

Деформирование и прочность однонаправленных углепластиков при повышенных температурах

Е. Л. Данильчук^а, Н. К. Кучер^а, А. П. Кушнарев^б, А. М. Потапов^б,
Н. П. Рудницкий^а, А. А. Самусенко^б, В. Э. Филатов^а

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

^б ГП “Конструкторское бюро “Южное” им. М. К. Янгеля”, Днепропетровск, Украина

Представлены результаты экспериментального исследования деформирования и прочности однонаправленных углепластиков, изготовленных на основе углеродных волокон типа T700 и эпоксидной матрицы, при комнатной и повышенных (до 260°C) температурах. Исследованы зависимости характеристик упругости и прочности композита от температуры испытаний. Определены механические характеристики и прочность углеродных волокон и матрицы при комнатной и повышенных температурах.

Ключевые слова: однонаправленный углепластик, деформирование, характеристики упругости, прочность, повышенные температуры.

Введение. К материалам, применяемым в ракетно-космической технике, предъявляются достаточно жесткие требования. Такие материалы должны сочетать в себе значительную жесткость и удельную прочность, оказывать существенное сопротивление концентраторам напряжений и действию динамических нагрузок, обладать высокими значениями длительной прочности и обеспечивать необходимую надежность конструкции [1]. Наиболее полно таким требованиям отвечают углепластики на основе термореактивных полимерных матриц.

Среди причин, ограничивающих их распространение, можно отметить низкие характеристики трансверсальной и сдвиговой прочности, трудоемкость изготовления композитов на основе углеродных волокон, необходимость строгого соблюдения технологических параметров изготовления. При нарушении последних резко снижаются прочностные свойства изделий [2].

Элементы конструкций, изготовленные из материалов, армированных углеродными волокнами, используются в изделиях, которые эксплуатируются как при низких (близких к -50°C), так и высоких температурах. Особенности их деформирования и несущая способность при низких температурах достаточно хорошо описаны, в частности, в работах [3–6]. Механическое поведение углепластиков при комнатной температуре исследовано наиболее полно [7–9]. На основе полученных экспериментальных данных предложены модели деформирования композитов и критерии оценки их несущей способности [10–12].

Некоторые аспекты высокотемпературного деформирования углепластиков представлены в [13–15]. При этом учитываются изменения характеристик волокон и матрицы при нагреве и возникновение расслоений между ними, что характерно для высокотемпературного нагрева аблирующих композитов [13].

Дальнейшее развитие моделей деформирования углепластиков и критериев оценки их несущей способности требует проведения комплексных исследований механического поведения углеродных волокон, полимерной матрицы и углепластиков при различных видах термосилового нагружения.

Цель настоящей работы заключается в исследовании температурных зависимостей модулей упругости и характеристик прочности однонаправленного углепласт-

тика, изготовленного на основе углеродного жгута типа Т700 и эпоксидной матрицы при $20 \leq T \leq 260^\circ\text{C}$. Композит выполнен методом вакуумного прессования предварительно пропитанных связующим монослоев при соответствующей термообработке, давлении и выдержке. Содержание волокон в композите равно 60...65%.

Основные гипотезы и предположения. Исходя из гипотезы континуума полагаем, что исследуемый углепластик является гомогенным материалом. Такой подход включает в себя процедуру статистического осреднения, когда действительное состояние среды идеализируется и считается континуумом. Для этого состояния характерные свойства будут одинаковыми для всех точек среды [10–13].

Слоистые однонаправленные углепластики относятся к классу трансверсально-изотропных материалов. При низких, комнатной и повышенных температурах их деформирование достаточно хорошо описывается соотношениями линейной теории упругости анизотропного тела [16].

Предположим, что каждый монослой представляет собой структуру, образованную выпрямленными и одинаково ориентированными волокнами, которые равномерно расположены в полимерной матрице.

Согласно теории высоконаполненных волокнистых композитов, основанной на регуляризации их структуры, и гипотезе, что вдоль ориентации волокон в одной ячейке напряженное состояние является однородным, монослой будем считать трансверсально-изотропным материалом [10].

Для идентификации механических характеристик однонаправленного композита используем декартову систему координат 123. Предположим, что ось 01 совпадает с направлением волокон.

Исходя из модели трансверсально-изотропного тела деформирование однонаправленного углепластика, в рамках плоской задачи теории упругости, полностью описывается четырьмя линейно независимыми эффективными параметрами [10]: двумя модулями продольной упругости E_1 , E_2 , модулем сдвига в направлении волокон G_{12} и главным коэффициентом Пуассона ν_{12} .

