

## ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАЗМЕРОСТАБИЛЬНЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

© 2018

**В. Е. Биткин** первый заместитель генерального директора, генеральный конструктор по специальным изделиям;  
Специальное конструкторско-технологическое бюро «Пластик»,  
г. Сызрань;  
[gksi@sktb-plastik.ru](mailto:gksi@sktb-plastik.ru)

**О. Г. Жидкова** заместитель генерального конструктора по научной работе;  
Специальное конструкторско-технологическое бюро «Пластик»,  
г. Сызрань;  
[opriokt-prg@sktb-plastik.ru](mailto:opriokt-prg@sktb-plastik.ru)

**В. А. Комаров** доктор технических наук, профессор;  
Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва;  
[vkomarov@ssau.ru](mailto:vkomarov@ssau.ru)

Рассмотрены вопросы выбора материалов для создания размеростабильных несущих конструкций оптико-электронных комплексов космического назначения. Представлены физико-механические характеристики успешно применяемых и перспективных композитов, полученные теоретически и экспериментально. Проведён сравнительный анализ характеристик углепластиков в зависимости от процентного содержания наполнителя в матрице композита, а также в зависимости от модуля упругости угольного волокна. Получены экспериментальные данные по характеристикам углепластиков на основе различных волокон. Теоретически и экспериментально исследована зависимость коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР) различных углепластиков с однонаправленной и квазиизотропной структурой. Показана устойчивость величины КЛТР, близкой к  $1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , в области объёмного содержания наполнителя 50-60%. Проведено сопоставление КЛТР и модулей упругости углепластиков с соответствующими характеристиками оптических стёкол элементов конструкции телескопов. Обсуждается задача разработки композита с величиной КЛТР, характерной для титановых сплавов. Даны рекомендации по применению рассмотренных композиционных материалов при создании размеростабильных космических конструкций.

*Композиты; конструкции; размеростабильность; углеродные волокна; эпоксидное связующее; углепластики; проектирование.*

---

**Цитирование:** Биткин В.Е., Жидкова О.Г., Комаров В.А. Выбор материалов для изготовления размеростабильных несущих конструкций // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 1. С. 100-117. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-100-117

### Введение

При проектировании и производстве несущих конструкций космического назначения, связанных с оптическими и радиотехническими устройствами, помимо традиционных требований необходимой прочности и жёсткости при минимуме массы добавляется требование размерной термостабильности [1]. В табл. 1 приведены для сравнения основные физико-механические свойства ряда материалов, используемых в этих конструкциях [2-5].

Указанные металлические материалы при некоторой близости удельных механических характеристик имеют различную и большую, в случае алюминиевых сплавов, величину коэффициента линейного термического расширения  $\alpha$  (КЛТР), что создаёт предпосылки для появления сложных и нежелательных температурных деформаций прецизионных конструкций в эксплуатации. Это особенно проявляется, когда различные материалы используются совместно. Поэтому в табл. 1 полезно отметить практи-

чески полное совпадение КЛТР титанового сплава и различных оптических стёкол в широком диапазоне их плотностей от 2,5 до 4,6 г/см<sup>3</sup>. Особого внимания заслуживает также уникальное свойство углеродных волокон удлиняться при охлаждении (и наоборот) в широком интервале температур, то есть иметь отрицательную величину КЛТР. В частности, волокно ВМН-4 в интервале температур 200-320 К имеет  $\alpha < -0,8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  и при 280 К  $\alpha \approx -1 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ . Это свойство углеродных волокон в сочетании с большой величиной КЛТР полимерных связующих позволяет управлять термоупругими характеристиками композитов, вплоть до создания материала с КЛТР близким к нулю.

Таблица 1. Свойства основных материалов, используемых в прецизионных космических конструкциях

Материал		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости, ГПа	Удельная прочность, км	КЛТР, $\cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Алюминиевый сплав АК4-1		2700	72	14÷18	23,5
Титановый сплав ВТ-8		4500	120	20÷27	8,0÷9,2
Углепластик	однонаправленный (вдоль основы)	1500	120÷300	70÷105	-1,2÷-0,5
	с квазиизотропной структурой		50÷110	35÷42	-0,1÷1,5
Материалы для астрономических зеркал	Астроситалл СО-115М	2460	93,9	0,03	0±0,15
	Карбид кремния SiC	3220	270	0,14	2,0
Оптические стёкла		2520÷4650	–	–	7,6÷8,5
Эпоксидные смолы		1200÷1400	3,1÷3,8	–	50÷70

Матрицей в полимерных композиционных материалах (КМ) служат термореактивные эпоксидные, фенолформальдегидные, цианат-эфирные, бисмалеимидные и другие смолы, что определяет как температуру эксплуатации изделия с применением данного материала, так и характеристики материала и конструкции в целом. Наиболее востребованными и предпочтительными с точки зрения весового совершенства конструкции и её термоупругих характеристик на сегодняшний день являются углепластики на основе эпоксидных смол.

Углепластики по ряду характеристик превосходят металлы и часто являются наиболее приемлемыми материалами для создания несущих космических конструкций с требуемыми критериями размерной стабильности. При этом такие особенности углепластиков, как неоднородность структуры, различие физико-механических характеристик компонентов, синхронность создания материала и конструкции, открывают широкие возможности управления свойствами материала и ликвидации многих промежуточных операций, что, в свою очередь, расширяет возможности реализации конструкций с заданными свойствами и снижает трудоёмкость создания продукции в триаде «материал – конструкция – технология» [6; 7].

