

УДК 620.22:629.76/.78

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-380414201670509>

С. А. Шилин<sup>1</sup>, *инженер*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКОВ В КОНСТРУКЦИЯХ РАКЕТНО- КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ КОРОБЧАТОГО ТИПА

**En**

The article presents the analysis results of the physical and mechanical properties of carbon fiber reinforced plastics for space rocketry applications in structures. Replacement of the traditional metal materials with structural carbon plastics using the example of Antares LV box-type structures was considered. The experimentally obtained elastic-strength properties of unidirectional carbon plastics based on carbon fibers and epoxide type binder were presented the physical and mechanical properties of carbon plastics with a present reinforcement scheme were predicted the trade-off analysis of the material predicted properties with experimental results was performed.

---

<sup>1</sup> Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» имени М. К. Янгеля»

**Ua**

Стаття містить результати аналізу дослідження фізико-механічних властивостей вуглепластиків в конструкціях ракетно-космічної техніки. У роботі розглянуто питання заміни традиційних металевих матеріалів на вуглепластики конструкційного призначення на прикладі коробчастих конструкцій ракетоносія «Антарес». Представлені експериментально отримані пружно-міцнісні характеристики односпрямованого вуглепластику на основі вуглецевих волокон та зв'язуючого епоксидного типу, приведено прогноз фізико-механічних властивостей вуглепластику з заданою схемою армування, проведено порівняльний аналіз прогнозованих властивостей матеріалу з експериментально отриманими даними.

### Вступление

В Государственном предприятии «Конструкторское бюро «Южное» проводится большое количество работ, направленных на снижение массы конструкций ракетно-космической техники за счет замены исходного материала изделия с традиционных металлов или сплавов на полимерный композиционный материал конструкционного назначения, в частности углепластик [1, 2]. В статье рассмотрен пример таких опытно-конструкторских работ по разработке желобов бортовой кабельной сети и желобов термостатирования для американского ракетоносителя «Антарес». Желоба представляет собой тонкостенную коробчатую конструкцию, общий вид которой показан на рис (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид желобов

### Постановка задачи

Ранее изготовление желобов осуществлялось методом штамповки из заготовки прокатного листа из алюминиевого сплава АМг6. Предварительный анализ показал, что замена алюминиевого сплава на углепластик позволит снизить массу конструкции до 40%.

## Результаты и их обсуждение

Учитывая относительно небольшую нагрузку, действующую на желоба, для их изготовления было применено углеволокно типа Т-700. На первом этапе работ были проведены исследования по оценке упруго-прочностных и теплофизических свойств углепластика на однонаправленных образцах. Испытания образцов по определению физико-механических характеристик (ФМХ) углепластика ОСТ 92-1459-77 «Пластмассы теплоизолирующего и конструкционного назначения, метод испытания на растяжение» и ОСТ 92-1462-77 «Пластмассы теплоизолирующего и конструкционного назначения, метод испытания на изгиб» [3]. Результаты проведенных исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1.

ФМХ однонаправленного углепластика

Наименование ФМХ	Обозначение	Величина
Модуль упругости вдоль волокон, ГПа	E1	130
Модуль упругости поперек волокон, ГПа	E2	6,8
Модуль упругости на сдвиг, ГПа	G12	8
Предел прочности на растяжение вдоль волокон, МПа	F1p	1800
Предел прочности на сжатие вдоль волокон, МПа	F1c	560
Предел прочности на растяжение поперек волокон, МПа	F2p	32
Предел прочности на сжатие поперек волокон, МПа	F2c	130
Предел прочности на сдвиг, МПа	F12	32
Коэффициент Пуассона	$\mu_{12}$	0,32

На основании полученных физико-механических и теплофизических свойств с учетом действующих полетных и температурных нагрузок в пакете конечно-элементного анализа типа ANSYS был проведен предварительный анализ напряженно-деформированного состояния рассматриваемой конструкции. В результате были получены требуемые толщины стенок желобов, количество и схема армирования слоев  $[90^\circ, 0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ, -45^\circ, 45^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$  и требуемый предел прочности на изгиб. Величина требуемого предела прочности при изгибе был занесен в конструкторскую документацию и в дальнейшем являлся контролируемым параметром при изготовлении желобов. Необходимым условием проектирования такого типа конструкции является симметричность схемы армирования относительно среднего слоя, что обеспечивает устранение поводок деталей после

