

Е. Н. Белецкий,
главный технолог,
ОАО «Концерн «НПО» Аврора»;

В. М. Петров,
д-р техн. наук, профессор,
ФГБОУ ВПО ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

С. Н. Безпальчук,
инженер,
ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»

**УЧЕТ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОМПОЗИЦИОННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ, ВЛИЯЮЩИХ
НА ПРОЦЕССЫ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
И ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**THE PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF COMPOSITE
PLASTICS INFLUENCE ON THE PROCESSES OF DESTRUCTION
AT REALIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF MACHINING
AND EXTREME CONDITIONS**

В статье рассмотрены вопросы разрушения композиционных углепластиков антифрикционного назначения, применяемых в качестве дейдвудных подшипников судовых валопроводов, опор скольжения центробежных насосов и паровых турбин.

In the article the questions of fracture of composite antifriction carbon fiber-reinforced plastics assignment used as sterntube bearings of ship shafting, bearings in centrifugal pumps and steam turbines.

Ключевые слова: композиционный антифрикционный углепластик, опора скольжения, дейдвудный подшипник, валопровод, физико-механические характеристики, полимерная матрица, термореактивное связующее.

Key words: composite antifriction carbon fiber reinforced plastic, bearing slides, sterntube bearings, shaft line, physico-mechanical properties, polymer matrix, thermoreactive binder.

У

ГЛЕПЛАСТИКИ — это композиционные материалы, в которых выгодно сочетаются свойства полимерной матрицы и углеродного армирующего материала. Матрица обеспечивает монолитность композита, фиксирует форму изделия и взаимное расположение армирующих волокон, распределяет действующие внешние напряжения по объему композита, обеспечивая равномерную нагрузку на волокна и ее перераспределение при разрушении части армирующих волокон. В качестве матрицы используют эпоксидные, полиэфирные, фенолформальдегидные смолы, полиамиды, кремнийорганические полимеры (полимерные КУ), синтетические полимеры, подвергнутые пиролизу (коксованные КУ), и так называемый пиролитический углерод (пироуглеродные КУ) [1; 2]. В данной работе речь пойдет о композиционных материалах с термореактивной матрицей, основные свойства фенолформальдегидных и эпоксидных смол приведены в табл. 1. С увеличением предела прочности матрицы прочность композиционного материала увеличивается.

При соблюдении условий монолитности композиции матрица почти не влияет на коэффициенты распределения внешней нагрузки. Нарушение монолитности КУ возможно вследствие: уменьшения содержания в них связывающего компонента; увеличения степени наполнения ар-

мирующим материалом; пористости; изменения свойств матрицы и прочности сцепления ее с волокнами.

В процессе термического или естественного старения матрица утрачивает способность перераспределять нагрузки, возникающие от действия внешних сил между армирующими волокнами.

Армирующий материал воспринимает основные напряжения, возникающие в композите под действием внешних нагрузок, и обеспечивает жесткость и прочность композиции.

Таблица 1

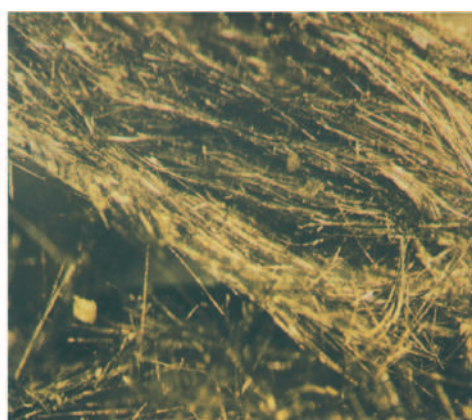
Физико-механические свойства материала матрицы КУ

Полимер	Условная плотность, кг/м ³	Макс. рабочая температура, °С	Прочность*, МН/м ²	
			при растяжении	при сжатии
Эпоксидная смола	90–220	110	—	1,0–2,5
Фенолформальдегидная смола К-40	190–230	120–130	2,0	0,8
Кремнийорганическая смола	200–400	250–300	0,6	0,8–14,0

