ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ
АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
Межвузовский сборник, вып. 3, 1977

УДК 539.43

А.С.Мостовой, В.М.Дуплякин, А.Г.Прохоров, В.Г.Юдин

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТАЛЬНЫХ ПРОУШИН НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЯ

Усталостная долговечность отдельных деталей и узлов в значительной степени лимитирует надежность и ресурс проектируемой конструкции в целом. Поэтому весьма важно иметь количественную оценку усталостных свойств деталей конструкции.

В данной статье рассматривается определение долговечности и прогнозирование закономерностей усталостного разрушения проушин крепления закрылка самолета ТУ-154 (рис. 1а) в зависимости

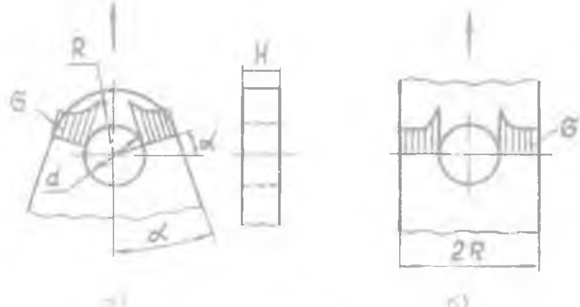

Рис. 1

от геометрии, определяемой коэффициентом $n = \frac{2R}{d}$. Размеры проушин: $H = 10$ мм, $d = 10$ мм и $\alpha = 30^{\circ}$, материал 30ХГСА.

Проведем статистический анализ возможностей появления первой макротрещины и прогнозирование кинетики роста трещины. Последнее делает возможным проектирование с учетом безопасной повреждаемости.

Сначала построим кривые усталости по моменту появления первой макротрещины с вероятностью $P = 0{,}01$ и $P = 0{,}99$ для $n = \frac{2R}{d} = 1{,}5;\ 2;\ 5$. При этом воспользуемся теорией "слабого звена", разработанной для расчета выносливости деталей машин в статистическом аспекте [I]. Модифицированная методика применения этой теории, изложенная в [2], позволяет повысить представительность экспериментальных данных. В качестве исходных данных, характеризующих усталостную прочность материала, были использованы экспериментальные кривые усталости по моменту появления первой макротрещины в плоских образцах с отверстием и в круглых гладких образцах, работающих при плоском изгибе.

Из теории "слабого звена" известно, что вероятность разрушения $P(\sigma_{max})$ при напряжении σ_{max} определяется выражением, учитывающим распределение прочности отдельных элементов в форме распределения, предложенного Вейбуллом [4]:

$$P(\sigma_{max}) = 1 - \exp\left[-\int_F \left(\frac{\sigma - u}{\sigma_0}\right)^m dF\right], \qquad (I)$$

где σ – текущее напряжение в точке сечения, u, σ_0, m – параметры распределения Вейбулла, F – часть сечения, где $\sigma > u$.

Проинтегрировав уравнение (I) для конкретных типов образцов, можно получить систему уравнений для определения параметров исходного распределения Вейбулла в случае изгиба плоских образцов с отверстием в виде [2]:

$$m = \left[\left(\ln \frac{J_1 \sigma^2_{max1}}{J_2 \sigma^2_{max2}}\right) \Big/ \left(\ln \frac{\sigma_{max1} - u}{\sigma_{max2} - u}\right)\right] - 2,$$

$$\sigma_0 = \left[\frac{2h(\sigma_{max1} - u)^{m+2}}{\bar{G} J_1 \sigma^2_{max1} (m+1)(m+2)}\right]^{1/m},$$

$$u = \left[81{,}17 \int_{0,5}^{1} (2z-1)^m \sqrt{1-z^2}\, dz\right]^{-1/m} \sigma_0. \qquad (2)$$

Здесь $J_i = -\ln[1 - P(\sigma_{max\,i})]$, $\bar{G} = \frac{d\sigma}{dx} \frac{1}{\sigma_{max}}$, h – толщина образца.

