

ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ
АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Межвузовский сборник, вып. 4, 1978

УДК 620.178.311

В.Г.Юдин

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТИ КОНСТРУКЦИИ В ЗОНЕ ВЫРЕЗА

В настоящей статье методом электрического моделирования, предложенным в работе [1], определяется долговечность окантовки типового выреза в нижней панели крыла при действии пульсирующей нагрузки, эквивалентной эксплуатационному спектру нагружения. Напряженное состояние в зоне выреза определено методом конечных элементов. Расчетным является сечение А-А, рис. 1.

Для электрического моделирования усталостного разрушения воспользуемся подходом, предложенным Р.Д.Вагаповым [2] и развитым в дальнейшем А.С.Мостовым [3]. Расчетное сечение рассматривается как совокупность малых напряженных элементов. Накопление усталостного повреждения в каждом из них определяется историей нагружения и описывается линейной гипотезой суммирования повреждений. Появление макротрещины рассматривается как разрушение первого наиболее нагруженного элемента. Тогда кривая усталости по разрушению для рассматриваемых элементов отождествляется с кривой усталости по появлению макротрещины в сечении детали. Распространение усталостной трещины трактуется как разрушение элементов, повреждение в которых достигло критической величины $D = 1$.

Приняв уравнение кривой усталости по появлению макротрещины в форме $\sigma^m N = C$ и выразив текущее значение числа циклов нагрузки n через частоту ω и время t , $n = \omega t$, получим систему уравнений (I), описывающую условия существования напряженных элементов 1, 2, 3, ..., n , т.е. распространение усталостного разрушения в расчетном сечении:

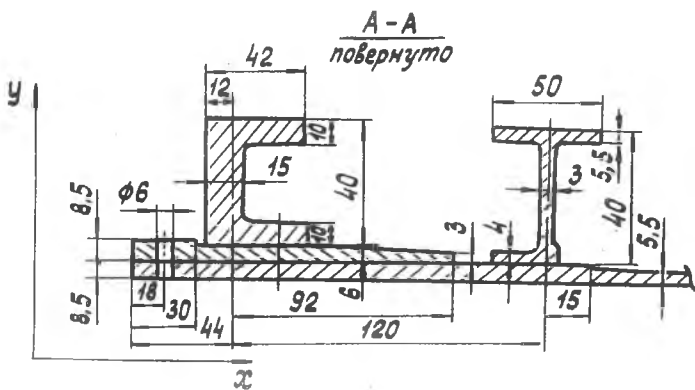
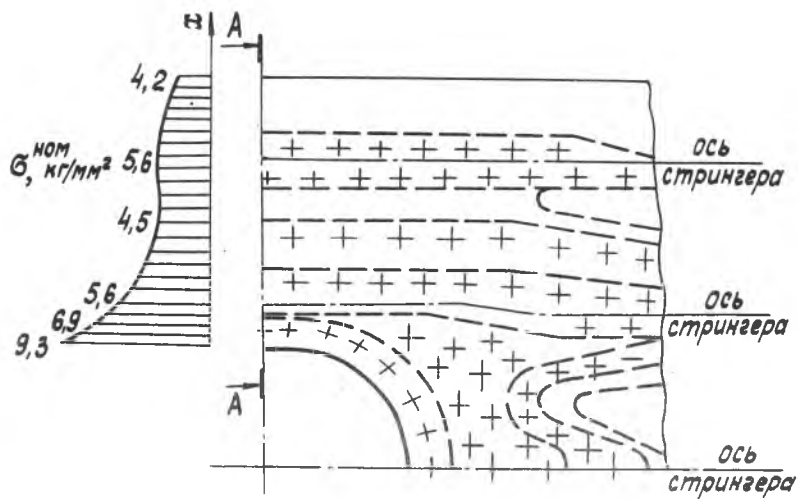


Рис. I

$$\begin{aligned} \frac{\omega}{c} \int_0^{t_1} (\sigma_1^0)^m dt &= 1, \\ \frac{\omega}{c} \int_0^{t_1} (\sigma_2^0)^m dt + \frac{\omega}{c} \int_{t_1}^{t_2} (\sigma_2^1)^m dt &= 1, \\ \frac{\omega}{c} \int_0^{t_1} (\sigma_n^0)^m dt + \frac{\omega}{c} \int_{t_1}^{t_2} (\sigma_n^1)^m dt + \frac{\omega}{c} \int_{t_2}^{t_3} (\sigma_n^2)^m dt + \\ + \dots + \frac{\omega}{c} \int_{t_i}^{t_{i+1}} (\sigma_n^i)^m dt + \dots + \frac{\omega}{c} \int_{t_{n-1}}^{t_n} (\sigma_n^{n-1})^m dt &= 1. \end{aligned} \quad (I)$$

Здесь σ_n^i - напряжение в n -ом элементе до момента разрушения i -того элемента; t_i - время от начала нагружения до разрушения i -того элемента.

