

УДК 539.4.305

Г. П. Зайцев, В. А. Пашков,
А. В. Зянин, И. В. Хавеева

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ
ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ ИСПЫТАНИИ НА ИЗГИБ ПЛАСТИН
ИЗ АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТИКОВ С ТРЕЩИНОЙ

Многие элементы ответственных конструкций (например, лопасти вертолетных винтов), выполненные из армированных пластиков, воспринимают значительные изгибающие нагрузки, переменные во времени. В связи с этим особый интерес представляют процессы потери несущей способности и развития усталостных трещин, происходящие в композиционных материалах при изгибе.

В работах [1, 2, 3] подробно исследованы процессы разрушения углепластиков при кратковременном изгибе и определены характеристики трещиностойкости для углепластиков с различными углами армирования.

В данной работе авторами ставилась цель определить характеристики роста трещины в композиционном материале типа углепластик при малоцикловом изгибе с коэффициентом асимметрии цикла $R = 0$, выявить влияние различных факторов на распространение усталостной трещины.

Анизотропия характеристик прочности композиционного материала приводит к существованию плоскостей различного сопротивления. В связи с этим трещина может изменять свое направление при прорастании по циклам; в этом случае изменяется и поле напряжений у вершины трещины.

В данной работе изучение кинетики развития трещины проводилось при испытаниях на малоцикловую усталость при трехточечном изгибе образцов из углепластика, механические свойства которого приведены в таблице I. Испытания проводились на образцах

прямоугольного сечения с надрезом.

Таблица

Модуль упругости при растяжении E_p , кгс/мм ²	Коэффициент Пуассона при растяжении ν	Предел прочности при изгибе $\sigma_{\text{ги}}$, кгс/мм ²	Модуль упругости при изгибе $E_{\text{из}}$, кгс/мм ²
8740	0,320	16,30	6210

Надрез, пересекающий полностью несколько слоев композита, наносился на фрезерном станке дисковой фрезой толщиной 0,2 мм. Кончик надреза доводился лезвием безопасной бритвы.

Испытания проводились на машине УМЭ-10ТМ. Для наблюдения за ростом трещины использовался микроскоп, позволяющий проводить измерения с точностью 0,002 мм. Длина трещины изменялась в двух направлениях: x и y (рис. 1).

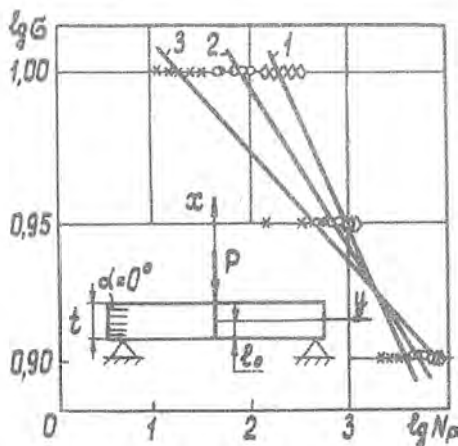


Рис. 1. Кривые малоциклового усталости и схема испытаний
1 - $l_0 = 1$ мм, 2 - $l_0 = 3$ мм, 3 - $l_0 = 6$ мм.

В целях исследования влияния глубины первоначального надреза на долговечность элемента и кинетику роста усталостной трещины были испытаны 3 партии по 15 образцов каждая. Длина надреза в

партиях составляла 1 мм, 3 мм, 6 мм, что соответственно равнялось $\frac{1}{12}t$, $\frac{1}{4}t$ и $\frac{1}{2}t$, где $t = 12$ мм - высота образца. Эксперименты проводились при 3 уровнях начального значения коэффициента интенсивности напряжений K_I .

Уровень нагрузок принимался достаточно высоким, так что долговечность образцов с надрезами не превышала $N_p = 5 \cdot 10^3$ циклов. Кривые малоциклового усталости представлены на рис. 1. Их анализ выявляет определенную зависимость долговечности образцов от глубины надреза. Корреляционное уравнение, описывающее эту связь, имеет вид

$$\lg N_p = 14,90 + 2,20 \lg \sigma - (12,49 + 2,29 \lg \sigma + 0,02 \lg^2 \sigma - 0,06 \lg^3 \sigma) \lg \sigma, \quad (1)$$

где σ - напряжения, посчитанные по "живому" сечению.

Эксперименты показали, что в течение первых десятков циклов нагружения трещина растет в направлении первоначального надреза X . По мере ее развития происходит отклонение траектории трещины от первоначального направления, она интенсивно развивается вдоль оси Y , причем продолжается рост и в направлении оси X .

