

### Л и т е р а т у р а

1. Лехницкий С.Г. Анизотропные пластики. - М.: ГИТТЛ, 1957. - 463 с.
2. Кильчевский Н.А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар. - Киев: Наукова Думка, 1976. - 314 с.
3. Серенсен С.В., Зайцев Г.П. Несущая способность тонкостенных конструкций из армированных пластиков с дефектами. - Киев: Наукова Думка, 1982. - 294 с.
4. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лалласа. - М.: ГИИМ, 1958. - 207 с.
5. Савин Г.Н. Концентрация напряжений около отверстий. - М-Л.: ГИТЛ, 1951. - 496 с.
6. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. - М.: Машиностроение, 1975. - 488 с.

УДК 629.7.017.1

Т.Д.Коваленко, Э.И.Миноранский  
С.Н.Перов, Ю.Л.Чарасов

#### ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ, ИМЕЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИЛИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ

Конструкция летательных аппаратов содержит силовые элементы, различающиеся по своему функциональному назначению. Во время эксплуатации в материале некоторых силовых элементов может образоваться макроскопическая трещина в результате накопления рассеянных повреждений. Эта трещина далее растет по тем же закономерностям, что и трещина технологического происхождения. Стадия ~~накопления~~ накопления рассеянных повреждений может составлять от 50 до 90 % от общего ресурса /1/.

Анализ состояния реальных конструкций показывает, что при производстве силовых элементов возможно образование начальных технологических неконтролируемых дефектов (непроваров, пор, включений, растрескиваний и т.п.) как в основном материале, так и в зоне сварных швов или заклепочных соединений. Материал конструкции может иметь также металлургические трещиноподобные дефекты.

Во время производственной приемки и планового осмотра даже при использовании современных средств дефектоскопии, которые в лабораторных условиях имеют высокую разрешающую способность, иногда пропускаются достаточно большие трещины, что обусловлено отсутствием информации об их местоположении. Критерием при этом должно служить не то, какую наименьшую трещину можно обнаружить в лабораторных условиях, а какой наибольший дефект можно пропустить в рабочих условиях. Так, например, в работе /2/ показано, что ультразвуковой и краскокапиллярный методы дефектоскопии позволяют с большей надежностью обнаружить только дефекты длиной более 9 мм, хотя их местоположение было заранее известно.

Следовательно, при проектировании современных летательных аппаратов необходимо учитывать, что часть силовых элементов может содержать относительно большие трещины. В основу современных методов проектирования таких элементов конструкции положен принцип повышенной живучести, который ставит задачу разработки эффективных методов оценки длительности стадии развития трещин вплоть до окончательного разрушения элемента.

С учетом стохастического характера геометрических, механических параметров конструкции и действующей нагрузки процесс развития усталостной трещины  $l(t)$  является случайным процессом. Поэтому оценку остаточного ресурса необходимо проводить в вероятностной постановке, то есть определять время эксплуатации конструкции до разрушения при заданной вероятности отказа или заданном уровне надежности

За параметры состояния силовых элементов с трещиной в данной работе приняты текущая длина усталостной трещины и величина максимального коэффициента интенсивности напряжений  $K^{max}(t)$  в вершине трещины. Момент разрушения характеризуется достижением параметрами состояния соответствующих критических значений  $l_c$  и  $K_c$ .

Если в качестве отказа рассматривать момент квазихрупкого разрушения элемента конструкции, то параметры  $l_c$  и  $K_c$  будут взаимозависимы и определяются величиной приложенной нагрузки.

Для многих конструктивных элементов летательных аппаратов величина критической длины трещины  $l_c$  характеризует такие эксплуатационные свойства системы, как жесткость, герметичность, податливость и т.п. А величина циклического коэффициента интенсивности напряжений характеризует момент ускоренного развития усталостной трещины при данной эффективной частоте нагружения.

