Эффективность программы показана в таблице 2 на примере сравнения статистических характеристик, полученных численным образом, и соответствующих экспериментальных данных.

Полученные результаты подтверждают эффективность предложенной методики. Проведенные разработки позволяют увеличить точность и достоверность оценки параметров, необходимых для прогнозирования сопротивления усталости в статистическом аспекте.

Библиографический список

I. Дуплякин В.М., Минсранский Р.Э., Коваленко Т.Д. Статистическое прогнозирование появления усталостных макротрещин на основе приложений теории „слабого" звена / Куйбышевск.авиац.ин-т. Куйбышев, 1989. 78 с. Деп. в ВИНИТИ I5.05.89, № 3I9I-В89.

УДК 539.43

А.С.Мостовой, А.В.Кириллов, А.Г.Прохоров

ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ

Предлагается метод расчета долговечности элементов конструкций, основанный на численной реализации линейно-дискретной гипотезы накопления повреждений. При этом напряженное состояние сечения с усталостной трещиной исследуется с использованием аппарата линейной механики разрушения. Теоретические результаты сопоставлены с экспериментальными данными.

Для оценки долговечности элементов конструкций эффективным оказалось применение метода расчета, изложенного в работе /I/. Метод основан на использовании линейно-дискретных представлений о механизме усталостного разрушения в комбинации с оценкой напряженного состояния деталей с усталостными трещинами при помощи аппарата линейной механики разрушения.

Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций. Куйбышев, 1990

Сечение детали представляется в виде совокупности дискретных элементов (рис.I), в которых накапливается повреждение D, определяемое по линейному закону суммирования:

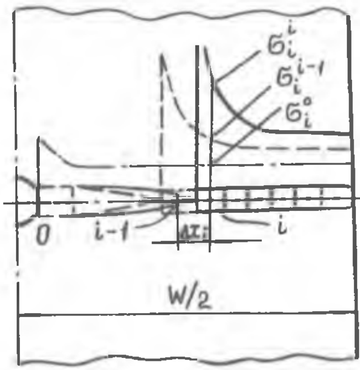

Рис. I

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i}, \qquad (1)$$

где n_i и N_i – соответственно пройденное и разрушающее числа циклов при i-ом уровне напряжений в рассматриваемом дискретном элементе. При достижении повреждением критического значения ($D_{кр} = I$) происходит разрушение дискретного элемента. Следует отметить, что линейный закон суммирования повреждений для дискретного элемента (выражение(I)) принципиально отличается от гипотезы Пальмгрена-Майнера, которая применяется для всего сечения детали в целом.

Появление первой усталостной трещины в детали трактуется как разрушение наиболее напряженного дискретного элемента. Поэтому в качестве кривой усталости $\sigma_i(N_i)$ для дискретного элемента принимается кривая усталости по появлению в детали первых усталостных трещин, построенная в истинных напряжениях. Эта кривая получается при испытании образцов из данного материала и пересчитывается для детали в соответствии с теорией „слабого звена", учитывающей масштабный фактор и концэнтрацию напряжений. Основное уравнение, используемое для оценки функции распределения долговечности $F(N)$, имеет вид

$$F(N) = 1 - \exp\left\{\sum_i\left[-\int\left(\frac{\sigma(x,y) - \tau_0}{\tau_c}\right)^{\alpha}\left(\frac{N}{N_c}\right)^{\alpha/m} ds\right]\frac{1}{S}\right\}, \qquad (2)$$

где N_c – характерное число циклов; τ_0, τ_c, α – параметры распределения Вейбулла-Гнеденко; m – показатель степени уравнения кривой усталости; S – площадь поперечного сечения детали; m – номер дискретного элемента. Суммирование ведется по всем дискретным элементам сечения детали, где $\sigma(x,y) < \tau_c$.