Кривая усталости по появлению макротрещины в детали получена пересчетом кривой усталости по появлению макротрещины в плоском образце с отверстием из материала Д16-Т при знакопеременном изгибе.

Для расчета кривой усталости по появлению макротрещины для детали воспользуемся гипотезой слабого звена, которая в случае неравномерного поля напряжений дает зависимость вероятности разрушения от уровня максимальных напряжений [4]:

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[- \int_{F_u} \left(\frac{\sigma - u}{\sigma_0} \right)^m dF \right], \quad (2)$$

где $P(\sigma)$ - вероятность появления макротрещины; F_u - часть поперечного сечения, где $\sigma > u$; u , σ_0 , m - параметры распределения (рис. 2), определяемые по методике, изложенной в работе [5].

В случае растяжения-сжатия уравнение (2) преобразуется к виду:

$$-\ln [1 - P(\sigma)] = \frac{L}{G} \frac{(\sigma - u)^{m+1}}{(m+1)\sigma_0^m \sigma}.$$

Здесь L - часть периметра, принадлежащая к зоне концент-

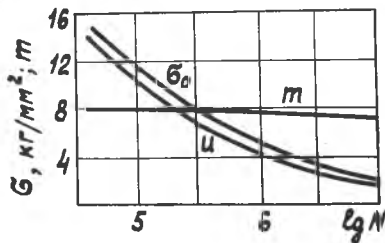


Рис. 2

рации напряжений; $\bar{G} = \frac{dG}{dx} \frac{1}{G}$ - относительный градиент первого главного напряжения.

Для рассматриваемого случая усталостная трещина возникает в зоне отверстия ϕ 6 мм. Тогда $L = 17$ мм, $\bar{G} = 0,766$. Кривые усталости по появлению макротрещины, полученные по уравнению (3) для вероятностей $P = 0,99$ и $P = 0,01$, приведены на рис. 3.

Каждому напряженному элементу (рис. 4а) расчетного сечения ставится в соответствие электрическая схема замещения (рис. 4б) (электрический аналог), изменение выходного напряжения которой (рис. 4е) отражает с достаточной точностью накопление усталостного повреждения в элементе сечения (рис. 4д), при условии, что входное напряжение электрического аналога (рис. 4г) пропорционально амплитуде напряжений в элементе сечения (рис. 4в).

Усталостное разрушение элемента сечения при таком подходе наступает, когда величина выходного напряжения электрического аналога достигнет заданной величины $U_{\text{вых}} = [U]$. Последняя соответствует кривой усталости по трещине для заданной вероятности и определяется при настройке электрических аналогов на расчетную кривую усталости (рис. 3). Соединенные между собой электрические аналоги образуют электрическую модель сечения. Усталостное разрушение расчетного сечения определяется на модели следующими условиями:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{RC} \int_0^{t_1} (U_{\text{вх}1})^m dt = [U] \\ & \frac{1}{RC} \int_0^{t_2} (U_{\text{вх}2})^m dt + \frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} (U_{\text{вх}2}')^m dt = [U] \\ & \frac{1}{RC} \int_0^{t_n} (U_{\text{вх}n})^m dt + \frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} (U_{\text{вх}n}')^m dt + \frac{1}{RC} \int_{t_2}^{t_n} (U_{\text{вх}n}'')^m dt + \\ & \dots + \frac{1}{RC} \int_{t_i}^{t_{i+1}} (U_{\text{вх}n}^{(i)})^m dt + \dots + \frac{1}{RC} \int_{t_{n-1}}^{t_n} (U_{\text{вх}n}^{(n-1)})^m dt = [U]. \end{aligned} \quad (4)$$

При этом должны соблюдаться критерии подобия, представленные в безразмерной форме:

$$\left| \frac{D_j C_n}{\omega_n (G_j^*)^m t_n} \right|_{j=1, \dots, n} = \left| \frac{U_{\text{вых}j} R_m C_m}{(U_{\text{вх}j}^0)^m t_m} \right|_{j=1, \dots, n}, \quad (5)$$

$$l = 1, \dots, (j-1)$$

где $U_{\text{вх}n}^{(l)}$ - входное напряжение n -ого аналога в момент, когда выходное напряжение l -того аналога стало равным $[U]$; RC -

