

## ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Yuriy Seleznyov, Dmytro Babenko, Genadiy Ivanov, Pavlo Polyansky

Mykolayiv State Agrarian University, Ukraine

Krylova Street 17, Mykolayiv 54040, Ukraine  
e-mail: [etcmt@yandex.ru](mailto:etcmt@yandex.ru)

**Аннотация.** Исследованы особенности структуры композитов и проблемы проектирования различных изделий из них, связанные с анизотропией и сложностью структуры наполнителей и матрицы. Сделан системный анализ и разработана методика расчетов на прочность изделий из углекомпозитов для сельскохозяйственной техники.

**Ключевые слова:** технология, структура, изделия, углекомпозиты

Научно-технический прогресс в 21-м веке во многом будет определяться применением новых материалов, призванных заменить традиционные металлы, которые в некоторых областях становятся тормозом дальнейшего развития техники. При проектировании изделий из композиционных материалов необходимо сделать оценку свойств композитов в зависимости от характеристик его компонентов и анизотропности. *Анизотропия композиционных материалов* (КМ) является конструкционной, если она закладывается специально при изготовлении изделий с учетом характера напряжений. Анизотропные КМ можно представить как ортотропные или как трансверсально изотропные. *Ортотропные* КМ характеризуются наличием в каждом элементарном объеме трех взаимно перпендикулярных плоскостей симметрии свойств. К таким КМ можно отнести материалы, армированные последовательно чередующимися слоями волокон в двух взаимно перпендикулярных направлениях, тканями с продольно-поперечной укладкой, а также слоистые КМ, армированные в двух неортогональных направлениях под углом с правильным чередованием слоев. Слоистые КМ со звездной укладкой волокон в смежных слоях обладают изотропией свойств в плоскости листа в том случае, если угол укладки волокон в смежных слоях меньше  $72^\circ$  (например,  $60^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $30^\circ$ ). Такие КМ, имеющие плоскость изотропии и перпендикулярную к ней ось симметрии, называются *трансверсально изотропными*. Сюда же относятся однонаправленные КМ, в которых волокна

ориентированы в одном направлении. В этом случае плоскость изотропии перпендикулярна к направлению укладки волокон. Трехосно армированные ориентированные КМ получают армированием матриц волокнами в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Композиты, которые содержат два или более различных по составу или природе типа армирующих элементов, называются *полиармированными* или *гибридными композиционными материалами*. Такие материалы за последнее время получают все более широкое практическое применение в космической технике, авиации и наземном транспорте, а также в новых экоэнергетических установках.

При определении модуля упругости КМ сделаем допущение, что волокна и матрица представляют собой изотропные упругие материалы, которые при нагружении композита деформируются совместно (без проскальзывания), т.е.  $\varepsilon_k = \varepsilon_m = \varepsilon_b$  (в направлении волокон). При этом общая сила  $F$  равна сумме сил  $F_m$  и  $F_b$ , т. е.

$$F = F_m + F_b, \quad (1)$$

где:

$F_m, F_b$  – силы, действующие на матрицу и волокна.

Соответственно напряжение

$$\sigma_m = \frac{F_m}{S_m}; \quad \sigma_b = \frac{F_b}{S_b}, \quad (2)$$

где:

$S_m, S_b$  – поперечное сечение матрицы и волокон.

Введем понятие среднего напряжения в композите

$$\sigma_k = \frac{F}{S}, \quad (3)$$

где:

$S = S_m + S_b$ .

Разделив (1) на  $S$  и выразив  $F_m, F_b$  из (2), получим:

$$\sigma_k = \sigma_m \frac{S_m}{S} + \sigma_b \frac{S_b}{S}, \quad (4)$$

Введем обозначения  $\varphi_m = \frac{S_m}{S} = \frac{V_m}{V}; \quad \varphi_b = \frac{S_b}{S} = \frac{V_b}{V}; \quad V = S \cdot l; \quad V_b = S_b \cdot l;$

$V_m = S_m \cdot l$ ; тогда

$$\sigma_k = \sigma_m \cdot \varphi_m + \sigma_b \cdot \varphi_b \quad (5)$$

или, т. к.  $\varphi_m + \varphi_b = 1$ , то

$$\sigma_k = \sigma_b \cdot \varphi_b + (1 - \varphi_b) \sigma_m. \quad (6)$$

Из закона Гука получим

$$\sigma_m = \varepsilon_m \cdot E_m; \quad \sigma_b = \varepsilon_b \cdot E_b; \quad \sigma_k = \varepsilon_k \cdot E_k; \quad (7)$$

из (6) и (7) с учетом  $\varepsilon_k = \varepsilon_m = \varepsilon_b$  будем иметь модуль Юнга композиции вдоль волокон:

$$E_{k\parallel} = \varphi_b \cdot E_b + (1 - \varphi_b) E_m, \quad (8)$$

где:

$\varphi_b$  – объемная доля волокон в композите.