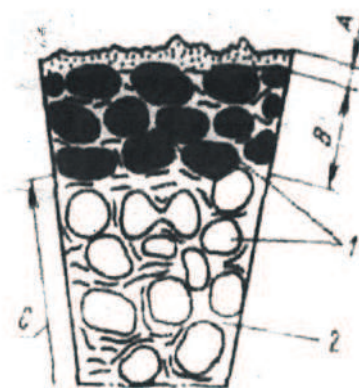
* Под прочностью подразумевается максимальное напряжение, при котором материал разрушается.

В качестве армирующего материала используется угольное волокно, низкомодульное и высокомодульное (см. рис. 1) [3].

Установлено, что углеродные волокна микрогетерогенны и представляют собой пример самоармированного композита, содержащего не менее двух фаз. Обе фазы состоят из фибрилл, с включениями турбостратных кристаллитов. Причем первая фаза состоит из более широких и толстых лент (фибрилл) поликонденсированного ароматического углерода с повышенной степенью продольной ориентации, а вторая — из более узких, менее ориентированных и сильно переплетенных лент [4, с. 86–93].



a



б

Рис. 1. *a* — микрофотография угольного волокна ($\times 400$) [3]; *б* — структура углеродного волокна:

A — поверхностный слой; *B* — высокоориентированная зона;

C — низкоориентированная зона;

1 — микрофибриллы; *2* — аморфный углерод

Менее ориентированные узкие фибриллы присутствуют обычно в центральной части волокна — ядре, в то время как более совершенные широкие располагаются с внешней стороны — оболочки волокна. Кристаллиты служат своеобразной арматурой, удерживающей длинные ленты аморфной (по данным темнопольной просвечивающей электронной микроскопии и широкоугольной дифракции электронов) матрицы. Размеры лент значительно превышают размеры кристаллитов. Поэтому ленты являются проходными и участвуют в построении большого числа кристаллитов. Хотя поверхность волокна является наиболее ориентированной его частью, она содержит как выходящие на поверхность края кристаллитов, так и бездефектные основные атомные плоскости. Различие в свойствах углеродных волокон определяется различиями в структуре, обусловленной прежде всего температурой термообработки и операцией вытягивания при их получении. Граница раздела процессов карбонизации и графитации лежит в области температур термообработки 1500–1800 °С [1]. С повышением температуры термообработки повышается содержание углерода, закономерно увеличиваются термоокислительная устойчивость и электропроводность, теплоемкость и теплопроводность, значительно возрастает модуль упругости, но прочность волокна, тканей и нитей на его основе снижается. С повышением температуры термообработки изменяется структура углеродного волокна, соотношение между аморфным и закристаллизованным углеродом, увеличиваются размеры кристаллитов, повышается степень ориентации кристаллитов относительно оси волокна.

Свойства армирующего материала приведены в табл. 2 [2].

Композиционные углепластики относятся к анизотропным материалам.

Таблица 2

Физико-механические свойства армирующего материала КУ

Свойства	Высокомодульное волокно	Низкомодульное волокно
Модуль упругости, ГПа	300–700	200–250
Прочность при растяжении, ГПа	2,0–2,5	2,5–3,2
Плотность, г/см ³	1,3–2,0	1,3–2,0
Диаметр, мкм	5–50	5–50

Анизотропия свойств зависит от способа армирования, который определяет пространственное расположение армирующих волокон в матрице. Разработаны технологии и существуют различные способы армирования, различающиеся по виду содержания армирующего материала в матрице и пространственному направлению углеродных нитей, основные способы армирования приведены в табл. 3.

