

УДК 620.22:66.095

Е.В. Шилина, С.А. Шилин, К.В. Козис

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ИЗГОТОВЛЕНИЮ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ

Статья посвящена исследованию реально получаемых физико-механических свойств однонаправленного углепластика, изготавливаемого методом «мокрой» намотки для трех видов углеродных волокон. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования свойств мотаных углепластиковых конструкций на основе исследованных волокон.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, углеродное волокно, микропластик, кольцевой образец.

Введение. Постановка задачи

Развитие техники, и особенно ракетно-космической, невозможно без применения материалов с высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Важное место среди таких материалов занимают полимерные композиционные углепластики, которые широко используются в различных силовых конструкциях [1] (примеры таких конструкций представлены на рис. 1):



Рис. 1. Используемые в ракетно-космической отрасли конструкции из углепластика

Важнейшей особенностью этих материалов является возможность управлять упруго-прочностными свойствами (УПС) конструкций в нужных направлениях, исходя из характера и величин действующих на них механических нагрузок. Именно поэтому, приступая к проектированию конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ), необходимо понимать условия их дальнейшей работы и иметь достоверные УПС применяемого углепластика, т.е. инженер должен не только оценить работоспособность ПКМ с функциональной точки зрения, но и вычислить запас прочности при расчетном уровне эксплуатационных нагрузок [2].

© Шилина Екатерина Витальевна, инженер лаборатории изготовления изделий из полимерных композиционных материалов ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля» (КБ «Южное»); раб. 056-792-08-66; моб. 067-592-45-86; e-mail: info@yuzhnoye.com; katerinahv89@gmail.com; Шилин Сергей Александрович, инженер той же лаборатории; раб. 056-792-08-66; моб. 095-661-72-84; e-mail: info@yuzhnoye.com; shilinsergalx@gmail.com; Козис Кристина Викторовна, раб. 056-792-08-66; моб.: 099-957-90-10; e-mail: info@yuzhnoye.com; ведущий инженер КБ «Южное»; 49008, г. Днепр, ул. Криворожская, 3

Соответствующий композиционный материал (КМ) представляет собой комбинацию из двух и более материалов с различными первоначальными физико-механическими свойствами исходных компонентов, которые могут значительно отличаться друг от друга. При этом следует отметить, что придаваемые конструкциям из КМ физико-механические характеристики (ФМХ) в дальнейшем зависят от целого ряда обстоятельств: технологии изготовления изделия, режима его полимеризации, схемы армирования, способа создания контактного давления формования и пр.

В настоящее время существует несколько десятков различных методик оценки ФМХ композиционного материала в зависимости от его схемы армирования и свойств монослоя (если речь идет об однонаправленном КМ), однако все они применимы индивидуально для каждого для конкретных условий нагружения конструкции и типа ее материала. При этом можно с уверенностью сказать, что важнейшим условием корректной оценки работоспособности любой конструкции является правильная оценка исходных свойств однонаправленного композиционного материала, а, следовательно, одним из важнейших вопросов развития КМ является получение достоверных УПС на имитирующих реальную технологию ее изготовления образцах.

В частности, в данной нашей статье рассмотрены вопросы корректного определения предела прочности при растяжении δ_p углепластиков на основе получаемых методом намотки высокопрочных волокон и эпоксидного связующего – с последующим использованием полученных характеристик при проектировании изделий из ПКМ.

Материалы и методы исследований. Обсуждение результатов

Существуют две основные методики определения прочности изготовленного с использованием технологии «мокрой» намотки однонаправленного углепластика:

определение прочности и модуля упругости материала на образцах микропластика;

вычисление значений этих же характеристик на кольцевых образцах.

В нашем случае применение первой (и наиболее простой) из этих методик состоит в оценивании свойств материала на образцах жгутового микропластика, представляющих собой пропитанные связующим и отвержденные единичные жгуты с линейной плотностью $200 \div 830$ текс. В частности, площадь поперечного сечения образцов определяли, исходя из линейной плотности жгута и без учета связующего (ввиду того, что предельное удлинение связующего перед разрывом существенно меньше, чем углеродного волокна), по формуле:

$$S = \frac{\lambda}{\rho}, \quad (1)$$

где: λ – линейная плотность углеродного волокна; ρ – его объемная плотность [3].

