

УДК 629.7.036 : 539.4

Н.Н. КОСТИН, А.В. ШЕРЕМЕТЬЕВ*Государственное предприятие Запорожское машиностроительное конструкторское бюро “Прогресс” им. академика А.Г. Ивченко, Украина*

АНАЛИЗ РАЗБРОСА СВОЙСТВ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОСТРОЕНИИ КРИВЫХ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

В работе проанализирована возможность применения разброса свойств нового материала при построении кривых малоциклового усталости по данным результатов испытаний образцов по определению их характеристик кратковременной прочности. Показано, что в диапазоне нагружения 10^3 - 10^5 циклов возможно использовать результаты испытаний на МЦУ как при «жестком», так и при «мягком» нагружениях.

малоцикловая усталость, предел прочности, предел текучести, циклическая долговечность, разброс свойств, критерий прочности, концентрация напряжений

Введение

Для оценки циклической долговечности деталей при проектировании новых авиационных двигателей используются новые перспективные авиационные материалы. При построении кривых малоциклового усталости этих материалов с учетом разброса свойств (принцип «-3 σ ») иногда удобнее использовать данные определения предела прочности или предела текучести образцов.

В работе приведен сравнительный анализ разброса свойств по данным испытаний образцов на малоцикловую усталость и по данным определения предела кратковременной прочности, предела текучести, широко применяемых в турбинах авиационных двигателей никелевых сплавов ЭИ698-ВД и ЭП742-ИД.

Кроме этого рассмотрена возможность использования кривых малоциклового усталости с учетом разброса свойств при мягком нагружении для анализа циклической долговечности деталей.

Формулирование проблемы

Проектирование деталей авиационных двигателей предполагает использование новых авиационных материалов с более высокими прочностными характеристиками, чем у материалов, применяемых

на серийных двигателях. Для анализа прочности и циклической долговечности деталей необходимо иметь ряд механических свойств материалов и кривые малоциклового усталости.

Кривые малоциклового усталости необходимо строить с учетом разброса свойств материалов, полученных при испытаниях образцов на малоцикловую усталость.

Для новых материалов на начальных стадиях жизненного цикла двигателя удобнее пользоваться данными по разбросу свойств, полученными по результатам испытаний образцов по определению предела прочности или предела текучести, которые имеются для каждой заготовки диска. Возможность использования таких данных требует более подробного рассмотрения.

Решение проблемы

Приведенное в [1] исследование прочности при малом числе циклов (до 10^4 – 10^5) на образцах с концентрацией напряжений и анализ кинетики напряженного состояния по числу циклов нагружения позволили сделать вывод о том, что в качестве критерия прочности деталей при малом числе циклов может быть выбрана величина разрушающего напряжения, определяемая по кривой малоциклового

усталости мягкого нагружения. Для материалов циклически упрочняющихся и стабильных это нашло экспериментальное подтверждение в исследованном диапазоне чисел циклов.

В статье [2] рассмотрены закономерности малоциклового разрушения при мягком и жестком симметричном и асимметричном нагружениях. На основании проведенных экспериментальных исследований показано, что при больших деформациях в области до 10^3 циклов в зависимости от типа испытаний кривые малоциклового усталости при мягком и жестком нагружениях отличаются существенно. В области сравнительно малых упругопластических деформаций (более 10^3 циклов) кривые малоциклового усталости при мягком и жестком нагружениях различаются мало. Поэтому будем рассматривать результаты испытаний образцов при мягком нагружении для диапазона 10^3 – 10^5 циклов.

Запишем формулу кривой малоциклового усталости в виде [3]:

$$\lg N = A - B \cdot \sigma, \quad (1)$$

где N – число циклов до разрушения; A, B – постоянные коэффициенты; σ – напряжение, при котором определяется циклическая долговечность детали до разрушения.

При построении кривых малоциклового усталости, принимаемых для расчетов, следует учитывать разброс свойств материала. Для этого требуется определить среднее квадратическое отклонение $S_{\lg N}$.

С учетом разброса свойств формула примет вид:

$$\lg N = A - B \cdot \sigma - K \cdot S_{\lg N}, \quad (2)$$

где K – толерантный множитель.

Рассмотрим (2) для случая применения разброса свойств по данным определения предела кратковременной прочности ($S\sigma_0$) и предела текучести ($S\sigma_{0,2}$) при 20 °С. Тогда уравнение (2) для определения циклической долговечности деталей примет следующий вид:

$$\lg N = A - B (\sigma + K_1 \cdot S\sigma_0); \quad (3)$$

$$\lg N = A - B (\sigma + K_1 \cdot S\sigma_{0,2}), \quad (4)$$

где K_1 – толерантный множитель.

