Проведенные на ЭВМ расчеты показывают, что реализован стабильный алгоритм оценки параметров Вейбулла и значительно повышена точность их определения. При фиксированном числе приближений относительная погрешность оценки параметров Вейбулла снижается на 3 порядка.

Л и т е р а т у р а

I. Серенсен С.В., Когаев В.П. Руководство по определению расчетных характеристик усталости деталей машин. - М., ВНИИМАШ, I97I.- 107 с.

2. Дуплякин В.М., Мостовой А.С. К вероятностному расчету кривых усталости деталей по результатам испытаний лабораторных образцов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: Сб. научных трудов. - Куйбышев, КуАИ, I974, вып.I. - С. I34-I39.

3. Weibull W. A statistical theory of the strength of materials. Stockholm, 1939, Ingeniours Veterskaps akademien, Handlingen (Proceeding). Nr 151, p. 58.

УДК 539.4

А.А.Измайлов, А.А.Мовчан

К РАСЧЕТУ НА РЕСУРС ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

С помощью описанного ниже алгоритма может быть определено число циклов до образования макротрещин в зоне концентрации напряжений по известной истории изменения номинального напряженного состояния. Считается, что внешние нагрузки изменяются пропорционально некоторому параметру напряжения, история изменения которого произвольна.

В первой части алгоритма по заданной истории изменения номинального напряженного состояния с учетом циклического упрочнения или разупрочнения материала, а также возможности накопления односторонних деформаций приближенно определяется история изменения напряжений и деформаций в зоне концентрации. Во второй части с помощью кинетического критерия накопления повреждений определяется ресурс.

При решении первой задачи предполагается, что уравнения диаграмм материала в нулевом четверть-цикле $\varepsilon = f_1(\sigma)$ и в первом полуцикле $\Delta\mathcal{E} = f_2(\Delta\sigma)$, вообще говоря, различны; уравнения же во всех последующих полуциклах подчиняются обобщенному принципу Мазинга /I/

$$\Delta\mathcal{E} = \alpha(K) f_2\left(\frac{\Delta\sigma}{\alpha(K)}\right) \qquad (I)$$

по отношению к диаграмме первого полуцикла. Здесь $\mathcal{E}$, σ - интенсивности деформаций и напряжений; $\Delta\mathcal{E}$, $\Delta\sigma$ - размах тех же величин в полуцикле номер K ; $\alpha(K)$ - параметр обобщенного принципа Мазинга в полуцикле номер K , $\alpha(I) = I$.

Значение $\alpha(K)$ является функционалом предшествующего пути деформирования, учитывающим циклическое упрочнение или разупрочнение, а также накопление односторонних деформаций. В отличие от известных предложений /2/ значение $\alpha(K)$ на данном полуцикле определяется итерационным путем через значение $\alpha(K-1)$ на предыдущем полуцикле по формуле

$$\alpha(K) = f(\Delta\mathcal{E}_{K-1})\,\varphi(\rho_{K-1})\,\alpha(K-1). \qquad (2)$$

Здесь $f(\Delta_{K-1})$ - множитель, учитывающий циклическое упрочнение или разупрочнение, дополнительно внесенное в материал полуциклом номер $(K-1)$; $\varphi(\tau_{K-1})$ - множитель, введенный для учета одностороннего накопления деформаций; ρ_{K-1} - коэффициент, равный модулю отношения напряжения начала полуцикла номер $(K-1)$ к напряжению конца этого полуцикла; он связан с обычным коэффициентом асимметрии по напряжениям τ_σ , вводимым для регулярного мягкого нагружения соотношением $\rho = \tau_\sigma^{(-1)^K}$, то есть величина ρ в прямом и обратном полуциклах при мягком регулярном нагружении принимает взаимно обратные значения. В случае, когда $\tau_\sigma > 0$, считаем, что $\varphi(\rho_{K-1}) = 1$.

Предполагается, что в случае отсутствия циклического упрочнения-разупрочнения ($f(\Delta\mathcal{E}_{K-1}, \Delta\sigma_{K-1}) = 1$) для мягкого регулярного нагружения петли упругопластического гистерезиса конгруэнтны между собой и лишь смещаются как жесткое целое, отражая одностороннее накопление деформаций. Можно доказать, что в этом случае должно быть $\varphi(\rho) = \varphi(\frac{1}{\rho}) = 1$ для любых $\rho > 0$. Решение этого функционального уравнения имеет вид $\varphi(\rho) = e^{\gamma(\ln\rho)}$, где $\gamma(x)$ - произвольная нечетная функция. Она непрерывна в нуле, причем $\gamma(0) = 0$ в случае, если при мягком симметричном нагружении не происходит накопления односторонних деформаций. В противном случае функция в нуле имеет заданный разрыв первого рода $\gamma(-0) = -\gamma(0) \neq 0$, величина которого может быть определена через постоянные A и A^*, выражающие анизотропию сопротивления материала циклическому деформированию /2/. Величины $\gamma(-\infty)=\gamma(\infty)$ определяются так, чтобы описать одностороннее накопление деформаций в опытах на циклическую ползучесть при $\tau_{\sigma} = 0$ /9/. По данным /3/ односторонне накопленная деформация максимальна при $\tau_{\sigma} = -0{,}75$. Одно из возможных выражений для функции $\varphi(\rho)$, обладающей вышеуказанными свойствами, имеет вид

