

Н. К. Кучер, д-р техн.наук, М. П. Земцов, канд.техн.наук, М. Н. Заразовский  
Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренка НАН Украины, г.Киев, Украина

## ДЕФОРМИРОВАНИЕ И ПРОЧНОСТЬ СЛОИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ

---

*Представлено результати експериментальних досліджень констант пружності, характеристик міцності, коефіцієнтів Пуассона та коефіцієнтів лінійного теплового розширення односпрямованого вуглепластика  $[0]_{25}$  і 29-шарового квазіортотропного вуглепластика зі схемою армування шарів  $[0_3/90/0_2/\mp 45/0/90/0_2/90/45/0/-45]_S$ , для умов плоского напруженого стану при температурах  $T = 293$  і  $77\text{K}$ . Коротко описані методику проведення випробувань.*

*The paper presents the results of experimental studies on the constants of elasticity and strength, Poisson's ratios and thermal expansion coefficients of both unidirectional  $[0]_{25}$  carbon/epoxy composite and 29-layer quasi-orthotropic balanced  $[0_3/90/0_2/\mp 45/0/90/0_2/90/45/0/-45]_S$  carbon/epoxy composite under a plane stress-strain state at  $T = 293$  and  $77\text{K}$ . The test techniques are outlined.*

---

### Введение

Одним из наиболее распространенных способов повышения прочности и надежности конструкций при одновременном уменьшении материалоемкости, является армирование их упрочняющими элементами, которые обладают более высокой прочностью и жесткостью. Такие композиционные материалы находят все более широкое применение в различных отраслях народного хозяйства.

Значительное место среди композитов занимают слоистые эпоксидные углепластики, армированные однонаправленными высокопрочными углеродными волокнами [1, 2]. Каждый слой такого материала состоит из системы однонаправленных волокон, находящихся в жестком зацеплении со связующим – эпоксидной матрицей.

К основным преимуществам углепластиков можно отнести высокую удельную прочность и жесткость, уникальные теплофизические характеристики, стойкость к агрессивным средам и высокую электропроводность. Разработанные, прежде всего, для авиационной и ракетной техники они все чаще используются при производстве товаров широкого потребления (например, в автомобильной промышленности, судостроении, при изготовлении рам ткацких станков, различных контейнеров, спортивного инвентаря, в медицинской технике и др.). Кроме высоких прочностных и электрических характеристик достаточный уровень теплофизических параметров углепластиков делают их весьма привлекательными и для использования в криоэлектромашиностроении.

Среди причин, сдерживающих применение разработанных композитов, следует назвать относительную дороговизну высокомодульных волокон, существующие технологии производства, требующие автоматизации процессов изготовления и необходимость разработок принципов конструирования, которые базируются на

достоверной информации о термомеханическом поведении композиций при различных видах термосилового нагружения.

Механические характеристики армированных полимерных материалов существенным образом зависят от температуры. Несмотря на значительное количество публикаций по исследованию закономерностей деформирования углепластиков, в отечественной литературе, практически, отсутствует полная информация о термомеханических характеристиках композитов, как при комнатной, так и низких температурах [1, 2].

Некоторые аспекты деформирования и разрушения эпоксидных углепластиков при комнатной и повышенных температурах описаны в ряде статей, обобщены в монографиях, представлены в обзорах и справочниках [1–6].

Наиболее полные обзоры по исследованию термомеханического поведения армированных углепластиков при низких температурах представлены в работах [7–14], где проиллюстрирована существенная зависимость термомеханических параметров композитов от температуры испытаний, механических свойств компонентов, от объемного содержания волокон, характера взаимодействия на границах раздела матрица-волокно и технологии изготовления. Необходимо отметить также, что в вследствие значительного различия термомеханических параметров армирующих волокон и матрицы, в таких композициях после процесса кристаллизации возникают существенные термические напряжения даже при отсутствии градиента температуры по объему среды, как при комнатной, так и при низких температурах.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование закономерностей деформирования и разрушения слоистых углепластиков, которые находятся в условиях плоского напряженного состояния, при двух фиксированных значениях температуры ( $T = 293$  и  $77K$ ). В частности, определение модулей упругости и сдвига, коэффициентов Пуассона, коэффициентов линейного теплового расширения, разрушающих напряжений однонаправленного композита  $[0]_{25}$ , и композита со схемой армирования  $[0_3 / 90 / 0_2 / \pm 45 / 0 / 90 / 0_2 / 90 / \overline{45 / 0 / -45}]_S$ , которые находятся в условиях плоского напряженного состояния. Черта над определенной группой слоев обозначает несимметричность отмеченных слоев относительно срединной поверхности композита.