Содержание армирующего материала в композициях конструкционно выражается через коэффициент объемного содержания армирующего волокна в матрице V_a , равный отношению объемной доли армирующего волокна к общему объему композита. Значения данного коэффициента для композита, армированного непрерывными волокнами, составляют 0,3–0,8, а с хаотическим расположением дискретного волокна не превышают 0,2–0,3, что связано с технологическими трудностями плотной упаковки дискретных наполнителей. Механические характеристики композиционного материала зависят от содержания армирующего волокна в матрице V_a , физико-механических свойств материала в матрице и армирующего материала и удельной поверхности контакта данных компонентов.

Таблица 3

Способы армирования композиционного углепластика

			
Короткими волокнами	Непрерывным волокном	Непрерывным волокном	Три семейства нитей
			
Непрерывным волокном	Короткими волокнами	Тканью	n семейств нитей
Хаотичное армирование	Одномерно армированные	Двухмерно армированные	Пространственное армированные

Модуль упругости E композиционного углепластика является одним из важнейших физико-механических характеристик, поэтому возникает необходимость исследования этой характеристики с учетом всех особенностей данного композита. На рис. 2 приведены зависимости [4] между напряжениями и деформациями при растяжении КУ с различной структурой армирования.

Наиболее высокие прочность и жесткость достигаются в КУ с взаимно параллельным расположением непрерывных волокон при нагружении их в направлении ориентации волокна.

Упругие характеристики в направлении главных осей симметрии — модули нормальной упругости E_x и E_y , коэффициенты Пуассона ν_{xy} , ν_{xz} и модули сдвига G_{xy} , G_{xz} — можно вычислить с удовлетворяющей точностью по формулам [5; 6, с. 118–124]:

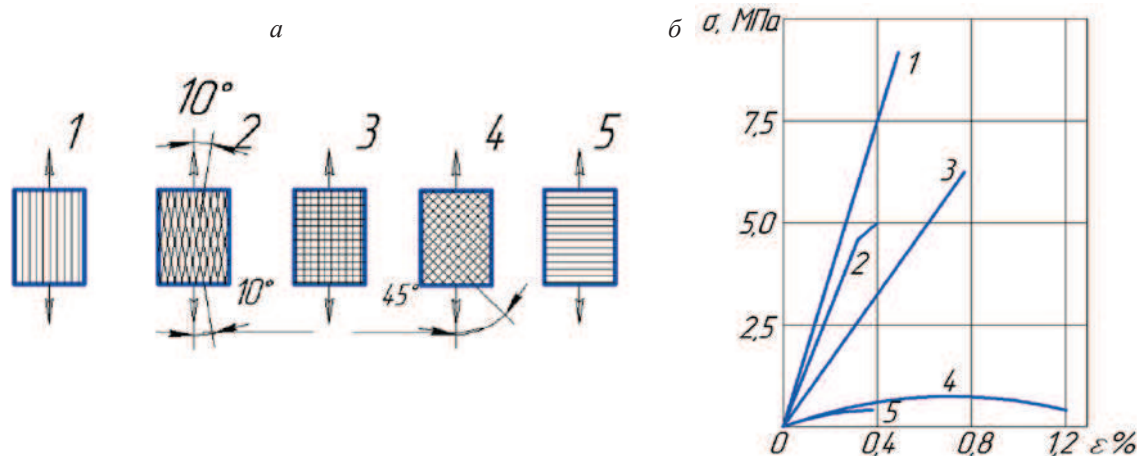


Рис. 2. Схема армирования композита (а),
график зависимости между напряжениями и деформациями при растяжении (б):
1 — 0°; 2 — ±10°; 3 — 0,90°; 4 — ±45°; 5 — 90°

$$E_x = E_a V_a; \quad (1)$$

$$E_y = E_z = \frac{E_m}{(1 - V_a)}; \quad (2)$$

$$v_{yx} = v_{xz} = v_a V_a + v_m (1 - v_a); \quad (3)$$

$$G_{xy} = G_{xz} = \frac{G_m (1 + V_a)}{(1 - V_a)}, \quad (4)$$

где E_a, E_m — модули нормальной упругости волокна и матрицы, МПа; v_a, v_m — коэффициенты Пуассона волокна и матрицы.