В связи с большой номенклатурой углеродных нитей, тканей и препрегов, цель данной статьи – обобщить определённый опыт создания композитов из отечественных компонентов с заданной величиной КЛТР в условиях промышленного производства.

### **Отечественные материалы, применяемые в углепластиках**

Углепластики, как правило, содержат большое количество наполнителя. Он образует жёсткий скелет, препятствующий деформации полимера. После полимеризации при охлаждении связующее сжимается и подвергается всестороннему растяжению. Объёмная деформация при этом может составлять несколько процентов. Таким обра-

зом, уже в ненагруженном состоянии композита матрица должна выдерживать значительные механические деформации без разрушения и нарушения адгезии на границе с волокном. Как показывают микроскопические исследования, эпоксидные смолы значительно лучше других связующих выдерживают подобные условия. Эпоксидные связующие обладают комплексом благоприятных свойств, определивших их широкое применение в производстве конструкций из композитов. Они обладают высокими механическими и адгезионными характеристиками, позволяющими достаточно полно использовать свойства армирующих волокон. Технологичность этих связующих и способность длительное время находиться в недоотверждённом состоянии позволяют изготавливать на их основе предварительно пропитанные и частично отверждённые полуфабрикаты (препреги) [8; 9].

Как правило, все волокна, применяемые в композиционных материалах, имеют небольшой диаметр, что обуславливает связанное с «масштабным эффектом» проявление высокой прочности ряда материалов. Характеристики углеродных волокон, выпускаемых в России промышленно, приведены в табл. 2 [10].

Таблица 2. Физико-механические характеристики непрерывных углеродных волокон, выпускаемых в России

Марка наполнителя	Число филоментов в нити, шт.	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости, ГПа	Деформация разрушения, %	Линейная плотность, мг/м	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Нить						
УКН-5000	5000 10000	2500	180÷240	1,2	410 900	1750
УКН-5000П	2500 5000	3000	20÷250	1,2	205 400	1730
УКН-П0,1	2500 5000 10000	4000÷4500	200÷250	1,5	125 250 410	1750
«Гранит-П»	5000	3000÷3500	320÷400	0,9	400	1800
«Кулон-24П»	5000	2500÷3000	450÷550	0,6	400	1970
«Кулон»	5000	2500÷4000	550÷600	0,6	400	1970
«Урал Н-15»	6600	1800	60÷80	2,0÷2,5	205	1450
«Урал Н-24»	6600	1500	80÷100	1,5÷2,0	205	1470
Лента						
ЛУ-П/0,1	–	2800÷3000	250÷280	1,0	–	1750
«Элур-П»	–	2700÷3200	220÷250	1,2	–	1700
ЛУ-24П	–	2500÷3000	320÷350	0,8	–	1800
«Урал Т-24»	–	1000÷1500	60	2,0	–	1470
ТМ-24	–	3000	60	2,0	–	1470
Тесьма						
«Урал-15»	–	1800	60÷80	2,0÷2,5	–	1450
«Урал-24»	–	1500	80÷100	1,5÷2,0	–	1470

### Методика анализа характеристик композиционного материала

Простой эмпирический подход к выбору композиции оптимального состава КМ невозможен в силу разнообразия исходных компонентов с широким спектром физико-механических и химических свойств. В данной работе используются известные структурные соотношения, выражающие связь физико-механических свойств композита со свойствами исходных компонентов [11-13].

Исходные термоупругие свойства наполнителя и матрицы, их объёмное содержание в КМ и углы ориентации монослоёв являются управляемыми параметрами при создании слоистых композитов с заданными термомеханическими свойствами.

Первоначально, исходя из паспортных данных на материал наполнителя и связующего, проводится анализ свойств монослоя композиционного материала.

Свойства монослоя композита в соответствии с законом механической смеси могут быть оценены с использованием следующих соотношений:

$$E_1 = E_B v + E_M (1 - v);$$

$$\frac{1}{E_2} = \frac{v}{E_B} + \frac{1 - v}{E_M} + \frac{[\mu_B v + \mu_M (1 - v)]^2}{E_B v + E_M (1 - v)};$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{v}{G_B} + \frac{1 - v}{G_M};$$

$$\mu_{21} = \mu_B v + \mu_M (1 - v);$$

$$E_1 \mu_{12} = E_2 \mu_{21};$$

$$\alpha_1 = \frac{E_B \alpha_B v + E_M \alpha_M (1 - v)}{E_B v + E_M (1 - v)};$$

$$\alpha_2 = \alpha_B (1 + \mu_B) v + \alpha_M (1 + \mu_M) (1 - v) - [\mu_B v + \mu_M (1 - v)] \frac{E_B \alpha_B v + E_M \alpha_M (1 - v)}{E_B v + E_M (1 - v)},$$

где  $v$  – объёмная доля волокон;  $E_1$  – продольный модуль упругости слоя;  $E_2$  – поперечный модуль упругости слоя;  $G_{12}$  – средний модуль сдвига слоя;  $\alpha_1$  – КЛТР материала вдоль волокон;  $\alpha_2$  – КЛТР материала поперёк волокон;  $\mu_{12}, \mu_{21}$  – коэффициенты Пуассона слоя;  $E_M, E_B, G_M, G_B, \alpha_M, \alpha_B$  – модули упругости, модули сдвига, коэффициенты линейного термического расширения матрицы и волокон.