Углепластики изготовлены методом горячего прессования предварительно пропитанных связующим слоев при соответствующей температурной обработке, давлении, и времени выдержки. В качестве армирующих элементов использовалась углеродная лента ЛУ-3. Наполнителем композита является эпоксидная смола ЭД-20 (модифицированная). Объемное относительное содержание волокон в композите  $c = 0,55$ .

### **1. Принятые гипотезы и предположения**

Каждый слой композита представляет собой систему однонаправленных углеродных волокон равномерно распределенных в полимерной матрице. Предполагается, что все слои жестко связанные друг с другом и расположенные

симметрично относительно срединной поверхности композита. Исходя из гипотезы континуума, слоистые материалы с симметричными схемами армирования будем считать ортотропными материалами.

Матрица и волокна являются изотропными материалами, которые имеют различные характеристики упругости, прочности и коэффициенты линейного теплового расширения.

Согласно теории высоконаполненных волокнистых материалов, основанной на регуляризации структуры, и допущении об однородном напряженном состоянии вдоль ориентации волокон в одной ячейке слой можно считать трансверсально изотропным материалом [1–4].

При описании процессов деформирования, как в отдельном слое, так и в композите в целом, воспользуемся гипотезой о малых деформациях.

Для характеристики механического поведения углепластика будем использовать следующие системы координат: общую "глобальную"  $(x, y, z)$  и локальные "естественные" системы координат  $(1, 2, 3)$ , совпадающие с главными направлениями слоев. Локальную систему координат выберем таким образом, что бы ее ось 01 совпадала с направлением армирования слоя.

Исходя из модели трансверсально изотропного материала, упругое деформирование слоя, находящегося в условиях плоского напряженного состояния, полностью описывается 6-тью линейно независимыми эффективными параметрами [1, 2]: двумя модулями упругости  $E_1, E_2$ , модулем сдвига в плоскости армирования  $G_{12}$ , коэффициентом Пуассона  $\nu_{12}$  и двумя коэффициентами линейного теплового расширения  $\alpha_1, \alpha_2$ . В обозначении коэффициента Пуассона  $\nu_{12}$  принято, что первый индекс 1 относится к направлению приложения нагрузки, а второй 2 – к направлению вызванной им поперечной деформации. Другой коэффициент Пуассона  $\nu_{21}$ , определяется из соотношения, которое следует из гипотезы о наличии упругого потенциала  $E_1\nu_{21} = E_2\nu_{12}$ .

Предполагается, что прочность армированного слоя характеризуется 5-ью эффективными параметрами прочности  $\sigma_{+1}, \sigma_{-1}, \sigma_{+2}, \sigma_{-2}, \sigma_{12}$ . Здесь  $\sigma_{+1}, \sigma_{-1}, \sigma_{+2}, \sigma_{-2}$  - величины разрушающих напряжений слоя при действии растягивающих и сжимающих усилий в направлениях 01 и 02 соответственно,  $\sigma_{12}$  - эффективная прочность при сдвиге в плоскости армирования. Следовательно, мы допускаем, что прочность при сдвиге одинаковая при противоположных направлениях сдвига.

Как уже отмечалось [1, 2], композиты с симметричными схемами укладки слоев относительно срединной поверхности пакета можно считать ортотропными материалами. Для упрощения расчетов исследуемый квазиортотропный композит будем рассматривать как ортотропный материал.

Глобальную систему координат  $(x, y, z)$  выберем таким образом, чтобы она совпадала с осями ортотропии композита. Тогда деформированное состояние упругого ортотропного тела, которое находится в условиях плоского напряженного состояния,

также описывается 6-ью линейно независимыми эффективными параметрами упругости  $E_x, E_y, G_{xy}, \nu_{xy}, \alpha_x, \alpha_y$  [15]. При этом  $E_x \nu_{yx} = E_y \nu_{xy}$ .

