

ДЖ 539.4:678.5.06

Г.П.Зайцев, А.В.Зинин,  
К.В.Кайков, Г.П.Машинская

К ВОПРОСУ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ТРЕЩИН  
В КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ ТИПА ОРГАНОПЛАСТИК

Перспективы использования композиционных материалов в конструкциях высоконагруженных элементов летательных аппаратов требуют исследований их поведения в условиях, близких к эксплуатационным.

Известно, что структурная неоднородность композитов обусловливает наличие в них дефектов типа трещин, складок, расслоений и других, из которых наиболее опасны трещины. Они являются инициаторами магистральных трещин, приводящих к разрушению.

Целью данной работы является исследование процессов распространения трещин в органопластике на основе волокон СВМ при различных видах нагружения и разработка методик экспериментального определения параметров, описывающих процесс разрушения как при кратковременном, так и при циклическом нагружениях.

При монотонном нагружении исследовалась кинетика распространения трещин в композитной структуре в условиях чистого сдвига.

Предельная скорость распространения трещины, при которой наступает ее неустойчивый рост при плоском напряженном состоянии в условиях чистого сдвига в ортотропной структуре, определяется по формуле [2]:

$$\frac{d\ell}{dt} = \sqrt{\frac{2\pi E_H}{k_T \rho Re[-i(S_1 + S_2)]}} \left(1 - \frac{\ell_0}{\ell}\right)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $E_H$ ,  $E_{22}$  - модули упругости в I и 2 главных направлениях;  $\rho$  - плотность материала;  $\ell_0$  - исходная полудлина трещины;  $\ell$  - текущая полудлина трещины;  $k_T$  - безразмерный коэффициент, определяемый экспериментально;  $S_1$  и  $S_2$  - параметры, определяемые для главных осей анизотропии из уравнения

$$S^4 + S^2 \left( \frac{E_H}{G_{12}} - 2\nu_{12} \right) + \frac{E_H}{E_{22}} = 0; \quad (2)$$

$G_{12}$ ,  $\nu_{12}$  - модуль сдвига в плоскости и коэффициент Пуассона;

$t$  - время, отсчитываемое с момента достижения действующим напряжением уровня

$$\tau^* = \sqrt{\frac{4\gamma_\tau E_H}{\pi l_0 \operatorname{Re}[-i(S_1 + S_2)]}} \quad (3)$$

$\tau^*$  - критическое касательное напряжение, соответствующее началу увеличения длины трещины;  $\gamma_\tau$  - плотность поверхностной энергии разрушения.

Интегрируя (1), получим уравнение, связывающее длину трещины и время  $t$  :

$$\sqrt{\frac{k_\tau P}{2\pi E_H} \operatorname{Re}[-i(S_1 + S_2)]} \left\{ \sqrt{l} \sqrt{l - l_0} + l_0 \ln \left( \sqrt{\frac{l}{l_0}} \sqrt{\frac{l}{l_0} - 1} \right) \right\} = t \quad (4)$$

Для экспериментального определения скорости роста трещины была использована электронная схема, основанная на измерении интервала времени между разрывами проводников. При этом определялась средняя величина скорости трещины на участке, расположенном между проводниками, которая затем сравнивалась с предельным значением, рассчитанным по (1).

Экспериментальное определение характеристик трещиностойкости и скорости роста трещины проводилось на органопластике марки СВМ 7Т0 с структуры I:0 с трещиной, расположенной под углом  $\varphi$ , равным  $90^\circ$  и  $0^\circ$  к направлению оси армирования и структуры I:I. Характеристики упругости данных материалов представлены в таблице I.

Таблица I

Марка материала	$E_H$ МПа	$E_{22}$ МПа	$G_{12}$ МПа	$\nu_{12}$
СВМ 7Т0 I:0	$62 \cdot 10^3$	$4,4 \cdot 10^3$	$0,196 \cdot 10^3$	0,345
СВМ 7Т0 I:I	$31 \cdot 10^3$	$31 \cdot 10^3$	$0,306 \cdot 10^3$	0,206

По экспериментальным результатам определялись:

$K_{II} = \tau \sqrt{\pi l}$  - коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации;  $\tau = \frac{P}{tL}$  - касательное напряжение;  $P$  - действующая нагрузка;  $t$  - толщина исследуемого образца;  $L$  - длина диагонали в свету;  $\gamma_\tau = \frac{\pi t \delta}{8}$  - плотность поверхностной энергии разру-

ания;  $\delta$  - смещение берегов трещины.