В обозначениях коэффициента Пуассона ν_{12} принято, что индекс 1 относится к направлению приложения усилия, индекс 2 – к направлению вызванной им поперечной деформации. Другой коэффициент Пуассона ν_{21} определяется из соотношения, которое следует из условия существования упругого потенциала $E_1\nu_{21} = E_2\nu_{12}$.

Напряженное состояние композита, который находится в условиях плоского напряженного состояния, описывается тремя независимыми характеристиками σ_1 , σ_2 , σ_{12} . Считается, что напряжение при сдвиге в плоскости армирования не зависит от направления действующих усилий и определяется одной величиной σ_{12} .

Предельное состояние углепластика, исходя из простейшего тензорно-полиномиального критерия разрушения [10, 12], характеризуется пятью эффективными параметрами прочности σ_{+1}^b , σ_{-1}^b , σ_{+2}^b , σ_{-2}^b и σ_{12}^b . Знак “+” в индексе указывает, что данная величина определена из опытов на растяжение, “–” – то же на сжатие.

Методики испытаний и регламентирующие документы. Для определения диаграмм деформирования и вышеприведенных характеристик упругости и прочности однонаправленного углепластика при температурах 20, 50, 75, 100, 125, 150, 200 и 260°C проводились испытания на растяжение, сжатие и сдвиг.

Все эксперименты проводились на оборудовании Центра механических испытаний и сертификации материалов и элементов конструкций Института проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. Для испытаний на растяжение в соответствии с ГОСТ 25.601-80 [17] использовали призматические образцы с накладками размером $350 \times 15 \times 2$ мм.

Исследования при температуре испытаний 50, 75 и 100°C выполнялись в климатической камере Instron (модель 3119-408). При других повышенных температурах

использовалась малогабаритная разъемная высокотемпературная печь, в которой нагревалась только рабочая часть образцов.

Климатическая камера обеспечивала нагрев и поддержание в рабочей зоне температуры с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$ после выдержки образцов не менее 20 мин.

Осевую деформацию измеряли экстензометром Epsilon (модель 3555-025M-020-НТ) и экстензометром (модель 2632-057) с керамическими ножами, монтируемыми снаружи на корпус печи. Для одновременного измерения осевой и поперечной деформации использовали биаксиальный тензомер (модель 2620-614).

Испытания на сжатие проводились согласно требованиям [18] на образцах размером $10 \times 10 \times 20$ мм, имеющих форму параллелепипеда. Поперечная и продольная деформация образцов определялась тензорезисторами типа КФ5-5П1-10-Б-12. После наклейки тензорезисторов образцы подвергались термообработке до температуры 140°C . Необходимый температурный режим при испытаниях поддерживался с помощью специальной термокамеры.

Характеристики сдвига G_{12} и σ_{12}^b однонаправленного композита определяли согласно [19] исходя из результатов испытаний на растяжение призматических образцов размером $350 \times 25 \times 2$ мм с укладкой слоев $[\pm 45^\circ]_S$. В процессе испытаний снимали показания растягивающего усилия и деформаций в продольном и поперечном направлении.

Предел прочности при сдвиге в направлении волокон определяли по формуле

$$\sigma_{12}^b = \frac{P_m}{2bh}. \quad (1)$$

Здесь b и h – ширина и толщина образца; P_m – усилие,

$$P_m = \min \left\{ \begin{array}{l} P_{\max} \\ P|_{\gamma_{12}=5\%} \end{array} \right., \quad (2)$$

где P_{\max} – максимальное значение растягивающего усилия в ходе эксперимента; γ_{12} – сдвиговая деформация,

$$\gamma_{12} = |\varepsilon_1| + |\varepsilon_2|; \quad (3)$$

ε_1 и ε_2 – продольная и поперечная деформация образца с укладкой слоев $[\pm 45^\circ]_S$.

Модуль упругости при сдвиге вдоль волокон вычисляли из выражения

$$G_{12} = \frac{\Delta\sigma_{12}}{\Delta\gamma_{12}}, \quad (4)$$

где $\Delta\sigma_{12}$ – величина сдвигового напряжения в конце прямолинейного участка диаграммы деформирования $\sigma_{12} - \gamma_{12}$; $\Delta\gamma_{12}$ – соответствующее значение сдвиговой деформации на том же участке диаграммы.