Эта использованная в нашей настоящей работе методика испытаний образцов микропластика не требует больших трудозатрат и позволяет получить достаточно корректные значения достигаемой в однонаправленном образце прочности.

Исходя из поставленных задач, образцы микропластика изготавливали методом «мокрой» намотки на рамку минимальной кривизны, причем в

процессе намотки регламентировали такие технологические параметры их изготовления, как нанос связующего на жгут, натяжение этого жгута и скорость намотки, а после отверждения образцы срезали с рамки и подвергали разрушению при растяжении.

В настоящей нашей работе проведены испытания и проанализированы их результаты по микропластикам на основе углеродных волокон «ТС-36S-12К» («Formosa Plastics Corporation», Тайвань), «ТС-42S-24К» (та же корпорация) и «Tenax-E IMS65 E23 24K 830tex» («TEIJIN Limited», Германия).

Для каждого из типов волокон было изготовлено и испытано более 500 образцов микропластика (измерения проводили по показаниям датчика силоизмерителя модернизированной машины «TiraTest-2300»; результаты испытаний приведены на рис. 2):

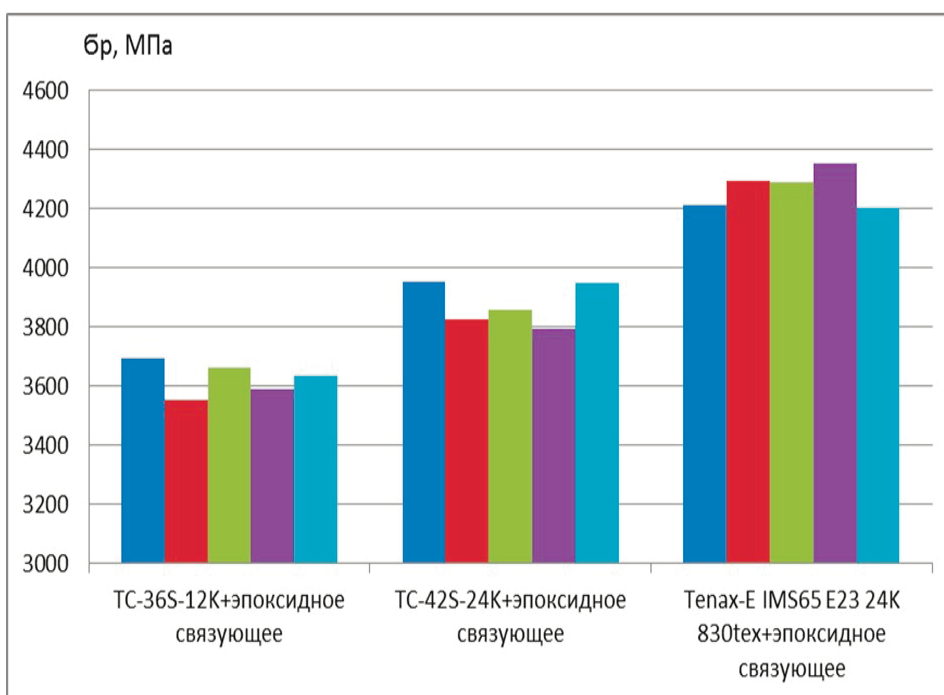


Рис. 2. Результаты испытаний микропластиков

В свою очередь, примененная нами методика испытаний кольцевых образцов также характеризуется достаточной простотой и реальными результатами. Эти образцы изготавливали методом намотки на цилиндрическую разборную оправку (в процессе такой намотки регламентируя нанос связующего, натяжение и скорость), потом после отверждения оправку разбирали и извлекали заготовки, испытывая их на растяжение после проведения последующей механической обработки, а в дальнейшем нагружая жесткими полудисками [4, 5] (рис. 3):

