

УДК 620.172.251.2:539.4

Г.В.Архипов, Г.П.Зайцев, С.А.Силантьев

К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ
И ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛАСТИНЕ
ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА КМУ-3 ЛН

В литературных источниках практически отсутствуют данные по оценке долговечности армированных пластиков с трещинами при длительном статическом нагружении. Однако изучение этого вопроса представляет научный и практический интерес, т.к. имеются элементы конструкций из композитов, которые работают в условиях длительных статических нагрузок и в которых в процессе эксплуатации или изготовления могут возникнуть трещины.

В настоящей работе предлагаются результаты исследования долговечности углепластика КМУ-3Лн со структурой 0/90 (6 раз) с центральной трещиной при длительном статическом нагружении растяжением. Для испытаний были использованы плоские образцы (250x40x1,70) с центральными надрезами $2\ell = 10$ мм и $2\ell = 15$ мм, где ℓ - полудлина надреза.

Для определения кривых длительной прочности были испытаны напри образцов под действием постоянных во времени напряжений, составляющих (0,90-0,99) σ_* (σ_* - величина предельного разрушающего напряжения при одновременном нагружении: $\sigma_* = 193,5$ МПа для $2\ell = 10$ мм, $\sigma_* = 168,2$ МПа для $2\ell = 15$ мм). Испытания на длительную прочность проведены в комнатных температурно-влажностных условиях.

Кривые длительной прочности данного углепластика описываются следующими уравнениями (рис.1):

$$2\ell = 10 \text{ мм}, \quad t = \exp(117,06 - 0,61\sigma), \quad (1)$$

$$2\ell = 15 \text{ мм}, \quad t = \exp(66,04 - 0,41\sigma), \quad (2)$$

где σ - действующее напряжение в МПа, t - долговечность образцов в час.

При нагружении образца из углепластика КМУ-3Лн как с постоянной скоростью увеличения напряжений, так и с постоянной нагрузкой во времени длина трещины не растет вплоть до момента разруше-

ния. В связи с этим для удобства описания процесса разрушения углепластика с трещиной при длительном статическом нагружении воспользуемся уравнением скорости раскрытия трещины в виде

$$\frac{d\delta}{dt} = CK_I^n,$$

где C и n - параметры, определяемые по данным эксперимента;
 K_I - коэффициент интенсивности напряжений, определяемый по формуле /I/.

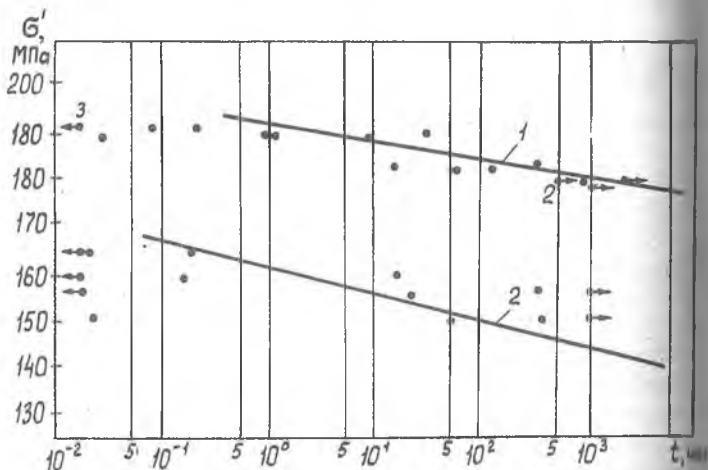


Рис. I

Кривые роста раскрытия надреза во времени описываются следующими уравнениями:

$$2\ell = 10 \text{ мм}, \quad \sigma = 0,98 \sigma_*, \quad \delta = 0,234 + 1,03 \cdot 10^{-2} (\lg t - 0,5), \quad (1)$$

$$\sigma = 0,93 \sigma_*, \quad \delta = 0,184 + 5,58 \cdot 10^{-3} (\lg t - 0,5), \quad (2)$$

$$2\ell = 15 \text{ мм}, \quad \sigma = 0,95 \sigma_*, \quad \delta = 0,293 + 1,21 \cdot 10^{-2} (\lg t - 0,5), \quad (3)$$

$$\sigma = 0,93 \sigma_*, \quad \delta = 0,254 + 8,22 \cdot 10^{-3} (\lg t - 0,5), \quad (4)$$

$$\sigma = 0,90\sigma_*, \quad \delta = 0,235 + 6,06 \cdot 10^{-3} (\lg t - 0,5), \quad (8)$$

где σ - напряжение, соответствующее заданному уровню, (МПа); t - время, (мин).

