

ВАРИАНТЫ МОДЕЛИ УОКЕРА ДЛЯ УЧЕТА СРЕДНИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ МАЛОЦИКЛОВОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Серветник А.Н.

ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, anservetnik@ciam.ru

Ключевые слова: малоцикловая усталость, модель Уокера, жесткое нагружение, средняя деформация.

Большое число деталей ГТД подвержено высоким циклическим нагрузкам, в результате чего в деталях возникают циклически изменяющиеся напряжения и деформации. Появление трещин и разрушение деталей обычно происходит в области МЦУ ($\sim 10^2 \div 10^5$ циклов) и сопровождается упругопластическим деформированием в локальных зонах концентрации напряжений. При этом в зависимости от конструкции детали и комбинации внешних нагрузок изменение напряжений и деформаций в цикле может быть асимметричным.

Асимметрия цикла нагружения является одним из влияющих на усталость факторов, который учитывают экспериментальным путем или на основе модельных представлений. Применительно к оценке малоцикловой долговечности деталей ГТД взаимосвязь между числом циклов до разрушения и параметрами цикла деформаций устанавливают на основании серии испытаний стандартных гладких образцов при разных контролируемых значениях размаха деформации $\Delta\varepsilon$ и коэффициента асимметрии цикла по деформации R_ε . При этом параметры цикла напряжений могут изменяться и не всегда доступны для анализа.

Известные модели учета асимметрии цикла, такие как модели Морроу [1], Смита, Ватсона и Топпера [2], Уокера [3] и их модификации, не учитывают асимметрию цикла по деформации.

Представим модель учета средних деформаций в виде функции, зависящей от двух контролируемых при испытании параметров – размаха деформации в цикле и коэффициента асимметрии по деформации [4], и введем константу w_ε , учитывающую чувствительность материала к асимметрии цикла по деформации

$$\varepsilon_w = f(\Delta\varepsilon, R_\varepsilon, w_\varepsilon) \quad (1)$$

Выражение получим, выполняя деление обеих частей классической модели Уокера [3] на модуль упругости

$$\varepsilon_w = \Delta\varepsilon \left(\frac{1}{1-R_\varepsilon} \right)^{1-w_\varepsilon} \quad (2)$$

Ограничением использования предложенной модели следует считать условия чистого сжатия, а границами применимости модели является тот диапазон долговечностей, в котором выполняется построение модели.

Оценка качества предложенной модели выполнена на основе обработки результатов испытаний на МЦУ гладких образцов титанового сплава Ti 6Al 4V ELI [5] и сплава на основе железа [6]. На рис. 1 показано сопоставление прогнозируемой долговечности по предложенной модели с числом циклов до разрушения для обоих сплавов. Все экспериментальные точки легли внутри полосы с разбросом 200 % (границы показаны пунктирными линиями), а статистическая оценка результатов моделирования показала удовлетворительное качество модели со стандартным отклонением меньше 0.2 и коэффициентом детерминации больше 0.9.

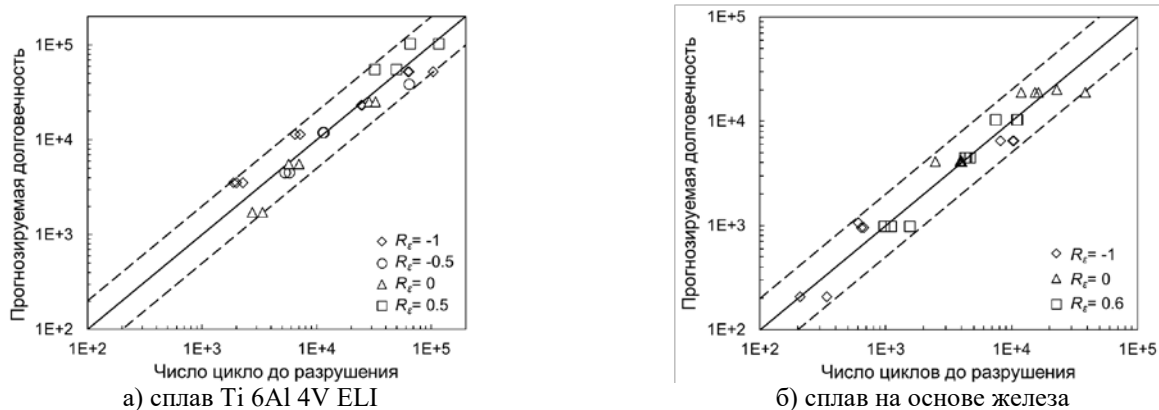


Рис. 1. Сопоставление прогнозируемой долговечности с числом циклов до разрушения

Анализ теплового и напряженного состояния деталей ГТД, таких как диски и валы, показывает, что в зонах концентрации напряжений в большинстве случаев реализуется цикл с положительной асимметрией цикла. При испытаниях материалов характеристики МЦУ определяют в основном при жестком симметричном или отнулевом циклах нагружения. В том случае, когда для материала есть только результаты испытаний при отнулевом цикле нагружения, построение модели и прогнозирование долговечности с учетом асимметрии цикла по деформации может быть выполнено на основе предложенной модели (2) при $w_\epsilon=0.8$

$$\epsilon_w = \Delta\epsilon \left(\frac{1}{1-R_r} \right)^{0.2} \quad (1)$$

Обоснованием выбора показателя степени в модели (3) является то, что константа Уокера в модели (2) для сплава Ti-6Al-4V ELI и сплава на основе железа составила $w_\epsilon=0.82\div 0.83$. Предложенная модель (3) представляет практический интерес для прогнозирования циклической долговечности основных деталей авиационных газотурбинных двигателей в условиях ограниченного объема экспериментальных данных.

Список литературы

1. Socie DF, Morrow J. Review of Contemporary Approaches to Fatigue Damage Analysis. Risk Fail Anal Improv Perform Reliab. 1980: 141–194.
2. Smith K., Watson P, Topper TH. A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals. J Mater JMLSA. 1970;5: 767–778.
3. Walker K. The Effect of Stress Ratio During Crack Propagation and Fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum. Eff Environ Complex Load Hist Fatigue Life. March 1970: 1–14.
4. Серветник А.Н. Вариант модели Уокера для построения кривой малоциклового усталости с асимметрией жесткого цикла нагружения // Авиационные двигатели. 2021. № 1 (10). С. 39–46.
5. Carrion PE, Shamsaei N. Strain-based fatigue data for Ti-6Al-4V ELI under fully-reversed and mean strain loads. Data Brief 2016; 7:12–5.
6. United States & Battelle Memorial Institute. (2012). MMPDS-07: Metallic materials properties development and standardization (MMPDS). Washington, D.C.: Federal Aviation Administration.

Сведения об авторах

Серветник Антон Николаевич, кандидат технических наук, начальник отделения динамики и прочности авиационных двигателей ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова». Область научных интересов: механика материалов, конструкционная прочность.

A WALKER-BASED MEAN STRAIN CORRECTION MODELS FOR LCF LIFE PREDICTION

A.N. Servetnik

Central Institute of Aviation Motors

Keywords: low cycle fatigue, Walker model, strain-controlled test, mean strain.

A Walker-based mean strain correction models for LCF life prediction of high loaded parts are proposed. The models are based on a function depending on strain range and strain ratio controlled in the strain-controlled LCF test of fatigue specimens and a constant reflecting the material sensitivity to strain ratio. The proposed models were compared to the Smith-Watson-Topper and Walker models that take into account mean stress effect.