Аналитическое определение остаточного ресурса в указанной

постановке связано с трудностями, преодолеть которые зачастую невозможно без введения существенных допущений о характере распространения усталостной трещины.

В данной работе для моделирования стохастического процесса распространения усталостной трещины и оценки остаточного ресурса при заданной величине надежности используется аппарат метода интерполяционных полиномов /3/.

Случайный стационарный процесс нагружения  $R(t)$  с заданной спектральной плотностью  $S_R(\omega)$  представляется неканоническим разложением /4/, а поцикловая скорость роста усталостной трещины полностью определяется размахом коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины  $\Delta K$  и параметрами материала и конструкции  $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_S$ :

$$\frac{d\ell}{dn} = \varphi(\Delta K, \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_S). \quad (I)$$

Полагается, что начальная длина трещины  $\ell_0$  является случайной величиной, распределенной по нормальному закону. Экспериментальные исследования /5/ показали, что при постоянной амплитуде коэффициента интенсивности напряжений величина приращения длины трещины за достаточно малый промежуток времени является нормально распределенной случайной величиной. Следовательно, случайная величина  $\ell(\Delta t) = \ell_0 + \Delta \ell$  также будет распределена по нормальному закону. Обобщая, делаем допущение, что в любой момент времени  $t$  длина трещины  $\ell(t)$  есть случайная величина с нормальным законом распределения и для полного ее описания достаточно знать математическое ожидание  $\langle \ell(t) \rangle$  и дисперсию  $D[\ell(t)]$ .

Полагая, что случайные величины - коэффициент интенсивности напряжений в момент времени  $t$ , значения  $\ell_c$  и  $K_c$ , определяющие стохастическую границу области допустимых состояний, - распределены по нормальному закону, функцию надежности находим в каждый момент времени по следующим зависимостям /4/:

$$H(t) = \frac{H_1(t) \cdot H_2(t)}{H_1(t) + H_2(t) - H_1(t) \cdot H_2(t)}, \quad (2)$$

где  $H_i(t) = \Phi(z_i)$ ,  $i = 1, 2$ ,  $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z - \frac{t^2}{2}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ ;  $z_1 = \frac{\langle \ell_c \rangle - \langle \ell(t) \rangle}{\sqrt{D[\ell_c] + D[\ell(t)]}}$ ,  
 $z_2 = \frac{\langle K_c \rangle - \langle K^{max}(t) \rangle}{\sqrt{D[K_c] + D[K^{max}(t)]}}$ .

Для расчетной оценки остаточного ресурса и надежности элементов конструкции достаточно определить математическое ожидание и дисперсию параметров  $\ell(t)$  и  $K^{max}(t)$  в каждый момент времени.

Размах коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K$  в каждый момент времени  $t$  (т.е. при определенной длине трещины  $l$ ) определяется размахом действующей нагрузки, а также физическими геометрическими параметрами элемента конструкции, средой эксплуатации:

$$\Delta K = K_{max} - K_{min},$$

$$K_{max} = K(l, R_{max}, \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_s); \quad K_{min} = K(l, R_{min}, \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_s)$$

Для вычисления значений  $\Delta K$  достаточно знать зависимость коэффициента интенсивности напряжений от длины трещины при некоторой фиксированной величине внешней силы  $R_*$ .

Аналитическое решение задачи исследования напряженно-деформированного состояния в зоне у вершины трещины с учетом пластичности очень сложно и в замкнутом виде получено лишь для случая антиплоской деформации /6/. Когда анализ напряжений и деформаций не может быть выполнен в явном виде, необходимо использовать приближенные численные методы. В реальных элементах конструкции, расчет которых может быть сведен к двумерным задачам, чаще реализуется несимметричное поле напряжений относительно линии трещины, и асимптотика у вершины трещины описывается двумя составляющими инвариантного энергетического контурного интеграла Черепанова-Райса  $J_1$  и  $J_2$  (отрывным и сдвиговым) /6/.

