

зволюло более точно оценить поведение малых трещин и получить согласование результатов на начальном и конечном участках кинетической диаграммы усталостного разрушения.

Библиографический список

1. 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, 1968. С. 108-118.
2. Брок Д. Основы механики разрушения. М.: Высшая школа, 1980. 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, 1986. С. 142-145.
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. 1984. С. 137-142.

УДК 629.7.02.015.4

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-

Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций. Куйбышев, 1990

ной нагрузки для конструкции, представляющей собой модель треугольного крыла. Поставленная задача решается в вероятностной постановке, т.е. определяется нагрузка, при действии которой надежность конструкции равна заданной нормированной величине. Надежность рассматривается как вероятностная прочность, т.е. вероятность того, что параметр состояния конструкции не превышает предельного значения:

$$H = P(x_{\max} < X),$$

где x_{\max} - максимальное значение параметра состояния, X - его предельное значение. Величина x_{\max} определяется путем расчета напряженно-деформированного состояния конструкции методом конечных элементов.

Задача решается в двух вариантах. В первом варианте рассчитывается неповрежденный кессон, и надежность определяется как вероятность того, что максимальное напряжение не превышает предела текучести:

$$H = P(\sigma_{\max} < \sigma_T), \quad (1)$$

где σ_{\max} и σ_T являются случайными величинами.

Для упругих систем

$$\sigma_{\max} = a \cdot R, \quad (2)$$

где R - действующая нагрузка. Для определения коэффициента a достаточно вычислить методом конечных элементов максимальное напряжение от действия одного значения нагрузки. Из (2) следует, что

$$\langle \sigma \rangle = a \cdot \langle R \rangle; \quad D_\sigma = a^2 \cdot D_R. \quad (3)$$

При нормальном распределении нагрузки и предела текучести надежность определяется по формуле /1/:

$$H = \Phi\left(\frac{\langle \sigma_T \rangle - a \cdot \langle R \rangle}{\sqrt{D_{\sigma_T} + a^2 \cdot D_R}}\right), \quad (4)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{t^2}{2}\right] dt$ - табулированная нормальная функция распределения (функция Лапласа).

Во втором варианте в растянутой панели кессона моделируется сквозная трещина. Надежность определяется как вероятность того,

что коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины не превышает критического значения.

Рассматриваемая конструкция представляет собой лабораторную модель треугольного двуклонжеронного крыла. Пояса лонжеронов изготовлены из стальных уголков № 3, 2, обшивка — из листов алюминиевого сплава Д16 толщиной 4 мм.

Обшивка подкреплена сходящимися дкравлевыми стрингерами из профиля Пр-100-3. Кессон имеет пять нервюр, расположенных по потоку на равном расстоянии друг от друга. Схема конструкции представлена на рис. 1. Кессон нагружается вертикальной силой, равномерно распределенной на его концевой нервюре.

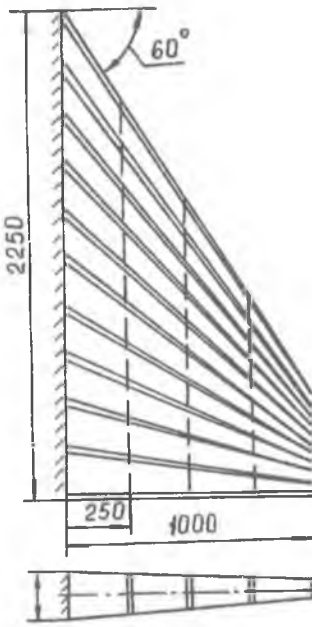


Рис. 1

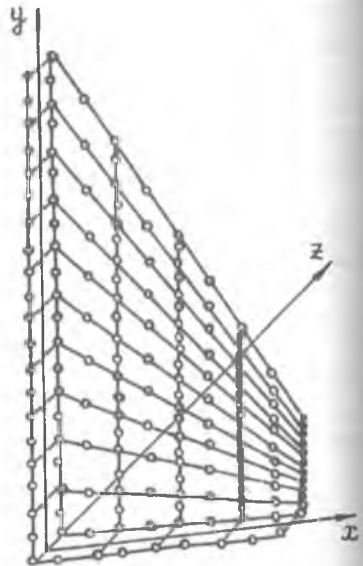


Рис. 2

При конечноэлементной дискретизации конструкции полагается, что элементы стрингеров и лонжеронов ограничены соседними нервюрами, элементы обшивки ограничены нервюрами и двумя соседними стрингерами, элементы нервюр ограничены панелями обшивки и соседними

стрингерами.