Для определения параметров уравнения (3) продифференцируем функции раскрытия трещины по времени и приравняем полученные производные к правой части уравнения (3). Решая полученные системы из двух уравнений для $2\ell = 10$ мм и $2\ell = 15$ мм, определяем неизвестные параметры C и n , подставляя которые в (3), получим следующие зависимости скорости роста раскрытия трещины от коэффициента интенсивности напряжений и времени:

$$2\ell = 10 \text{ мм}, \quad \frac{d\delta}{dt} = \frac{4,47 \cdot 10^{-3}}{t} \left(\frac{K_I}{759,4} \right)^{9,82}, \quad (9)$$

$$2\ell = 15 \text{ мм}, \quad \frac{d\delta}{dt} = \frac{5,25 \cdot 10^{-3}}{t} \left(\frac{K_I}{842,6} \right)^{16,23}. \quad (10)$$

Для определения величины прироста раскрытия трещины за время t при заданном уровне напряжений (коэффициенте интенсивности напряжений) проинтегрируем полученные зависимости (9) и (10) от t_0 до t . В результате чего получим

$$2\ell = 10 \text{ мм}, \quad \delta(t) = 1,03 \cdot 10^{-2} \left(\frac{K_I}{759,4} \right)^{9,82} (\lg t + 2), \quad (11)$$

$$2\ell = 15 \text{ мм}, \quad \delta(t) = 1,21 \cdot 10^{-2} \left(\frac{K_I}{842,6} \right)^{16,23} (\lg t + 2). \quad (12)$$

Таким образом, с помощью уравнений (11) и (12) при заданном уровне напряжений можно определить время до разрушения углепластика КМУ-Злн. Используя диаграмму раскрытия при одновременном нагружении и уравнения (11) и (12), можно определять величину раскрытия трещины для заданной базы времени и заданного уровня напряжений (рис.2).

Предпринимаемые в настоящее время попытки использовать углепластик КМУ-Злн в качестве составляющего элемента теплозащитного покрытия определяют актуальность оценки эффекта воздействия нестационарного теплового потока на пластину из рассматриваемого материала. В процессе расчета нам понадобятся следующие теплофиз-

численные характеристики углепластика:

$\beta = 58,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ град})$ - коэффициент теплоотдачи;

$\lambda = 0,5 \text{ Вт}/(\text{м град})$ - удельная теплопроводность;

$c = 3,1 \cdot 10 \text{ Дж}/(\text{кг град})$ - удельная теплоемкость;

$\alpha = 1,15 \cdot 10 \text{ м}^2/\text{с}$ - удельная температуропроводность;

$\gamma = 1,4 \text{ Г}/\text{см}^3$ - удельный вес;

$\alpha_1 = \alpha_2 = 10 \text{ Г}/\text{град}$ - коэффициенты линейного расширения.

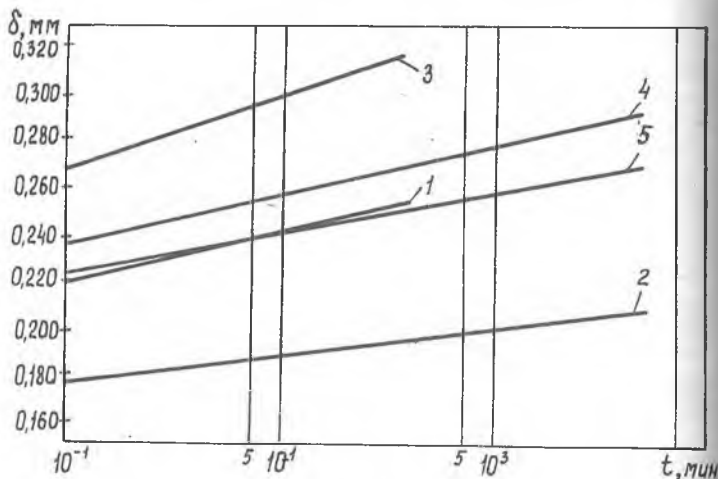


Рис. 2

Здесь $\alpha_1 = \alpha_2$ ввиду того, что рассматриваемая структура пластины $0^\circ/90^\circ$.