Модуль упругости (Юнга) в направлении, перпендикулярном к оси волокон  $E_{k\perp}$ , определится из следующих соображений.

При нагружении силой перпендикулярной оси волокон будем считать, что напряжения  $\sigma_b$  и  $\sigma_m$  будут равны, т.е.

$$\sigma_b = \sigma_m = \sigma_k. \quad (9)$$

Абсолютная деформация при этом всей композиции будет равна сумме деформаций матрицы и волокон:

$$\Delta b_k = \Delta b_m + \Delta b_b, \quad (10)$$

но  $\Delta b_k = \varepsilon_k \cdot b_k$ ,  $\Delta b_m = \varepsilon_m \cdot b_m$ ,  $\Delta b_b = \varepsilon_b \cdot b_b$ , тогда

$$\varepsilon_k = \varepsilon_m \cdot \varphi_m + \varepsilon_b \cdot \varphi_b. \quad (11)$$

Зная, что  $\varepsilon_k = \frac{\sigma_k}{E_k}$ ,  $\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m}$ ,  $\varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_b}$  из (11) с учетом (9) получим

$$\frac{1}{E_{k\perp}} = \frac{\varphi_m}{E_m} + \frac{\varphi_b}{E_b} = \frac{\varphi_b}{E_b} + \frac{1 - \varphi_b}{E_m};$$

откуда

$$E_{k\perp} = \frac{1}{\frac{\varphi_b}{E_b} + \frac{1 - \varphi_b}{E_m}} = \frac{E_b \cdot E_m}{\varphi_b \cdot E_m + (1 - \varphi_b) \cdot E_b}. \quad (12)$$

Коэффициент Пуассона композита определится как

$$\mu_k = \frac{\varepsilon_{yk}}{\varepsilon_{kx}} = \frac{\varepsilon_{ym} \cdot \varphi_m + \varepsilon_{yb} \cdot \varphi_b}{\varepsilon_{kx}}, \text{ или } \mu_k = \frac{\varepsilon_{ym}}{\varepsilon_{xm}} \varphi_m + \frac{\varepsilon_{yb}}{\varepsilon_{xb}} \varphi_b, \quad (13)$$

где:

$$\mu_m = \frac{\varepsilon_{ym}}{\varepsilon_{xm}}, \quad \mu_b = \frac{\varepsilon_{yb}}{\varepsilon_{xb}}. \quad (14)$$

Тогда из (13) и (14) получим

$$\mu_k = \mu_m \cdot \varphi_m + \mu_b \cdot \varphi_b = \varphi_b \cdot \mu_b + (1 - \varphi_b) \mu_m. \quad (15)$$

Модуль сдвига определится из следующих условий. При нагружении композита касательными напряжениями нагрузка воспринимается матрицей и волокнами последовательно, поэтому  $\tau_{xy} = \tau_{xym} = \tau_{xyb}$ . При этом деформация сдвига композиции по аналогии:

$$\gamma_{xyk} = \gamma_{xyb} \cdot \varphi_b + \gamma_{xym} (1 - \varphi_b); \quad \gamma = \frac{\tau}{G}; \quad (16)$$

$$G_{xyk} = \frac{G_b \cdot G_m}{[\varphi_b \cdot G_m + (1 - \varphi_b) \cdot G_b]}. \quad (17)$$

Приведенные соотношения позволяют в первом приближении на стадии проектирования производить оценку механических характеристик композитов и деталей, выполненных из КМ. В действительности из-за технологических дефектов неоднородности в распределении волокон по объему, геометрической формы, разброса свойств компонентов характеристики могут быть отличны от расчетных. Поэтому уточнения в каждом частном случае необходимо производить путем изготовления и испытания опытных образцов.

В общем случае диаграмма растяжения однонаправленного КМ состоит из трех участков: первый - матрица и волокна деформируются упруго; второй - матрица переходит в упруго-пластическое состояние, волокна продолжают деформироваться упруго; третий - оба компонента испытывают пластические деформации. Прочность связи (адгезия) на границе раздела волокно-матрица должна быть достаточной, чтобы обеспечить совместную деформацию компонентов вплоть до разрушения.