Регулирование степени анизотропии и свойств материалов в плоскости армирования достигается перекрестным расположением армирующих слоев. При ортогональной схеме укладки слоев прочность (σ_x, σ_y) и модуль упругости (E_x, E_y) пропорциональны объемному содержанию волокон в направлении армирования.

Деформативные (модуль Юнга, коэффициент Пуассона и модуль сдвига) свойства материалов с ортогональной укладкой при их нагружении под углом к основным осям упругой симметрии рассчитывают с использованием уравнений по известным значениям E_x, E_y, E_{45} и v_{xy} :

$$E_\varphi = E_x (\cos^4 \varphi + m \sin^2 2\varphi + n \sin^4 \varphi)^{-1}; \quad (5)$$

$$G_\varphi = E_x [2v_{xy} + 4m - 4(2m - c) \sin^2 \varphi]^{-1}, \quad (6)$$

где E_φ — модуль Юнга при нагружении под углом φ к основной оси ox ;

E_{45} — модуль сдвига при нагружении под углом 45° к основной оси ox ;

G_φ — коэффициент Пуассона при нагружении под углом φ к основной оси ox ;

v_{xy} — коэффициент Пуассона при нагружении под углом φ к основной оси ox .

n, c, m — коэффициенты пропорциональности:

$$n = \frac{E_x}{E_y}; \quad c = \frac{E_x}{E_{45}}; \quad m = c - \frac{n-1}{4}. \quad (7)$$

Прочность при растяжении, сжатии, сдвиге в плоскости армирования также рассчитывают по аналогичным формулам, позволяющим вычислить прочность для любого направления на основании экспериментальных или расчетных значений прочности в продольном, поперечном и диагональном (под углом 45°) направлениях.

Взаимодействие материала матрицы с поверхностью углеродного волокна зависит от адгезионной прочности взаимодействия полимерной матрицы и углеродного волокна [5], что оказывает непосредственное влияние на прочность связи компонентов композиции, от которой существенно зависят такие характеристики композита, как продольная, поперечная и сдвиговая прочность, вязкость разрушения, модуль упругости, термостойкость и др. В табл. 4 [5] приведены значения адгезионной прочности ряда полимеров, используемых в качестве связующих для углепластиков и изделий из них при $d = 9$ мкм, $S = 6 \cdot 10^{-3}$ мм².

Таблица 4

Адгезионная прочность связующей (материала матрицы)

Связующее	Адгезионная прочность, МПа	
	углеродное волокно	стеклянное волокно
Эпоксидиановое ЭДТ-10	41,5	40,0
Эпоксифенольное 5-211	41,0	41,0
Эпокситрифенольное ЭТФ	43,0	—
Эпоксидные алифатические		
УП-612	40,5	—
ДОДЦПД	43,0	—
Полиамидное СП-6	34,0	30,0

Для сравнения в табл. 4. приведены значения исследуемых полимеров при адгезии их к бесщелочному стеклянному волокну того же диаметра. Видно, что исследованные связующие обладают высокой адгезией к углеродным волокнам. Адгезионные прочности различных эпоксидных связующих близки между собой.

Теория межфазных явлений [2; 7, с. 31–39] в полимерных композиционных материалах может рассматриваться как совокупность трех основных частей — адсорбции полимеров на твердых поверхностях армирующего материала, адгезии полимеров к этим поверхностям и структуры и свойств межфазного слоя на границе раздела полимер–твердое тело. При этом МФС может в первом приближении рассматриваться как однородный, хотя анализ показывает, что его следует описывать как негомогенный материал. Этому слою А. В. Теокарис приписывает свойства независимой фазы, что удобно для расчетов, но некорректно с термодинамических позиций. Рассмотрение механического поведения системы может быть проведено на основе трехслойной (рис. 3) или N-слойной модели. В последнем случае межфазная область рассматривается как состоящая из N слоев с разными свойствами.