Будем считать, что прочностные свойства ортотропного материала также описываются при помощи 5-ти эффективных параметров прочности  $\sigma_{+x}, \sigma_{-x}, \sigma_{+y}, \sigma_{-y}, \sigma_{xy}$

## 2. Методики исследований и результаты экспериментов

Наиболее существенной проблемой при испытаниях слоистых композитов является передача усилий от захватов испытательной машины к образцу. В зоне измерения деформаций необходимо обеспечить ее однородность и предотвратить нежелательный вид разрушения. Игнорирование этими фактами может привести к невозможности получения искомых параметров материала или к их очень грубому приближению [16].

Для определения эффективных характеристик упругости и прочности слоистых углепластиков проводились опыты на растяжение и сжатие. В частности, для вычисления вышеназванных параметров из пластин композитов вырезались плоские образцы в направлениях 0, 45 и 90° к осям ортотропии. Требования к их форме, размерам, способам закрепления и нагружения регламентировались ГОСТ 25601-80 при проведении испытаний на растяжение и ГОСТ 25602-80 - при сжатии. Для более точного определения механических характеристик с учетом возможного разброса экспериментальных данных измерения проводились при пяти значениях нагрузки для пяти образцов при исследовании каждого вида нагружения. Полученные значения затем усреднялись.

В связи с отсутствием в нашей стране стандартов для определения модуля сдвига и разрушающих напряжений при сдвиге в плоскости армирования мы использовали соответствующий нормативный документ США - ASTM D 3518. В этом случае параметр  $G_{12}$  вычисляли из результатов опытов на растяжение образцов  $[\pm 45]_{3S}$ , вырезанных под углом 45° к направлению армирования, перекрестно армированных композитов. Тогда

$$G_{12} = \frac{E_x}{2(1 + \nu_{xy})}, \quad (1)$$

где  $E_x$  модуль упругости образца при растяжении вдоль оси 0x,  $\nu_{xy}$  - соответствующий коэффициент Пуассона.

За разрушающее сдвиговое напряжение  $\sigma_{12}$  принята величина, при которой наблюдалось отклонение от линейной зависимости напряжения от деформации данного композита  $[\pm 45]_{3S}$ .

При вычислении модуля сдвига  $G_{xy}$  слоистого пакета использовали известное соотношение [1]

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{4}{E_{45}} - \left[ \frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} - \frac{\nu_{xy}}{E_x} \right], \quad (2)$$

где  $E_{45}$  - модуль продольной упругости образца, вырезанного из пластины под углом  $45^\circ$  к осям ортотропии в плоскости армирования.

Испытания проводились на испытательной машине Instron-1126 со скоростью перемещения траверсы  $33 \cdot 10^{-6}$  м/с. Погрешность измерения силы не превышала 1%. Образец зажимался по боковым поверхностям накладок клиновидными захватами.

Для исследований механического поведения углепластика при  $T = 77\text{K}$  использовали криостат, в который помещался образец с тензOMETром, и заливали жидкий азот. Для стабилизации температуры система образец-тензOMETр выдерживалась в жидком азоте без нагрузок в течении 15 минут. Деформации измерялись с помощью специально разработанного двухплечевого тензOMETра. ТензOMETр сконструирован таким образом, что бы начальные отклонения образца не приводили к значительным ошибкам.

Для определения коэффициентов Пуассона деформации по ширине или толщине образца измерялись высокочувствительным тензOMETром. Тарирование производилось с помощью специального тягового устройства.

Результаты исследований эффективных параметров упругости композитов представлены в табл. 1. Как видно, понижение температуры эксплуатации до 77K приводит к наиболее существенному изменению модуля сдвига  $G_{12}$ . Параметры продольной упругости  $E_1, E_2$  однонаправленных углепластиков изменяются в меньшей степени. Практически не изменяются и главные коэффициенты Пуассона углепластиков, которые соответственно равны  $\nu_{12} = 0,31$ ;  $\nu_{xy} = 0,27$ . Можно отметить также незначительное расхождение модулей продольной упругости  $E_1, E_2$ , определенных в опытах на растяжение и сжатие.

Таким образом, понижение температуры эксплуатации до 77K приводит к увеличению модулей упругости  $E_1, E_2$  и  $G_{12}$  на 14,7; 9,8 и 18,2%. Аналогичные тенденции сохраняются и для исследуемого квазиортотропного композита.

Значения эффективных характеристик прочности исследуемых композитов для двух фиксированных значений температуры приведены в табл. 2. Как видно, прочность однонаправленного композита в направлении армирования при охлаждении до 77K изменяется незначительно:  $\sigma_{+1}$  увеличивается на 4%, а  $\sigma_{-1}$  - уменьшается на 2,5%. Более существенные изменения претерпевают прочности в трансверсальном направлении: компонента  $\sigma_{+2}$  увеличивается на 37%, а  $\sigma_{-2}$  - уменьшается на 48%. Прочность при сдвиге в плоскости армирования  $\sigma_{12}$  также увеличивается приблизительно на 26%.