В дополнение к имеющейся программе расчета несущей способности элементов с трещинами при симметричном поле напряжений была разработана подпрограмма расчета параметров трещиностойкости  $J_K$ ,  $K = I, II$ , для несимметричного поля напряжений, которые описывают компоненты

$J$ -интеграла как вектора потока энергии деформации через вершину трещины в плоских элементах конструкции:

$$J_K = \int (\sigma_{ij} n_j - G_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} - \eta_j) ds, \quad K = I, II. \quad (4)$$

Вычисления по формуле (4) реализуются методом конечных элементов в упругопластической постановке в условиях пошагового монотонного нагружения.

Зависимости (3) вычисляются по энергетическому методу (4) в соответствии с выражениями:

$$K_I = \frac{1}{2} (\sqrt{J_1 - J_2} + \sqrt{J_1 + J_2}) \sqrt{E'}$$

$$K_{II} = \frac{1}{2} (\sqrt{y_1 - y_2} - \sqrt{y_1 + y_2}) \sqrt{E'} \quad (5)$$

Таким образом, изменение длины трещины  $\ell$ , которое осуществляется автоматическим переносом вершины трещины в соответствующий узел сетки конечных элементов и разрывом связей между освободившимися конечными элементами, дает зависимость  $K(\ell, R_*, z_1, z_2, \dots, z_S)$ .

В указанной постановке предлагаемая реализация вычисления остаточного ресурса силовых элементов заключается в следующем.

1. Проводится анализ работы элемента конструкции, определяются в различных сечениях действующие напряжения, выявляются местоположение возможных начальных дефектов и направление их развития.

2. Задаются параметры нормального закона распределения длины начального трещиноподобного дефекта  $\langle \ell_0 \rangle, D[\ell_0]$ .

3. Определяются экспериментальным путем моменты распределения стохастических границ области допустимых состояний  $\langle \ell_c \rangle, D[\ell_c], \langle K_c \rangle, D[K_c]$ .

4. Для случайных величин  $z_1, z_2, \dots, z_S$  задается число узлов интерполяции  $- q_1, q_2, \dots, q_S$  и определяются соответствующие узлы интерполяции.

5. Определяется расчетным путем зависимость  $K(\ell, R_*, z_1, z_2, \dots, z_S)$  для рассматриваемого конструктивного элемента.

6. Задаются числа узлов интерполяции неканонического разложения и строятся реализации случайного процесса нагружения  $R_{K_R}(t)$   
 $K_R = 1, 2, \dots, q_R$ ;  $q_R$  - заданное число реализаций.

7. Задаются число узлов интерполяции случайной величины длины трещины  $q_\ell$  и определяются узлы интерполяции:

$$\ell_{K_\ell} = \langle \ell(t) \rangle + \lambda_{q_\ell, K_\ell} \sqrt{D[\ell(t)]}, \quad K_\ell = 1, \dots, q_\ell, \quad (6)$$

где  $\lambda_{q_\ell, K_\ell}$  - узлы типа Чебышева центрированного нормированного нормального закона распределения /3/.

8. Осуществляется интегрирование уравнения (I) в узлах интерполяции:

$$\Delta \ell_{K_u} = \varphi(\Delta K_{K_n}, z_{1K_1}, z_{2K_2}, \dots, z_{SK_S}) \frac{\omega_{K_\omega}}{2\pi} \Delta t, \quad (7)$$

где  $\Delta K_{K_n} = [K(\ell_{K_\ell}, R_{K_R}, z_{1K_1}, \dots, z_{SK_S})] - K(\ell_{K_\ell}, R_{K_R}^{\min}, z_{1K_1}, \dots, z_{SK_S}) / R_*$ ,  
 $K_n = K_\ell \cdot K_R \cdot K_1 \cdot \dots \cdot K_S$ ;  $K_u = K_n \cdot K_\omega$ ;  $K_\omega$  - число узлов интерполяции случайной величины  $\omega$ .