## Інформаційні системи, механіка та керування

снятия их с оправки [4]. Вторым этапом работ была оценка и анализ конструкции на технологичность, и изготовление спроектированной конструкции. Технологический процесс изготовления рассматриваемых изделий состоит из следующих основных этапов [5] (рис. 2):

- изготовление однонаправленного препрега на основе высокопрочных углеродных волокон и связующего эпоксидного типа методом «мокрой» намотки;
- укладка однонаправленного препрега в многослойные пакеты с заданной схемой армирования;
- раскрой пакетов на заготовки;
- ручная выкладка раскроенных пакетов на оправку с подмоткой кольцевыми слоями;
- сборка оправки с уложенными пакетами под вакуумное отверждение
- отверждение заготовки;
- механическая обработка изделия.



Рис. 2. Этапы изготовления желобов

Для определения фактических упруго-прочностных характеристик углепластика, реализованных в реальной конструкции, были проведены испытания на образцах-свидетелях. Полученные результаты прочностных испытаний представлены в табл. 2.

Таблиця 2.

Результаты испытаний

№ п/п	Предел прочности при изгибе, МПа	Необходимый уровень, МПа
1	389,1	
2	424,3	
3	317,5	
4	460,6	
5	417,5	
6	342,0	
7	354,8	300
8	352,8	
9	487,1	
10	491,0	
11	308,7	
Среднее значение	395,1	

Следующим этапом исследований стал анализ сходимости полученных экспериментальных результатов с существующими на сегодня теоретическими аналитическими расчетными значениями. Для аналитического расчета был использован критерий прочности, который получил наибольшее распространение для конструкций данного типа – критерий максимальных нормальных напряжений [6]. В соответствии со слоистой моделью композита [7] были определены упруго-прочностные характеристики пакета, приведенные в табл. 3.

Таблиця 3.

Расчетные значения ФМХ армированного углепластика

Наименование	Обозначение	Величина
Модуль упругости вдоль оси, ГПа	$E_x$	47,848
Модуль упругости поперек оси, ГПа	$E_y$	60,849
Модуль упругости на сдвиг, ГПа	$G_{xy}$	19,24
Предел прочности на растяжение вдоль оси, МПа	$F_{xp}$	158,373
Предел прочности на сжатие вдоль оси, МПа	$F_{xc}$	158,373
Предел прочности на растяжение поперек оси, МПа	$F_{yp}$	192,39
Предел прочности на сжатие поперек оси, МПа	$F_{yc}$	192,39

Наименование	Обозначение	Величина
Предел прочности на сдвиг, МПа	$F_{xy}$	76,961
Коэффициент Пуассона	$\mu_{xy}$	0,265

Для оценки предела прочности при изгибе были рассмотрены четыре возможных формы разрушения при изгибе образцов композиционного материала (КМ) [8].

Первая форма разрушения (рис. 3) – пределы прочности на растяжение и сжатие достигаются одновременно в крайних волокнах изгибаемого образца (1).

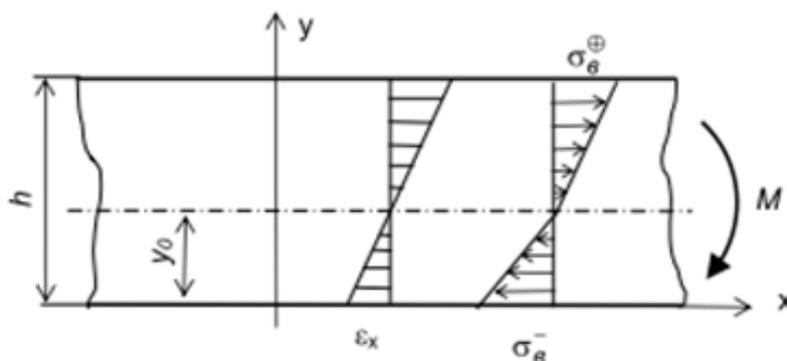


Рис. 3. Первая форма разрушения КМ при изгибе

$$\sigma_{\text{визг}} = \frac{2\sigma_e^- \sigma_e^+}{\sigma_e^- + \sigma_e^+}, \quad (1)$$

где  $\sigma_e^+$  и  $\sigma_e^-$  – пределы прочности при растяжении и сжатии соответственно.