Тогда  $\varepsilon_k = \varepsilon_m = \varepsilon_b$ ;

$$(\sigma_b)_k = k_b \cdot (\sigma_b)_b \cdot \varphi_b + k_m \cdot \sigma'_m \cdot (1 - \varphi_b), \quad (18)$$

где:

$\sigma'_m$  - напряжение в матрице в момент разрыва волокон;

$(\sigma_b)_b$  - предел прочности волокон при растяжении.

Уравнение (18) может быть использовано для оценочных расчетов деталей из волокнистых композитов. Здесь:  $k_b$  - коэффициент, учитывающий неодновременность разрушения волокон,  $k_b=0,8\div 0,95$ ;  $k_m$  - коэффициент, учитывающий появление трещин в матрице на границе раздела,  $k_m=0,7\div 0,9$ .

При значениях  $\phi_b < \phi_{b_0}$  разрушение волокон не приводит к разрушению композита, т. к. оставшееся неразрушенным сечение более податливой матрицы обладает способностью нести более высокую нагрузку, чем волокна.

Величина минимальной доли волокон в КМ определится из условия

$$(\sigma_b)_b \cdot \phi_{b_0} + \sigma'_m \cdot (1 - \phi_{b_0}) = (\sigma_b)_m \cdot (1 - \phi_{b_0}); \quad (19)$$

Откуда

$$\phi_{b_0} = \frac{[(\sigma_b)_m - \sigma'_m]}{[(\sigma_b)_b + (\sigma_b)_m - \sigma'_m]}. \quad (20)$$

Критической объемной долей волокон  $\phi_{bkr}$  назовем такую долю, при которой прочность КМ становится равной прочности неармированной матрицы:

$$(\sigma_b)_b \cdot \phi_{bkr} + \sigma'_m \cdot (1 - \phi_{bkr}) = (\sigma_b)_m. \quad (21)$$

Отсюда

$$\phi_{bkr} = \frac{[(\sigma_b)_m - \sigma'_m]}{[(\sigma_b)_b - \sigma'_m]}. \quad (22)$$

Уравнение (22) справедливо для КМ, у которых матрица более пластична, чем волокна.

Если волокна обладают большим запасом пластичности, чем матрица, то переход от единичного разрушения к множественному происходит при концентрации  $\phi'_b$ , определяемого из условия

$$(\sigma_b)_b \cdot \phi'_b = (\sigma_b)_m \cdot (1 - \phi'_b) + \sigma'_b \cdot \phi'_b, \quad (23)$$

Откуда

$$\phi'_b = \frac{(\sigma_b)_m}{[(\sigma_b)_b + (\sigma_b)_m - \sigma'_b]}, \quad (24)$$

где:

$\sigma'_b$  - напряжение в волокнах при деформации разрушения матрицы.

Таким образом, КМ с пластичной матрицей разрушаются по механизму единичного разрушения (все волокна и матрица разрушаются в одном сечении) при высоких  $\varphi_b$ , а с хрупкой матрицей - при малых  $\varphi_b$ . Введем еще некоторые характеристики для материала:

$$\sigma_{yd} - \text{удельная прочность материала } \sigma_{yd} = \frac{\sigma_b}{\rho},$$

где:

$$\rho - \text{плотность материала; } E_{yd} - \text{удельная жесткость, } E_{yd} = \frac{E}{\rho}.$$

Плотность КМ можно определить по формуле

$$\rho_k = \rho_b \cdot \varphi_b + \rho_m \cdot (1 - \varphi_b) = \rho_m + (\rho_b - \rho_m) \cdot \varphi_b, \quad (25)$$

где:

$\rho_b, \rho_m$  - плотности волокон и матрицы.

Из (18) и (25) получим

$$\sigma_{yd} = \frac{\sigma'_m + [(\sigma_b)_b - \sigma'_m] \cdot \varphi_b}{\rho_m + (\rho_b - \rho_m) \cdot \varphi_b}, \quad (26)$$

при  $\varphi_b < \varphi_{b_0}$

$$\sigma_{yd} = \frac{(\sigma_b)_m \cdot (1 - \varphi_b)}{\rho_m}. \quad (27)$$

Основное условие прочности композитов

$$\sigma_k \leq \frac{(\sigma_b)_k}{n}, \quad (28)$$

где:

$\sigma_k$  - расчетные напряжения,

$(\sigma_b)_k$  - предел прочности композитов, определяемый по (18) в зависимости от состава и качества компонентов;

$n$  - запас прочности, определяемый в зависимости от степени важности деталей,  $n=2 \div 3$ .

