

УДК 621.3.002

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МОДЕЛИ СУММИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ДИСКОВ ТУРБИН

© 2012 А.А. Иноземцев¹, М.Ш. Нихамкин², А.В. Ильиных², А.М. Ратчиев¹

¹ ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 05.12.2012

Описаны методика и результаты экспериментального исследования малоциклового усталости (МЦУ) и циклической трещиностойкости гранулируемого никелевого сплава. Сравниваются два варианта формы цикла нагружения: треугольный и М-образный, характерный для дисков турбин авиационных двигателей. Получены количественные оценки влияния формы цикла нагружения на циклическую долговечность и скорость роста усталостных трещин и эмпирические соотношения, описывающие это влияние. Показана удовлетворительная сходимость экспериментально полученных кривых МЦУ для М-образного цикла нагружения с расчетными кривыми МЦУ по модели линейного суммирования.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, диск турбины, циклический ресурс, рост усталостных трещин, линейное суммирование повреждений

Обеспечение циклического ресурса дисков турбин составляет одну из сложнейших проблем прочностной надежности газотурбинных двигателей (ГТД). Ее решение требует совершенствования расчетных и экспериментальных методов прогнозирования и подтверждения ресурса дисков, учитывающих особенности применяемых материалов и условий их работы. Условия работы дисков высокотемпературных турбин характеризуются многорежимностью, сочетанием нагружения и неравномерного нагрева, определяющим сложную циклическую зависимость от времени напряжений в опасных точках. При этом происходит накопление повреждений по механизмам малоциклового усталости (МЦУ), завершающееся появлением и последующим ростом макроскопических усталостных трещин. Типовой эксплуатационный цикл нагружения включает в себя несколько этапов с различным уровнем размахов деформаций, различными значениями коэффициента асимметрии цикла. Методология подтверждения безопасного циклического ресурса дисков турбин, основанная на методах механики разрушения [1-3] или по критериям МЦУ [4, 5], предполагает использование характеристик МЦУ и циклической трещиностойкости материала, полученных для эксплуатационных условий, в частности, для сложной формы цикла нагружения. Обычно характеристики материалов получают для простейшей формы цикла нагружения –

треугольной или синусоидальной. Для учета сложной формы эксплуатационного цикла нагружения при прогнозировании циклического ресурса дисков используют различные модели накопления повреждений, которые требуют экспериментального подтверждения [4].

Цель исследования: экспериментальная проверка модели суммирования повреждений применительно к стадиям зарождения и роста трещин при циклическом нагружении дисков турбин, соответствующем эксплуатационному циклу.

Исследование проводилось на примере жаропрочного сплава на никелевой основе, предназначенного для изготовления дисков турбин авиационных ГТД. Образцы вырезали из заготовки диска, полученной методом металлургии гранул [6]. В работе [7] на основании анализа эксплуатационного цикла нагружения опасных точек диска высокотемпературной турбины предложена схематизация эксплуатационного цикла нагружения в виде двух подциклов (М-образная форма цикла). На стадии зарождения трещин с наибольшим размахом деформаций (рис. 1а) и на стадии роста магистральной трещины с наибольшим размахом коэффициента интенсивности напряжений (КИН) (рис. 1б). М-образный цикл при использовании модели суммирования повреждений представляют в виде суммы двух подциклов [7, 8]. Первый подцикл определяется взлетным режимом (точка 2 на рис. 1а, б), второй – режимом обратной тяги при реверсе (точка 4). Первый подцикл имеет размах деформаций $\Delta\epsilon_1$ и коэффициент асимметрии $R=0$, второй – $\Delta\epsilon_2$ и $R=0,35$.

Для проверки модели суммирования повреждений на стадии зарождения магистральной трещины были получены кривые МЦУ для трех вариантов цикла нагружения (рис. 2): при

Иноземцев Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, генеральный конструктор

Нихамкин Михаил Шмерович, доктор технических наук, профессор. E-mail: nikhankin@mail.ru

Ильиных Артем Валерьевич, кандидат технических наук, старший преподаватель

Ратчиев Алексей Михайлович, инженер. E-mail: ratchiev@avid.ru

треугольном цикле нагружения с $R=0,1$, при треугольном цикле нагружения с $R=0,35$ и при М-образном цикле нагружения.

