



Свойства углепластиков и области их применения

Б.И. Молчанов

М.М. Гудимов

Ноябрь 1996

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем 30 научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в 4 филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале *«Авиационная промышленность»*, № 3–4, 1997 г.

Электронная версия доступна по адресу: www.viam.ru/public

Свойства углепластиков и области их применения

Б.И. Молчанов, М.М. Гудимов

Всероссийский институт авиационных материалов

On the basis of the results of the carbon fiber and plastics properties analysis these materials demonstrated a possibility of their advantageous use not only in aviation industry but also in the chemical, oil, automotive, textile and agricultural engineering industry.

Армирование полимеров углеродными волокнами позволило создать принципиально новый класс полимерных конструкционных материалов – углепластиков. Углепластики отличаются от традиционных конструкционных материалов сочетанием таких свойств, как высокие удельные прочность и жесткость, низкие коэффициенты линейного термического расширения и трения, высокая износостойкость и устойчивость к воздействию агрессивных сред, термическому и радиационному ударам, повышенная теплопроводность и электрофизические свойства, изменяющиеся в широких пределах, высокая усталостная прочность при статических и динамических нагрузках. По удельным показателям прочности и жесткости углепластики превосходят практически все наиболее широко используемые конструкционные полимерные и металлические материалы. Указанные свойства углепластиков определили их преимущественное использование в оборонных отраслях промышленности и прежде всего в авиационной и ракетостроительной технике. Большое число элементов конструкций военных самолетов, боевых и исследовательских космических аппаратов и ракет (в том числе и космический комплекс «Энергия–Буран»), антенн и антенных обтекателей выполнено из углепластиков. Использование углепластиков в оборонной технике делало практически недоступной информацию о них для широкого круга специалистов в различных отраслях промышленности. В настоящее время благодаря Правительственной

программе конверсии и существенному сокращению объемов потребления углепластиков для военных нужд стало возможным использование этих материалов в других отраслях промышленности.

В табл. 1 представлены для сравнения характеристики некоторых металлических, полимерных материалов конструкционного назначения и углепластиков.

Таблица 1.

Свойства некоторых конструкционных материалов

Материал	Плотность, кг/м ³	Прочность при растяжении, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Удельная прочность, $e \cdot 10^3$, км	Удельный модуль, $E \cdot 10^6$, км
Углепластик	1450–1600	780–1800	120–130	53–112	9–20
Стеклопластик	2120	1920	69	91	3,2
Высокопрочная сталь	7800	1400	210	18	2,7
Алюминиевый сплав	2700	500	75	18	2,7
Титановый сплав	4400	1000	110	28	2,5
Полиамид 6,6	1140	82,6	28	7,24	0,24
Полиамид 6,6+40 мас. % стекловолокна	1460	217	112	8,87	0,77
Полиамид 6,6+40 мас. % углеродного волокна	1340	280	238	21,0	1,92

Как видно из табл. 1, по показателям удельной прочности и жесткости углепластики превосходят практически все наиболее широко используемые конструкционные полимерные и металлические материалы. Интересно отметить, что такой сравнительно непрочный конструкционный полимерный материал, как полиамид, при введении в него углеродных волокон по показателям удельной прочности и жесткости приближается к металлическим конструкционным материалам.

Экономическая целесообразность использования углепластиков взамен металлов определяется также сравнительно низкими удельными затратами энергии (в кВт·ч) на производство конструкционных материалов и изделий из них:

Материал	На 1 кг материала	На 1 кг готового изделия
Эпоксидный углепластик	33,0	72,7
Сталь	35,2	220,4
Алюминий	48,5	392,4
Титан	189,5	1543,2

Таким образом, в пересчете на 1 кг готовых изделий из эпоксиглепластика энергии расходуется в 3 раза меньше, чем на изделия из стали, в 5,5 раза меньше, чем на изделия из алюминия и его сплавов и в 20 раз меньше, чем на изделия из титана.

