких подходов: использование давно известного и доказанного, как теоретически (на базе теории пластичности), так и экспериментально уравнения Мэнсона–Коффина (1), имеющего в простейшем виде следующий вид [2,3]:

$$\Delta\varepsilon = C \cdot N^{-\alpha}, \quad (1)$$

где $\Delta\varepsilon$ – размах пластических деформаций; C, N – константы.

Для проведения анализа МЦУ основных деталей, для которых ресурс устанавливается в часах и циклах, на стадии предварительных расчётов и при сравнительных оценках [1,4,5] рекомендовано использование модифицированного уравнения Мэнсона-Коффина (2) [1,4,6]

$$\Delta\varepsilon_i = \left[\ln \frac{1}{1 - \Psi(t, T)} \right]^{0.6} N^{-0.6} + \frac{3,5[\sigma_{dl}(t, T) - \sigma_{mi}]}{E(T)} N^{-0.12}, \quad (2)$$

где N – циклическая долговечность детали (образца); $\Delta\varepsilon_i$ – интенсивность размахов деформаций в опасной точке детали, приведенная к деформированному состоянию в гладких образцах, используемых для определения стандартных характеристик материала σ_{dl} , E , Ψ ; σ_{mi} – интенсивность среднего напряжения цикла, среднее напряжение цикла учитывается только в случае, если $\sigma_{mi} > 0$; $E(T)$ – модуль продольной упругости при максимальной температуре цикла в рассчитываемой точке детали; $\sigma_{dl}(t, T)$ – предел длительной прочности, соответствующий максимальной температуре и времени действия расчётного режима; $\Psi(t, T)$ – коэффициент поперечного сужения материала (3), соответствующий максимальной температуре и зависящий от длительности нагружения t и максимальной температуры цикла T :

$$\Psi(t, T) = \Psi_0(T) \cdot t^m, \quad (3)$$

где $\Psi_0(T)$ – коэффициент поперечного сужения в исходном состоянии (нулевом цикле); m – постоянная, характеризующая скорость охрупчивания материала, определяемая по экспериментальным кривым $\Psi(t)$, для дисковых жаропрочных сплавов при отсутствии экспериментальных данных $\Psi(t)$ принималось: $m = -0,1$ при $T \geq 650^\circ\text{C}$, $m = 0$ при $T < 650^\circ\text{C}$.

Значения величин σ , Ψ и E , используемые в уравнении Мэнсона, принимаются средними. Рекомендованная [1] методика получения интенсивности размахов полной деформации $\Delta\varepsilon_i$ на базе результатов упруго–пластического анализа модели показана ниже.

Параметры НДС при нагружении: $\varepsilon_{ij}^{e(load)}$ – компоненты упругих деформаций; $\varepsilon_{ij}^{pl(load)}$ – компоненты пластических деформаций.

Параметры НДС при разгрузке: $\varepsilon_{ij}^{e(unload)}$ – компоненты упругих деформаций; $\varepsilon_{ij}^{pl(unload)}$ – компоненты пластических деформаций.

Изменение (размах) компонент деформаций в цикле нагружения:

$\Delta\varepsilon_{ij}^e = \varepsilon_{ij}^{e(load)} - \varepsilon_{ij}^{e(unload)}$ – размах компонент упругих деформаций;

$\Delta\varepsilon_{ij}^{pl} = \varepsilon_{ij}^{pl(load)} - \varepsilon_{ij}^{pl(unload)}$ – размах компонент пластических деформаций.