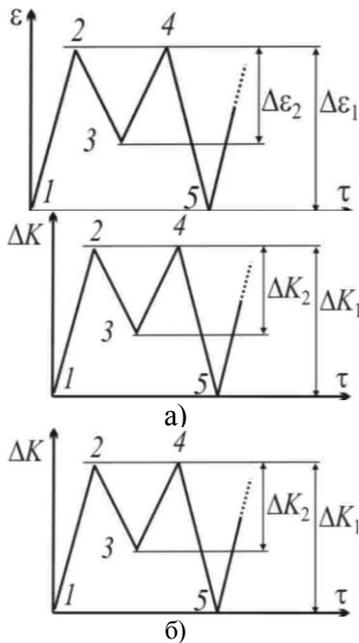


Рис. 1. Схематизация эксплуатационного цикла нагружения на стадиях зарождения (а) и роста (б) магистральной трещины

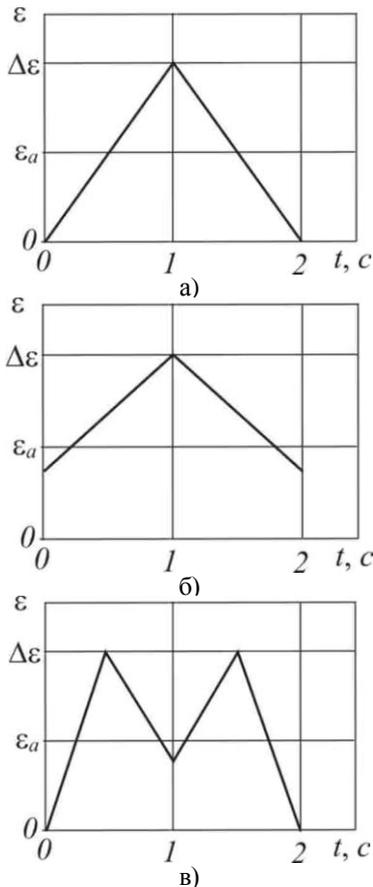


Рис. 2. Форма цикла нагружения при испытаниях на МЦУ с треугольной формой цикла $R=0$ (а) и $R=0,35$ (б) и М-образной формой цикла (в), ε_a и $\Delta\varepsilon$ – амплитуда и размах деформации

Кривые МЦУ получали в соответствии с требованиями стандартов ASTM E606-42 и ГОСТ 25.505-85. Использовались цилиндрические образцы с диаметром рабочей части 5 мм и резьбовыми захватами. Испытания проводились на сервогидравлической испытательной машине Instron 8801 при комнатной температуре. Управление по деформации в процессе испытаний осуществлялось при помощи экстензометра Instron с базой 12,5 мм. Испытания проводились в режиме жёсткого нагружения, при котором в процессе испытания средние и амплитудные значения циклических деформаций сохраняли свои исходные значения. На каждом цикле регистрировались зависимости осевого напряжения от полной осевой деформации. Дополнительно контролировали зависимости пиковых нагрузок σ_{max} , σ_{min} и размаха напряжений $\sigma_{max}-\sigma_{min}$ от числа циклов нагружения. Частота циклирования поддерживалась постоянной и равнялась 0,5 Гц. Полученные кривые МЦУ приведены на рис. 3.

Верификация модели линейного суммирования повреждений состоит в проверке погрешности предсказания циклической долговечности в М-образном цикле с помощью модели линейного суммирования повреждений $N^*(\varepsilon_a)$ с полученной экспериментально (кривая 3 на рис. 3). Обобщенная модель линейного суммирования повреждений А. Пальмгрена и М.А. Майнера [8] имеет вид:

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = A \quad (1)$$

где n_i – число циклов нагружения при нагружении с параметрами подцикла I , N_i – число циклов до разрушения в таком цикле, A – константа.