Упругие постоянные в плоскости пакета слоистого композита вычисляются через его структурные параметры следующим образом:

$$E_x = \frac{Q}{Q_{22} Q_{33} - Q_{23}^2};$$

$$E_y = \frac{Q}{Q_{11}Q_{33} - Q_{13}^2};$$

$$G_{xy} = \frac{Q}{Q_{11}Q_{22} - Q_{12}^2};$$

$$\mu_{xy} = \frac{Q_{12}Q_{33} - Q_{13}Q_{23}}{Q_{22}Q_{33} - Q_{23}^2};$$

$$\mu_{yx} = \frac{Q_{12}Q_{33} - Q_{13}Q_{23}}{Q_{11}Q_{33} - Q_{13}^2};$$

$$\alpha_x = \frac{1}{E_x H} (Q_{1T} - \mu_{yx} Q_{2T} + \eta_{x,xy} Q_{3T});$$

$$\alpha_y = \frac{1}{E_y H} (Q_{2T} - \mu_{xy} Q_{1T} + \eta_{y,xy} Q_{3T});$$

$$\alpha_{xy} = \frac{1}{G_{xy} H} (\eta_{xy,x} Q_{1T} + \eta_{xy,y} Q_{2T} + Q_{3T});$$

$$Q = \frac{1}{H} [(Q_{11}Q_{22} - Q_{12}^2)Q_{33} + 2Q_{12}Q_{13}Q_{23} - Q_{11}Q_{23}^2 - Q_{22}Q_{13}^2].$$

Здесь  $E_x, E_y, G_{xy}$  – средние модули упругости, модуль сдвига слоистого КМ;  $\mu_{xy}, \mu_{yx}$  – средние коэффициенты Пуассона слоистого КМ;  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_{xy}$  – средние КЛТР слоистого пакета КМ;  $H$  – суммарная толщина пакета КМ;  $Q_{ij}, Q_{iT}$  – обобщённые жёсткости слоистого КМ ( $i, j = 1, 2, 3$ ):

$$Q_{11} = \sum_{i=1}^n h_i (E_1^i \cos^4 \theta_i + 2E_1^i \mu_{12}^i \sin^2 \theta_i \cos^2 \theta_i + E_2^i \sin^4 \theta_i + G_{12}^i \sin^2 2\theta_i);$$

$$Q_{21} = Q_{12} = \sum_{i=1}^n ((E_1^i + E_2^i) \sin^2 \theta_i \cos^2 \theta_i + E_1^i \mu_{12}^i (\sin^4 \theta_i + \cos^4 \theta_i) - G_{12}^i \sin^2 2\theta_i);$$

$$Q_{22} = \sum_{i=1}^n h_i (E_1^i \sin^4 \theta_i + 2E_1^i \mu_{21}^i \sin^2 \theta_i \cos^2 \theta_i + E_2^i \sin^4 \theta_i + G_{12}^i \sin^2 2\theta_i);$$

$$Q_{31} = Q_{13} = \sum_{i=1}^n h_i \sin \theta_i \cos \theta_i (E_1^i (1 - \mu_{21}^i) \cos^2 \theta_i - E_2^i (1 - \mu_{12}^i) \sin^2 \theta_i - 2G_{12}^i \cos 2\theta_i);$$

$$Q_{23} = Q_{32} = \sum_{i=1}^n h_i \sin \theta_i \cos \theta_i (E_1^i (1 - \mu_{21}^i) \sin^2 \theta_i - E_2^i (1 - \mu_{12}^i) \cos^2 \theta_i - 2G_{12}^i \cos 2\theta_i);$$

$$Q_{33} = \sum_{i=1}^n \left( (E_1^i + E_2^i - 2E_1^i \mu_{21}^i) \sin^2 \theta_i \cos^2 \theta_i + G_{21}^i \cos^2 2\theta_i \right);$$

$$Q_{1T} = \sum_{i=1}^n h_i \left( E_1^i (\alpha_1^i + \mu_{21}^i \alpha_2^i) \cos^2 \theta_i + E_2^i (\alpha_2^i + \mu_{21}^i \alpha_1^i) \sin^2 \theta_i \right);$$

$$Q_{2T} = \sum_{i=1}^n h_i \left( E_1^i (\alpha_1^i + \mu_{12}^i \alpha_2^i) \sin^2 \theta_i + E_2^i (\alpha_2^i + \mu_{12}^i \alpha_1^i) \cos^2 \theta_i \right);$$

$$Q_{3T} = \sum_{i=1}^n h_i \sin \theta_i \cos \theta_i \left( E_1^i (\alpha_1^i + \mu_{21}^i \alpha_2^i) - E_2^i (\alpha_2^i + \mu_{12}^i \alpha_1^i) \right),$$

где  $\theta_i$  – угол армирования монослоя композита;  $h_i$  – толщина  $i$ -го монослоя.

Анализ приведённых зависимостей показывает, что, варьируя углы армирования слоёв пакета  $\theta$ , можно получить термомеханические характеристики композита, позволяющие свести к минимуму как деформации конструкции от воздействия температуры, так и создать двуоснотермонейтральные структуры пакета КМ. Эти возможности могут быть в значительной степени расширены путём использования методов технологического воздействия, выбора режима отверждения, степени армирования композита и др. [13]. КЛТР в направлении оси  $Z$  может быть оценён величиной порядка  $30 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

### Результаты расчёта термомеханических характеристик композиционных материалов

В табл. 3, 4 приведены полученные расчётным путём термомеханические характеристики однонаправленных углепластиков и углепластиков с квазиизотропной структурой  $(0^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 90^\circ)_{2n}$  на основе ленты ЛУ-П/0,1-А 1 (ГОСТ 28006-88), КУЛОН-500/0,07 (СТО 75969490-007-2009), связующего ЭНФБ (ТУ 1-596-36-2005) для различных значений модуля упругости волокна и процентного содержания наполнителя в КМ. В расчёте приняты средние значения физико-механических характеристик эпоксидного связующего.