Предположим, что к свободной от нагрузок пластине толщиной $2R$ с начальной температурой $T_\omega = 0$ на верхней поверхности поводится переменное количество теплоты $q(t)$ (в единицу времени на единицу поверхности), причем $q(0) = 0$. Нижняя поверхность и кромки пластины теплоизолированы. Плоскость xy совпадает со срединной плоскостью пластины, и тогда температура будет зависеть от координаты z и времени t . Пластина помещена в среду с линейно возрастающей температурой $T_c - T_o = 250$ при числе $B_i = \frac{\beta R}{\lambda} = 2$. Здесь $F_o = (\alpha t^2 / R^2)$ - критерий Фурье. Интервал расчета ΔF_o принимаем равным 0,1. Для расчета температуры поверх-

ности пластины к концу i -го интервала времени применим следующую формулу /4/:

$$T_{\omega}^i = \frac{T_0 + \frac{\Delta t}{c\gamma R} q^{\circ} d_i + \frac{\Delta t}{c\gamma R} \sum_{m=1}^i q^m D_{i-m} + \left(\frac{\Delta t}{c\gamma R}\right) D_0 \beta T_c^i}{1 + \frac{\Delta t}{c\gamma R} D_0 \beta} \quad (13)$$

Для нахождения температуры в середине пластины воспользуемся следующим выражением /4/:

$$T^i = T_{\omega} = (T_{\omega}^{\circ} - T_0) \beta_i + \sum_{m=1}^i (T_{\omega}^m - T_0) \beta_{i-m} \quad (14)$$

Температуру нижней кромки рассчитываем также по формуле (13), но принимая коэффициенты β_{i-m} и β_i для соответствующей координаты z .

Коэффициенты d_i , D_0 , D_{i-m} , β_i , β_{i-m} вычислены для симметричной пластины и приведены в /4/.

Для последних трех рассматриваемых моментов времени, соответствующих $\Delta F_0 = 0,6; 0,7; 0,8$, будем определять возникающие термоупругие напряжения. Так как в нашем случае температура зависит от двух параметров - ΔF_0 и z , то предлагается следующее выражение для T :

$$T = (-0,65 \Delta F_0^2 + 0,853 \Delta F_0 - 0,174) z^2 + (-0,592 \Delta F_0^2 + 6,625 \Delta F_0 - 5,68 \Delta F_0) z + (80 \Delta F_0 - 22) \quad (15)$$

Определив температурное поле пластины, приступим к нахождению соответствующих нестационарных упругих напряжений. Для ортотропной пластины согласно /3/ имеем

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{E_1}{1-\nu_1\nu_2} \varepsilon_x + \frac{\nu_1 E_2}{1-\nu_1\nu_2} \varepsilon_y - \frac{E_1}{1-\nu_1\nu_2} \left[z \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \nu_1 \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) + (1+\nu_1) \alpha_1 T \right] \\ \sigma_{yy} &= \frac{E_2}{1-\nu_1\nu_2} \varepsilon_y + \frac{\nu_2 E_1}{1-\nu_1\nu_2} \varepsilon_x - \frac{E_2}{1-\nu_1\nu_2} \left[z \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \nu_2 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) + (1+\nu_2) \alpha_2 T \right] \\ \sigma_{xy} &= \frac{E_1}{1+\nu_1} \left(\varepsilon_{xy} - z \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Подставляя в (15) внутренние усилия и моменты и учитывая, что пластина может свободно деформироваться, в итоге получим