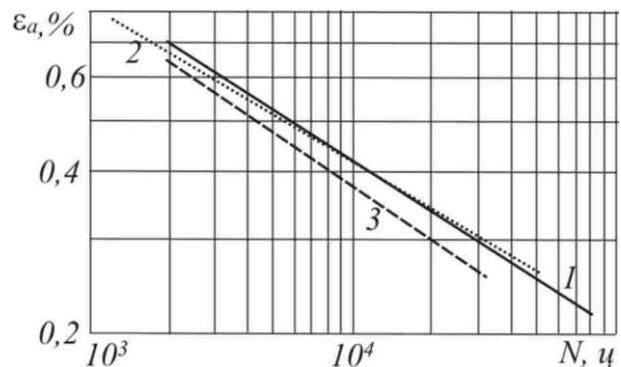


Рис. 3. Кривые МЦУ при $R=0$ (1), $R=0,35$ (2) и М-образном цикле (3)

Для состоящего из двух подциклов М-образного цикла нагружения с амплитудой деформации ε_a и коэффициентом асимметрии второго подцикла R , линейное суммирование повреждений (1) дает оценку долговечности:

$$N^*(\varepsilon_a) = A \frac{N_1(\varepsilon_a) \cdot N_2((1-R) \cdot \varepsilon_a)}{N_1(\varepsilon_a) + N_2((1-R) \cdot \varepsilon_a)} \quad (2)$$

где $N_1(\varepsilon_a)$ и $N_2(\varepsilon_a)$ – кривые МЦУ для первого подцикла ($R=0$) и второго подцикла ($R=0,35$) соответственно.

На рис. 4 приведено сравнение кривых МЦУ для М-образного цикла нагружения, полученных экспериментально и на основе модели линейного суммирования повреждений по соотношению (2). Видно хорошее согласование этих кривых. Прогноз долговечности по модели линейного суммирования повреждений отличается от экспериментальных данных в пределах 1,2% по логарифму долговечности.

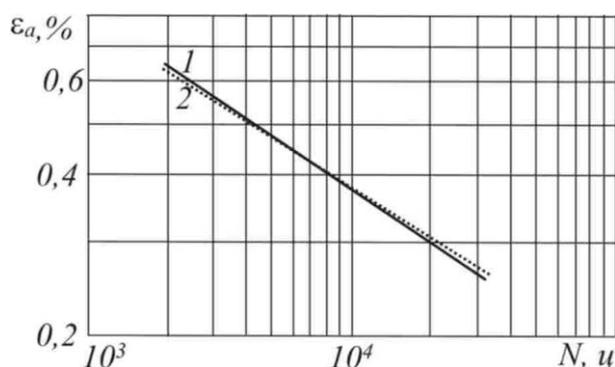


Рис. 4. Сравнение кривых МЦУ, полученных экспериментально (1) и на основе модели линейного суммирования повреждений (2)

На стадии развития магистральной усталостной трещины мерой повреждения материала обычно считают размер трещины. Ее рост характеризуется кинетической диаграммой усталостного разрушения – зависимостью скорости роста трещины (СРТ) da/dN (a – размер трещины, N – число циклов нагружения) от размаха ΔK КИН. Как и на стадии зарождения трещины, рассмотренный выше М-образный цикл нагружения включает в себя два подцикла: основной с размахом ΔK_1 и нулевой асимметрией $R=0$ и дополнительный с размахом $\Delta K_2=0,65\Delta K_1$ и асимметрией $R=\Delta K_{min}/\Delta K_{max}=0,35$. В соответствии с гипотезой суммирования повреждений суммарное приращение длины трещины в М-образном цикле da/dN представляет собой сумму приращений в первом и втором подциклах:

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{da}{dN} \right)_1 + \left(\frac{da}{dN} \right)_2 \quad (3)$$

Для проверки модели суммирования повреждений на стадии развития магистральной трещины были экспериментально получены кинетические диаграммы усталостного разрушения для трех вариантов цикла нагружения: при треугольном цикле нагружения с $R=0,1$, при треугольном цикле нагружения с $R=0,35$ и при М-образном цикле нагружения.