При воздействии растягивающих напряжений  $\sigma$  под углом  $\theta$  к направлению волокон возможны три вида разрушения.

1. При малых  $\theta$  материал разрушается в результате разрыва волокон от нормальных напряжений за счет пластической деформации матрицы параллельно

волокнам. Если прочностью матрицы пренебречь, то нормальные напряжения  $\sigma_n = \sigma \cdot \cos^2 \theta$ .

$$\text{Предел прочности } \sigma_n = \frac{(\sigma_b)_b}{\cos^2 \theta}.$$

2. При некотором критическом значении  $\theta_{\text{кр}}$  прочность композита начинается определяться вторым механизмом - разрушением матрицы или границы раздела волокно-матрица в результате сдвига по плоскостям, параллельным волокнам. Сдвиговые напряжения  $\tau$  на этих плоскостях определяются соотношением  $\tau = \sigma \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta$  при этом прочность

$$\sigma_\theta = \frac{\tau_n}{\sin \theta \cdot \cos \theta},$$

где:

$\tau_n$  - предел прочности матрицы или границы раздела при сдвиге.

Минимум прочности соответствует  $\theta=45^\circ$ .

Таблица 1. Значение  $\phi_{b_0}$  (в процентах) в зависимости от предела прочности волокон

Table 1. Value  $\phi_{b_0}$  (in percents) depending on tensile strength of fibers

Прочность волокон $(\sigma_b)_b$ , МПа	$(\sigma_b)_m / \sigma'_m$			
	85/30	210/40	315/65	455/175
700	8,3	25,5	39,6	53,4
1700	3,2	9,8	15,0	17,8
3500	1,6	4,9	7,3	8,4
7000	0,8	2,4	3,6	4,1

3. При больших значениях  $\theta$  прочность КМ определяется третьим видом разрушения, который контролируется нормальной прочностью матрицы или границы раздела в направлении, перпендикулярном к волокнам. Прочность при этом  $\sigma_\theta = \frac{(\sigma_b)_m}{\sin^2 \theta}$ .

Важной характеристикой композита является его сопротивление распространению трещин или вязкость разрушения. В материале всегда есть внутренние дефекты (поры, трещины, надрезы), которые под действием сравнительно небольших напряжений могут вырасти до катастрофических размеров, приводящих к разрушению.

Задачей является создание материала, который хорошо сопротивляется

распространению трещин, что обеспечит надежность работы.

Согласно энергетическому подходу Гриффитса величина критического значения вязкости разрушения  $G_c$ , определяющего интенсивность поглощения энергии пластически деформированной зоны в вершине трещины

$$G_c = \frac{\pi \cdot \sigma_c^2 \cdot l_a}{E},$$

где  $\sigma_c$  - разрушающее критическое напряжение;  $E$  - модуль Юнга;  $l_a$  - характерный линейный размер опасного дефекта.

$$\text{Для КМ } G_c = (\sigma_b)_m \cdot \varepsilon_m \cdot d_b \left[ \frac{\varphi_m^2}{(1 - \varphi_b)} \right].$$

$$\text{Критическое напряжение } \sigma_c = \varphi_m \cdot \sqrt{\frac{E_b \cdot (\sigma_b)_m \cdot \varepsilon_m}{\pi \cdot n_n}}.$$

Если внешнее напряжение  $\sigma_x < \sigma_c$  то развитие трещин будет останавливаться.

В композитах повышение вязкости разрушения может достигаться пластичностью матрицы и волокон, прочностью связи волокно-матрица, отводов трещин.

Механизм разрушения КМ еще недостаточно изучен, поэтому нужны опыты для конкретных условий работы деталей из композитов.

Благодаря легкости, прочности, технологичности, малому коэффициенту температурного расширения углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) представляются нам наиболее перспективными для изготовления деталей машин, корпусов аппаратов и элементов конструкций сельскохозяйственной техники. УУКМ содержит углеродный наполнитель в виде волокон, лент, тканей с плоским и объемным плетением можно использовать углеродные волокна низкокомодульные, высококомодульные и высокопрочные, полученные из вискозных, полиакрилонитрильных волокон и каменноугольного пека.

