

Н.Е. САРКИСЯН, Н.Н. САРКИСЯН

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ
НА ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА

Исследовано влияние направления линии действия силы на концентрацию напряжений в условиях кратковременного статического растяжения стеклопластиков при центральном круговом отверстии. Показано, что экспериментальные значения эффективного коэффициента концентрации напряжений существенно отличаются от теоретических значений, рассчитанных для анизотропных однородных сред.

Ключевые слова: концентратор напряжений, прочность, стеклотекстолит, статическое растяжение.

Влияние концентратора напряжений на изменение прочности композитных материалов, в частности стеклопластиков, изучено еще в недостаточной степени, в том числе в экспериментальном аспекте [1,2 и др.].

Как известно [3, 4], распределение нормальных напряжений в анизотропной тонкой пластинке вблизи концентратора напряжений определяется в виде

$$\begin{aligned} a_{22} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} - 2a_{26} \frac{\partial^4 F}{\partial x^3 \partial y} + (2a_{12} + a_{66}) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} - \\ - 2a_{16} \frac{\partial^4 F}{\partial x \partial y^3} + a_{11} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где F - функция напряжений; a_{ii} - константы, определяющие упругие свойства материала.

Армированные во взаимно перпендикулярных направлениях стеклопластики, равно как и испытанные в данной работе стекловолокнистые композиты [5], принято считать материалами, обладающими свойствами анизотропных ортотропных тел. Следовательно, для них упругие постоянные $a_{16}=a_{26}=0$.

Учитывая указанное выше условие, характеристическое уравнение (1) приводят к уравнению вида

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

где E_1 , E_2 и ν_{12} соответственно являются экспериментальными значениями модуля упругости и коэффициента поперечной деформации по направлениям упругих осей материала анизотропной пластинки.

Как известно, корни уравнения (2) являются мнимыми либо комплексными.

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \beta_1 i, & \lambda_3 &= -\beta_1 i, \\ \lambda_2 &= \beta_2 i, & \lambda_4 &= -\beta_2 i.\end{aligned}\quad (3)$$

Распределение напряжений в зоне концентратора в основном определяется значениями β_1 и β_2 , а также граничными условиями.

Для главного направления оси упругой симметрии (в нашем случае, например, ось x) для концентратора напряжений, имеющего вид центрального эллипсоидального отверстия, распределение напряжений в случае растянутой, достаточно широкой пластинки (рабочий участок образца) можно определить из выражения

$$\sigma_x = \sigma + \frac{\sigma b}{\beta_1 - \beta_2} \times \left\{ \frac{\beta_1^2}{a - \beta_1 b} \left[1 - \frac{\beta_1 y}{\sqrt{a^2 + \beta_1^2 (y^2 - b^2)}} \right] - \frac{\beta_2^2}{a - \beta_2 b} \left[1 - \frac{\beta_2 y}{\sqrt{a^2 + \beta_2^2 (y^2 - b^2)}} \right] \right\}, \quad (4)$$

где a и b - полуоси эллипса; σ - номинальное значение напряжений.

Подставляя в (4) значение $a=b$, получим расчетное выражение напряжений в зоне центрального кругового отверстия:

$$\sigma_x = \sigma + \frac{\sigma}{\beta_1 - \beta_2} \times \left\{ \frac{\beta_1^2}{1 - \beta_1} \left[1 - \frac{\beta_1 y}{\sqrt{a^2 + \beta_1^2 (y^2 - a^2)}} \right] - \frac{\beta_2^2}{1 - \beta_2} \left[1 - \frac{\beta_2 y}{\sqrt{a^2 + \beta_2^2 (y^2 - a^2)}} \right] \right\}. \quad (5)$$

Анализ уравнения (5) показывает, что для исследованных в данной работе стеклопластиков марок СТ и ТСУ-8/3 при установленных значениях коэффициентов, определяющих анизотропию свойств (см. табл.), концентрация напряжений выражена более ярко, чем в случае изотропных материалов.

Развитие разрушения армированных анизотропных материалов у нагруженных композитов приводит к тому, что эффективный коэффициент концентрации напряжений получается значительно более меньшим, чем его теоретическое значение:

$$K_\sigma = \sigma_{в, гл} / \sigma_{в, кн}. \quad (6)$$

В формуле (6), как известно, значения $\sigma_{в, гл}$ и $\sigma_{в, кн}$ представляют собой временное сопротивление материала (в данном случае, предел прочности) при одинаковых условиях нагружения, соответственно, для гладкого образца (без концентратора напряжений) и образца, имеющего концентратор напряжений.

Эффективный коэффициент концентрации напряжений K_σ для стеклопластиков составляет обычно 1,3...1,4 (например, [2]). В данной работе для K_σ получены почти такого же порядка значения в случаях, если нагружение

(растяжение) образцов проводилось по направлению основы армирующей ткани (1,35 и 1,45 соответственно для материалов СТ и ТСУ-8/3), а по направлению утка значения K_σ значительно более высокие - 1,65 и 1,80. Отметим, что приведенные нами значения эффективного коэффициента концентрации напряжений соответствуют концентратору напряжений в виде круглого отверстия радиусом $R=2$ мм.

Как следует из (5), для рассмотренного выше вида концентратора напряжений теоретические значения K_σ , независимо от радиуса концентратора, составляют

$$K_{\sigma, \text{теор}} = 1 + \beta_1 + \beta_2. \quad (7)$$

Значения комплексных параметров упругих свойств композитного материала β_1 и β_2 определяются из уравнений

$$\beta_1 \beta_2 = \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}, \quad (8)$$

$$\beta_1^2 + \beta_2^2 = \frac{E_1}{G_{12}} - 2\nu_{21},$$

где E_1 и E_2 - значения модуля упругости (Юнга) в направлениях осей x и y , но не для направлений основы и утка стеклоткани; G_{12} и ν_{12} - соответственно модуль сдвига и коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации).