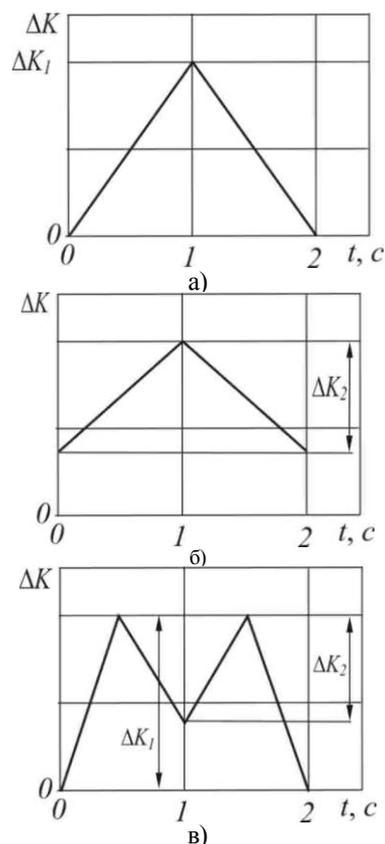


Рис. 5. Форма цикла нагружения при испытаниях на трещиностойкость с треугольной формой цикла $R=0$ (а) и $R=0,35$ (б) и М-образной формой цикла (в)

Испытания по определению характеристик циклической трещиностойкости проводились в соответствии с требованиями стандарта ASTM E647 и методических указаний [9]. Использовались компактные образцы со стороной 50 мм и толщиной 10 мм. Испытания проводили на испытательной машине Instron 8801, контроль размеров трещины в ходе испытаний осуществлялся с помощью датчика раскрытия трещины Instron с дополнительным контролем с помощью микроскопа. В качестве параметра управления испытательной машиной использовалась полная амплитуда осевого усилия. Испытания проводились в режиме поддержания постоянных параметров нагрузки в цикле, т.е. с монотонным возрастанием размаха КИН, при этом форма цикла сохранялась неизменной в течение всего испытания. Частота циклирования составляла 0,5 Гц. Получены кинетические диаграммы усталостного разрушения (рис. 6), которые в диапазоне скоростей роста трещин от $5 \cdot 10^{-8}$ до 10^{-4} м/цикл для всех рассмотренных вариантов формы цикла нагружения хорошо аппроксимируются прямой:

$$\frac{da}{dN} = 10^{-7} \left(\frac{\Delta K}{\Delta K^*} \right)^n, \quad (4)$$

где ΔK^* и n – характеристики циклической трещиностойкости материала.

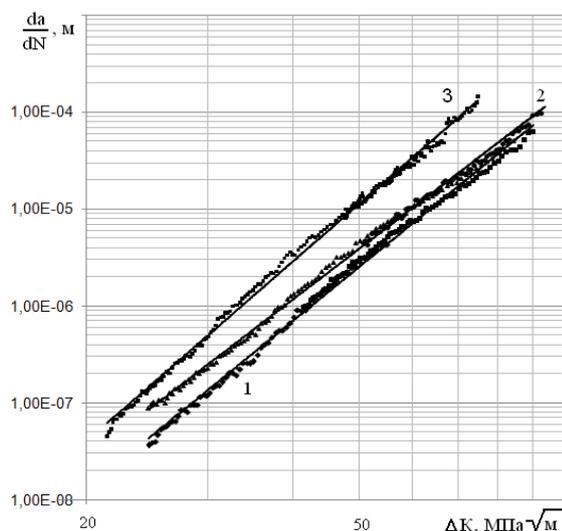


Рис. 6. Кинетические диаграммы усталостного разрушения при треугольной форме цикла с $R=0$ (1), $R=0,35$ (3) и М-образном цикле (2)

На рис.7 показаны кинетические диаграммы усталостного разрушения, полученные для М-образного цикла нагружения прямым экспериментом и по соотношению (3). В диапазоне размахов КИН 20-80 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ различие по логарифму СРТ лежит в пределах 3,5%.