Для оценки возможности использования при построении кривой малоциклового усталости разброса свойств по данным определения предела кратковременной прочности и предела текучести проведем исследование по имеющимся данным для широко применяемых в турбинах никелевых сплавах ЭИ698-ВД и ЭП742-ИД.

В табл. 1 – 3 на основе осредненных данных по большому количеству образцов (при определении $S\sigma_0$, $S\sigma_{0,2}$ более 1000 образцов – для сплава ЭИ698-ВД, более 500 образцов – для сплава ЭП742-ИД) приведены результаты определения циклической долговечности детали по экспериментальным кривым малоциклового усталости для гладких образцов сплавов ЭИ698-ВД и ЭП742-ИД по формулам (2), (3) и (4). При этом для упрощения принято: $K = 1$; $K_1 = 1$.

Результаты определения циклической долговечности детали с учетом $S\sigma_0(N2)$ и $S\sigma_{0,2}(N3)$ приведены в сравнении с результатами определения циклической долговечности, полученной при применении $S_{\lg N}(N1)$.

Как видим, циклическая долговечность деталей с учетом использования разброса свойств $S\sigma_0$ близка к циклической долговечности, полученной с использованием разброса свойств $S_{\lg N}$. При применении разброса свойств $S\sigma_{0,2}$ получено более существенное отличие от результатов с применением разброса свойств $S_{\lg N}$. Поэтому при построении кривых малоциклового усталости с учетом разброса свойств лучше использовать $S\sigma_0$.

Для материалов, используемых на серийных двигателях, имеются данные по испытаниям на малоцикловую усталость и по определению характеристик кратковременной прочности для большого количества образцов.

Небольшое количество испытанных образцов для новых материалов чаще всего приводит к существенному увеличению $S\sigma_0$ по сравнению с раз-

бросом свойств материалов, применяемых на серийных двигателях, что значительно снижает расчетную циклическую долговечность деталей.

Таблица 1

Результаты определения циклической долговечности детали по формуле (2)

Материал	t , °C	σ , кг/мм ²	$N1$, циклов
ЭИ698-ВД	400	90	17652
ЭИ698-ВД	550	90	2504
ЭИ698-ВД	650	90	1354
ЭП742-ИД	400	100	11287
ЭП742-ИД	550	100	6614
ЭП742-ИД	650	100	1144

Таблица 2

Результаты определения циклической долговечности детали по формуле (3)

Материал	t , °C	σ , кг/мм ²	$N2$, циклов
ЭИ698-ВД	400	90	16881(–4,37%)
ЭИ698-ВД	550	90	2333(–6,82%)
ЭИ698-ВД	650	90	1305(–3,61%)
ЭП742-ИД	400	100	10043(–11,0%)
ЭП742-ИД	550	100	6190(–6,41%)
ЭП742-ИД	650	100	1195(4,45%)

Таблица 3

Результаты определения циклической долговечности детали по формуле (4)

Материал	t , °C	σ , кг/мм ²	$N3$, циклов
ЭИ698-ВД	400	90	18595(5,34%)
ЭИ698-ВД	550	90	2488(–0,63%)
ЭИ698-ВД	650	90	1430(5,61%)
ЭП742-ИД	400	100	8147(–27,81%)
ЭП742-ИД	550	100	5463(–17,4%)
ЭП742-ИД	650	100	1083(–4,45%)

Указанное снижение циклической долговечности пойдет в запас по циклической долговечности детали.

Приведенный выше анализ показывает, что при проектировании новых двигателей до получения более достоверных данных по разбросу свойств нового материала можно использовать $S\sigma_g$.

Выводы

1. Для новых авиационных материалов при построении кривых малоциклового усталости с учетом разброса свойств до получения данных по испытаниям большого количества образцов на малоцикловую усталость можно использовать $S\sigma_g$ вместо S_{lgN} .

2. В диапазоне $10^3 - 10^5$ циклов результаты испытаний образцов на малоцикловую усталость до разрушения при жестком и мягком нагружениях близки [1, 2].

Литература

1. Ларионов В.В. Кинетика напряженного состояния и разрушение в зонах концентрации при циклическом упрочнении. Сопротивление деформированию и разрушению при малом числе циклов нагружения. – М.: Наука, 1967. – 171 с.
2. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
3. Балашов Б.Ф., Биргер И.А., Бычков Н.Г. Ресурсное проектирование авиационных ГТД. Вып. 1. – М.: ЦИАМ, 1990. – 207 с.

Поступила в редакцию 19.05.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Д.Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.