Интенсивности размахов (эквивалентные размахи) упругой (4), пластической (5) и полной (6) деформаций:

$$\Delta\varepsilon_i^e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\Delta\varepsilon_{11}^e - \Delta\varepsilon_{22}^e)^2 + (\Delta\varepsilon_{22}^e - \Delta\varepsilon_{33}^e)^2 + (\Delta\varepsilon_{33}^e - \Delta\varepsilon_{11}^e)^2 + \frac{3}{2}[(\Delta\varepsilon_{12}^e)^2 + (\Delta\varepsilon_{23}^e)^2 + (\Delta\varepsilon_{31}^e)^2]} \quad , \quad (4)$$

$$\Delta\varepsilon_i^{pl} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\Delta\varepsilon_{11}^{pl} - \Delta\varepsilon_{22}^{pl})^2 + (\Delta\varepsilon_{22}^{pl} - \Delta\varepsilon_{33}^{pl})^2 + (\Delta\varepsilon_{33}^{pl} - \Delta\varepsilon_{11}^{pl})^2 + \frac{3}{2} [(\Delta\varepsilon_{12}^{pl})^2 + (\Delta\varepsilon_{23}^{pl})^2 + (\Delta\varepsilon_{31}^{pl})^2]}, \quad (5)$$

$$\Delta\varepsilon_i = \frac{3}{2(1+\nu)} \Delta\varepsilon_i^e + \Delta\varepsilon_i^{pl} . \quad (6)$$

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 с различными радиусами (коэффициентами концентрации напряжений) у основания надреза, полученными при «мягком», то есть с заданным циклом изменения нетто напряжения, нагружении образца [4, 7, 8].

Оценка циклической долговечности реальной детали проводилась на базе кривых МЦУ, полученных для гладкого образца или образца с концентратором, соответствующим по коэффициенту концентрации напряжений в исследуемой зоне детали [5, 9]. В ОКБ Н. Д. Кузнецова (ПАО «ОДК – Кузнецов») для анализа МЦУ деталей двигателей был накоплен значительный объём таких испытаний для целого ряда сталей, жаропрочных никелевых и титановых сплавов.

Эти экспериментальные данные и редкие случаи разрушения деталей по механизму МЦУ, являются уникальным материалом для оценки качества работы модифицированного уравнения Мэнсона-Коффина и возможной необходимости его коррекции [10].

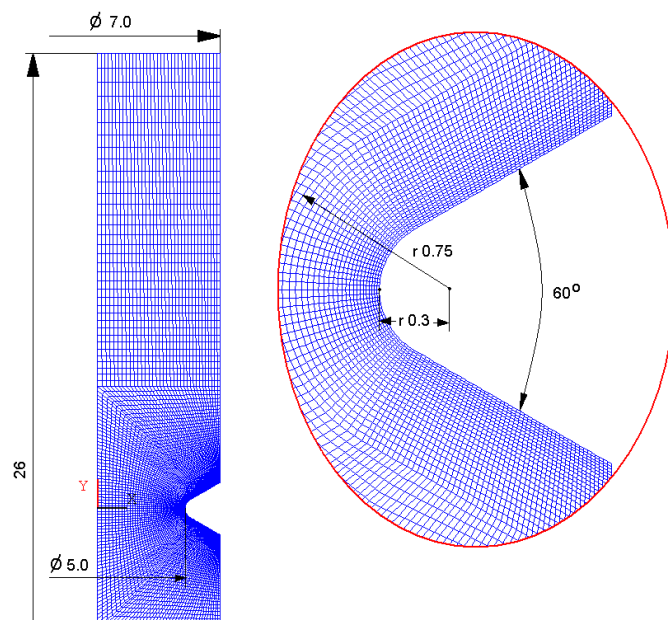


Рис. 1. 2D – осесимметричная модель стандартного испытываемого образца

На рис. 2–7 показаны результаты обработки испытаний стандартных гладких образцов и образцов с различными концентраторами напряжений для нескольких наиболее применяемых на двигателях ПАО «ОДК – Кузнецов» материалов, проведённых на предприятии [8].