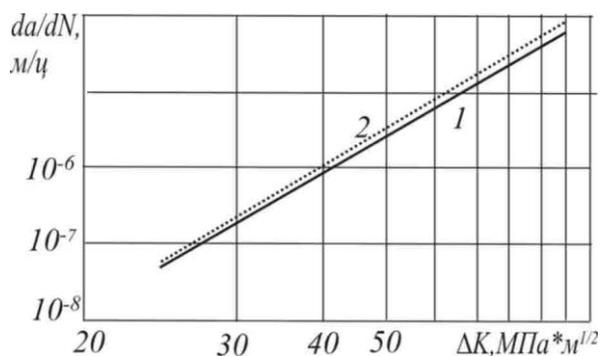


Рис. 7. Сравнение СРТ, полученных экспериментально (1) и на основе модели линейного суммирования повреждений (2)

Выводы: проведенная экспериментальная верификация модели суммирования повреждений показала применимость гипотезы линейного суммирования повреждений на стадии зарождения и роста макроскопической трещины в никелевом сплаве при нагружении, характерном для дисков высокотемпературных турбин газотурбинных авиационных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Скибин, В.А. Научный вклад ЦИАМ в создание авиационных двигателей / В.А. Скибин, В.И. Солонина. Т.1. – М.: Машиностроение, 2000. 725 с.
2. Engine structural integrity program (ENSIP). Department of defense handbook. MIL-HDBK-1783, USA W/change 2, 22 September 2004.
3. Нихамкин, М.Ш. Вероятностная оценка циклической долговечности дисков ГТД из гранулируемых материалов / М.Ш. Нихамкин, Д.А. Вятчанин // Известия Вузов. Авиационная техника. 2008. № 1. С. 70-71.
4. Кузнецов, Н.Д. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей / Н.Д. Кузнецов, В.И. Цетлин. – М.: Машиностроение, 1976. 219 с.
5. Основы технологии создания газотурбинных двигателей для магистральных самолетов / Под общ. ред. А.Г. Братухина, Е.Ю. Решетникова, А.А. Иноземцева. – М.: Авиатехинформ, 1999. 554 с.
6. Гарибов, Н.Д. Создание нового высокопрочного сплава ВВ751Н для перспективных газотурбинных двигателей / Н.Д. Гарибов, Н.М. Гриц, А.В. Востриков, Е.А. Федоренко // Технология легких сплавов. 2009. №1. С. 34-39.
7. Иноземцев, А.А. Малоцикловая усталость и циклическая трещиностойкость никелевого сплава при нагружении, характерном для дисков турбин / А.А. Иноземцев, М.Ш. Нихамкин, А.В. Ильиных и др. // Тяжелое машиностроение. 2011. №4. С. 30-33.
8. Коллинз, Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предупреждение. – М.: Мир, 1984. 624 с.
9. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении. Методические указания. – М.: МЦНТИ, 1993. 54 с.

EXPERIMENTAL CHECKING THE SUMMATION DAMAGES MODEL

AT CYCLIC LOADING OF TURBINES DISKS

© 2012 A.A. Inozemtsev¹, M.Sh. Nikhamkin², A.V. Ilyinykh², A.M. Ratchiyev¹
¹JSC “Aviadvigatel”, Perm

²Perm National Research Polytechnical University

The technique and results of experimental research the low-cyclic fatigue (LCF) and cyclic crack resistance of granulated nickel alloy are described. Two variants of loading cycle form are compared: triangular and M-shaped, characteristic for disks of aviation engines turbines. Quantitative estimates of influence the form of loading cycle on cyclic durability and growth rate of fatigue cracks and the empirical ratios describing this influence are received. Satisfactory convergence of experimentally received curve LCF for the M-shaped loading cycle with calculated curve of LCF on model of linear summation is shown.

Key words: gas-turbine engine, turbine disk, cyclic resource, growth of fatigue cracks, linear summation of damages

Alexander Inozemtsev, Doctor of Technical Sciences, Chief Designer; Mikhail Nikhamkin, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: nikhamkin@mail.ru; Artem Ilyinykh, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer; Aleksey Ratchiev, Engineer. E-mail: ratchiev@avid.ru