ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ
АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
Межвузовский сборник, вып. 5, 1979

УДК 678.5:620.I7:629.7

Г.П.Зайцев

К ВОПРОСУ О ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТИКОВ С ТРЕЩИНАМИ В СИЛОВОМ АСПЕКТЕ

Рассмотрим пластину из эпоксифенольного армированного пластика с центральной трещиной, подвергающуюся осевому циклическому растяжению в направлении первой главной оси анизотропии (рис. I).

Экспериментальные данные, полученные при кратковременном растяжении до разрушения пластин из эпоксифенольных пластиков с трещиной, показывают, что силовая модель [I] хорошо описывает полученные данные. При этом трещина представляется состоящей из двух зон: зоны $2\ell_0$ невзаимодействующих берегов и зоны $2L - 2\ell_0 = 2\Delta\ell$ взаимодействующих берегов с силой, равной пределу прочности бездефектного материала $\sigma_в$.

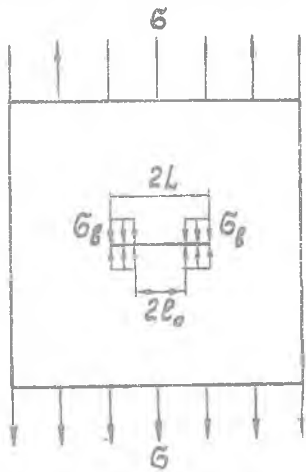


Рис. I

Из работы [I] следует, что предельное напряжение для пластины из вышеуказанного материала с центральной трещиной будет таким:

$$\sigma_к = \frac{2}{\pi}\sigma_{в_1} \arccos \exp\left(-\frac{\pi E_1 \gamma_{в1}}{2\ell_0 \sigma_{в_1}^2 \operatorname{Re}[-i(S_1+S_2)]}\right), \qquad (I)$$

где $\sigma_{в1}$ – предел прочности материала в первом главном направлении анизотропии; E_1 – модуль упругости первого рода в первом главном направлении анизотропии; $\gamma_{б1}$ – плотность поверхностной энергии разрушения по нормальным напряжениям в первом главном направлении анизотропии; S_1, S_2 – параметры упругости, определяемые из уравнения

$$S^4+\left(\frac{E_1}{G_{12}}-2\nu_{12}\right)S^2+\frac{E_1}{E_2}=0,$$

где E_2 – модуль упругости первого рода во втором главном направлении; G_{12} – модуль упругости второго рода в плоскости 12; ν_{12} – коэффициент Пуассона, характеризующий изменение размеров в направлении 2 при нагружении в направлении 1.

Величина $\Delta\ell = L-\ell_0$ определяется из зависимости [1]

$$\Delta\ell=\ell_0\left(\sec\frac{\pi\sigma}{2\sigma_{в1}}-1\right),$$

где σ – уровень действующего напряжения.

Наблюдения под микроскопом за прорастанием трещины при циклическом нагружении показывают, что за каждый цикл трещина подрастает на определенную часть зоны взаимодействующих берегов. Эта часть подрастания зависит от асимметрии цикла r и вида армированного пластика

$$(\delta\ell)_{1\,цикл}=K_r\cdot\Delta\ell,$$

где K_r – относительная величина подрастания трещины за один цикл ($0\leq K_r\leq 1$).

За первый цикл нагружения трещина продвинется и длина трещины без учета зон взаимодействия возрастет с ℓ_0 до ℓ_1

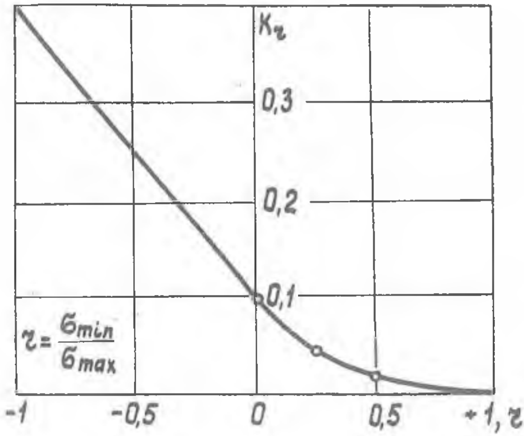
$$\ell_1=\ell_0+(L-\ell_0)K_r=\ell_0\left[1+K_r\left(\sec\frac{\pi\sigma}{2\sigma_{в1}}-1\right)\right].$$

После второго цикла нагружения длина зоны невзаимодействующих берегов трещины будет

$$\ell_2=\ell_1+(L_1-\ell_1)K_r=\ell_0\left[1+K_r\left(\sec\frac{\pi\sigma}{2\sigma_{в1}}-1\right)\right]^2.$$

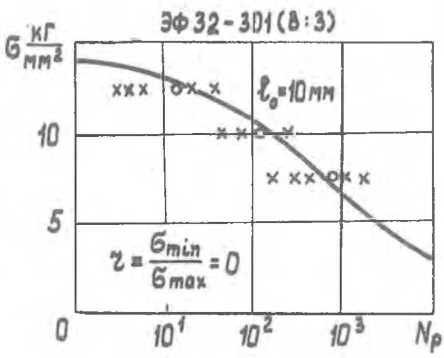
После N циклов нагружения получим

$$\ell_N=\ell_0\left[1+K_r\left(\sec\frac{\pi\sigma}{2\sigma_{в1}}-1\right)\right]^N. \tag{2}$$