Значение числа циклов N_y , при котором происходит явное изменение направления роста трещины, находится в пределах от 10 до 100 циклов и зависит от величины нагрузки и глубины надреза образца. Высокий уровень нагрузки и значительная длина надреза ведут к тому, что трещина начинает развиваться между слоями практически с первых циклов нагружения. Это обусловлено значительным повышением уровня касательных напряжений, которые играют основную роль при расслоении по мере приближения трещины к нейтральной линии образца. Приблизительно значение N_y можно определять из эмпирической зависимости

$$\lg N_y = 1,824 - 0,000043 \lg \sigma^{3,6}. \quad (2)$$

По результатам экспериментов строилась зависимость скорости роста длины трещины от числа циклов нагружения (рис. 2). Анализ кривых рис. 2а показывает, что скорость распространения трещины в направлении первоначального надреза X монотонно уменьшается. Для рассматриваемого материала она изменяется по степенному закону

$$\frac{dx}{dN} = 0,107 N^{-(0,667 - 0,045 \lg \sigma)^2}. \quad (3)$$

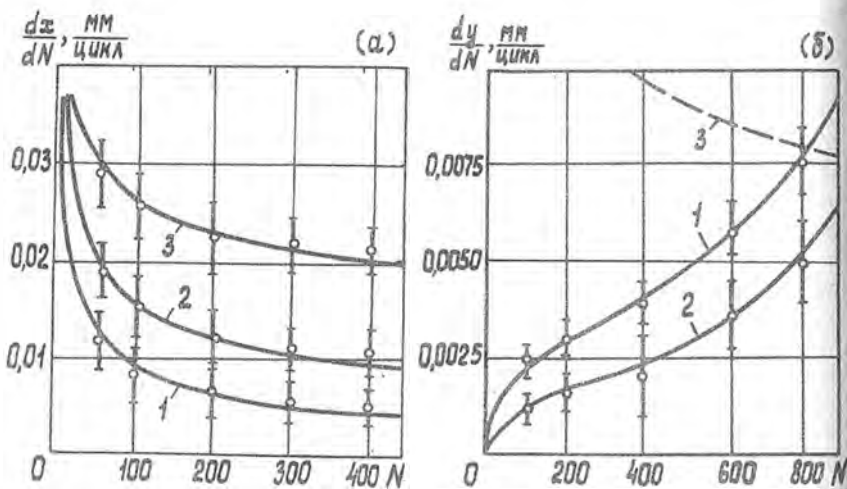


Рис. 2. Зависимость скорости роста трещины от числа циклов нагружения в направлении x (а) и в направлении y (б)
 1 - $\ell_0 = 1$ мм, 2 - $\ell_0 = 3$ мм, 3 - $\ell_0 = 6$ мм.

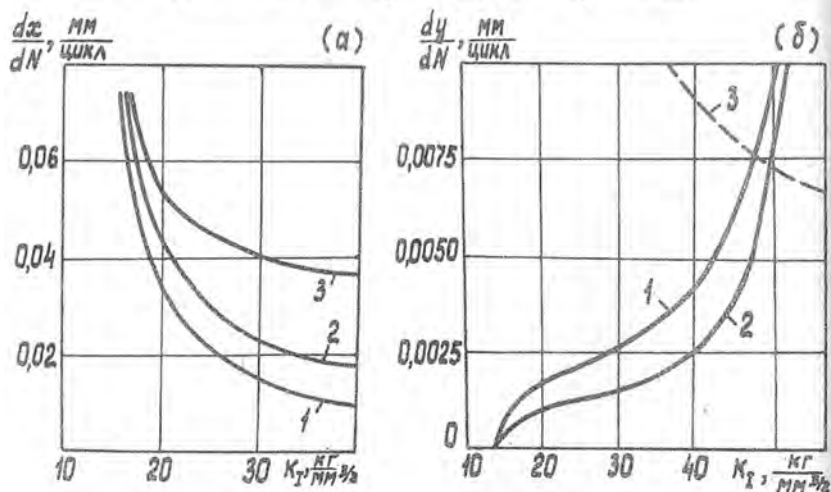


Рис. 3. Зависимость скорости роста трещины от коэффициента интенсивности напряжений в направлении x (а) и в направлении y (б)
 1 - $\ell_0 = 1$ мм, 2 - $\ell_0 = 3$ мм, 3 - $\ell_0 = 6$ мм.