$$\varphi(\rho) = -\frac{\sqrt[3]{\rho}}{1+M\rho^4}.$$

Множитель $f(\Delta\varepsilon_{k-1}, \Delta\sigma_{k-1})$ в (I) подбирается так, чтобы при регулярном мягком симметричном нагружении циклически изотропного материала из формулы (I) следовали известные законы циклического упрочнения $\delta(k)=\delta(1)\cdot k^{-\ell}$ или разупрочнения $\delta(k)=\delta(1)e^{\beta(k-1)}$. Можно показать, что при использовании петли гистерезиса в первом полуцикле в виде зависимости Рамберга-Осгуда $\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + \lambda\left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_T}\right)^n$ величины f в (I) должны быть соответственно равны $f=(1+\frac{1}{k})^{\frac{\ell}{n-1}}$ для циклического упрочнения и $f=e^{-\frac{\beta}{n_2-1}}$ для циклического разупрочнения. Величины ℓ и β, следуя /2/, зависят от того, насколько напряжения или деформации превосходят предел текучести. Однако в рассматриваемом алгоритме в связи с итерационным характером учета циклического упрочнения величины ℓ или β определяются разностями между достигнутым уровнем напряжений и деформаций и соответствующими пределами текучести не в нулевом четверть-цикле, а в полуцикле, предшествующем рассматриваемому.

Для приближенного определения размаха интенсивности напряжений и деформаций в зоне концентрации совместно решается уравнение диаграммы деформирования (I) и модифицированная формула Нейбера /4,5/

$$\alpha_{\sigma_i}^2 \int_0^{\Delta\varepsilon_H} \Delta\sigma(\Delta\varepsilon_H)\, d_\Delta\varepsilon_H = \int_0^{\Delta\varepsilon} \Delta\sigma(\Delta\varepsilon)\, d(\Delta\varepsilon).$$

Здесь α_{σ_i} – теоретический коэффициент концентрации по интенсивности напряжений; ε_H, $\Delta\varepsilon$ – размах номинальных деформаций и деформаций в зоне концентрации; $\Delta\sigma(\Delta\varepsilon_H)$ и $\Delta\sigma(\Delta\varepsilon)$ – уравнения диаграмм деформирования (I) для номинального напряженного состояния и для напряженного состояния в зоне концентрации.

Отношение главных напряжений в зоне концентрации $R=\sigma_2/\sigma_1$ находится с помощью приближенной методики, предложенной в /6/. Здесь σ_1 – максимальное главное напряжение в зоне концентрации, σ_2 – второе главное напряжение (третья координатная ось перпендикулярна свободной поверхности концентратора, так что $\sigma_3 = 0$). Через величину R находятся параметры вида напряженного состояния, за которые в алгоритме выбраны $\mu_1=\sigma_{kk}/\sigma_1=1+R$; $\mu_2=\frac{\sigma_1}{\sigma_i}=\frac{1}{\sqrt{R^2-R+1}}$.

12-4708

В случае наличия между отдельными циклами или блоками нагружения достаточно продолжительного отдыха в некоторых алюминиевых сплавах происходит релаксация дислокационной структуры, ответственной за упрочнение материала /9/. Неучет этого явления может привести к существенному завышению расчетного значения долговечности над экспериментальным, особенно для коэффициентов асимметрии r_σ, близких к нулю. В алгоритме для циклов, происходящих после продолжительного отдыха в случае расчета элементов конструкций из таких материалов, считается, что нагружение как бы происходит из начального недеформированного состояния и процесс циклического упрочнения начинается заново.