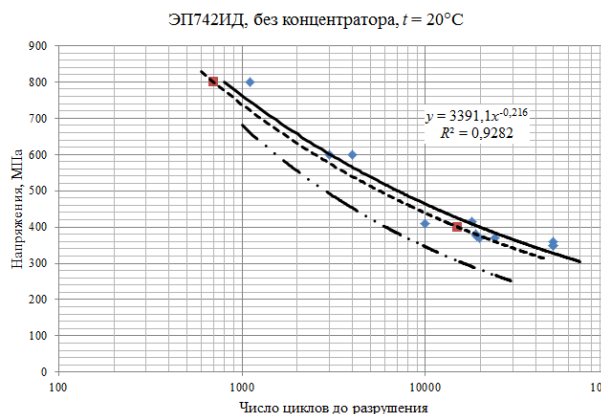


Рис. 2. Кривые МЦУ для материала ЭП742ИД, без концентратора при $t = 20^\circ\text{C}$

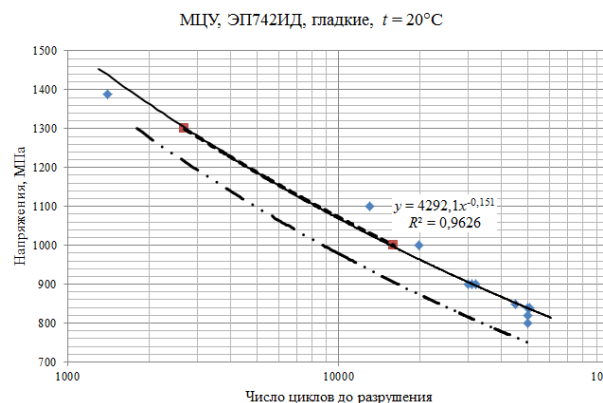


Рис. 3. Кривые МЦУ для материала ЭП742ИД, без концентратора при $t = 20^\circ\text{C}$

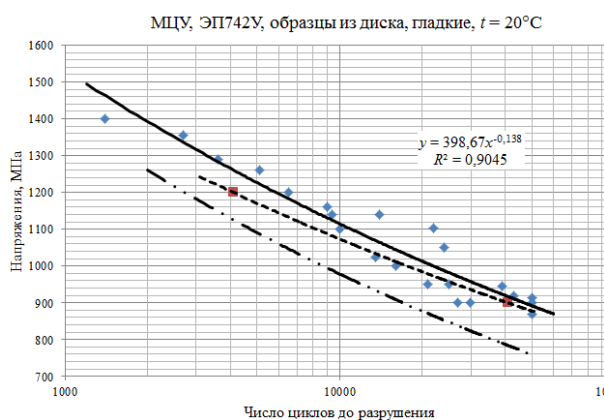


Рис. 4. Кривые МЦУ для материала ЭП742У, без концентратора при $t = 20^\circ\text{C}$

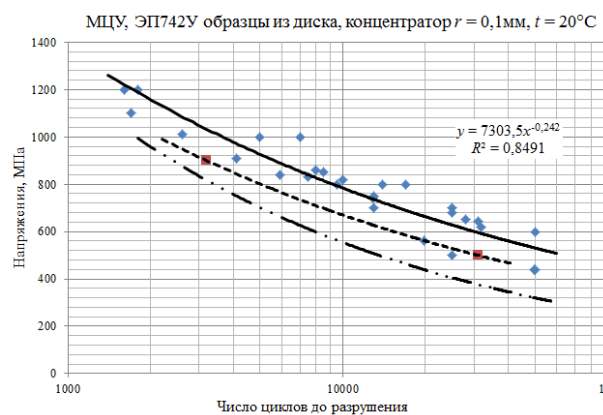


Рис. 5. Кривые МЦУ для материала ЭП742У, с концентратором $r = 0,1\text{ мм}$ при $t = 20^\circ\text{C}$

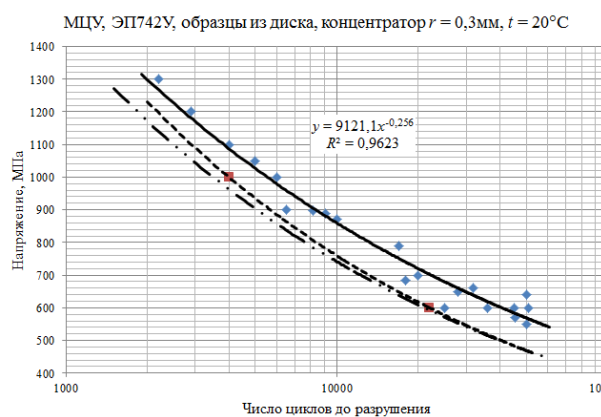


Рис. 6. Кривые МЦУ для материала ЭП742У, с концентратором $r = 0,3\text{ мм}$ при $t = 20^\circ\text{C}$