Зависимости скорости трещины от длины трещины показаны на рис. 1. Характеристики трещиностойкости при чистом сдвиге приведены в таблице 2.

Таблица 2

Материал	$\tau$	$\delta \tau$	$K_{II}$	$\frac{dl}{dt}$	$(\frac{dl}{dt})_{пред}$
ОИМ I:0 $\varphi = 90^\circ$	14,8	$0,146 \cdot 10^2$	2,759	$0,301 \cdot 10^{-2}$	$0,438 \cdot 10^{-2}$
ОИМ I:0 $\varphi = 0^\circ$	20,1	$0,21 \cdot 10^2$	3,441	$0,41 \cdot 10^{-2}$	$0,671 \cdot 10^{-2}$
ОИМ I:I	35,97	$0,374 \cdot 10^2$	6,65	$0,127 \cdot 10^{-2}$	$0,179 \cdot 10^{-2}$

Результаты экспериментов показывают, что скорость роста трещины зависит от типа структуры материала и от направления трещины по отношению к основному армированию. В органопластике СВМ I:0 скорость роста трещины с  $\varphi = 90^\circ$  в 1,36 раза меньше, чем в плучье трещины с  $\varphi = 0^\circ$ . При переходе к более равновесной структуре I:I скорость роста трещины уменьшается по сравнению с органо-пластиком структуры I:0 в 2,37 раза.

При растяжении механизм разрушения органопластика иной. Одно-осное растяжение органопластика в направлении армирования сопровождается ориентационным прорастанием межфибриллярных трещин вдоль направления действия растягивающего усилия. Это связано с неравномерностью напряженного состояния пучков фибрилл внутри одного макронеоднородного волокна [3]. Наличие дефекта типа трещины, у вершины которой имеет место значительная концентрация напряжений, усиливает эту неравномерность, что приводит к прорастанию трещин в волокнах, наиболее приближенных к вершине трещины, уже при низ-ких уровнях напряжений. При нагрузках, близких к предельным, в зоне такого расщепленного волокна растрескивается матрица, образуя магистральную трещину в направлении действия нагрузки. Поэтому при малоцикловом растяжении образцов с надрезом усталостная трещина развивается не в направлении первоначального надреза, а в направ-лении действия нагрузки.

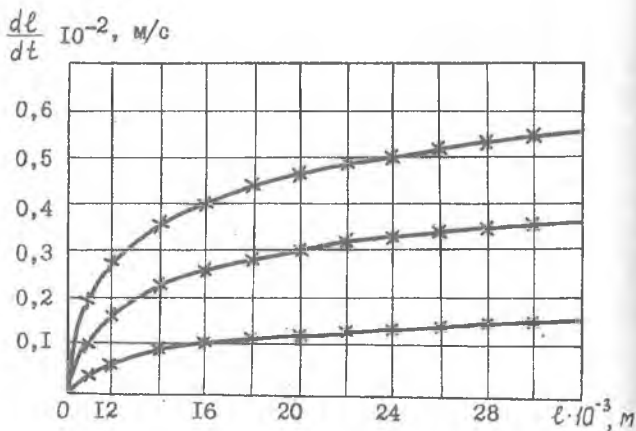


Рис. 1

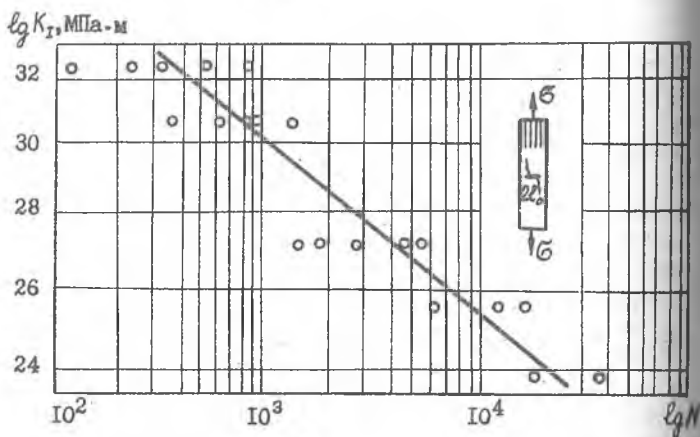


Рис. 2

Для определения скорости роста усталостной трещины в органическом пластике замерялись величины приращений длины трещины с левой и правой сторон надреза. Так как разрушению образца путем разделения на две части при таком «трансверсальном» (по отношению к первоначальному надрезу) росте трещины препятствовали захваты испытатель-