Для определения долговечности по известной истории изменения напряженно-деформированного состояния в зоне концентрации используется кинетический критерий накопления повреждений /7/, уравнения которого имеют в общем случае вид

$$\frac{d\Omega_{ij}}{dL} = \alpha_0(\mu_K, \overset{\circ}{R}_i)\delta_{ij} + \alpha_1(\mu_K, \overset{\circ}{R}_i)\frac{dR_{ik}}{dL}\frac{dR_{kj}}{dL} \qquad (3)$$

$$\frac{dR_{ij}}{dL} = K\left(\frac{\omega_{ij}\frac{de_{ij}}{dL}}{\omega_i} + 1\right)\omega_{ij}; \quad \overset{\circ}{R}_i = \sqrt{\frac{dR_{ij}}{dL}\frac{dR_{ij}}{dL}} \qquad (4)$$

$$R_{ij} + \omega_{ij} = e_{ij} \qquad (5)$$

$$\Omega_{ij}\sigma_{ij} = \sigma_э. \qquad (6)$$

Здесь Ω_{ij} – тензор повреждений, δ_{ij} – символ Кронекера, $\frac{dR_{ij}}{dL}$ – плотность дислокационного потока, идущего на зарождение микродефектов, ω_{ij} – тензорная мера плотности дислокационных скоплений у препятствий, e_{ij}, σ_{ij} – тензоры деформаций и напряжений, $\sigma_э$ – некоторое эквивалентное напряжение; функции модели $\alpha_0(\mu_K, \overset{\circ}{R}_i)$ и $\alpha_1(\mu_K, \overset{\circ}{R}_i)$ находятся из опытов на малоцикловую усталость при жестком нагружении без поворота и с поворотом главных осей тензора напряжений. Уравнение (6) представляет из себя предельное условие.

В рассматриваемом в данной работе случае пропорционального немонотонного изменения компонент тензора деформаций (3) переходит в скалярное уравнение повреждаемости

$$\frac{d\Omega}{dL} = f(\overset{\circ}{R}_i, \mu_K), \qquad (7)$$

совпадающее с уравнением критерия /8/ в случае, если правая часть (7) является линейной функцией интенсивности тензора остаточных микронапряжений.

Функция f в (7) должна быть выбрана таким образом, чтобы система описывала малоцикловую усталость материала рассматриваемого элемента конструкции при жестком симметричном деформировании. Установлено, что для образцов из сплавов АМг6, Д16, ВТ6С экспериментальные точки в двойных логарифмических координатах $\lg\Delta\varepsilon \sim \lg N$ располагаются в общем случае на двузвенной ломаной линии /II/. Здесь N – число полуциклов до разрушения, $\Delta\varepsilon$ – размах полной, а не пластической, как для многих других материалов, деформации. В соответствии с этим функция f в (7) должна иметь вид

$$f(\xi) = \begin{cases} \dfrac{1}{\alpha_1} \dfrac{\xi^{1/\alpha_1 - 1}}{e_{*1}^{1/\alpha_1}} & \text{при } \xi \le e_* \\ \dfrac{1}{\alpha_2} \dfrac{\xi^{1/\alpha_2 - 1}}{e_{*2}^{1/\alpha_2}} & \text{при } \xi \ge e_* \end{cases},$$

где α_1, α_2 – тангенсы углов наклона соответствующих звеньев, e_{*1}, e_{*2} – правые части уравнений Коффина-Мэнсона для соответствующих звеньев.

Для учета влияния вида напряженного состояния и анизотропии материала, имеющего три взаимно перпендикулярные оси анизотропии на скорость накопления повреждений, считается, что показатели кривой малоцикловой усталости α_2 и циклические вязкости e_{*2} зависят от параметров вида напряженного состояния μ_2 и μ_2 по формулам /7/

$$\alpha_2 = \alpha_{20}[1 + a_1(\mu_1 - \mu_{10}) + a_2(\mu_2 - \mu_{20})]$$

$$\hat{e}_{*2} = (e_{01}^{*\,1/\alpha_2} \cos\gamma_1 + e_{02}^{*\,1/\alpha_2} \cos\gamma_2 + e_{03}^{*\,1/\alpha_2} \cos\gamma_3)^{\alpha_2}$$

$$e_{0i}^* = e_{0i}^*(\mu_1 \mu_2) = e_{00i}^*[1 + b_1(\mu_1 - \mu_{10}) + b_2(\mu_2 - \mu_{20})].$$

Здесь α_{20} – значение показателя кривой малоцикловой усталости для одноосного растяжения-сжатия, которое считается не зависящим от направления деформирования, e_{00i}^* (i = I,2,3) – значения циклических вязкостей для одноосного растяжения-сжатия в трех главных направлениях анизотропии материала, e_{0i}^* – значение циклических вязкостей для деформирования с теми же направлениями наибольшего главного напряжения, но при сложном напряженном состоянии, задаваемом параметрами μ_1 и μ_2, μ_{10} и μ_{20} – значения этих параметров при одноосном растяжении-сжатии, γ_i – углы, которые составляют направление наибольшего главного напряжения с осями анизотропии материала. Параметры a_1, a_2 определяются путем аппроксимации экспериментальных данных по малоцикловой усталости при сложном напряженном состоянии методом наименьших квадратов.