Для круглых гладких образцов, работающих при плоском изгибе, можно получить систему уравнений для определения параметров Вейбулла в виде

$$m = \left(\ln \frac{\sigma_{max}}{u}\right)^{-1} \ln \left\{ \frac{d^2}{J} \left[\int_{\xi^{-1}}^{1} \left(\frac{\sigma_{max}}{u} z - 1 \right)^m \sqrt{1 - z^2}\, dz \right] \right\},$$

$$\sigma_0 = u \left(\frac{d^2}{J} \right)^{1/m} \left[\int_{\xi^{-1}}^{1} \left(\frac{\sigma_{max}}{u} z - 1 \right)^m \sqrt{1 - z^2}\, dz \right]^{1/m},$$

$$u = \left[81{,}17 \int_{0,5}^{1} (2z - 1)^m \sqrt{1 - z^2}\, dz \right]^{-1/m} \sigma_0 . \qquad (3)$$

Здесь $J = -\ln[1 - P(\sigma_{max})]$, $\xi = \frac{\sigma_{max}}{u}$, d – диаметр образца.

Приняв расчетную схему, как показано на рис. Iб, и сохраняя равенство градиентов напряжений на рис. Iа и Iб, воспользуемся зависимостью, описывающей появление первой макротрещины в случае пульсирующего растяжения плоского образца с отверстием [I]:

$$\ln[1 - P(\sigma_{max})] = \frac{1}{m+1} \frac{2h}{\xi} \frac{1}{\sigma_0^m} \left(\frac{\sigma_{max} - u}{\sigma_{max}} \right)^{m+1} \qquad (4)$$

Осредненные кривые усталости по моменту появления первой макротрещины с вероятностью $P = 0{,}0I$ и $P = 0{,}99$, рассчитанные с использованием зависимости (4) и параметров Вейбулла, определенных из систем уравнений (2) и (3), представлены на рис. 2 для проушин с различной геометрией.

При прогнозировании кинетики разрушения воспользуемся методикой, согласно которой опасное сечение детали рассматривается в виде совокупности отдельных элементов-волокон [3]. Предполагается, что суммирование усталостных повреждений в отдельном волокне подчиняется линейному закону и что кривая усталости волокна тождественна с кривой усталости детали по моменту появления первой макротрещины.

Согласно этим представлениям величина $\left(\frac{d\tau}{dx}\right)_k$, обратная скорости распространения трещины по координате x, определяется рекуррентной зависимостью [3]:

$$\left(\frac{d\tau}{dx}\right)_k = \frac{N_{k+1}^{k+1}}{\Delta x_k} \left[\tau_0 \left(\frac{1}{N_{k+1}^0} - \frac{1}{N_k^0} \right) + \sum_{n=1}^{k} \left(\frac{d\tau}{dx} \right)_{n-1} \left(\frac{1}{N_{k+1}^n} - \frac{1}{N_k^n} \right) \Delta x_{n-1} \right] \qquad (5)$$

Здесь τ_0 – время появления первой макротрещины, σ_k^n – напряжение в волокне "к" в момент разрушения волокна "n", N_k^n – число циклов, соответствующее появлению трещины в волокне "к" при действии напряжения σ_k^n (определяется с помощью кривой усталости детали по моменту появления первой макротрещины с соответствующей вероятностью).