Расчёт термомеханических характеристик пакета композиционного материала проводился с использованием соотношений, приведённых в [11-13].

Таблица 3. Термомеханические характеристики однонаправленного углепластика и углепластика с укладкой  $(0^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 90^\circ)_{2n}$  на основе ленты ЛУ-П/0,1 (ГОСТ 28006-88) и связующего ЭНФБ (ТУ 1-596-36-2005), полученные расчётным способом

Процентное содержание волокна $V_v, \%$	Модуль упругости волокна $E_v, \text{ГПа}$	Расчётные значения характеристик однонаправленного углепластика							Расчётные значения характеристик углепластика с укладкой $(0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ)_{2n}$				
		$E_x, \text{ГПа}$	$E_y, \text{ГПа}$	$G_{xy}, \text{ГПа}$	$\mu_{xy}$	$\mu_{yx}$	$\alpha_x \cdot 10^{-6}, \text{C}^{-1}$	$\alpha_y \cdot 10^{-6}, \text{C}^{-1}$	$E_x, E_y, \text{ГПа}$	$G_{xy}, \text{ГПа}$	$\mu_{xy}, \mu_{yx}$	$\alpha_x \cdot 10^{-6}, \alpha_y \cdot 10^{-6}, \text{C}^{-1}$	
58	250	146,50	6,50	4,97	0,305	0,014	-0,568	30,368	55,13	21,19	0,301	1,101	
	265	155,20	6,53	4,98	0,305	0,013	-0,604	30,378	58,05	22,29	0,302	0,992	
	280	163,91	6,55	4,99	0,305	0,012	-0,635	30,386	60,96	23,38	0,304	0,881	
62	250	156,40	7,67	5,90	0,299	0,015	-0,665	27,475	59,56	22,97	0,297	1,002	
	265	165,70	7,70	5,92	0,299	0,014	-0,695	27,487	62,70	24,14	0,298	0,894	
	280	174,97	7,74	5,94	0,299	0,013	-0,722	27,486	65,83	25,32	0,300	0,793	

Таблица 4. Термомеханические характеристики однонаправленного углепластика и углепластика с укладкой  $(0^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 90^\circ)_{2n}$  на основе ленты КУЛОН-500/0,07 (СТО 75969490-007-2009) и связующего ЭНФБ (ТУ 1-596-36-2005), полученные расчётным способом

Процентное содержание волокна $V_f, \%$	Модуль упругости волокна	Расчётные значения характеристик однонаправленного углепластика							Расчётные значения характеристик углепластика с укладкой $(0^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 90^\circ)_{2n}$			
		$E_x, \text{ГПа}$	$E_y, \text{ГПа}$	$G_{xy}, \text{ГПа}$	$\mu_{xy}$	$\mu_{yx}$	$\alpha_x \cdot 10^{-6}, \text{C}^{-1}$	$\alpha_y \cdot 10^{-6}, \text{C}^{-1}$	$E_x, E_y, \text{ГПа}$	$G_{xy}, \text{ГПа}$	$\mu_{xy}, \mu_{yx}$	$\alpha_x \cdot 10^{-6}, \alpha_y \cdot 10^{-6}, \text{C}^{-1}$
58	450	262,50	6,72	5,07	0,305	0,008	-0,848	30,438	93,96	35,74	0,314	0,160
	500	291,50	6,75	5,09	0,305	0,007	-0,882	30,447	103,66	39,39	0,316	0,031
	550	320,50	6,77	5,10	0,305	0,006	-0,911	30,455	113,35	43,05	0,317	-0,087
62	450	280,37	7,98	6,06	0,299	0,009	-0,901	27,536	101,15	38,53	0,312	0,119
	500	311,37	8,02	6,08	0,299	0,008	-0,931	27,544	111,52	42,43	0,314	-0,007
	550	342,37	8,05	6,10	0,299	0,007	-0,955	27,550	121,89	46,34	0,315	-0,122

На рис. 1, 2 приведены полученные расчётным способом физико-механические характеристики пакета КМ для укладки  $(0^\circ / \pm\theta^\circ / 90^\circ)_{2n}$  и степени армирования слоя  $V_B = 0,6$ . В качестве композиционного материала рассмотрен углепластик на основе углеленты ЛУ-П/0,1 и связующего ЭНФБ [10].