Рис. 3. Трехфазная модель строения композиционного материала

Оценка модуля упругости композита E выражается в данном случае соотношением, определяющим аддитивность [6] вклада волокна, матрицы и межфазного слоя:

$$E_k = E_{a a a} + E_{i a i} + E_{m a m}, \quad (8)$$

где $E_{a a a}$ — модуль Юнга армирующего материала и его объемная доля, МПа;

$E_{i a i}$ — модуль Юнга межфазного слоя и его объемная доля, МПа;

$E_{m a m}$ — модуль Юнга материала матрицы и его объемная доля, МПа.

Если рассматривать элемент наполненного полимера с цилиндрическим включением (волокна), то выражение имеет вид

$$E = E_a \left(r_a^2 / r_m^2 \right) + E_i \left[\left(r_i^2 - r^2 \right) / r_m^2 \right] + E_m \left[\left(r_m^2 - r_i^2 \right) \right], \quad (9)$$

где r_a — величина радиуса армирующего материала;

r_i — величина радиуса межфазного слоя;

r_m — величина радиуса матрицы;

Величина модуля упругости межфазного слоя также зависит от содержания наполнителя или радиуса волокна:

$$E_i(r) = E_m + E_f \left(r_f / r \right) \eta^1 - E_m \left(r_f / r \right) \eta^2. \quad (10)$$

Для граничных условий ($r = r_i$) имеем

$$E_i(r_i) = E_m + E_a \left(r_a / r_i \right) \eta^1 - E_m \left(r_a / r_i \right) \eta^2. \quad (11)$$

В этих соотношениях экспоненты η^1 и η^2 являются характеристиками адгезии, определяющими передачу напряжений от матрицы к наполнителю.

Модуль нормальной упругости КУ, как говорилось выше, зависит от направления армирования, в работах [2; 3; 5] показана данная зависимость. На рис. 4 представлена схема строения углепластика, из которой видно, что углепластики являются ортотропными в осях, совпадающих с направлениями армирования (1 — направление по основе (x), 2 — направление по утку (y), 3 — трансверсальное направление (z)). Соотношение количества волокон в основе и утке равно 10:8. Показатели механических свойств углепластиков в различных направлениях представлены в табл. 5.

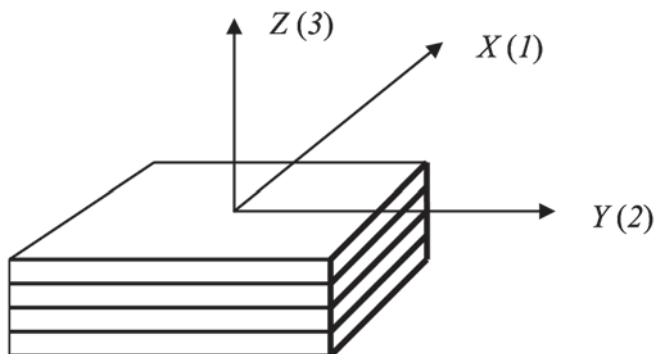


Рис. 4. Схема направлений армирования углепластика:

1 — направление вдоль основы армирующей ткани; 2 — направление вдоль утка армирующей ткани;
3 — направление, трансверсальное плоскости армирующей ткани

Пространственную анизотропию упругих и прочностных свойств углепластиков УГЭТ и ФУТ можно охарактеризовать значениями модулей нормальной упругости E_1 , E_2 , E_3 , модуля сдвига в плоскости листа $G_{1,2}$ и межслойных модулей сдвига $G_{2,3}$, $G_{3,1}$; разрушающих напряжений при растяжении σ_1^+ , σ_2^+ , σ_3^+ и сжатии σ_1^- , σ_2^- , σ_3^- и разрушающего напряжения при межслойном сдвиге $\tau_{1,3}$ (табл. 5).