Вторая форма разрушения (рис. 4) – предел прочности на сжатие первоначально достигается в волокне сжатой зоны и на всей ее глубине. При этом в крайнем волокне растянутой зоны напряжения достигают предела прочности на растяжение (2).

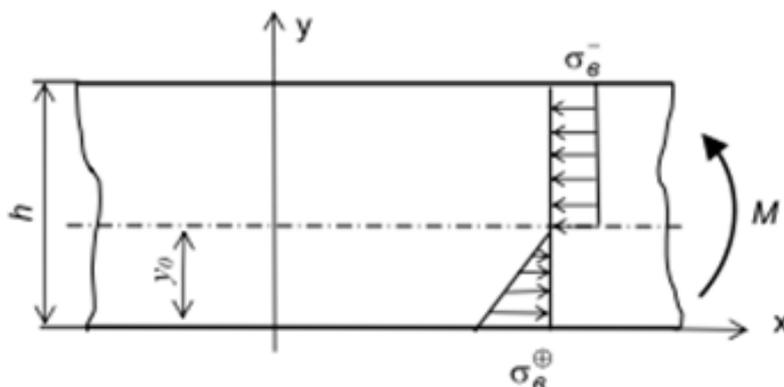


Рис. 4. Вторая форма разрушения КМ при изгибе

$$\sigma_{\text{визг}} = \frac{\sigma_{\sigma}^{-} \sigma_{\sigma}^{\oplus} (3\sigma_{\sigma}^{\oplus} + 8\sigma_{\sigma}^{-})}{(2\sigma_{\sigma}^{\oplus} + \sigma_{\sigma}^{-})^2}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\sigma}^{\oplus}$  и  $\sigma_{\sigma}^{-}$  – пределы прочности при растяжении и сжатии соответственно.

Третья форма разрушения (рис. 5) – пределы прочности на растяжение первоначально достигается в крайнем волокне растянутой зоны и на всей ее глубине. При этом в крайнем волокне сжатой зоны напряжения достигают предела прочности на сжатие (3).

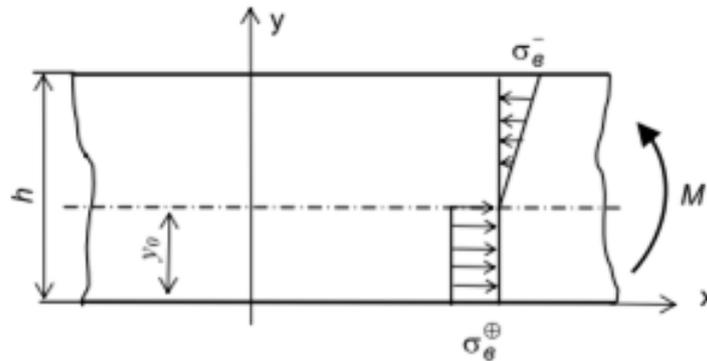


Рис. 5. Третья форма разрушения КМ при изгибе

$$\sigma_{\text{визг}} = \frac{\sigma_{\sigma}^{-} \sigma_{\sigma}^{\oplus} (8\sigma_{\sigma}^{\oplus} + 3\sigma_{\sigma}^{-})}{(2\sigma_{\sigma}^{\oplus} + \sigma_{\sigma}^{-})^2}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{\sigma}^{\oplus}$  и  $\sigma_{\sigma}^{-}$  – пределы прочности при растяжении и сжатии соответственно.

Четвертая форма разрушения (рис. 6) – пределы прочности на растяжение и сжатие при изгибе достигаются в крайних волокнах соответствующих зон и на всей их глубине (4)

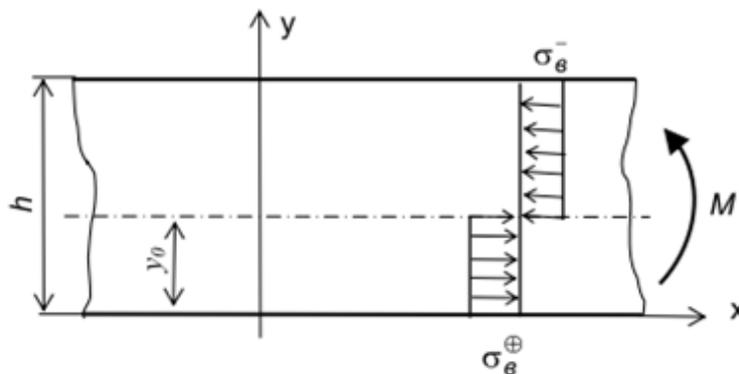


Рис. 6. Четвертая форма разрушения КМ при изгибе

$$\sigma_{\text{визг}} = \frac{3\sigma_{\sigma}^{-}\sigma_{\sigma}^{\oplus}}{\sigma_{\sigma}^{\oplus} + \sigma_{\sigma}^{-}}, \quad (4)$$