С целью определения однородности распределения механических характеристик и условия повторяемости результатов экспериментов все опыты проводили для пяти образцов при каждом виде деформирования. При этом вычисляли средние значения искомого величин, коэффициенты вариации и стандартные отклонения.

Результаты испытаний. На рис. 1 представлены диаграммы деформирования однонаправленного углепластика в направлении армирования при температурах 20 и 260°C . Аналогичные соотношения, связывающие сдвиговое напряжение σ_{12} и деформацию сдвига γ_{12} , при сдвиге вдоль волокон приведены на рис. 2.

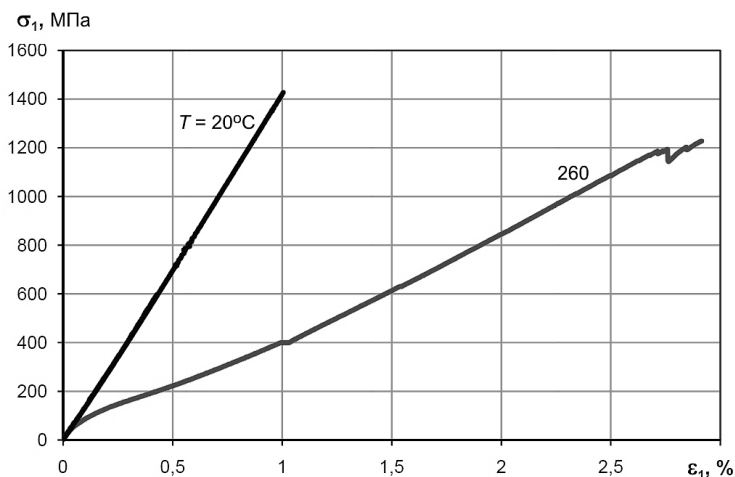


Рис. 1. Зависимость продольных напряжений σ_1 однонаправленного углепластика от деформации ϵ_1 при $T = 20$ и 260°C .

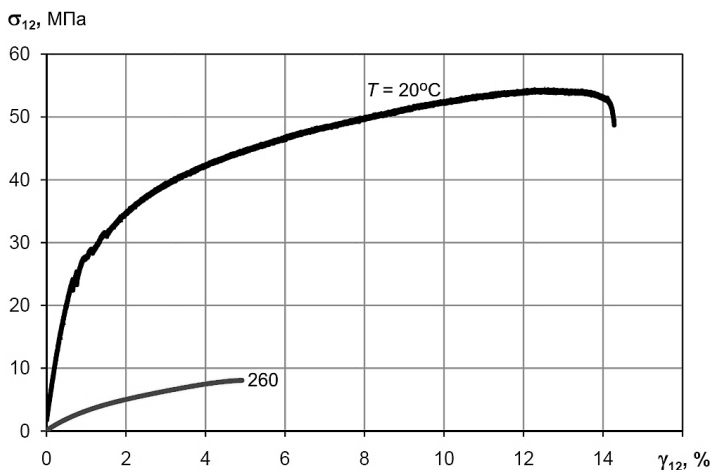


Рис. 2. Диаграмма деформирования углепластика при продольном сдвиге при двух фиксированных значениях температуры.

Как видно из рис. 1, диаграмма деформирования в направлении волокон достаточно хорошо описывается линейной зависимостью. Линейные соотношения можно использовать также для описания уравнений состояния в трансверсальном направлении для всего диапазона повышенных температур.

Для уравнений состояния при сдвиге в направлении волокон имеет место нелинейная зависимость между напряжением σ_{12} и деформацией сдвига γ_{12} в диапазоне температур $20 \dots 260^\circ\text{C}$. Однако как первое приближение при анализе деформирования однонаправленных углепластиков можно использовать линейные соотношения теории упругости анизотропных сред при комнатной и повышенных температурах.

При этом можно отметить такую особенность диаграммы, как значительное уменьшение предельных напряжений и деформаций сдвига при температуре 260°C .

Усредненные значения эффективных характеристик упругости и предельных напряжений, исходя из результатов испытаний пяти образцов, приведены в таблице. Там же для каждой характеристики представлены значения стандартного отклонения.