Таблица 5

Физико-механические свойства композиционных углепластиков

Свойства	ФУТ	УГЭТ
Модуль нормальной упругости, МПа, в плоскости листа по основе E_1	17 000	18 000
в плоскости листа по утку E_2	12 000	13 000
в трансверсальном направлении E_3	8000	8500
Модуль сдвига, МПа, в плоскости листа, $G_{1,2}$	6000	6700
Модуль сдвига, МПа, межслойный, $G_{1,3} = G_{2,3}$	4500	5000
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа, в плоскости листа по основе σ	200	280
в плоскости листа по утку σ	160	240
в трансверсальном направлении σ	10	14
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа, в плоскости листа по основе σ	200	300
в плоскости листа по утку σ	180	250
в трансверсальном направлении σ	300	400
Разрушающее напряжение при межслойном сдвиге, МПа, $\tau_{1,3}$	20	25

Заключение

В соответствии с соотношением 10:8 все показатели упругости и прочности вдоль волокон основы в 1,3–1,4 раза больше, чем вдоль волокон утка. Разрушающее напряжение при растяжении в трансверсальном направлении в приблизительно 20 раз ниже, чем вдоль слоев ткани.

Поведение слоистого материала при сжатии существенно отличается от поведения при растяжении. В этом случае σ_3^- даже выше σ_1^- и σ_2^- — приблизительно в 1,5 раза.

Для углепластиков характерна значительная анизотропия теплофизических свойств — коэффициент теплопроводности в направлениях 1, 2 в 50 раз выше, чем в направлении 3: $\lambda_1 \approx \lambda_2 = 38$ Вт/м·К, $\lambda_3 = 0,7$ Вт/м·К. Анизотропия теплофизических свойств объясняется значительным различием в теплопроводности полимерной матрицы и углеродных волокон.

Все вышеизложенное позволяет сделать главный вывод: при проектировании изделий из композиционных углепластиков антифрикционного назначения, а также реализации технологического процесса их механической обработки необходимо учитывать особенности исходной заготовки (плита — метод прессования; слои параллельно или навитая заготовка — слои радиально). Причем главным фактором, в технологической наследственности определяющим основные эксплуатационные характеристики опоры скольжения, является ориентация волокон по отношению к линии действия основных нагрузок в виде сил и моментов.

Список литературы

1. Технологии производства изделий и интегрированных конструкций из композиционных материалов в машиностроении / науч. ред. А. Г. Братухин, А. С. Боголюбов, О. С. Сироткин. — М.: Готика, 2003. — 516 с.
2. Белецкий Е. Н. Обеспечение заданной точности и качества поверхности на операциях сверления антифрикционных углепластиков на основе результатов моделирования процесса резания: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / Е. Н. Белецкий. — Саратов. СГТУ, 2010. — 134 с.
3. Абозин И. Ю. Некоторые вопросы механической лезвийной обработки углепластиков / И. Ю. Абозин, В. М. Петров // Вопросы материаловедения: науч.-техн. журн. — 2001. — № 2 (26).
4. Полимерные композиты в триботехнике. Проблемы создания и применения. Опыт эксплуатации: докл. науч.-техн. семинара, 14–15 ноября 2000 г. — СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей», 2000.
5. Гольденблат И. И. Критерии прочности конструкционных материалов / И. И. Гольденблат, В. А. Копнов. — М.: Машиностроение, 1968. — 192 с.
6. Маркин В. Б. Расчетная оценка вязкоупругих характеристик межфазных слоев и закономерности их влияния в полимерных композиционных материалах / В. Б. Маркин, Л. М. Аникеева, А. В. Тарасов // Композиты — в народное хозяйство России (Композит-95): тр. Междунар. науч.-техн. конф. — Барнаул: АлтГТУ им. И. И. Ползунова, 1995.
7. Армированные пластики — современные конструкционные материалы // Российский химический журнал. — 2001. — Т. XLV, № 2.