Обшивка моделируется изопараметрическими конечными элементами пластины, работающими в условиях плоского напряженного состояния и изгиба /3/. Стрингеры и пояса лонжеронов, работающие только на растяжение-сжатие, моделируются одномерными изопараметрическими элементами /3/. Общее число конечных элементов - 226. В разработанной программе предусмотрено использование элементов первого порядка и элементов второго порядка. Схема дискретизации конструкции с использованием элементов второго порядка представлена на рис.2.

Матрицы жесткости вычисляются с помощью численного интегрирования по методу Гаусса. Для элементов нервюр и стенок лонжеронов применяется понижение порядка интегрирования с целью исключения ложных деформаций сдвига.

Компоненты вычисляются в точках Гаусса, соответствующих минимально допустимому порядку интегрирования /3/. Затем подсчитываются в каждой точке главные напряжения σ_1 , σ_2 и

$$\sigma_{зкв} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} - \sigma_1 \cdot \sigma_2, \quad (5)$$

которые сравниваются с пределом текучести материала.

Некоторые результаты расчета НДС кессона приведены на рис.3,4: на рис.3 - вертикальные перемещения элементов конструкции; на рис.4 - напряжения в обшивке вдоль хорды крыла и вдоль заднего лонжерона.

При расчете НДС кессона с трещиной необходимо смоделировать сингулярный характер распределения напряжений и деформаций у вершины трещины:

$$\varepsilon \sim K/\sqrt{r}, \quad \sigma \sim K/\sqrt{r},$$

где K - коэффициент интенсивности напряжений, r - расстояние данной точки от вершины. В работе /4/ показано, что для этого следует окружить вершину трещины изопараметрическими конечными элементами со сдвинутыми промежуточными узлами (рис.5). Такие элементы совместны с обычными и не требуют специальных подпрограмм для вычисления жесткости. Размер этих элементов не должен превышать $1/25$ длины трещины. В области с размером порядка длины трещины размеры элементов должны плавно возрастать. Конечноеlementная сетка для кессона с трещиной показана на рис.6.

В данной задаче реализуется несимметричное поле напряжений относительно трещины, которое описывается двумя параметрами K_I и K_{II} .

Для их определения использован прямой метод, приведенный в /2/.

K_I и K_{II} находятся из решения системы двух уравнений типа

$$K_I F_i(\theta) + K_{II} \Phi_i(\theta) = 2 G \sqrt{\frac{2\pi}{L}} [4u_i(L/4) - 3u_i(0) - u_i(L)], \quad (6)$$

где $i = x, y, \zeta$ - модуль сдвига; L - длина стороны элемента, расположенный вдоль луча с началом в вершине трещины; $u_i(0)$, $u_i(L/4)$, и $u_i(L)$ - перемещения узла в вершине трещины, промежуточного узла и углового узла соответственно, определяемые с помощью МКЭ. Функции $F_i(\theta)$ и $\Phi_i(\theta)$ приведены в /2/.

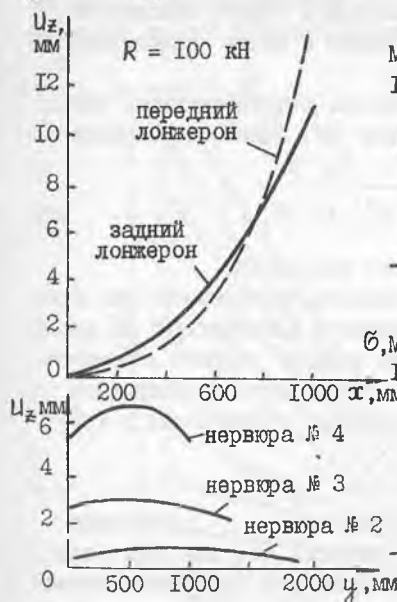


Рис. 3



Рис. 4

В качестве критерия локального разрушения используется коэффициент плотности энергии деформации:

$$S = a_{11}(\theta) K_I^2 + 2a_{12}(\theta) K_I K_{II} + a_{22}(\theta) K_{II}^2. \quad (7)$$

Функции $a_{11}(\theta)$, $a_{12}(\theta)$, $a_{22}(\theta)$ приведены в /2/.