Последовательное разрушение дискретных элементов рассматривается как распространение усталостной трещины. Напряженное состояние в окрестности трещин определяется уравнением

$$\sigma_y = K_I / \sqrt{2\pi r}. \qquad (3)$$

Здесь σ_y – напряжение в точке на удалении r от устья трещины при упругом поведении материала; K_I – коэффициент интенсивности напряжений. Для устранения сингулярности в устье трещины напряжение в i -ом дискретном элементе, примыкающем к устью, определяется как среднеинтегральное по длине Δx дискретного элемента:

$$\sigma_{yi} = \int_0^{\Delta x} \sigma_y(x)\,dx/\Delta x = K_{Ii}\sqrt{\frac{2}{\pi\Delta x}}, \qquad (4)$$

где $K_{Ii} = \lambda_i \sigma_{бр}\sqrt{\pi \ell_i}$ – коэффициент интенсивности напряжений при размерах трещины, достигшей i -го дискретного элемента; $\sigma_{бр}$ – напряжение-брутто; ℓ_i – длина трещины; λ_i – поправочная функция, учитывающая конечные размеры детали, форму трещины, изменение геометрических характеристик сечения, ослабленного трещиной /2/, а также наличие трещин малой длины. Последнее обстоятельство учитывается введением в λ_i сомножителя /3/ вида

$$\lambda(\psi) = \frac{0{,}385}{\psi\sqrt{1-\psi}} \geqslant 1, \quad \psi = \sigma/\sigma_в. \qquad (5)$$

Параметр ψ изменяется в пределах $0{,}667 < \psi < 1$. При $\psi < 0{,}667$ функция $\lambda(\psi) = 1$. При $\psi = 1$ ($\sigma = \sigma_в$) происходит разрушение детали без появления начальных дефектов (усталостных трещин).

Переход от определяемых таким образом упругих напряжений σ_{yi} к истинным (упругопластическим) напряжениям σ_i , в отличие от схемы Нейбера, производится по формуле, полученной в работе /4/ из условия сохранения удельной энергии деформации $A_{уд}$:

$$\sigma_i = \left\{\left[\sigma_{yi}^2 - \frac{(m_1-1)}{(m_1+1)}\sigma_T^2\right]\frac{m_1+1}{2\sigma_T^{\frac{m_1-1}{m_1}}}\right\}^{\frac{m_1}{m_1-1}}. \qquad (6)$$

Здесь m_1 – характеристика упрочнения материала в упругопластической области ($0 \leqslant m_1 \leqslant 1$) при степенной аппроксимации кривой деформирования $\sigma = \sigma_T(\varepsilon/\varepsilon_T)^{m_1}$, σ_T – предел текучести материала, ε_T – деформация при $\sigma = \sigma_T$.

На рис.2 графически показано определение истинных напряжений указанным способом ($A_y \partial = const$), а также по формуле Нейбера ($\sigma \cdot \varepsilon = const$) и методом редукционных коэффициентов ($\varepsilon = const$).

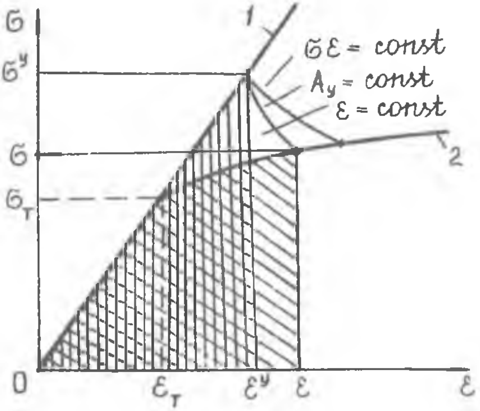

Рис. 2

Зная напряженное состояние конструктивного элемента и располагая кривыми усталости по появлению трещины, можно прогнозировать процесс усталостного разрушения в соответствии со следующей моделью. Под действием нагрузки появление усталостной трещины (разрушение наиболее нагруженного дискретного элемента - элемента „0") произойдет при накоплении в нем критического повреждения $D_0^0 = 1 = n_o / N(\sigma_0^0)$, т.е. через n_o циклов. Во всех последующих дискретных элементах накапливаются усталостные повреждения, соответственно равные

$$D_1^0 = \frac{n_o}{N(\sigma_1^0)}, \quad D_2^0 = \frac{n_o}{N(\sigma_2^0)}, \ldots, \quad D_i^0 = \frac{n_o}{N(\sigma_i^0)},$$

где D_i^0 , σ_i^0 - накопленное повреждение и напряжение в i -и дискретном элементе в момент разрушения элемента „0"; $N(\sigma_i^0)$ - разрушающее число циклов при напряжении σ_i^0 , определяемое кривой усталости по моменту появления трещины.