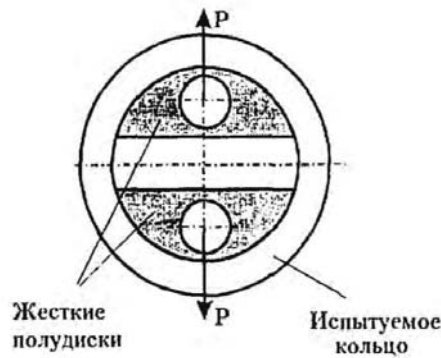


Рис. 3. Нагружение жесткими полудисками кольцевых образцов при испытаниях на растяжение

В данной нашей работе были проведены испытания и рассмотрены их результаты по кольцевым образцам на основе тех же вышеупомянутых углеродных волокон «ТС-36S-12К», «ТС-42S-24К» и «Tenax-E IMS65 E23 24K 830tex», причем для каждого типа углеродного волокна было изготовлено и испытано более 50 образцов (измерения проводили по показаниям испытательной машины «P-20»; результаты испытаний приведены на рис. 4):

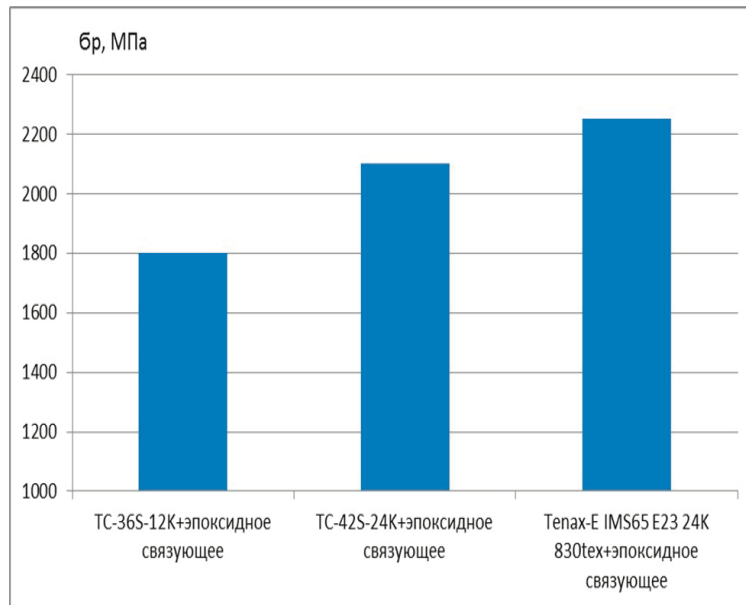


Рис. 4. Результаты испытаний кольцевых образцов

На основании вышеизложенных методик определения предела прочности на растяжение, а также соответствующих методик по определению иных упруго-прочностных свойств на однонаправленных образцах (будут подробно рассмотрены в наших последующих работах) был получен комплекс ФМХ монослоя углепластика на основе углеродного волокна «ТС-36S-12К», представленный в табл. 1:

Таблиця 1

ФМХ однонаправленного углепластика

Наименование ФМХ	Обозначение	Величина
Модуль упругости вдоль волокон, ГПа	E1	130,00
Модуль упругости поперек волокон, ГПа	E2	6,80
Модуль упругости на сдвиг, ГПа	G12	8,00
Предел прочности на растяжение вдоль волокон, МПа	F1p	1800,00
Предел прочности на сжатие вдоль волокон, МПа	F1c	560,00
Предел прочности на растяжение поперек волокон, МПа	F2p	32,00
Предел прочности на сжатие поперек волокон, МПа	F2c	130,00
Предел прочности на сдвиг, МПа	F12	32,00
Коэффициент Пуассона	μ_{12}	0,32

На основании полученных физико-механических свойств однонаправленного материала и действующих на изделие полетных нагрузок далее нами с использованием критерия максимальных напряжений были спроектированы тонкостенные желоба бортовой кабельной сети и термостатирования для ракетносителя среднего класса, причем в процессе проектирования был проведен, с учетом нагрузок и полученных характеристик монослоя, расчет оптимальной схемы армирования (достигнутые характеристики материала в целом представлены в табл. 2, а спроектированные нами желоба – на рис. 5):