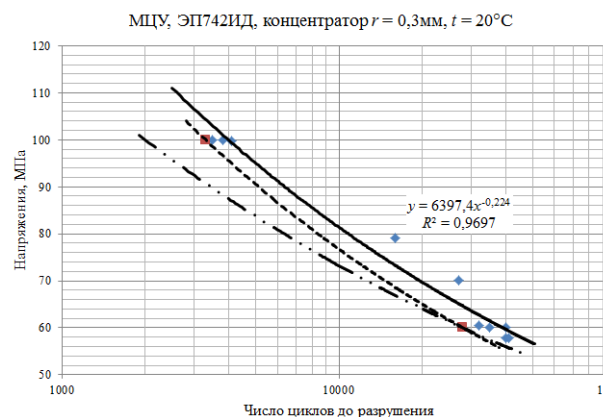


Рис. 7. Кривые МЦУ для материала ЭП742ИД, с концентратором $r = 0,3\text{ мм}$ при $t = 20^\circ\text{C}$

На приведённых рисунках маркеры – ромбы – экспериментальные точки, полученные при испытаниях образцов. Сплошная кривая – степенная аппроксимирующая кривая. Штрих – пунктирная кривая – аппроксимирующая кривая ми-

нус три среднеквадратичных отклонения точек эксперимента. Пунктирная кривая – расчётная по модифицированной зависимости Мэнсона-Коффина.

Заключение. Как видно из приведённых рисунков, кривые расчётных долговечностей по уравнению Мэнсона-Коффина для гладких образцов и образцов с концентраторами находятся в поле разброса экспериментальных результатов в пределах трёх среднеквадратичных отклонений. Это подтверждает возможность получения достоверных результатов использования модифицированного уравнения Мэнсона-Коффина для расчёта долговечности деталей двигателя, повреждаемых по механизму малоциклового усталости.

Принципиально, при наличии достаточного объёма экспериментальных данных, возможна индивидуальная настройка модифицированного уравнения Мэнсона – Коффина на конкретный материал или группу материалов.

Библиографический список

1. Нормы прочности авиационных газотурбинных двигателей гражданской авиации. – М.: ЦИАМ, 2004. – 260 с.
2. Терентьев, В.Ф. Усталость высокопрочных металлических материалов / В.Ф. Терентьев, А.Н. Петухов. – М.: ИМЕТ РАН-ЦИАМ, 2013. – 515 с.
3. Партон, В.З. Динамика хрупкого разрушения / В.З. Партон, В.Г. Борисковский. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
4. Ануров, Ю.М. Основы обеспечения прочностной надёжности авиационных двигателей и силовых установок / Ю.М. Ануров, Д.Г. Федорченко. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 390 с.
5. Кудрявцев, И.В. Усталость крупных деталей машин / И.В. Кудрявцев, Н.Е. Наумченко, Н.М. Саввина. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
6. Колмогоров, В.Л. Напряжения, деформации, разрушение / В.Л. Колмогоров. – М.: Metallurgy, 1970. – 229 с.
7. Кудрявцев, П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины / П.И. Кудрявцев. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.
8. ГОСТ 25.502 – 79. Расчёты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость / – Введ. 1981 – 01 – 01. – М.: Стандартиформ, 1983. – 50 с.
9. Махутов, Н.А. Механика малоциклового разрушения / Н.А. Махутов, М.И. Бурак, М.М. Гаденин. – М.: Наука, 1986. – 264 с.
10. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчёт элементов конструкций на прочность / Н.А. Махутов. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.