9. По формулам метода интерполяционных полиномов определяются параметры математического ожидания и дисперсии:

$$\langle \Delta \ell \rangle = \sum_{k_u=1}^{q_u} \Delta \ell_{k_u} \cdot p_{k_u}; \quad D[\Delta \ell] = \sum_{k_u=1}^{q_u} [\Delta \ell_{k_u} - \langle \Delta \ell \rangle]^2 \cdot p_{k_u}, \quad (8)$$

$$\langle K^{max}(t) \rangle = \sum_{k_n=1}^{q_n} K_{k_n}^{max} \cdot p_{k_n}; \quad D[K_n^{max}(t)] = \sum_{k_n=1}^{q_n} [K_n^{max} - \langle K^{max}(t) \rangle]^2 \cdot p_{k_n}, \quad (9)$$

где  $q_n = q_\ell \cdot q_R \cdot q_1 \cdot \dots \cdot q_5$ ;  $q_u = q_\omega \cdot q_n$ .

10. Делается переход к моменту времени  $t = t + \Delta t$  и вычисляются моментные характеристики длины трещины

$$\langle \ell(t + \Delta t) \rangle = \langle \ell(t) \rangle + \langle \Delta \ell(t) \rangle$$

$$D[\ell(t + \Delta t)] = D[\ell(t)] + D[\Delta \ell(t)]. \quad (10)$$

11. Вычисляется вероятность безотказной работы по формулам (2) и сравнивается с величиной заданной нормированной надежности  $H_0$ . Если  $H(t) < H_0$ , расчет продолжается, начиная с пункта 7.

В соответствии с изложенной схемой составлен алгоритм и написана программа расчета на ЭЕМ остаточного ресурса элементов конструкции с заданной надежностью, имеющих производственные или эксплуатационные дефекты.

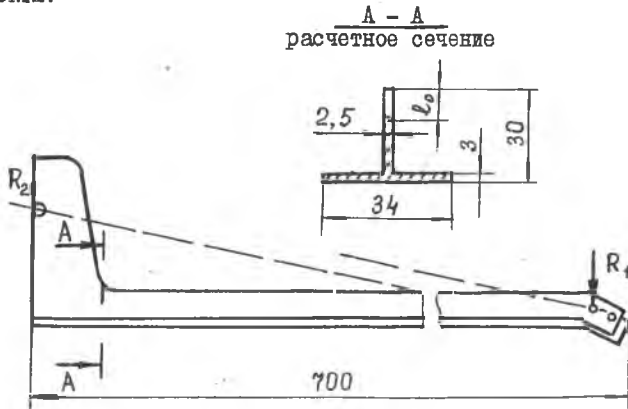


Рис. I

Проведены тестовые расчеты живучести кронштейна, схема которого представлена на рис. I. Кронштейн выполнен из материала АМг6М, кото-

рый имеет следующие характеристики:  $\langle K_c \rangle = 30 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ,  $D[K_c] = 6 [\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}]^2$ . Уравнение поцикловой скорости роста усталостных трещин взято в форме Париса с показателями на воздухе:  $c = 10^{-6}$ ,  $m = 2$ ; в вакууме:  $c = 6,1 \cdot 10^{-12}$ ,  $m = 6/7$ . Кронштейн воспринимает случайную стационарную нагрузку, спектральная плотность которой имеет вид:

$$S_R(\omega) = \frac{4\alpha D_R}{\pi} \frac{\omega^2 + \omega_0^2 + \alpha^2}{(\omega^2 + \omega_0^2 + \alpha^2)^2 - 4\omega_0^2 \omega^2} \quad (\text{II})$$

Параметры процесса нагружения следующие:  $\omega_0 = 62,8 \text{ с}^{-1}$ ,  $\alpha = 0,3353$ ; первый вариант нагружения:  $\langle R(t) \rangle = 1 \text{ кН}$ ,  $D_R = 22500 \text{ Н}^2$ ; второй вариант:  $\langle R(t) \rangle = 1,5 \text{ кН}$ ;  $D_R = 37500 \text{ Н}^2$ . Моменты распределения начального и конечного дефекта:  $\langle \ell_0 \rangle = 1 \text{ мм}$ ;  $D[\ell_0] = 0,0025 \text{ мм}^2$ ;  $\langle \ell_c \rangle = 15 \text{ мм}$ ;  $D[\ell_c] = 1 \text{ мм}^2$ .

