

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 620.17.172/175

## **О практике оценки прочности неметаллических волокнистых композиционных материалов при высоких температурах**

**А. В. Богомолов, В. К. Федчук**

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Приведены экспериментальные данные о влиянии температуры на характеристики прочности углепластика при растяжении, сжатии, изгибе и сдвиге. Установлено, что определяемые при различных схемах изгиба значения сопротивления сдвигу отличаются.*

**Ключевые слова:** анизотропия, углепластик, ортотропный материал, высоко-температурная прочность, сдвиг, основа, уток ткани.

Многие ответственные несущие элементы авиационной и ракетно-космической техники изготавливают из неметаллических волокнистых композиционных материалов, обладающих технологичностью и высокими удельными характеристиками прочности. Преимущества этих материалов по сравнению с другими в наибольшей степени проявляются при изготовлении конструктивных элементов оболочечного или панельного типа. Оценка пригодности использования данных материалов в конструкции в первую очередь требует получения научно обоснованных характеристик прочности и жесткости при простых видах нагружения (растяжение, сжатие, изгиб).

Для анизотропных материалов, как правило, не подходят традиционные критерии прочности в функции главных напряжений, а также отсутствуют постоянные соотношения между предельными значениями нормальных и касательных напряжений. Поэтому наряду с испытаниями этих материалов на растяжение и сжатие при оценке предельного состояния волокнистых композитов крайне необходимы испытания на сдвиг.

Для определения сопротивления разрушению в широком диапазоне температур при сдвиге, особенно межслоевом, широко используются образцы с надрезами, в том числе образцы Иосипеску [1] при испытаниях на изгиб. Однако существующие методики обладают рядом недостатков, связанных с возникновением концентрации напряжений в надрезах, краевым эффектом и эффектом “перерезанных нитей” [2, 3]. Если испытывают материалы в плоскости армирования, то, как правило, нельзя добиться разрушения в рабочем сечении, что существенно затрудняет обработку и анализ получаемых результатов.

Таким образом, определение характеристик сопротивления сдвигу волокнистых композитов в плоскости армирования, особенно при высоких температурах, является сложной методической задачей.

© А. В. БОГОМОЛОВ, В. К. ФЕДЧУК, 2003

ISSN 0556-171X. Проблемы прочности, 2003, № 2

143

Представляется важным получение таких характеристик в широком интервале температур при различных схемах нагружения с однородным напряженным состоянием в исследуемом образце. Определенными преимуществами с этой точки зрения обладает кручение призматических стержней [4, 5].

При наличии методик подобных испытаний на растяжение, сжатие и чистый изгиб [6, 7] методики испытаний на сдвиг и экспериментальные результаты до настоящего времени отсутствовали.

Ниже в таблице и на рисунке приведены результаты испытаний на растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг углепластика, полученного укладкой основа по основе углеродной ткани “Урал-ТР” на фенолоформальдегидном связующем “ФН”, в температурном диапазоне 293...1073 К.

**Характеристики прочности углепластика при растяжении, сжатии, изгибе и сдвиге в диапазоне температур 293...1073 К**

$T, K$	Прочность при растяжении $\sigma^P, MPa$	Прочность при сжатии $\sigma^C, MPa$	Прочность при изгибе $\sigma^H, MPa$	Предельный сдвиг $\tau^C, MPa$	Предельный сдвиг $\tau^H, MPa$ (расчет)
293	$\frac{89,65}{37,14}$	$\frac{161,12}{181,11}$	$\frac{152,94}{51,11}$	8,42	$\frac{10,92}{3,65}$
473	$\frac{81,50}{30,96}$	$\frac{94,64}{105,60}$	$\frac{107,71}{37,17}$	6,33	$\frac{7,69}{2,69}$
573	$\frac{79,13}{30,10}$	$\frac{76,27}{80,54}$	$\frac{97,11}{27,19}$	5,99	$\frac{6,93}{1,90}$
673	$\frac{66,37}{14,87}$	$\frac{35,16}{32,69}$	$\frac{55,97}{18,06}$	2,70	$\frac{3,99}{1,29}$
773	–	$\frac{17,34}{15,71}$	–	1,50	–
873	$\frac{15,45}{3,19}$	$\frac{7,23}{10,42}$	$\frac{12,63}{2,22}$	0,80	$\frac{0,90}{0,15}$
1073	$\frac{9,55}{-}$	–	–	–	–

**Примечания:** 1. Над чертой приведены значения  $\sigma_1^P, \sigma_1^C, \sigma_1^H, \tau_1^C, \tau_1^H$  для основы, под чертой –  $\sigma_2^P, \sigma_2^C, \sigma_2^H, \tau_2^C, \tau_2^H$  для утка. 2. Каждое значение является средним по данным не менее пяти измерений.

Образцы для испытаний вырезали в направлении осей симметрии (основа, уток ткани) ортотропного материала из специально изготовленных пластин толщиной  $h = 10$  мм. Образцы для испытаний на растяжение выполняли в виде двусторонних лопаток с рабочим участком размером  $10 \times 10 \times 25$  мм, на сжатие – в виде коротких прямоугольных стержней  $10 \times 10 \times 20$  мм. Испытания на сжатие показали большую чувствительность материала к изменению температуры по сравнению с испытаниями на растяжение.