Таблиця 2

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
Предел прочности на сдвиг, МПа	F_{xy}	76,961
Коэффициент Пуассона	μ_{xy}	0,265

А чтобы оценить работоспособность этих желобов, в качестве контрольного параметра была принята величина предела прочности углепластика при изгибе, которую определяли посредством испытания его образцов, вырезаемых из технологических припусков изготовленных деталей и испытываемых в соответствии с ГОСТ 92-1462-77 «Пластмассы теплоизолирующего и конструкционного назначения: метод испытания на изгиб» (результаты сравнения расчетных и полученных экспериментально значений предела прочности на изгиб приведены в табл. 3):



Рис. 5. Общий вид желобов

Таблица 3

Результаты сравнения расчётных и экспериментальных пределов прочности

Расчетная величина предела прочности при изгибе, МПа	Экспериментальная величина предела прочности при изгибе, МПа	Потребный предел прочности при изгибе, МПа
384,78	389,10	Среднее значение 395,10
	424,30	
	317,50	
	460,60	
	417,50	
	342,00	
	354,80	
	352,80	
	487,10	
	491,00	
	308,70	300,00

Выводы

В ходе выполнения настоящей работы нами предложена корректная авторская методика определения предела прочности на растяжение углепластиков на их однонаправленных образцах.

Кроме того, на примере тонкостенных желобов кабельной сети нами предложен новый подход к проектированию изделий ракетно-космической техники из ПКМ, включающий в себя:

- определение исходных свойств монослоя углепластика;

- анализ действующих на изделие нагрузок;

- определение оптимальной схемы армирования изделия согласно наиболее подходящей в том или ином случае модели КМ (исходя из действующих нагрузок, минимума массы проектируемого узла и корректных исходных свойств монослоя).

Исходя из предложенного подхода, авторами также спроектированы и изготовлены тонкостенные углепластиковые детали желоба бортовой кабельной сети и термостатирования ракеты-носителя.

В целом проведенные нами испытания вырезанных из технологических припусков натуральных изделий образцов-свидетелей показали хорошую сходимость характеристик использованных при авторском проектировании из этих изделий однонаправленных образцов с изготовленными из штатных желобов образцами.

Стаття присвячена дослідженню реально одержуваних фізико-механічних властивостей односпрямованого вуглепластику, виготовлюваного методом «мокрої» намотки для трьох видів вуглецевих волокон. Отримані результати можуть бути використані для прогнозування властивостей мотаних вуглепластикових конструкцій на основі досліджених волокон.

Ключові слова: полімерний композиційний матеріал, вуглецеве волокно, мікропластик, кільцевий зразок.

This article is devoted to investigation of physico-mechanical properties of unidirectional carbon-filled plastic fabricated by the «wet» winding method for the three types of carbon fibers. The obtained results may be used to forecast the properties of winding carbon-filled plastic constructions on the basis of the investigated fibers.

Keywords: polymer composite material, carbon fiber, microplastic, circular pattern.

1. Джур Є. О. Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці: підручник / Є. О. Джур, Л. Д. Кучма, Т. А. Манько та ін. – К.: Вища освіта, 2003. – 399 с.
2. Карпов Я.С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов: учебник. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьковский авиационный университет», 2010. – 768 с.
3. Фитцер Э. Углеродные волокна и углекомпози́ты / Э. Фитцер, Р. Дифендорф, И. Калнин и др.; пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 336 с.
4. Батаев А. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение (учебник) / А. А. Батаев, В. А. Батаев. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. тех. ун-та (НГТУ), 2002. – 384 с.
5. Справочник по композиционным материалам: в 2-х кн.; под ред. Дж. Любина. – Кн. 2 / пер. с англ. А. Б. Геллера и др.; под ред. Б. Э. Геллера – М.: Машиностроение, 1988. – 584 с.