Для определения эффективных коэффициентов линейного теплового расширения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  однонаправленных композитов из пластин данного материала в направлении осей

транстропии вырезали образцы квадратного поперечного сечения. Требования к образцам, испытательному оборудованию и методике проведения испытаний регламентировалось ДСТУ 2388-93 [17].

Таблица 1.

Структура и характеристики упругости углепластиков

Код армирования композита	T, K	Параметры упругости	Их значения ± стандарт. откл., ГПа
[0] <sub>25</sub>	293	$E_1$	154,1±7,3
	77	$E_1$	173,3±1,2
[90] <sub>25</sub>	293	$E_2$	9,2±0,2
	77	$E_2$	10,1±0,1
[± 45] <sub>3S</sub>	293	$G_{12}$	4,4±0,3
	77	$G_{12}$	5,2±0,2
[0 <sub>3</sub> /90/0 <sub>2</sub> /± 45/0/90/0 <sub>2</sub> /90/45/0/− 45] <sub>S</sub>	293	$E_x$	92,5±3,7
		$E_y$	38,7±1,1
		$G_{xy}$	11,5±0,3
	77	$E_x$	142,0±4,0
		$E_y$	40,2±2,2
		$G_{xy}$	12,7±0,8

Для вычисления таких параметров при низких температурах образец вначале охлаждали до 77К, а затем, слив жидкий азот, медленно нагревали до комнатной температуры. Из аппроксимации полученных зависимостей  $\alpha_1(T)$ ,  $\alpha_2(T)$  можем записать, что при  $T = 293K$   $\alpha_1 = 0,73 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ,  $\alpha_2 = 27,37 \cdot 10^{-6} K^{-1}$  и соответственно при  $T = 77K$  эти параметры равны  $\alpha_1 = 0,65 \cdot 10^{-7} K^{-1}$  и  $\alpha_2 = 22,24 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ . Такое значительное различие коэффициентов линейного теплового расширения в направлении осей транстропии слоя является причиной возникновения термических напряжений, как при комнатной, так и низких температурах.

При расчете напряженно-деформированного состояния слоистых анизотропных материалов необходимо знать начальную температуру  $T_0$ , при которой в полимерном пластике отсутствуют термические напряжения. Как показано в [18], за такую величину может быть принята температура кристаллизации матрицы плюс 15К, т.е.  $T_0 = (T_{кр} + 15)K$ .

Представленная информация о зависимости термомеханических параметров однонаправленного композита может быть использована для расчета напряжений и деформаций в слоистом композите с произвольной схемой укладки слоев. Определенные эффективные параметры упругости композитов позволяют оценить

достоверность их прогнозирования, исходя из модели теории упругости анизотропного тела. На основе вычисленных параметров разрушения слоистых полимерных композиций, находящихся в условиях плоского напряженного состояния, можно оценить достоверность расчета несущей способности композитов, исходя из термомеханических параметров слоя на основе теории слоистых сред и критерия разрушения отдельного слоя.

Таблица 2.

Код армирования и значения разрушающих напряжений углепластиков

Код армирования композита	$T, K$	Компоненты разрушающих напряжений	Их значения $\pm$ стандарт. откл., МПа
$[0]_{25}$	293	$\sigma_{+1}$	885 $\pm$ 10
		$\sigma_{-1}$	992 $\pm$ 13
	77	$\sigma_{+1}$	848 $\pm$ 11
		$\sigma_{-1}$	1017 $\pm$ 18
$[90]_{25}$	293	$\sigma_{+2}$	35 $\pm$ 2
		$\sigma_{-2}$	155 $\pm$ 16
	77	$\sigma_{+2}$	22 $\pm$ 3
		$\sigma_{-2}$	230 $\pm$ 1
$[\pm 45]_{3S}$	293	$\sigma_{12}$	82 $\pm$ 2
	77	$\sigma_{12}$	103 $\pm$ 3
$[0_3 / 90 / 0_2 / \mp 45 / 0 / 90 / 0_2 / 90 / \overline{45 / 0 / -45}]_S$	293	$\sigma_{+x}$	320 $\pm$ 19
		$\sigma_{-x}$	630 $\pm$ 8
		$\sigma_{+y}$	188 $\pm$ 9
		$\sigma_{-y}$	383 $\pm$ 11
	77	$\sigma_{+x}$	330 $\pm$ 15
		$\sigma_{-x}$	804 $\pm$ 22
		$\sigma_{+y}$	138 $\pm$ 5
		$\sigma_{-y}$	451 $\pm$ 4
$[-45_3 / 45 / -45_2 / 90 / 0 / \mp 45 / -45_2 / 45 / 0 / -45 / 90]_S$	293	$\sigma_{+x}$	184 $\pm$ 1
		$\sigma_{-x}$	290 $\pm$ 4
	77	$\sigma_{+y}$	158 $\pm$ 18
		$\sigma_{-y}$	315 $\pm$ 20