где:  $\sigma_{\sigma}^{\oplus}$  и  $\sigma_{\sigma}^{-}$  – пределы прочности при растяжении и сжатии соответственно.

Результаты сравнения расчетных значений предела прочности на изгиб с полученными экспериментально приведены в табл. 4.

**Таблица 4.**

Результаты сравнения расчётных и экспериментальных пределов прочности

Расчетная величина предела прочности при изгибе, МПа				Экспериментальная величина предела прочности при изгибе, МПа
Первая форма разрушения	Вторая форма разрушения	Третья форма разрушения	Четвертая форма разрушения	
				389,1
				424,3
				317,5
				460,6
				417,5
384.78	235.143	235.143	288.585	342,0
				354,8
				352,8
				487,1
				491,0
				308,7
Среднее значение				395,1

### Выводы

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие основные выводы:

- замена алюминиевого сплава на конструкционный углепластик позволили снизить массу желобов бортовой кабельной сети и желобов термостатирования более чем 40 %;
- получена хорошая сходимость расчетной модели по критерию максимальных напряжений с экспериментальными данными. Поэтому для проведения прогнозирования работоспособности рассмотренной кон-

- струкции можно рекомендовать применение критерия максимальных напряжений;
- форма разрушения конструкции при изгибе соответствует первому рассматриваемому случаю, что подтверждено экспериментально;
  - полученный разброс экспериментальных данных можно объяснить отклонениями технологических параметров изготовления желобов от номинальных значений, а также погрешностями, полученными в результате испытаний образцов композитов.

### Список использованной литературы

1. Ситалов, В. Г. Композиционные материалы в разработках ГKB «Южное» [Текст] / В. Г. Ситалов, Т. Н. Литвишко // Теория и практика технологии производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ): труды межд. конф. 30 января – 2 февраля 2001 г., МГУ, Россия – 2001. – С. 107 – 115.
2. Композиционные материалы в разработках ГП «КБ Южное» [Текст] / А. М. Потапов, В. А. Коваленко, Ю. Г. Артеменко и др. // Композиционные материалы в промышленности: сб. материалов 30 междунар. науч.-практ. конф., Ялта 7–11 июня 2010 г. / Украинский информационный Центр «Наука. Техника. Технология». – К., 2010. – С. 111 – 119.
3. Шах, В. Справочное руководство по испытаниям пластмасс и анализу причин их разрушения [Текст]: пер. с англ. / В. Шах; под ред. А. Я. Малкина – СПб.: Научные основы и технологии, 2009. – 732 с.
4. Коваленко, В.А. Исследование температурного напряженно-деформированного состояния композитных панелей при различной степени термонеровесности их структуры [Текст] / В. А. Коваленко, А. В. Кондратьев, А. А. Кичка// Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» – Вып. 2 (70).– Х., 2012. – С. 20 - 33.
5. Методология разработки эффективных конструктивно-технологических решений композитных агрегатов ракетно-космической техники: монограф. в 2 т. Т. 1. Создание агрегатов ракетно-космической техники регламентированного качества из полимерных композиционных материалов / А. В. Гайдачук, В. Е. Гайдачук, А. В. Кондратьев, В. А. Коваленко, В. В. Кириченко, А. М. Потапов; под. ред. А. В. Гайдачука – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2016. – 263 с.
6. Основы проектирования и изготовления конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов [Текст] / В. В. Васильев, А. А. Добряков, А. А. Дудченко и др. – М.: МАИ, 1985. – 218 с.

7. *Васильев, В. В.* Механика конструкций из композиционных материалов [Текст] / В. В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
8. *Харченко, М. Е.* Приближенные зависимости между пределами прочности полимерных композиционных материалов при сжатии, растяжении и изгибе [Текст] / М. Е. Харченко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (74).– Х., 2013. – С. 54 – 63.