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= - \frac{E_1}{1-\nu_1\nu_2} (1+\nu_1) \alpha_1 T \\ \sigma_{yy} &= - \frac{E_2}{1-\nu_1\nu_2} (1+\nu_2) \alpha_2 T. \end{aligned} \quad (17)$$

Для данной структуры $0^{\circ}/90^{\circ}$ имеем, что $E_1 = E_2 = 70150$ МПа, $\nu_1 = \nu_2 = 0,019$. Тогда окончательно получим

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 0,0715 [(-0,65\Delta F_0^2 + 0,853\Delta F_0 - 0,174)z^2 + (-0,592\Delta F_0^2 + 6,625\Delta F_0 - 5,68)z + (80\Delta F_0 - 22)], \text{ [МПа]}.$$

Эпюры распределения термупругих напряжений по толщине пластины для рассматриваемых моментов времени представлены на рис. 3.

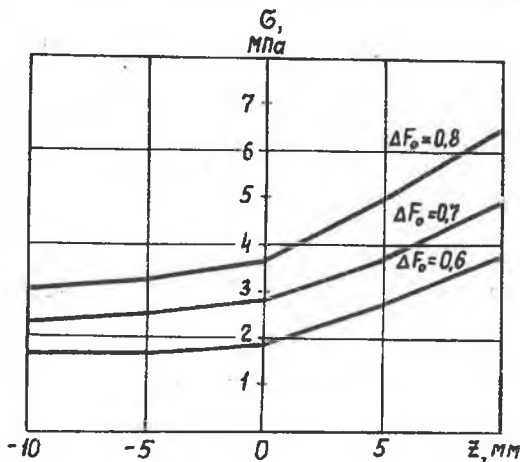


Рис. 3

Из рисунка видно, что при достижении к моменту времени, соответствующему $\Delta F_0 = 0,8$, температуры окружающей среды 200°C , напряжения в срединной плоскости имеют значения порядка $3,7$ МПа. Наибольшие напряжения возникают на верхней кромке пластины, и они примерно в 2 - 3 раза больше напряжений в срединной плоскости.

Относительно небольшие величины термупругих напряжений делают перспективным использование углепластика КМУ-3дн в теплозащитных покрытиях.

Л и т е р а т у р а

1. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытания композитных материалов с поли-

ной матрицей. Методы определения характеристик трещиностойкости в статическом растяжении и изгибе. - Госстандарт, Минстанкопром.- 1980, с.17-24.

2. Митропольский А.К. Техника статических вычислений. - М.: Матгиз, 1961, с.31-56.

3. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения. - М.: Наука, 1975, с.206-210.

4. Усов А.Т. Приближенные методы расчета температур нестационально нагреваемых твердых тел простой формы. - М.: Машиностроение, 1973, с.9-56.

620.178.3

В.А.Мехеда

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕЛИНЕЙНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ЦИКЛ В КАЧЕСТВЕ МЕРЫ УСТАЛОСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

По усовершенствованной методике, изложенной в /1,2/, были построены петли гистерезиса для алюминиевого сплава Д16АТ и стали 1Х18Н9Т в координатах "напряжение - нелинейная деформация". Петля гистерезиса для стали 1Х18Н9Т приведена на рис.1, где четко проявилась нелинейность участка разгрузки. По петле гистерезиса в процессе усталостных испытаний с постоянной амплитудой перемещения конца консольного образца фиксировались две величины: неупругая деформация за цикл $\Delta \epsilon_n$ и нелинейная деформация за цикл $\Delta \epsilon$. Изменение этих величин в процессе усталостных испытаний образцов из алюминиевого сплава Д16АТ показано на рис.2. Амплитуда напряжения составляла 139 МПа, частота нагружения - 10 гц.

На рис.2 видно, что величины $\Delta \epsilon_n$ и $\Delta \epsilon$ в эксперименте ведут себя по-разному. Неупругая деформация (кривая 1) за цикл в течение 400 тысяч циклов почти не изменялась, в то время как нелинейная (кривая 2) монотонно возрастала. В процессе испытаний наблюдался небольшой поворот петли гистерезиса по ходу часовой стрелки.