Интегрируя это выражение, получим

$$x = \frac{0,107}{1 - (0,667 - 0,045 \ell_0)^2} N^{[1 - (0,667 - 0,045 \ell_0)^2]} \quad (4)$$

Анализ кривых рис. 26 позволил выявить следующую особенность: глубина надреза ℓ_0 оказывает решающее влияние на процессы распространения трещины в направлении оси y . Глубокий надрез ($\ell_0 = 0,5t$) ведет к уменьшению скорости продвижения фронта трещины с ростом числа циклов нагружения N . Разрушение образцов с глубокими надрезами происходило не от неустойчивого роста усталостной трещины, а в результате потери несущей способности в плоскости первоначального надреза. Зависимость скорости роста трещины в направлении y от числа циклов нагружения имеет вид

$$\frac{dy}{dN} = 0,055 N^{-(32,37 - 7,02 \ell_0 + 0,38 \ell_0^2)} \quad (5)$$

При глубинах надрезов $\ell_0 = \frac{1}{12}t$ и $\ell_0 = \frac{1}{4}t$ наблюдается, напротив, ускоренный рост усталостной трещины, который приводит к разрушению. Связь скорости роста трещины $\frac{dy}{dN}$ от числа циклов нагружения удовлетворительно описывается уравнением

$$\frac{dy}{dN} = c e^{\alpha N} N^{\beta} \quad (6)$$

Для $\ell_0 = 1$ мм $c = 0,0012$, $\alpha = 0,0015$, $\beta = 0,1$;
 для $\ell_0 = 3$ мм $c = 0,0008$, $\alpha = 0,0020$, $\beta = 0,04$.

Интегрируя уравнение (6), можно получить зависимость длины трещины в направлении y от числа циклов нагружения N .

Как известно, процесс разрушения около кончика надреза в упругом материале характеризуется единственным параметром поля напряжений - коэффициентом интенсивности напряжений K_T .

При трехточечном изгибе он определяется следующим образом:

$$K_T = \sigma_n \sqrt{\ell} Y(\lambda), \quad (7)$$

где $\sigma_n = \frac{3PL}{2bt^2}$ - номинальные напряжения изгиба в образце; P - действующая сила; L - расстояние между опорами; b и t - геометрические размеры сечения образца; ℓ - длина трещины; $Y(\lambda)$ - функция, учитывающая влияние длины надреза и ширины образца на значение K_T ; $\lambda = \frac{\ell_0}{t}$.

Для трехточечного изгиба при $\lambda = 0 + 0,6$ имеем

$$Y(\lambda) = 1,96 - 2,75\lambda + 13,66\lambda^2 - 23,98\lambda^3 + 25,22\lambda^4. \quad (8)$$

Увеличение длины трещины при циклическом нагружении на

величину $x(N)$ приводит к изменению коэффициента интенсивности напряжений:

$$K_I = G_H \sqrt{\ell_0 + x(N)} Y(\lambda). \quad (9)$$

Подставляя выражение (4) для $x(N)$, получим зависимость изменения K_I от числа циклов N :

$$K_I = G_H \sqrt{\ell_0 + \frac{A}{m+1} N^{m+1}}, \quad (10)$$

где $m = -(0,667 - 0,045 \ell_0)^2$; $A = 0,107$.

Находя отсюда $N = f(K_I)$ и подставляя в (3), (5), приходим к уравнениям, связывающим скорость роста трещины с изменением коэффициента интенсивности напряжений:

$$\frac{dx}{dN} = A [F(K_I)]^{-(0,667 - 0,045 \ell_0)^2} \quad (11)$$

$$\frac{dy}{dN} = c e^{\alpha F(K_I)} [F(K_I)]^\beta \quad \text{для } \ell_0 = 1 \div 3 \text{ мм} \quad (12)$$

$$\frac{dy}{dN} = 0,055 [F(K_I)]^{-(32,37 - 7,025 - 0,384 \ell_0^2)} \quad \text{для } \ell_0 = 6 \text{ мм} \quad (13)$$

$$F(K_I) = \left\{ \frac{m+1}{A} \left[\left(\frac{K_I}{G_H} \right)^2 - \ell_0 \right] \right\}^{\frac{1}{m+1}}, \quad (14)$$

где c , α , β , A , m - постоянные в равенствах (6) и (10).

Соответствующие зависимости представлены графически на рис.3 (а) и (б).

Для начального значения $K_I^0 = 15,00 \text{ кг/мм}^{3/2}$ функция $F(K_I)$ имеет вид

при $\ell_0 = 1 \text{ мм}$	$F(K_I) = (0,029 K_I^2 - 5,729)^{1,631}$
при $\ell_0 = 3 \text{ мм}$	$F(K_I) = (0,073 K_I^2 - 20,103)^{4,395}$
при $\ell_0 = 6 \text{ мм}$	$F(K_I) = (0,223 K_I^2 - 47,215)^{1,188}$

Л и т е р а т у р а

1. Полилов А.Н. Сопротивление расслаиванию однонаправленных композитов. - Машиноведение, 1978, № 5, с. 74-78.

2. Konish H.J. Jr., Swedlov J.Z., Cruse T.A. Fracture Phenomena in Advanced Fiber Composite Materials, AJAA Journal, 1972, v. 11, N 1, p.p. 40-43.

3. Konish H.J. Jr. Experimental Investigation of Fracture in an Advanced Fiber Composite, Journal of Composite Materials, 1972, v. 6, N 11, p.p. 114-124.