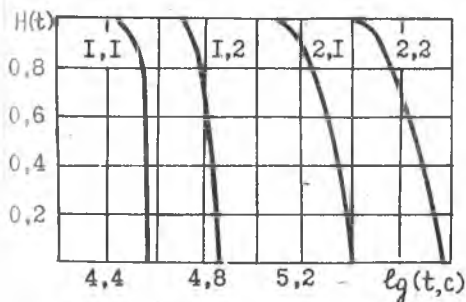


Рис. 2

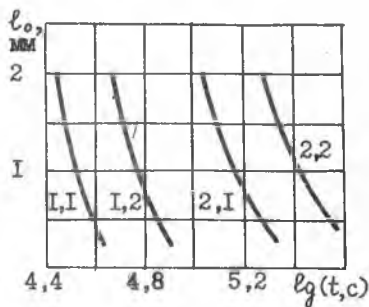


Рис. 3

Результаты расчетов функции надежности кронштейна в различных условиях эксплуатации при различных режимах нагружения представлены на рис.2. На рис.3 показаны зависимости остаточного ресурса от длины начального дефекта при заданной величине нормированной надежности. Первая цифра на рис.2, 3 обозначает номер режима нагружения, вторая - условия эксплуатации (.1 - воздух, .2 - вакуум). Анализ результатов показывает, что при заданных режимах нагружения остаточный ресурс при эксплуатации в вакууме выше, чем в нормальных условиях. Это объясняется существенным уменьшением скорости роста усталостных трещин в вакууме.

Л и т е р а т у р а

1. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. - М.: Металлургия, 1975. - 456 с.
2. Нотт Д. Основы механики разрушения. - М.: Металлургия, 1978. - 256 с.
3. Чернецкий В.И. Анализ точности нелинейных систем управления. - М.: Машиностроение, 1968. - 248 с.
4. Перов С.Н. Методика оценки вероятности безотказной работы элементов конструкции летательных аппаратов с учетом технологических и эксплуатационных трещиноподобных дефектов. - Куйбышев, 1985. 77 с. Рукопись деп. в ВИНТИ № 3853-85 Деп от 03.06.85.
5. Ярема С.Я., Мельничок Л.С., Попов Б.А. Рассеяние скорости роста усталостной трещины и обработка экспериментальных данных. - Физ-хим. механика материалов, 1984, № 3, с.59-66.
6. Черепанов Г.П. Уругоупругая задача в условиях антиплоской деформации. - Прикладная математика и механика, 1962, т.26. № 4, с.697-708.
7. Куренков В.И., Тарасов Ю.Л. Определение скорости роста усталостных трещин на основе равновесной диаграммы растяжения: - В кн.: Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций. Куйбышев, 1980, с.98-105.

УДК 539.4.620.178.222

Б.А.Лавров, Б.В.Курилкин, В.А.Носов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ  
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА МАЛЫХ ОБРАЗЦАХ

Для оценки работоспособности элементов конструкции с трещинами в настоящее время все более широкое применение получают параметры механики разрушения. Наибольший интерес среди них представляет критический параметр  $K_{1c}$ , определяющий нижнюю границу вязкости разрушения и являющийся константой материала. Однако определение  $K_{1c}$  по существующим методикам требует испытания массивных образцов, при разрушении которых благодаря достаточной для данного материала толщине практически запрещается макропластическая деформация перед краем трещины и реализуются условия плоской деформации, необходимые для корректного определения  $K_{1c}$  материала. Проведение