Параметр K в (4), ответственный за степень влияния предшествующей истории на процесс накопления повреждений, определяется из уравнения

$$\int_0^1 \left[\frac{1-e^{-\beta\xi}}{\beta}\right]^n d\xi = \alpha \left(\frac{e^*}{\ln\frac{1}{1-\psi}}\right)^{1/\alpha},$$

где $K = \frac{\beta}{\ln\frac{1}{1-\psi}}$; ψ – поперечное сужение при разрыве, α , e_* – показатель кривой малоцикловой усталости и вязкость разрушения.

Решение задачи состоит в интегрировании системы (7),(3),(4) вдоль пути деформирования, который определяется в первой части алгоритма. Разрушение наступает тогда, когда выполнено предельное условие (6).

Описанный выше алгоритм в отличие от известных методик, основанных на законе суммирования повреждений, учитывает влияние предшествующей истории на скорость накопления повреждений /9/. Он не нуждается в специальных искусственных приемах выделения циклов типа метода стока, поскольку не приводит к противоречивым результатам для случая, когда малые полуциклы прерывают полуциклы большого размаха. Алгоритм учитывает влияние вида напряженного состояния как на циклическую вязкость, так и на показатель кривой малоцикловой усталости; в нем отражена анизотропия сопротивления малоцикловой усталости листовых или прутковых материалов. Итерационный способ учета циклического упрочнения или разупрочнения, а также процесса накопления односторонних деформаций позволяет более точно учитывать эти явления при нерегулярном нагружении. Алгоритм реализован в виде программы на языке FORTRAN-4 для машины ЕС 1033.

Литература

1. Москвитин В.В. Циклические нагружения элементов конструкций. – М., Наука, 1981.

2. Прочность при малоцикловом нагружении / Под ред.С.В.Серенсена. – Наука, 1975.

3. Павлов П.А., Пенкин А.Н., Абу Эль Фа Тах Мустафа. Энергетический критерий малоциклового разрушения металлов. – Ленингр.политех.ин-т. Л., 1984, 19 с. – Деп. в ВИНИТИ 9.07.84: № 4862-84 ДЕП.

4. Матюшев Ю.С. Приближенная методика определения коэффициентов концентрации при упругопластическом деформировании // Вопросы строительной механики и прочности летательных аппаратов: Сб.научн. трудов, М., МАИ, 1985.

5. Glinka G. Calculation of inelastic notsh-tip strain stress histories under cyclic loading., Eng. Fract. Mech., 1985, 22, N5.

6. Хоффман, Зегер. Обобщенный метод оценки многоосного упругопластического напряженно-деформированного состояния у надреза. Часть I: теория.

7. Мовчан А.А. О суммировании малоцикловых усталостных повреждений при изменении направления нагружения; Моск.авиац.ин-т. - М., 1986. - 15 с. Деп. в ВИНИТИ 9.07.86, № 4598-В-86 ДЕП.

8. Рыбакина О.Г. Феноменологическое описание малоцикловой усталости при некоторых видах асимметричного деформирования // Изв. АН СССР, МТТ, 1969. - № 6. С. 61.

9. Стрижало В.А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. - Киев: Наукова думка, 1978.

10. Мовчан А.А. О влиянии истории деформирования на скорость накопления повреждений при немонотонном упругопластическом нагружении. - ПМТФ, 1984, № 5, 125-132.

11. Измайлов А.А., Мовчан А.А. О малоцикловой усталости образцов и некоторых элементов конструкции из авиационных алюминиевых сплавов // Доклады на II Всесоюзной конференции „Современные проблемы строительной механики и прочности ЛА". - Куйбышевский авиационный институт, 1986.

УДК 539.4

Н.И.Гриненко, И.Г.Завалич,
С.Я.Меньшиков, Л.А.Шефер

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассматривается метод расчета характеристик сопротивления усталости элементов конструкций на стадии проектирования. Исходной информацией для расчета служит кривая усталости, полученная на образцах одного типоразмера при гармоническом нагружении. Предлагаемый метод позволяет оценить влияние конструктивных факторов (масштаб, концентрация напряжений) и вида нагружения на долговечность детали с учетом структуры реального (случайного) динамического воздействия.

На первом этапе расчета определяются характеристики сопротивления усталостному разрушению элемента конструкции при гармоническом нагружении. Эта задача решается в вероятностной постановке на основе теории прочности "наиболее слабого звена" /1,2/, согласно