**Значения характеристик упругости и предельных напряжений
однонаправленного углепластика при различных фиксированных температурах**

T , °C	E_1 , ГПа	E_2 , МПа	G_{12} , МПа	ν_{12}	σ_{+1}^b , МПа	σ_{-1}^b , МПа	σ_{+2}^b , МПа	σ_{-2}^b , МПа	σ_{12}^b , МПа
20	132,0 ±4,3	6790 ±584	3932 ±309	0,32 ±0,04	1433,6 ±15,5	560,6 ±75,7	32,2 ±1,6	132,6 ±11,7	52,3 ±1,7
50	126,0 ±13,2	4562 ±341	1416 ±188	0,34 ±0,01	1444,0 ±20,0	467,0 ±8,8	27,0 ±7,3	95,1 ±7,3	47,8 ±4,4
75	123,0 ±15,0	–	311 ±7	0,38 ±0,07	1370,1 ±41,1	346,8 ±67,5	–	–	22,7 ±0,3
100	125,4 ±13,2	3900 ±248	256 ±39	0,35 ±0,03	1326,3 ±412,5	127,2 ±18,6	20,0 ±1,7	28,6 ±6,9	15,5 ±2,6
125	119,7 ±7,3	3100 ±86	203 ±18	–	1305,6 ±52,6	118,7 ±29,9	12,6 ±2,1	19,3 ±3,1	11,7 ±1,4
150	112,4 ±11,2	–	186 ±33	–	1259,9 ±73,5	61,5 ±7,7	–	–	9,3 ±1,7
200	108,4 ±1,0	–	120 ±15	–	1257,6 ±51,5	56,0 ±7,7	–	–	9,9 ±1,3
260	103,7 ±21,5	2200 ±75	98 ±17	–	1181,3 ±187,1	83,2 ±4,7	4,5 ±0,3	11,1 ±1,5	7,8 ±0,8

Как видно из данных таблицы, повышение температуры испытаний до 260°C приводит к существенному изменению как характеристик упругости, так и параметров прочности композита. Например, модуль продольной упругости E_1 в направлении волокон уменьшается почти на 21,4%, а модуль E_2 в трансверсальном направлении понижается более чем в три раза. Коэффициент Пуассона ν_{12} незначительно увеличивается при повышении температуры испытаний. Поэтому в большинстве случаев он считается постоянным. Прочность при растяжении σ_{+1}^b в направлении армирования уменьшается в 1,2 раза, а при сжатии σ_{-1}^b – более чем в 6,7 раза по сравнению с аналогичной характеристикой при комнатной температуре. Значительно изменяется также прочность при сдвиге вдоль волокон (σ_{12} уменьшается в 6,7 раза).

Прочность при растяжении σ_{+2}^b в трансверсальном направлении уменьшается в 7,2 раза, а при сжатии – в 11,9 раза по сравнению с аналогичными величинами при $T = 20^\circ\text{C}$.

Существенные значения стандартного отклонения при определении механических характеристик углепластика свидетельствуют о необходимости дальнейшего совершенствования как технологий изготовления композита, так и образцов для испытаний. Например, разброс характеристик прочности при растяжении может быть уменьшен при использовании образцов в виде лопаток [17].

Вместе с тем представленные данные позволяют определить зависимости характеристик упругости и прочности для всего диапазона повышенных температур и использовать их для расчета несущей способности элементов конструкций из таких углепластиков.

Отметим, что свойства однонаправленных композитов при повышенных температурах несколько отличаются от свойств непропитанного пучка волокон ($E_f = 250$ ГПа,

$\sigma_f^b = 4,9$ ГПа), которые не изменяются в диапазоне повышенных температур. Это связано с дефектами многих волокон, образующих нить. Если в непропитанном пучке разрушенное волокно не воспринимает нагрузку, то в однонаправленном композите (препреге) благодаря наличию касательных напряжений матрицы разрушенное волокно включается в работу и вносит свой вклад в общую прочность.

Изменения усредненных характеристик упругости и прочности однонаправленного композита при повышенных температурах определяются в первую очередь теплостойкостью матрицы, а не свойствами волокон. Теория смесей, например, не описывает подобные явления. Согласно этой теории модуль композита в направлении армирования определяется выражением $E_1 = \nu_f E_f + \nu_m E_m$, где ν_f , ν_m – относительные объемные содержания волокон и матрицы в композите.

При повышении температуры эксплуатации изменяются как теплофизические, так и механические свойства однонаправленных композитов. В первую очередь изменяются упругие и прочностные характеристики в трансверсальном направлении и при сдвиге вдоль волокон. Наличие различных коэффициентов линейного термического расширения составляющих приводит к немонотонному расширению композита и его усадке. При этом изменяются упругие и прочностные характеристики композитов в направлении армирования.