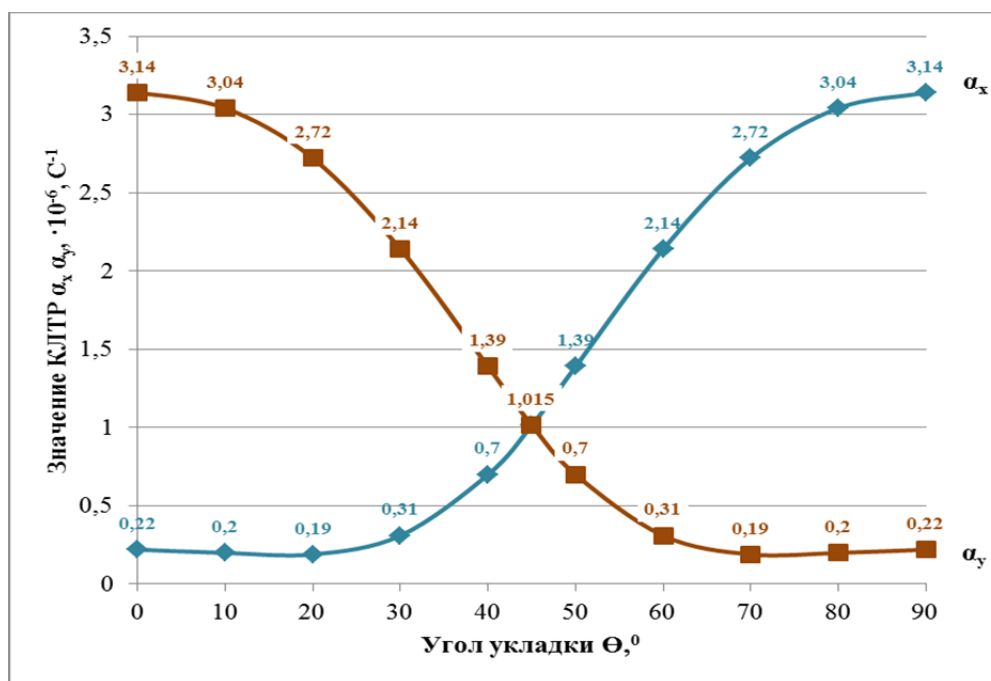


Рис. 1. Зависимость КЛТР композита от угла армирования  $\theta$  для углепластика на основе углеродной ленты ЛУ-П/0,1 и связующего ЭНФБ (степень армирования  $V_B = 0,6$ , схема армирования  $(0^\circ / \pm\theta^\circ / 90^\circ)_{2n}$ )

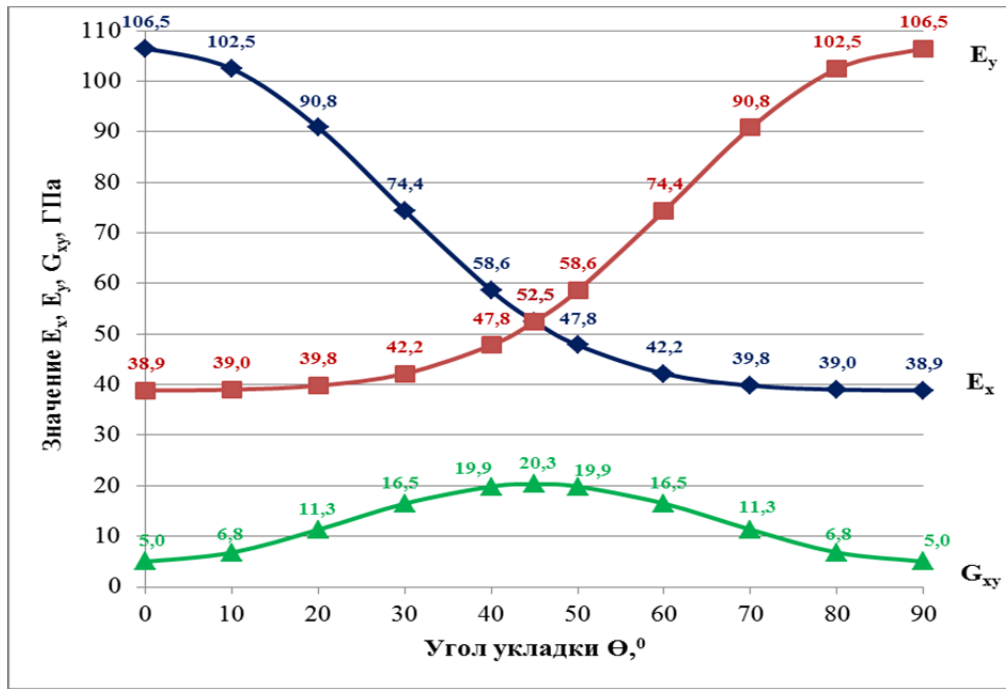


Рис. 2. Зависимость упругих характеристик композита от угла армирования  $\theta$  для углепластика на основе углеродной ленты ЛУ-П/0,1 и связующего ЭНФБ (степень армирования  $V_B = 60\%$ , схема армирования  $(0^\circ / \pm\theta^\circ / 90^\circ)_{2n}$ )

Из табл. 3 и рис. 1 следует, что квазиизотропная структура композита на основе ленты ЛУ-П/0,1 и эпоксидного связующего имеет расчётную величину КЛТР  $1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Определённая переориентация половины слоёв позволяет получить работоспособную структуру композита с КЛТР в одном направлении  $3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Однако это уже анизотропная структура с низкими характеристиками сдвиговой жёсткости и прочности (рис. 2).

Практический интерес с точки зрения достижения требований по размерной стабильности несущих конструкций оптико-электронных комплексов представляют углепластики с коэффициентом линейного термического расширения, близким к КЛТР материалов, применяемых для астрономических зеркал, а также материалов (например, титановые сплавы), применяемых в закладных и накладных элементах для крепления элементов и самих конструкций к ответным частям. Теоретический анализ термомеханических характеристик композитов показывает, что для схемы армирования  $(0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ)_{2n}$  композиционный материал на основе углеленты КУЛОН-500/0,07 при содержании волокна 58% для среднего значения модуля упругости наполнителя имеет КЛТР, близкий к значению КЛТР материала Астроситалл СО-115М.

На рис. 3 показана расчётная зависимость КЛТР квазиизотропной структуры композита на основе ленты ЛУ-П/0,1 и эпоксидного связующего от объёмной доли волокна.

Зависимость имеет существенно нелинейный характер. В практически важной области со степенью армирования  $0,55 \div 0,62$  КЛТР имеет величину  $1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , что свидетельствует об относительной нечувствительности композита в этой зоне к количеству связующего, которое может варьироваться в силу технологических причин.