Детали современных машин и механизмов редко работают в условиях однородного напряженного состояния, и обычно в них есть зоны, в которых материал недогружен (например, вблизи нейтральной плоскости при работе конструкции на изгиб). В этих случаях целесообразно армировать эти зоны не дорогостоящими высокопрочными углеродными волокнистыми материалами, а менее прочными, но более дешевыми (в том числе и неволокнистыми) материалами, т.е. создавать детали из так называемых гибридных полимерных композиционных материалов. Применение указанных материалов весьма перспективно и при изготовлении изделий, эксплуатирующихся в агрессивных средах. Использование таких материалов позволяет решить ряд проблем, которые не могут быть решены при использовании полимеров, армированных только углеродными волокнами или традиционными конструкционными материалами.

Углеродные волокна обладают высокой химической стойкостью ко всем агрессивным средам за исключением сильных окислителей. Высокая химическая стойкость углеродных волокон определила разработку хемостойких углепластиков взамен нержавеющей стали, сплавов и цветных металлов для изготовления различной аппаратуры и узлов машин, работающих в условиях воздействия агрессивных сред: коррозионностойких насосов, емкостей и трубопроводов.

Наряду с высокими механическими свойствами и хемостойкостью углепластики обладают хорошими антифрикционными характеристиками,

сравнительно низким коэффициентом трения и повышенной износостойкостью. Коэффициент трения углепластиков колеблется от 0,1 до 0,17 в зависимости от условий испытания, а по износостойкости они в 5–10 раз превосходят антифрикционные марки бронзы, используемые для изготовления подшипников скольжения. Результаты испытания на трение* некоторых ненаполненных и наполненных углеродными волокнами пластиков в сравнении с бронзой приводятся в табл. 2.

Таблица 2.

Трибологические характеристики некоторых материалов

Материал	Удельная нагрузка, МПа	Коэффициент трения	Коэффициент износа $K \cdot 10^6$, мм ³ /Н·м	Примечание
Бронза	3,0	0,21	3,8	Схватывание с контртелом
	6,3	0,31	12,5	
	7,4	0,33	108,0	
Феноуглепластик (50 мас. % УВ)	7,4	0,14	1,1	Температура в зоне трения 275°С
	11,0	0,19	2,7	
	16,0	0,20	3,2	
Полиамид 12	7,4	0,12	37,0	Плавится
	11,0	0,10	92,0	
Полиамид 12+20 мас. % УВ	7,4	0,06	3,8	-«-
	11,0	0,04	6,0	
Полипропилен	7,4	0,15	45,0	-«-
	11,0	0,10	120,0	
Полипропилен+20 мас. % УВ	7,4	0,15	3,2	-«
	11,0	0,10	6,8	
Найлон 6,6**	13,0	0,08	12,0	По литературным данным
	0,1	0,28	20,0	
Найлон 6,6+20% СВ	0,1	0,28	7,8	
Найлон 6,6+20% УВ	0,1	0,20	4,0	
Найлон 6,6+30% СВ	0,1	0,31	7,5	
Найлон 6,6+30% УВ	0,1	0,20	2,0	
Найлон 6,6+40% СВ	0,1	0,18	7,0	
Найлон 6,6+40% УВ	0,1	0,18	1,2	

* Трение скольжения по стали 45 со скоростью 0,78 м/с без смазки.

** Трение скольжения по стали EN58В со скоростью 1 м/с без смазки.

Как видно из приведенных данных, углепластики по сравнению с бронзой и ненаполненными полимерами позволяют на порядок повысить износостойкость деталей трения, а по сравнению с полимерами, наполненными стеклянными волокнами, – в 2–5 раз. Углепластики как подшипники скольжения могут эффективно эксплуатироваться при ограниченной смазке или без нее, что особенно важно в таких отраслях промышленности, как пищевая и текстильная. К положительным свойствам углепластиков как антифрикционных материалов следует также отнести их сравнительно высокую теплопроводность, предотвращающую локализацию тепла в зоне трения, особенно при повышенных нагрузках и скоростях скольжения.