В качестве матрицы может быть пироуглерод, коксирующиеся полимеры, которые в процессе термодеструкции не размягчаются и дают более 50 % кокса (фенольные смолы дают (54÷60) % кокса, полиамиды (63÷74) %, кремний органические смолы (84÷87) %). Чем выше выход кокса и прочность его сцепления с волокнами, тем выше качество УУКМ.

Адгезия УВ к углеродным матрицам, полученным из полимеров в основном обеспечивается механическими связями, возникающими при усадке во время карбонизации. При формировании матрицы нанесением пироуглерода из газовой фазы определяющую роль играют химические связи. Механические характеристики УУНМ определяются количеством УВ и технологическими параметрами намотки и пропитки.

Пример 1. Определить механические характеристики композита из УУКМ



при  $\varphi_b=0,8$ ;  $(\sigma_b)_m=70$  МПа,  $E=1,5 \cdot 10^9$  Па при использовании волокон марки Урал-15.

По формуле (8)  $E_{k||} = E_b \cdot \varphi_b + E_m \cdot (1 - \varphi_b)$ ;  $E_{k||}=75 \cdot 0,8 + 1,5 \cdot 0,2 = 60,3$  ГПа.

По формуле (18), при  $k_b = 0,9$ ;  $k_m = 0,8$ ; по табл. 2  $=1600$  МПа:

$$\sigma_{bk} = 1600 \cdot 0,8 \cdot 0,9 + 70 \cdot (1 - 0,8) \cdot 0,8 = 1163,2 \text{ МПа.}$$

Таблица 2. Примерные свойства высоко прочных углеродных волокон  
Table 2. Exemplary properties of highly durable carbon fibers

Марка волокна	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> · 10 <sup>-3</sup>	Модуль упругости $E$ , МПа	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа
ВМН-3	1,7	250	1430
ВМН-4	1,71	270	2210
ВЭН-210	1,75	343	1470
Кулон	1,9	500	2000
ЛУ-2	1,7	230	2300
ЛУ-3	1,7	250	2700
ЛУ-4	1,7	250	3200
Урал-15	1,55	75	1600
Урал-24	1,75	170	1800
Элур	1,6	150	2000

## ВЫВОДЫ

1. При проектировании деталей машин из композиционных материалов необходимо учитывать ориентацию волокон относительно направления напряжений. По возможности необходимо совмещать направление волокон с растягивающими напряжениями.

2. При расчетах на прочность оценку коэффициента упругости композиции можно производить по формуле (8), (12), а предела прочности по (18).

3. При подборе материала желательно, чтобы модуль упругости волокна был

несколько выше модуля упругости матрицы.

4. Наиболее перспективными композиционными материалами следует считать углерод-углеродную композицию, обладающую наиболее высокой удельной прочностью, термостойкостью, технологичностью.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Селезнев Ю.В. 1991: Методические указания к решению задач проектирования судовых машин на основе системного подхода. - Николаев: РИО НКИ, - 63 с.
- Селезнев Ю.В. 2000: Оптимизация управления проектами при организации и развитии совместных предприятий на основе системного подхода. - Николаев: РИО УГМТУ, сб. научных трудов вып. 1, с. 157-163.
- Хикс Ч. 1967: Основные принципы планирования эксперимента. Пер. с англ. - М.: "Мир", - 343 с.
- Хубка В.А. 1987: Теории технических систем.-М.: "Мир", -208с.
- Честер Д. 1966: Теория необратимых процессов -М.: "Наука", -242с.
- Селезнев Ю.В. 1991: Проектирование деталей судовых машин из композиционных материалов. - Николаев: НКИ, - 63 с.
- Селезнев Ю.В. 1993: Системология конструирования машин. - Николаев: НКИ, - 59 с.
- Селезнев Ю.В.1988: Технология изготовления деталей из углеродных композиционных волокнистых материалов. // Технология судового машиностроения и обработка металлов резанием: Сб. научи, тр. - Николаев, НКИ,- с. 3-8.

#### TECHNOLOGY OF DESIGNING ARTICLES FROM FIBRED COMPOSITE MATERIALS

**Summary.** The structural features of composite materials and problems of making different articles from them, related to anisotropy and complex structure, of fillers and matrix have been considered. The system analysis has been made and the methods of calculating the durability of articles from carbon composites for agricultural machinery have been developed.

**Keywords:** technology, structure, wares, carbon composites

**Reviewer:** Boris Bytakov, Prof. Sc. D. Eng.