K_r
0,3
0,2
0,1
$r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$
-1
-0,5
0
0,5
+1, r

Рис. 2



ЭФ 32-301 (8:3)
$\sigma \frac{кГ}{мм^2}$
ℓ_0=10 мм
10
5
$r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0$
0
10^1
10^2
10^3
N_p

Рис. 3

Из уравнения (2) можно найти предельное число циклов до разрушения элементов с трещиной

$$N_p = \frac{\lg \frac{\ell_{N_p}}{\ell_0}}{\lg\left[1 + K_r\left(\sec\frac{\pi\sigma}{2\sigma_{B1}} - 1\right)\right]}. \qquad (3)$$

Разрушение элементов из армированных пластиков с трещиной наступает тогда, когда длина трещины достигает критической для рассматриваемого уровня нагружения. Используя зависимость (1) можно найти, что

$$\ell_{N_p} = \frac{\pi \gamma_{1\sigma} E_1}{2\sigma_{B1}^2 \operatorname{Re}\left[-i(S_1 + S_2)\right] \ln \sec\frac{\pi\sigma}{2\sigma_{B1}}}. \qquad (4)$$

Тогда предельное число циклов до разрушения будет

$$N_p = \frac{\lg \dfrac{\pi \gamma_{1\sigma_B} E_1}{2\sigma_{B1}^2 \ell_0 \operatorname{Re}\left[-i(S_1 + S_2)\right] \ln \sec\frac{\pi\sigma}{2\sigma_{B1}}}}{\lg\left[1 + K_r\left(\sec\frac{\pi\sigma}{2\sigma_{B1}} - 1\right)\right]}. \qquad (5)$$

Используя метод линеаризации, можно найти дисперсию числа циклов до разрушения [2]:

$$D(\ell_{N_p}) = \frac{1}{\lg^2 A}\left[\frac{D(N_p)}{\ell_{N_p}^2} + \frac{D(\ell_0)}{\ell_0^2}\right] +$$

$$+ \frac{K_r^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\pi\sigma}{2\sigma_{B1}}}{\cos^2 \frac{\pi\sigma}{2\sigma_{B1}}} \; \frac{\pi^2 \lg^2 \frac{\ell_{N_p}}{\ell_0}}{4\sigma_{B1}^2 A^2 \lg^4 A}\left[D(\sigma) + D(\sigma_{B1})\frac{\sigma^2}{\sigma_{B1}^2}\right],$$

где

$$A = 1 + K_r\left(\sec\frac{\pi\sigma}{2\sigma_{B1}} - 1\right). \qquad (6)$$

Вначале при испытании ряда образцов из армированного стеклопластика на основе стеклоткани сатинового плетения (8:3) и эпоксифенольного связующего ЭФ 32-30I определялись K_r в зависимости от асимметрии цикла при действии циклического напряжения растяжения вдоль основы, т.е. вдоль первого главного направления

...отропии. Испытания проводились при $r = 0{,}4;\ 0;\ 0{,}125;\ 0{,}5$. ...ученная при этом зависимость K_r от асимметрии цикла представ... на рис. 2.

Используя физико-механические характеристики материала ...Ф 32-301 $E_1 = 3280$ кг/мм^2, $E_2 = 2100$ кг/мм^2, $G_{12} = 570$ кг/мм^2, $\nu_{12} = 0{,}21$, $\gamma_{\sigma 1} = 1{,}35$ кг/мм, $\sigma_{B1} = 53{,}0$ кг/мм^2, можно по фор... (5) построить кривую усталости в координатах "$\sigma - N_p$". Для ...льной полудлины трещины $\ell_0 = 10$ мм эта кривая представлена ...рис. 3 в виде сплошной линии. Точками на рис. 3 показаны экс...риментальные данные по результатам циклического растяжения ...стин из армированного стеклотканью пластика ЭФ 32-301 со ...возной центральной трещиной, расположенной перпендикулярно ...правлению основного армирования. Образцы имели размеры: ширина ... = 80 мм, толщина $t = 3$ мм, длина $H = 500$ мм. Из рисунка видно ...овлетворительное описание экспериментальных данных расчетными ...ными.

По зависимости (2) можно рассчитать изменение длины трещины ...элементе из армированного пластика по циклам, при этом скорость ...оста зоны невзаимодействующих берегов трещины можно найти из ...отношения

$$\frac{d\ell}{dN} = \ell_0\left[1 + K_r\left(\sec\frac{\pi\sigma}{2\sigma_{B1}} - 1\right)\right]^N \ln\left[1 + K_r\left(\sec\frac{\pi\sigma}{2\sigma_{B1}} - 1\right)\right]. \qquad (7)$$

Из зависимости (7) следует, что скорость роста длины трещи...ы по циклам увеличивается по мере увеличения наработанного числа ...циклов, что наблюдалось экспериментально.

Л и т е р а т у р а

1. Зайцев Г.П. К вопросу о предельном равновесии пластин и ...тел из хрупких ортотропных материалов с трещинами. Проблемы прочности, № 8, 1977, стр. 78÷83.

2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей, М., "Наука", 1964.