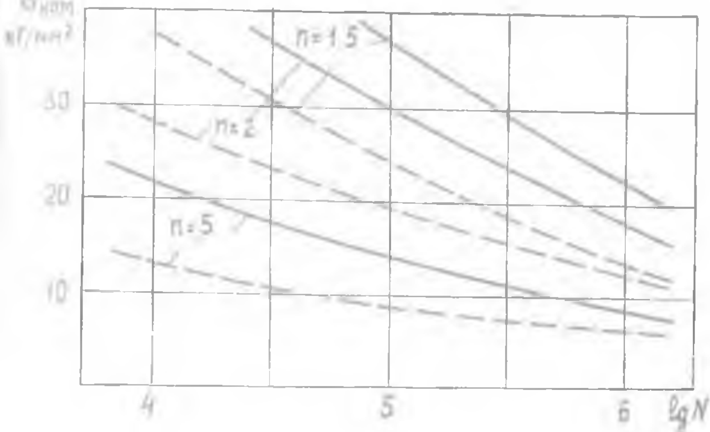

Рис. 2

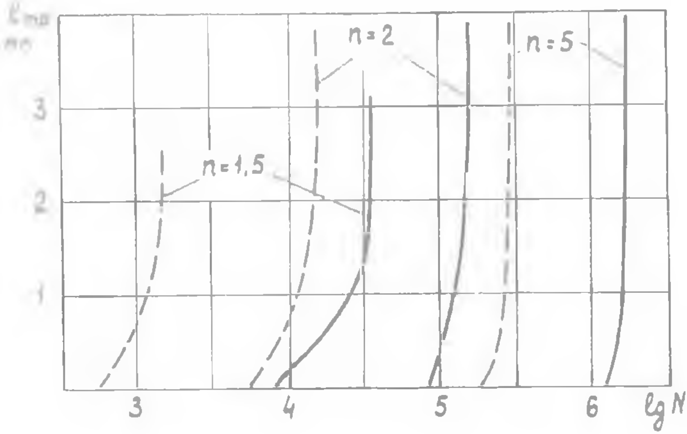

Рис. 3

Распределение напряжений в опасном сечении проушин до момента возникновения первой макротрещины определяется с помощью известного решения задачи Ляме для толстостенного сосуда, находящегося под воздействием внутреннего давления. После возникновения трещины поле напряжений в ее окрестности определяется с использованием методов линейной механики разрушения.

Проинтегрировав уравнение (5) для проушин со значением n = I,5; 2; 5 при внешних нагрузках, равных эксплуатационным, получим данные по распространению трещин (рис. 3), служащие основанием для выбора размеров проушины. В данном случае выбирается проушина со значением $n = 2$, имеющая требуемую долговечность и обладающая достаточной живучестью (время распространения трещины до разрушения составляет 7600 циклов, отношение времени разрушения к времени появления трещины 2,52). Для этой проушины рассчитываются кривые усталости по окончательному разрушению с вероятностями P = 0,0I и P = 0,99.

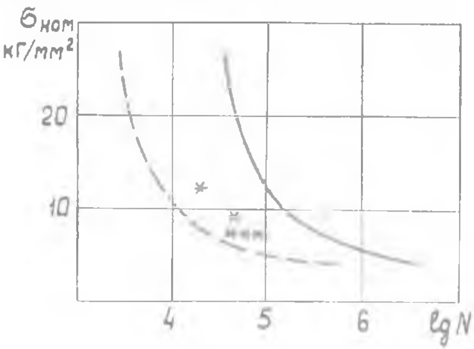

Рис. 4

Были испытаны пять проушин со значением $n = 2$*). Результаты эксперимента и соответствующие расчетные кривые представлены на рис. 4.

Изложенная методика выступает как эффективное аналитическое средство исследования усталостной долговечности, тем более ценное, что оно может быть использовано до того, как будет изготовлена опытная партия натурных образцов. Кроме того, применение аналитических методов определения долговечности и кинетики разрушения позволяет сократить объем натурных испытаний, которые могут быть сведены к испытанию небольшой партии деталей выбранного типоразмера.

---

*) Эксперимент проведен под руководством И.В.Якобсона.

Литература

1. Когаев В.П. Определение расчетных характеристик выносливости деталей машин. В сб. "Механическая усталость в статистическом аспекте". М., "Наука", 1969.

2. Дуплякин В.М., Мостовой А.С. К вероятностному расчету кривых усталости деталей по результатам испытаний лабораторных образцов. В сб. "Вопросы прочности элементов авиационных конструкций". Межвузовский сборник, вып. 1, Куйбышев, 1974.

3. Мостовой А.С. Определение долговечности образца на основе некоторых представлений о механизме усталостного разрушения. В сб. "Вопросы прочности элементов авиационных конструкций". Труды КуАИ, вып. 39, Куйбышев, 1968.

4. W. Weibull, Proc. Roy. Swed. Inst. Eng. Research, 1939, N 151.