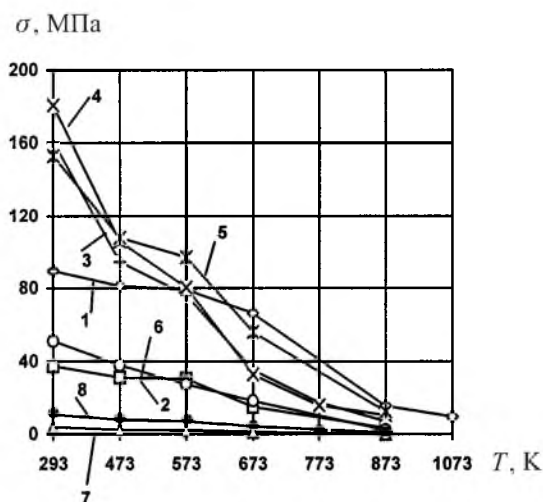
Испытания на четырехточечный (чистый) изгиб широко применяются для определения упругих и прочностных характеристик на участке с однородным напряженным состоянием. При этом использовали образец

прямоугольного сечения шириной  $b = 15$  мм и толщиной  $h = 10$  мм. В этом случае длина пролета  $L$  составляла 120 мм, величина участка чистого изгиба  $l = 50$  мм. При определении характеристик межслойного сдвига при поперечном изгибе коротких образцов длина пролета  $L = 50$  мм.

Предельный сдвиг  $\tau^c$  при поперечном изгибе коротких балок и сдвиговую составляющую напряжений  $\tau^н$  вне зоны чистого изгиба при четырехточечном изгибе образца определяли из соотношений

$$\tau^c = \frac{3P}{4bh}, \quad \tau^н = \frac{\sigma h}{2(L-l)},$$

где  $P, \sigma$  – усилие разрушения и максимальное нормальное напряжение при соответствующем изгибе.



Зависимость прочности углепластика от температуры при различных видах испытаний. (Обозначения характеристик см. в таблице: 1 ( $\diamond$ ) –  $\sigma_1^p$ ; 2 ( $\square$ ) –  $\sigma_2^p$ ; 3 (+) –  $\sigma_1^c$ ; 4 (X) –  $\sigma_2^c$ ; 5 (\*) –  $\sigma_1^н$ ; 6 (O) –  $\sigma_2^н$ ; 7 ( $\Delta$ ) –  $\tau_1^c$ ; 8 ( $\bullet$ ) –  $\tau_1^н$ .)

Из данных таблицы и рисунка, где представлены максимальные расчетные значения сдвиговой составляющей напряжений вне зоны чистого изгиба, следует, что они превышают предельные значения сдвиговых напряжений, полученные на коротких балках. Отметим, что размеры образца и расстояния между опорами при четырехточечном изгибе выбирались таким образом, чтобы избежать разрушения от “расслоения” образца в зоне чистого изгиба. На более низкие значения предельной сдвиговой составляющей при изгибе коротких балок, по нашему мнению, повлияло смятие материала под центральной опорой из-за превышения значений удельного давления в два раза. Поэтому результаты испытаний на сдвиг оказываются заниженными и требуют тщательного анализа.

Заметим, что предельные значения межслойной прочности при сдвиге исследованных углепластиков с учетом специфики их строения находятся ближе к показателям, получаемым при четырехточечном изгибе, и могут

служить нижней границей для предельных значений напряжений сдвига в плоскости материала.

Полученные результаты исследования в интервале температур 293...1073 К свидетельствуют о важности определяемой сдвиговой составляющей напряжений вне зоны чистого изгиба при четырехточечном изгибе. Обосновывается несовпадение значений прочности, полученных при различных схемах нагружения.

## Резюме

Наведено експериментальні результати щодо впливу температури на міцність вуглепластиків при розтязі, стиску, згині та зсуві. Виявлено, що значення опору зсуву при різних схемах згину відрізняються.

1. *Винсон Ж. Р., Сираковский Р. Л.* Поведение конструкций из композиционных материалов / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1991. – 264 с.
2. *Тарнопольский Ю. М., Кинцис Т. Я.* Методы статических испытаний армированных пластиков. – М.: Химия, 1981. – 272 с.
3. *Кристенсон Р.* Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 334 с.
4. *Богомолов А. В., Борисенко В. А.* Установка для испытания композиционных материалов на кручение при высоких температурах до 330 К // Пробл. прочности. – 1992. – № 1. – С. 87 – 88.
5. *Борисенко В. А., Богомолов А. В., Мишкин А. Н.* Сдвиговые испытания полимерных композиционных материалов: Тр. конф. “Полимерные композиты в промышленности” (Славско, 3–5 марта 1998 г.): Тез. докл. – Киев: Об-во “Знание”, 1998. – С. 30 – 32.
6. *Эскин Э. А., Федчук В. К.* Влияние типа тканого наполнителя на механические характеристики углепластиков в интервале температур 293...1000 К // Пробл. прочности. – 1987. – № 11. – С. 76 – 82.
7. *Борисенко В. А., Грачева Л. И., Мишкин А. Н.* Прочность и тепловое деформирование углеродных композиционных материалов при высоких температурах. Сообщ. 1. Экспериментальное оборудование и методы исследования // Там же. – 1995. – № 10. – С. 81 – 87.

Поступила 14. 11. 2001