Рис. 3. Зависимость КЛТР от процентного содержания волокна для углепластика на основе ленты ЛУ-П/0,1 и связующего ЭНФБ со схемой армирования  $(0^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 90^\circ)_{2n}$

Но, с другой стороны, попытка найти структуру на этих компонентах с КЛТР  $8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (как у титана) приводит к композиту с содержанием волокна  $V_B = 12,5\%$  и большой чувствительностью КЛТР к  $V_B$ . Поэтому данная структура представляет только теоретический интерес. Квасититановый композит можно создать только со значительно более жёстким полимером или с добавлением слоёв волокон с большим положительным  $\alpha$ .

### Экспериментальные исследования углепластиков

С целью оценки достоверности и уточнения расчётных значений термомеханических характеристик углепластика проводятся экспериментальные исследования, включающие изготовление плоских образцов композита с однонаправленными слоями и выбранными укладками, вычисляются коэффициенты вариации физико-механических характеристик. Назначаются их величины или поправочные коэффициенты для практических расчётов конструкций.

Испытания слоистых волокнистых композиционных материалов характеризуются рядом особенностей и отличаются от металлов различными типами нагружения. Анизотропия и неоднородность волокнистых КМ, а также практически полное отсутствие пластических деформаций в углепластике при всех возможных видах разрушения обуславливают значительные трудности при получении объективных характеристик даже при одноосном нагружении [14; 15]. Поэтому обоснование выбора образца часто требует более значительных усилий, чем проектирование конструктивного элемента из композита. Создание однородного поля деформаций на рабочем участке – необходимое условие корректности проведения испытаний.

Принцип Сен-Венана в анизотропных материалах по сравнению с традиционными изотропными материалами проявляется в резком расширении зон краевого эффекта, что требует увеличения длины образца. Длина рабочей части образцов при сжатии ограничивается возможностью потери их устойчивости [16].

Для экспериментальной оценки в данной работе выбраны схемы армирования углепластика –  $(0^\circ)_n$  и  $(0^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 90^\circ)_{2n}$ .

Образцы для определения характеристик изготовлены из препрега на основе угле-лент ЛУ-П/0,1 и КУЛОН-500/0,07 и связующего ЭНФБ методом автоклавного формования. Формование образцов производилось при давлении  $5\div 7 \cdot 10^{-1}$  МПа в течение 6 часов и температуре  $160\div 170^\circ\text{C}$  [17]. После режима формования листы, предназначенные для изготовления образцов для физико-механических испытаний, проходят термообработку при температуре формования. Из листов, прошедших термообработку, изготавливались образцы для экспериментального определения характеристик композиционного материала.

Достоверность определения экспериментальных значений обеспечивалась испытаниями не менее пяти образцов. Коэффициенты вариации определялись в процентах соотношением:

$$k = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{cp} - x_i)^2}}{x_{cp}} 100,$$

где  $x_i$  – экспериментальное значение исследуемой величины для  $i$ -го образца;  $x_{cp}$  – среднее значение этой же величины.

Испытания образцов по определению физико-механических характеристик материалов с выбранными схемами армирования на растяжение и сжатие проводились в нормальных климатических условиях по ГОСТ 25.601, ГОСТ 25.602 [18; 19] соответственно. Испытания на сдвиг в плоскости армирования композита проводились по ГОСТ Р 50578 [20] методом перекашивания пластины.

Испытания образцов на растяжение, сжатие и сдвиг проводились на универсальной разрывной машине 1958У-10-1 с постоянной скоростью деформирования 5 мм/мин. Деформации при проведении испытаний на растяжение и сжатие измерялись при помощи тензорезисторов типа КФ 5П1-5-200-Б-12, наклеенных с двух сторон на образцы в продольном и поперечном направлении для измерения продольных и поперечных деформаций образцов. Такая схема измерения деформаций позволяет компенсировать погрешности, вызванные возможным перекосом образцов в захватах из-за геометрической неточности их изготовления. При проведении испытаний на сдвиг тензорезисторы КФ 5П1-5-200-Б-12 наклеивались под углом  $45^\circ$  к направлению действия нагрузки с каждой стороны образца в середине рабочей зоны. Регистрация деформаций проводилась с помощью измерительной системы СИИТ-3. Запись диаграммы деформаций производится с использованием лабораторного двухкоординатного прибора ЛКД-4.

Для определения механических характеристик углепластика при растяжении использовались плоские образцы, вырезанные из многослойных пластин под углами  $0^\circ$  и  $90^\circ$  к оси укладки слоёв. Длина образцов 250 мм, ширина 12 мм, рабочая зона 70 мм.

Нагружение образцов при растяжении осуществлялось с использованием клиновых захватов, имеющих точное позиционирование образца по оси прилагаемой нагрузки (ширина захватов изготовлена по ширине образца). Предотвращение разрушения от контактных напряжений в местах их закрепления достигалось с помощью наклеенных стеклотекстолитовых накладок. Длина накладок выбиралась в соответствии с требованиями ГОСТ 25.601 [18] и условиями обеспечения сдвиговой прочности клеевого соединения.

При испытаниях на сжатие использовались плоские образцы шириной 10 мм по основе – для однонаправленной укладки и шириной 15 мм по утку – для однонаправ-

ленной укладки и других укладок во всех направлениях. При определении прочностных характеристик длина образцов составляла  $(120 + 4,5h)$  мм ( $h$  – толщина образца), при определении модуля упругости при сжатии – 150 мм. Рабочая зона при определении прочностных характеристик составляла  $4,5h$ , при определении модуля упругости – 30 мм.