ой машины, за потерю несущей способности принимался момент достижения фронтом трещины граничной зоны, в которой начинало сказываться влияние захватов. Количество циклов нагружения до этого момента принималось за долговечность образцов.

Анализ результатов показал, что долговечность образцов с надрезами снизилась по сравнению с гладкими образцами при равных относительных уровнях напряжений  $\sigma/\sigma_B$  на порядок. Уравнение прямой малоциклового усталости для образцов с надрезами, представленной на рис.2, имеет вид

$$\lg N_p = 22,93 - 13,51 \lg K_I; \quad z = 0,973, \quad (5)$$

где  $K_I = \sigma \sqrt{\pi \ell_0}$  - коэффициент интенсивности напряжений для I вида нарушения;  $\ell_0$  - полудлина надреза;  $\sigma = \frac{P}{F}$  - номинальные напряжения.

При изучении процесса роста усталостной трещины в органо-плексике были отмечены три ярко выраженных этапа. Первый этап продолжается несколько первых циклов, в течение которых отмечался значительный рост трещины, обусловленный влиянием макроконцентратора надреза. По мере удаления фронта трещины от надреза и ослабления его влияния скорость роста трещины замедлялась. Этот этап наиболее продолжителен. При достижении длиной трещины критического значения ( $\ell = \ell_{кр}$ ) начинается вновь ускоренный процесс, который приводит к разрушению.

Анализ зависимости длины трещины от числа циклов нагружений (рис.3) позволяет описать процесс роста трещины уравнением вида

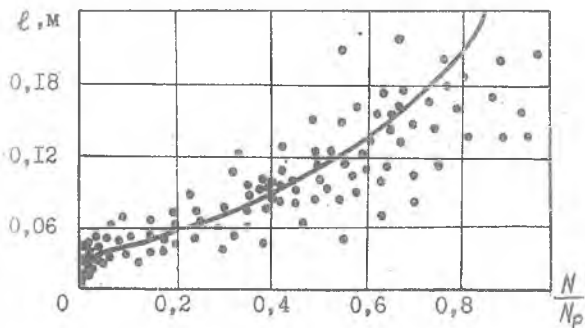


Рис. 3

$$l = \frac{1}{\beta \ln(1 - \lg \frac{N}{N_p})} \quad (6)$$

В этом уравнении коэффициент  $\beta$  является постоянной материала и характеризует сопротивление материала распространению усталостной трещины. Для органоластика данного типа и структуры I:0  $\beta = 0,035$ .

Учитывая (5), имеем длины трещины с величиной коэффициента интенсивности напряжений:

$$l = \frac{1}{0,035 \ln(23,93 + 13,51 K_I - \lg N)}, \text{ мм.} \quad (7)$$

Скорость роста трещины в этом случае зависит от числа пройденных циклов и долговечности материала для данного уровня нагрузок:

$$\frac{dl}{dN} = \frac{1}{2,3\beta} \frac{1}{N(1 - \lg \frac{N}{N_p}) [\ln(1 - \lg \frac{N}{N_p})]^2} \quad (8)$$

### Л и т е р а т у р а

1. Зайцев Г.П. Распространение макротрещины в некоторых композиционных материалах типа стеклопластика при кратковременном нагружении. - Механика полимеров, 1977, № 4, с.742-745.

2. Зайцев Г.П., Кайков К.В., Гусева Р.И. Скорость распространения трещины в анизотропной пластине при чистом сдвиге. / Труды IV научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. - МАТИ, М., 1980, с.17-20; Деп. ВИНТИ № 4324-80.

3. Перов В.В., Скудра А.М., Машинская Г.П., Булавс Ф.Я. Особенности разрушения органоластика и их влияние на прочность. - Механика композитных материалов, 1979, № 2, с.317-321.