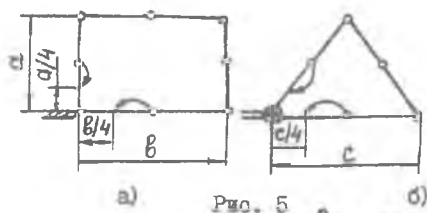


Рис. 5

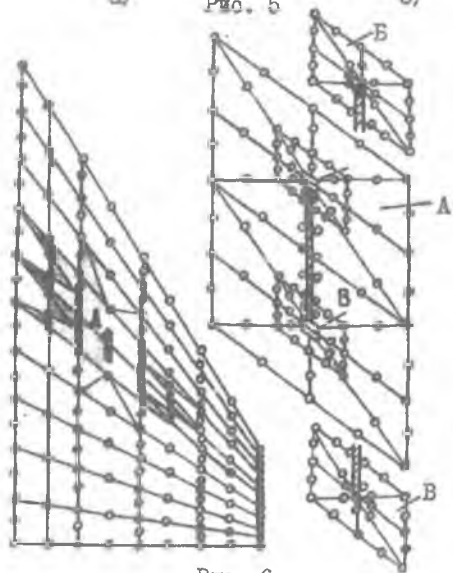


Рис. 6

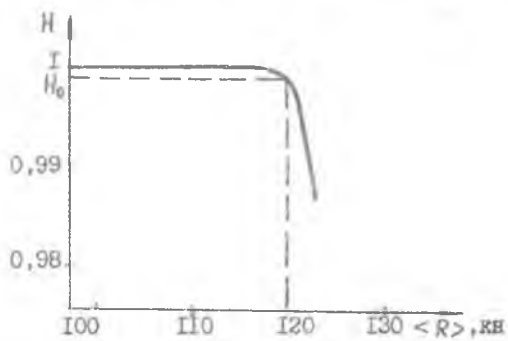


Рис. 7

Трещина начинает расти в направлении минимума величины S :

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \theta} \right|_{\theta = \theta_0} = 0, \quad -\pi < \theta_0 < \pi,$$

где θ_0 - начальный угол распространения трещины.

Локальное разрушение происходит при достижении величиной S критического значения S_c :

$$S_c = \frac{(1+\mu)(\alpha-1)}{4E} K_{Ic}^2, \quad (8)$$

где $\alpha = (3-\mu)/(1+\mu)$ для плоского напряженного состояния, K_{Ic} - критическое значение коэффициента интенсивности напряжений.

При расчете НДС кессона было установлено, что нагрузке $R = 100 \text{ кН}$ соответствует максимальное напряжение $\sigma_{max} = 185 \text{ МПа}$. По формуле (2) находим $\alpha = \sigma_{max}/R = 0,00185 \text{ 1/мм}^2$. Принимаем для материала Д16 $\langle \sigma_T \rangle = 260 \text{ МПа}$, $\langle \sigma_{\Gamma} \rangle = 100 \text{ МПа}$. Допустимый уровень надежности $N_0 = 0,999$. Для нескольких значений нагрузки по формуле (4) подсчитана надежность и построен график $N = f(\langle R \rangle)$ (рис.7). По этому графику находим, что допустимая нагрузка равна 120 кН.

Библиографический список

1. Арасланов А.М. Расчет элементов конструкций заданной надежности при случайных воздействиях. М.: Машиностроение, 1987.
2. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. М.: Наука, 1980.
3. Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. М.: Высшая школа, 1985.
4. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. М.: Наука, 1985.