Нагружение образцов при сжатии проводилось на приспособлении, предотвращающем потерю устойчивости образца – части приспособления, зажимающие образец, перемещаются по направляющим. Предотвращение разрушения от контактных напряжений в местах их закрепления обеспечивалось распределением давления на образец при помощи прижимных пластин из мягких сплавов (алюминий) и плавного снятия напряжений на выходе из захвата посредством небольших текстолитовых вставок.

Испытания образцов на сдвиг проводились на образцах углепластика размером  $150 \times 150$  мм с усиливающими накладками из стеклотекстолита [20].

В табл. 5, 6 представлены физико-механические характеристики углепластиков на основе углеленты ЛУ-П/0,1 и связующего ЭНФБ, полученные экспериментально. Содержание наполнителя в матрице 60%.

Полученные экспериментальные значения модуля упругости, модуля сдвига и коэффициентов Пуассона хорошо согласуются с расчётными. Значения коэффициента вариации находятся в пределах от 2,45 до 6,58%, что приемлемо для композиционных материалов.

Таблица 5. Результаты физико-механических испытаний однонаправленного углепластика на основе углеленты ЛУ-П/0,1 и связующего ЭНФБ вдоль направления основы

Определяемый показатель	№ образца	Результат испытаний по каждому образцу	Среднее значение показателя	Коэффициент вариации, %
Модуль упругости при растяжении, ГПа	1	148	145	2,93
	2	138		
	3	144		
	4	149		
	5	148		
Предел прочности при растяжении, МПа	1	935	912	3,41
	2	889		
	3	910		
	4	876		
	5	951		
Коэффициент Пуассона	1	0,298	0,284	4,16
	2	0,295		
	3	0,276		
	4	0,281		
	5	0,271		
Модуль упругости при сжатии, ГПа	1	171	166	3,32
	2	160		
	3	160		
	4	166		
	5	171		
Предел прочности при сжатии, МПа	1	892	884	5,74
	2	870		
	3	890		
	4	811		
	5	769		

Таблица 6. Результаты физико-механических испытаний углепластика с укладкой  $(0^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 90^\circ)_{2n}$  на основе углеленты ЛУ-П/0,1 и связующего ЭНФБ

Определяемый показатель	Направление вырезки	№ образца	Результат испытаний по каждому образцу	Среднее значение показателя	Коэффициент вариации, %
Модуль упругости при растяжении, ГПа	0°	1	55,0	56,1	3,92
		2	55,2		
		3	53,6		
		4	59,2		
		5	57,4		
	90°	1	54,6	55,0	3,59
		2	56,8		
		3	55,3		
		4	56,6		
		5	51,9		
Предел прочности при растяжении, МПа	0°	1	252	256	3,20
		2	258		
		3	256		
		4	247		
		5	269		
	90°	1	260	275	4,30
		2	273		
		3	281		
		4	291		
		5	269		
Коэффициент Пуассона	0°	1	0,318	0,310	5,22
		2	0,310		
		3	0,287		
		4	0,331		
		5	0,306		
	90°	1	0,326	0,325	2,79
		2	0,327		
		3	0,335		
		4	0,310		
		5	0,325		
Модуль упругости при сжатии, ГПа	0°	1	58,5	57,6	3,33
		2	54,6		
		3	56,8		
		4	58,6		
		5	59,4		
	90°	1	57,6	57,2	2,45
		2	56,4		
		3	55,2		
		4	58,1		
		5	58,7		
Модуль сдвига, ГПа	0°	1	21,4	20,3	5,96
		2	19,3		
		3	20,3		
		4	18,9		
		5	21,6		
	90°	1	21,0	20,5	6,58
		2	22,4		
		3	18,9		
		4	19,6		
		5	20,8		

Одной из важных характеристик материала, влияющей на размерную стабильность изделия, является коэффициент линейного термического расширения. Результаты экспериментального определения КЛТР углепластика с укладкой  $(0^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 90^\circ)_{2n}$  на основе углеленты ЛУ-П/0,1 и связующего ЭНФБ для степени армирования слоя  $V_g = 0,6$  приведены в табл. 7.

Образцы для определения коэффициента линейного термического расширения изготавливались в форме прямоугольного параллелепипеда размерами  $5 \times 5 \times 50$  мм. Испытания проводились на кварцевом dilatометре ДКВ-7А для автоматической регистрации теплового расширения полимерных материалов. Измерение температурной деформации образца производится вдоль его длинной стороны. Образцы подвергались термообработке при температуре формования, а также термоциклированию в диапазоне температур от минус  $50^\circ\text{C}$  до  $+100^\circ\text{C}$  и дегазации в барокамере при давлении от  $(1,33 \cdot 10^{-2})$  до  $(1,33 \cdot 10^{-6})$  Па и температуре  $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$ . Измерение КЛТР проводилось в диапазоне температур от минус  $50^\circ\text{C}$  до  $+50^\circ\text{C}$ .