Для расчета деформирования и прочности однонаправленных композитов при повышенных температурах [14, 15] необходимо знать механические свойства составляющих. Принято, что углеродный жгут типа Т700 в температурном диапазоне до 260°C деформируется упруго, и его параметры жесткости и прочности остаются постоянными. Для полимерной эпоксидной матрицы при комнатной температуре модуль сдвига $G_m = 1090$ МПа, предел прочности при сдвиге $\tau_m^b = 55$ МПа. При $T = 125^\circ\text{C}$ соответственно имеем $G_m = 25$ МПа, $\tau_m^b = 15$ МПа. Для этого диапазона температур предполагается линейное изменение указанных параметров. Коэффициент Пуассона ν считается постоянным и равным 0,42.

Выводы

1. Проведенные испытания механического поведения однонаправленных углепластиков при различных фиксированных температурах позволяют определить все необходимые характеристики упругости и прочности для условий плоского напряженного состояния в диапазоне повышенных температур 20...260°C.
2. Представленная информация о закономерностях деформирования составляющих компонентов композита углеродного жгута типа Т700 и эпоксидной матрицы является основой для разработки определяющих соотношений армированных структур при повышении температуры эксплуатации до 260°C.
3. Определенные значения характеристик упругости и предельных напряжений композита могут быть использованы для интерполяции необходимых температурных зависимостей при повышенных температурах и для расчета элементов конструкций с различными схемами армирования слоев.

Резюме

Представлено результати експериментального дослідження деформування і міцності односпрямованих вуглепластиків, виготовлених на основі вуглецевих волокон типу Т700 і епоксидної матриці, за кімнатної і підвищеної (до 260°C) температур. Досліджено залежності характеристик пружності і міцності композита від температури випробувань. Визначено механічні характеристики і міцність вуглецевих волокон і матриці за кімнатної і підвищеної температур.

1. Кондратьев А. В., Коваленко В. А. Обзор и анализ мировых тенденций и проблем расширения применения в агрегатах ракетно-космической техники полимерных композиционных материалов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2011. – № 3 (67). – С. 7–18.
2. Углеродные волокна и углекомпозиаты / Под ред. Э. Фитцера. – М.: Мир, 1988. – 336 с.
3. Schutz J. B. Properties of composite materials for cryogenic applications // Cryogenics. – 1998. – **38**, No. 1. – P. 3–12.
4. Kucher N. K., Zarazovskii M. N., and Danil'chuk E. L. Deformation and strength of laminated carbon-fiber-reinforced plastics under a static thermomechanical loading // Mech. Compos. Mater. – 2013. – **48**, No. 6. – P. 669–680.
5. Лотоцкая В. А., Похил Ю. А., Телегон А. И., Дергун С. М. Прочность и пластичность металлических и неметаллических композитов криогенного и аэрокосмического назначения // Пробл. прочности. – 2005. – № 5. – С. 93–103.
6. Reed R. P. and Golda M. Cryogenic properties of unidirectional composites // Cryogenics. – 1994. – **34**, No. 11. – P. 909–928.
7. Гуляев Г. М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. – М.: Химия, 1981. – 232 с.
8. Композиционные материалы. Справочник / Под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
9. Composite Materials Handbook. Vol. 2: Polymer Matrix Composite Materials Properties. – MIL-HDBK-17-2F. – Department of Defense, USA, 1999. – 529 p.
10. Кристенсен Р. Введение в механику композитов / Пер. с англ. под ред. Ю. М. Тарнопольского. – М.: Мир, 1978. – 564 с.
11. Композиционные материалы. В 8 т. / Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. Т. 2. Механика композиционных материалов / Под ред. Дж. Сендецки. – М.: Мир, 1978. – 564 с.
12. Becker W. Available theories for an analysis of stresses and assessment of strength of laminate structures // Mech. Compos. Mater. – 2014. – **50**, No. 5. – P. 759–770.
13. Скудра А. М., Булавс Ф. Р. Структурная теория армированных пластиков. – Рига: Зинатне, 1978. – 192 с.
14. Димитриенко Ю. И., Епифановский И. С. Прочность полимерных композиционных материалов при высокой температуре // Пластические массы. – 1989. – № 6. – С. 35–37.
15. Dimitrienko Yu. I. Thermomechanics of Composites under High Temperatures. – Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publisher, 1999. – 347 p.
16. Лехницкий С. Г. Теория упругости анизотропного тела. – М.: Наука, 1977. – 415 с.
17. ГОСТ 25.601-80. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытаний плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 16 с.
18. ГОСТ 25.602-80. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытаний плоских образцов на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 18 с.
19. ASTM D 3518. Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate.

Поступила 22. 04. 2015