Момент разрушения следующего дискретного элемента - „I" определяется выражением

$$D_1^1 = \frac{n_o}{N(\sigma_1^0)} + \frac{\Delta n_1}{N(\sigma_1^1)} = 1,$$

откуда находим число циклов Δn_1 (время) продвижения трещины от элемента „0" к элементу „I" и скорость продвижения трещины $(\Delta x/\Delta n)_1$. Одновременно i -й дискретный элемент получит приращение повреждения $\Delta D_i^1 = \Delta n_1/N(\sigma_i^1)$. Момент его разрушения определяется из условия

$$D_i^i = \sum_{K=0}^{K=i} \frac{\Delta n_K}{N(\sigma_i^K)} = 1. \qquad (7)$$

Поскольку все предыдущие значения $\Delta n_1 \ldots \Delta n_{i-1}$ вычислены, то может быть определена скорость продвижения трещины $\left(\frac{\Delta x}{\Delta n}\right)_i$. При этом долговечность детали равна

$$N = n_0 + \sum_{i=1}^{i=K} \Delta n_i . \qquad (8)$$

Момент разрушения детали трактуется как момент весьма большого возрастания скорости распространения трещины $V_K = (\Delta x/\Delta n)_K$ (принято $V_K^{пред}$ = 0,25 мм/сек), или как достижение критического значения коэффициентом интенсивности напряжений ($K_{1K} = K_{fc}$), или как достижение локальными напряжениями в устье трещины величины истинного сопротивления разрыву материала ($\sigma_K = S_K$). Эти критерии разрушения примерно равнозначны.

Моделирование процесса усталостного разрушения проведено на ЭВМ СМ-4. Разработан сервисный пакет прикладных программ на языке ФОРТРАН.

Для конструктивного элемента - плоской пластины с центральным отверстием, выполненной из материала АМг-6М,- на рис.3 приведено сопоставление расчетных и экспериментальных кинетических диаграмм усталостного разрушения.

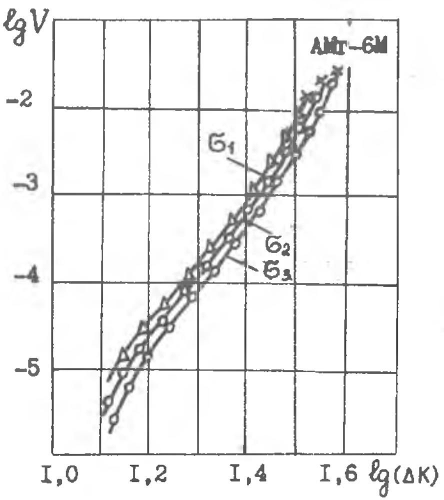

Рис. 3

Известно, что использование аппарата линейной механики разрушения дает хорошее согласование с экспериментом на среднем участке кинетической диаграммы. Применение анализа накопления повреждений для каж[illegible] точки сечения позволило более точно оценить поведение малых трещин и получить согласование результатов на начальном и конечном участках кинетической диаграммы усталостного разрушения.

Библиографический список

I. Мостовой А.С. Определение долговечности образца на основе некоторых представлений о механизме усталостного разрушения // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: Сб.научн.трудов. Вып.39. Куйбышев: КуАИ, I968. С.I08–II8.

2. Броек Д. Основы механики разрушения. М.: Высшая школа, I980. 368 с.

3. Кириллов А.В., Мостовой А.С. Определение коэффициента интенсивности напряжений для трещин малых размеров // Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций: Сб.научн. трудов. Куйбышев: КуАИ, I986. С. I42–I45.

4. Кириллов А.В., Мостовой А.С. К определению напряжений и деформаций в упругопластической области // Прочность и долговечность элементов конструкций летательных аппаратов: Сб.научн.трудов: Куйбышев: КуАИ. I984. С.I37–I42.

УДК 629.7.02.0I5.4
С.Н.Перов, С.П.Рассказов

НОРМИРОВАНИЕ НАГРУЗКИ НА ТРЕУГОЛЬНЫЙ КЕССОН ПО КРИТЕРИЮ НАДЕЖНОСТИ

Изложена методика расчетного определения предельной нагрузки крыла по критерию надежности. Задача решена в двух вариантах. В первом варианте рассчитывается неповрежденная конструкция, во втором – конструкция со сквозной трещиной в растянутой панели. Приведены результаты расчета модели треугольного кессона.

Целью настоящей работы является расчетное определение предель-