Важной характеристикой конструкционных материалов является стабильность размеров деталей при изменении температуры. Варьированием вида углеродных волокон, вводимых в полимер, схемы армирования можно добиться существенного снижения коэффициента линейного термического расширения углепластиков и изменения его в довольно широких пределах. Коэффициент линейного термического расширения (КЛТР) – α углепластиков в 15–20 раз ниже, чем у металлов и в 50–100 раз ниже, чем у неармированных полимеров:

	$\alpha \cdot 10^6, 1/^\circ\text{C}$
Алюминий.....	23,8
Медь.....	16,5
Сталь.....	15,0
Фторопласт.....	200,0
Низкопрочное карбонизованное углеродное волокно.....	6,5
Высокопрочное карбонизованное углеродное волокно.....	0,12
Низкопрочное графитированное углеродное волокно.....	6,2
Высокопрочное графитированное углеродное волокно.....	0,08
Полиамид 6,6.....	5,40
Полиамид 6,6 + 40 мас. % стеклянного волокна.....	1,68
Полиамид 6,6 + 40 мас. % углеродного волокна.....	0,96

Углеродные волокна и материалы на их основе обладают электропроводностью. По своим электрофизическим свойствам углеволокнистые материалы охватывают область от полупроводников до проводников. Удельное электрическое сопротивление углеродных волокнистых материалов в зависимости от их вида лежит в диапазоне $(3,1-1,1) \cdot 10^3$ Ом·см. Наибольшее применение электропроводность углеродных материалов нашла при создании полимерных деталей с антистатическими свойствами, электрических проводов и кабелей с полимерной изоляцией и электрических нагревателей различного назначения: погружные электронагреватели для подогрева жидких сред, в том числе и агрессивных, гибкие ленточные нагреватели для подогрева трубопроводов переменного сечения и сложной формы, электрообогреваемые трубчатые модули для транспортировки по модульной линии жидкостей, бытовые конвекторные электронагреватели панельного типа в напольном и настенном исполнении для обогрева жилых помещений и т.п. Электронагреватели запитываются от источников электроэнергии переменного или постоянного тока напряжением от 12 до 380 В.

Анализ свойств углеродных волокон и пластиков на их основе указывает на то, что наряду с авиационной промышленностью к наиболее перспективным областям применения углепластиков относятся химическое, нефтяное, автомобильное, текстильное и сельскохозяйственное машиностроение.

Основные области потребления углепластиков и технико-экономический эффект от их использования представлены ниже. В автомобилестроении из них изготавливаются корпус, шасси, быстродвижущиеся детали, детали двигателей внутреннего сгорания, панели на шасси электромобиля, отдельные части кузова автомобиля, что уменьшает массу конструкции на 70–80%, снижает расход ГСМ; в судостроении – корпус и элементы конструкции морских и спортивных судов, что обеспечивает устойчивость к воздействию морской воды, обрастанию водорослями и моллюсками,

жесткость, высокую прочность в сочетании с низкой плотностью. В текстильной промышленности изготавливают узлы и детали ткацких станков, работающих при скоростях на 20% выше обычных, взамен металла и древесины, что увеличивает срок службы узлов и деталей, сокращает трудовые затраты при изготовлении изделий. Кроме того, изготавливаются конструкции рентгеновских установок, пресс-формы для горячего прессования, быстровращающиеся детали; кулачки шестерен и другие детали, механические свойства которых сопоставимы со свойствами легких сплавов, имеют низкую плотность, усталостную прочность и небольшие коэффициенты расширения и трения, высокую износостойкость и коррозионную стойкость.

В электротехнике и электронике из углепластиков изготавливаются высокопрочные электроды, электрические щетки, термопары, обладающие высокой электропроводностью, более высокой по сравнению с графитом ударной и временной прочностью. При этом снижаются затраты производства, увеличивается срок их службы. Рабочие температуры без доступа окислителей – выше 250°C. Кроме того, углепластики используются в корпусах приборов, радио- и телевизионных антенн, акустических системах и т.д., что обеспечивает защиту от электромагнитных излучений, улучшение технических характеристик. Применение углепластиков в несущих конструкциях каналов ирригационных систем, трубопроводах для транспортировки жидких и газовых (в том числе агрессивных) сред, воздуховодах, дымоходах и вытяжных стволах увеличивает срок их эксплуатации и приводит к снижению массы. Углепластики используют при производстве нагревательных элементов технического и бытового назначения, что позволяет увеличить срок их службы и экономить электроэнергию.