Экспериментальные и рассчитанные по формулам (6)-(8) теоретические значения (см. табл.) отражают влияние концентратора напряжений в виде центрального кругового отверстия диаметром 4 мм на изменение предела прочности материалов.

Приведенные значения свидетельствуют о большой разнице между теоретически рассчитанными и полученными экспериментальным путем значениями прочности анизотропного материала, которые относятся к эффективному коэффициенту концентрации напряжений K .

Таблица

Направ- ление растяже- ния	Прочность, <i>МПа</i>		E_x , <i>МПа</i>	ν_{xy}	G_{xy} , <i>МПа</i>	α_1	α_2	Коэф- фициент К	
	$\sigma_{\partial, \text{пл}}$	$\sigma_{\partial, \text{кн}}$						Теор.	Эксп.
Стеклотекстолит СТ									
по основе	292	238	21200	0,17	2900	0,39	2,55	3,94	1,50
по утку	221	127	20000	0,08	2600	0,36	2,78	3,14	1,42
Стеклотекстолит ТСУ-8/3									
по основе	533	369	29000	0,14	5300	0,52	2,20	3,82	1,40
по утку	372	205	22000	0,04	3800	0,37	2,80	3,17	1,35

При этом разница между ними существенно зависит от направления линии действия нагрузки. Как видно из таблицы, экспериментальные и теоретические значения коэффициента K отличаются друг от друга по направлению основы ткани примерно в 2,5 раза, а по утку - в 1,75 раз. Интересно отметить, что на

количественную сторону указанного выше явления не влияет изменение марки стеклотекстолита, т.е. характеристик прочности и деформативности композита, в то время как сами эти характеристики друг от друга отличаются примерно в 1,3 и 1,7 раза, соответственно, для **E** и **σ_d** .

Представляет определенный интерес исследование изменения градиента поля напряжений, что также является мерой, характеризующей концентрацию напряжений.

В работе рассчитаны значения напряжений в точках контура отверстия и боковой поверхности рабочего участка образца, лежащих в направлении, перпендикулярном продольной оси образца, т.е. $y=2$ и $y=7,5$ мм. Расчеты, проведенные по формуле (5), показывают, что для рассмотренных в данной работе двух типов стеклотекстолита в точках на боковой поверхности растягиваемого образца имеет место существенное ослабление напряженного состояния. Степень недогруженности, т.е. градиент поля напряжения образца, составляет 10...55 МПа/мм. При этом большие значения приведенного интервала соответствуют высокопрочному стеклопластику. Что касается степени недогруженности, то в точке боковой поверхности образца (по оси y) она составляет 15...20% по сравнению с номинальным значением напряжения для образца, имеющего концентратор напряжений. Следует отметить, что эффект недогруженности материала в точках боковой поверхности образца при его продольном растяжении (без концентрации напряжения) имеет также свое экспериментальное подтверждение [6], в том числе для случаев растяжения образца в направлениях, отличных от направления основы армирующей ткани.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А.** Сопротивление полимерных и композитных материалов. - Рига: Зинатне. 3-е изд., перераб. и допол., 1980. - 572 с.
2. **Серенсен С.В., Стреляев В.С.** Статическая конструкционная прочность стеклопластиков // Вестник машиностроения. - 1962. - №3. - С.3-9.
3. **Амбарцумян С.А.** Разномодульная теория упругости. - М.: Наука, 1982. - 318 с.
4. **Савин Г.Н.** Концентрация напряжений около отверстий. - Киев: Наукова думка, 1968. - 486с.
5. **Саркисян Н.Н., Саркисян Н.Е.** Характер повреждения композитных материалов и оценка снижения их прочности при циклическом деформировании // Изв. НАН РА, Механика. - 2000. - Т.53. - С.78-82.
6. **Гольдман А.Я., Савельева Н.Ф.** О напряженном состоянии и некоторых особенностях разрушения образцов стеклопластиков при растяжении под углом к направлению армирования // Механика полимеров. - 1967. - №6. - С.1030-1034.

ГУАСА.

Материал поступил в редакцию 10.05.2002.

Ն.Ե. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Ն.Ն. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

**ԼԱՐՄԱՆ ԿՈՆՑԵՆՏՐԱՏՈՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ
ԿՈՄՊՈԶԻՏԱՑԻՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ
ԱՍՐՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ**

Հետազոտված է ապակեպլաստների կարճատև ստատիկ ձգման դեպքում ուժի ազդման ուղղության (ըստ հենքի և թեզանի) ազդեցությունը լարումների խտացման վրա կլոր կենտրոնական անցքի դեպքում: Սահմանված է, որ լարումների խտացման արդյունավետության գործակցի փոքրձևական արժեքները էապես տարբերվում են անիզոտրոպ համասեռ միջավայրի համար տեսականորեն հաշվարկված արդյունքներից:

N.E. SARGSYAN, N.N. SARGSYAN

**STRAIN CONCENTRATOR IMPACT FEATURES ON COMPOSITE MATERIAL
STRENGTH**

Line direction impact of force action on strain concentration under short-term conditions of static glass plastic tension with a central circular hole is viewed. It is shown that experimental data of effective strain concentration factor are essentially different from theoretical ones meant for anisotropic homogeneous media.