### Выводы

1. Выполненные исследования закономерностей деформирования и разрушения однонаправленных эпоксидных углепластиков при  $T = 293$  и  $77K$  позволяют сделать вывод о существенной зависимости их термомеханических параметров от температуры. При охлаждении композита до  $77K$  увеличиваются эффективные параметры упругости  $E_1, E_2, G_{12}$  соответственно на 14,7; 9,8 и 18%. Наиболее существенно

изменяются при этом параметры тензора разрушения слоя в трансверсальном направлении: компонента  $\sigma_{+2}$  увеличивается на 37%, а  $\sigma_{-2}$  - уменьшается на 48%. Прочность слоя в плоскости армирования  $\sigma_{12}$  также увеличивается приблизительно на 26%.

2. Эффективные коэффициенты линейного термического расширения слоя в направлении армирования  $\alpha_1$  и в трансверсальном направлении  $\alpha_2$  отличаются почти в 40 раз. Такое значительное их различия является причиной возникновения существенных термических напряжений в композиционном материале как при комнатной, так и низких температурах.

3. Пренебрежение зависимостями термомеханических параметров от температуры слоя и термическими напряжениями в композите может привести к значительным погрешностям при расчетном определении напряженно - деформированного состояния слоистых полимерных углепластиков.

4. Прогнозирование несущей способности композиционных материалов, исходя из теории слоистых сред на основе термомеханических параметров слоя и критерия слоя, должно базироваться на информации об изменении компонент тензора разрушения от температуры, полученных из экспериментов.

#### Список литературы

1. Композиционные материалы. Справочник / Под. общ. ред. В.В. Васильева и Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
2. Композиционные материалы. Справочник / Под ред. Д.М. Карпиноса. – Киев: Наук. думка, 1985. – 592 с.
3. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. - М.: Химия, 1981. - 232 с.
4. Ванин Г.А. Микромеханика композиционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1985. – 304 с.
5. Композиционные материалы в 8 т. / Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. Том 2. Механика композиционных материалов / Под. ред. Дж. Сендецки. – М.: Мир, 1978. - 564 с.
6. Механика композитов. В 12 т. / Под. ред. А.Н. Гузя. Том. 3. Статистическая механика и эффективные свойства материалов / Под. ред. Л.П. Хорошуна. – Киев: Наук. думка, 1993. – 390 с.
7. Kasen M.B. Mechanical and thermal properties of filamentary-reinforced structural composites at cryogenic temperatures. 1: Glass – reinforced composites // Cryogenics.- 1975.- 15. – N 6. - P. 327-349.
8. Kasen M.B. Cryogenic properties of filamentary-reinforced composites: an update // Cryogenics.- 1981. - 21. - N 6. – P. 323-340.
9. Hartwig G. Overview of advanced fibre composites // Cryogenics. - 1988. - 28. – N 4. - P. 216-219.
10. Reed R.P. Golda M. Cryogenic properties of unidirectional composites // Cryogenics.- 1994. - 34. – N 11. – P. 909-928.
11. Schutz J.B. Properties of composite materials for cryogenic applications // Cryogenics. - 1998. - 38. - N 1. - P. 3-12.
12. Лотоцкая В.А., Похил Ю.А., Телегон А.И., Дергун С.М. Прочность и пластичность металлических и неметаллических композитов криогенного назначения // Пробл. прочности. - 2005. - №5. - С. 93- 103.
13. Кучер Н.К., Земцов М.П. Деформирование и прочность слоистых углепластиков при температурах 293 и 77К // Пробл. прочности. - 2001. - № 3. - С. 46-56.