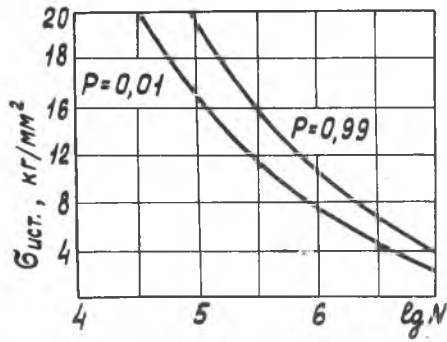


Рис. 3

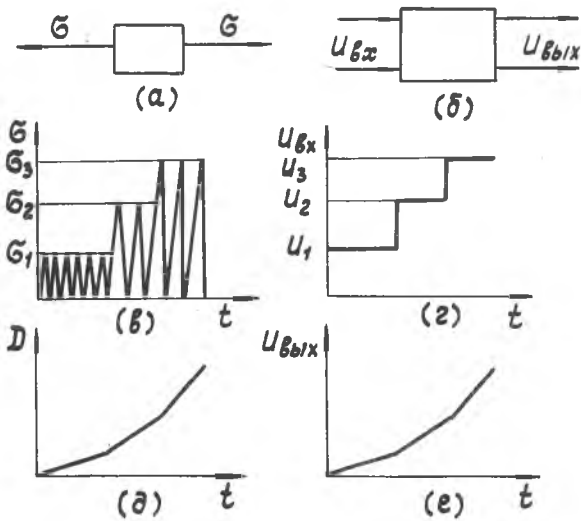


Рис. 4

постоянная интегрирования электрических аналогов.

Индекс N означает принадлежность величины к натуре, а индекс M к модели.

Критерии подобия (5) связывают координаты и время распространения усталостной трещины в сечении с протеканием процессов на модели.

Задавшись масштабами моделирования для основных параметров натуре G , D , C_H/ω_H и модели U_{Bx} , U_{Byx} , $R_M C_M$, определим масштаб времени t_M для модели из условий (5).

В процессе расчета шаг напряженных элементов вдоль оси X принимался равным 0,5 мм. Так как в рассматриваемом случае напряжения изменяются только вдоль оси X , то фронт усталостной трещины перемещается параллельно оси Y , и для развития разрушения от отверстия $\phi 6$ мм возможны два направления: L_1 - в сторону контура выреза и L_2 - в сторону окантовывающего вырез стрингера (рис. 5а).

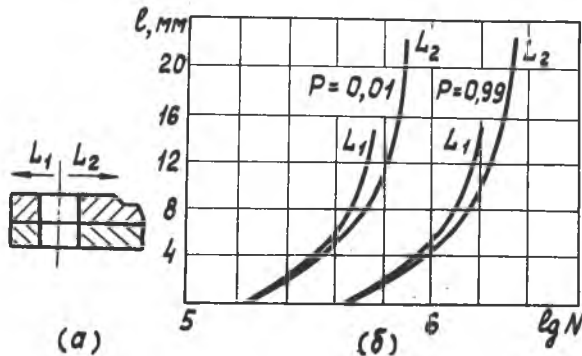


Рис. 5

Результаты расчета, проведенного с помощью электрической модели усталости, приведены на рис. 5б. Их анализ показывает, что развитие усталостных трещин, зародившихся у отверстия, ускоряется с ростом длины трещины. При $L_2 = 20$ мм расчетное сечение практически исчерпывает свой ресурс, что соответствует долговечности $N = 750000$ циклов при $P = 0,01$ и $N = 1800000$ циклов при $P = 0,99$.

Л и т е р а т у р а

1. Юдин В.Г. О возможности электрического моделирования механической усталости. В сб.: Контактные и циклические задачи теплопроводности. Вопросы прочности и работоспособности инструментальных материалов. Межвузовский сборник, вып. 2, Куйбышев, КПТИ, 1977.

2. Вагапов Р.Д. Статистические и детерминистские закономерности усталости и возможность их моделирования. - В кн.: Вопросы механической усталости. "Машиностроение", М., 1964.

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, 1968.

4. Серенсен С.В. Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению. Атомиздат, М., 1975.

5. Дулякин В.М., Мостовой А.С. К вероятностному расчету кривых усталости деталей по результатам испытаний лабораторных образцов. - В кн.: Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Межвузовский сборник, вып. 1, изд. КуАИ, 1974.