Таблица 7. Результаты испытаний по определению КЛТР углепластика на основе углеленты ЛУ-П-0,1 и связующего ЭНФБ (степень армирования слоя  $V_g = 0,6$ ) с укладкой  $(0^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 90^\circ)_{2n}$

Определяемый показатель	Направление вырезки	№ образца	Результат испытаний по каждому образцу	Среднее значение показателя	Коэффициент вариации, %
КЛТР после термообработки, $\cdot 10^{-6}, \text{C}^{-1}$	$0^\circ$	1	1,09	1,09	6,77
		2	1,13		
		3	0,98		
		4	1,08		
		5	1,18		
	$90^\circ$	1	1,43	1,30	8,98
		2	1,13		
		3	1,38		
		4	1,27		
		5	1,36		
КЛТР после термоциклирования, $\cdot 10^{-6}, \text{C}^{-1}$	$0^\circ$	1	0,93	0,89	5,98
		2	0,93		
		3	0,83		
		4	0,92		
		5	0,83		
	$90^\circ$	1	1,16	1,17	2,73
		2	1,20		
		3	1,17		
		4	1,13		
		5	1,21		
КЛТР после дегазации $\cdot 10^{-6}, \text{C}^{-1}$	$0^\circ$	1	0,88	0,98	12,5
		2	0,98		
		3	0,88		
		4	0,98		
		5	1,18		
	$90^\circ$	1	1,10	1,06	5,78
		2	0,98		
		3	1,11		
		4	1,09		
		5	1,00		

В табл. 8, 9 представлены средние значения физико-механических характеристик, полученные экспериментально, для углепластиков на основе углеродной ленты ЛУ-П/0,1, КУ-ЛОН-500/0,07 и связующего ЭНФБ.

Таблица 8. Усреднённые значения физико-механических характеристик однонаправленных углепластиков, полученные экспериментально

Характеристика	Углепластик	
	на основе углеродной ленты ЛУ-П/0,1 и связующего ЭНФБ	на основе углеродной ленты КУЛОН-500/0,07 и связующего ЭНФБ
Модуль упругости при растяжении по основе, ГПа	145	245,2
Модуль упругости при растяжении по утку, ГПа	5	5,88
Предел прочности при растяжении по основе, МПа	912	-
Модуль сдвига, ГПа	5	5,2
Коэффициент Пуассона	0,284	0,290
КТЛР по основе $\cdot 10^{-6}, C^{-1}$	-0,5	-0,5 ÷ -0,7
КТЛР по утку $\cdot 10^{-6}, C^{-1}$	34	34

Таблица 9. Усреднённые значения физико-механических свойств углепластиков с укладкой  $(0^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 90^\circ)_{2n}$ , полученные экспериментально

Характеристика	Углепластик	
	на основе углеродной ленты ЛУ-П/0,1 и связующего ЭНФБ	на основе углеродной ленты КУЛОН-500/0,07 и связующего ЭНФБ
Модуль упругости по направлению $0^\circ$ , ГПа	56,1	88,21
Модуль упругости по направлению $90^\circ$ , ГПа	55,00	87,02
Предел прочности при растяжении по основе, МПа	256	-
Предел прочности при растяжении по утку, МПа	275	-
Модуль сдвига, ГПа	20,4	32,74
Коэффициент Пуассона	0,330	0,310
КТЛР по основе $\cdot 10^{-6}, C^{-1}$	0,89 ÷ 1,15	0,18 ÷ 0,19
КТЛР по утку $\cdot 10^{-6}, C^{-1}$	1,06 ÷ 1,30	0,18 ÷ 0,19

### Заключение

Анализ результатов расчётных и экспериментальных исследований термомеханических характеристик слоистого композита на основе углеродных наполнителей ЛУ-П/0,1, КУЛОН-500/0,07 и эпоксидного связующего ЭНФБ позволяет сделать следующие выводы.

1. В условиях мелкосерийного и штучного производства достигнуто полное качественное совпадение теоретических прогнозов и экспериментально замеренных характеристик образцов с коэффициентами вариации в пределах 6% по механике и 9% по КЛТР.

2. Максимальное отличие замеренных модулей упругости и пределов прочности слоистого композита с квазиизотропной структурой от расчётных составляет величину

порядка 15%, как правило, в минус. С учётом стабильности экспериментальных данных это расхождение может быть учтено в практических расчётах соответствующей поправкой коэффициента безопасности.

3. Рассмотренная квазиизотропная структура слоистого композита на основе относительно низко модульной и недорогой ленты ЛУ-П/0,1 и эпоксидного связующего имеет стабильную величину КЛТР порядка  $1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , не чувствительную к колебаниям количества полимера.

4. Создание квазититанового углепластика с КЛТР  $\alpha = 8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  на основе рассмотренной композиции представляется проблематичным и требует поиска других решений – смены связующего, использования гибридных армирующих материалов и т.д.

5. Для создания лёгких размеростабильных конструкций повышенной прочности и жёсткости может быть использована высоко модульная лента типа КУЛОН-500/0,1 с перспективным цианат-эфирным связующим, обладающим рядом полезных свойств для конструкций оптических телескопов космического назначения.

### **Библиографический список**

1. Тестоедов Н.А., Двирный Г.В., Пермяков М.Ю. Определение величины температурной деформации размеростабильных рефлекторов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнёва. 2011. № 2 (35). С. 67-71.

2. Попов Н.Н, Филонов А.С., Донцов Г.А. Вурсол А.В., Родимкина Е.Ю., Матвеев Д.С. Конструкционные материалы оптических модулей аппаратов дистанционного зондирования Земли // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофото-съёмка. 2012. № 5. С. 101-105.

3. Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М. Промышленные алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1984. 527 с.

4. Чечулин Б.Б., Ушков С.С., Разуваева И.Н., Гольдфайн В.Н. Титановые сплавы в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1977. 248 с.

5. Абдулкадиров М.А., Семенов А.П. Современные способы изготовления астрономических и космических зеркал // Фотоника. 2015. № 3 (51). С. 62-79.

6. Комаров В.А. Проектирование силовых аддитивных конструкций: теоретическое основы // Онтология проектирования. 2017. Т. 7, № 2 (24). С. 191-206. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-191-206

7. Биткин В.Е., Денисов А.В., Жидкова О.Г. Технологический комплекс для изготовления силовых и высокоточных размеростабильных элементов конструкций интегрального типа из волокнистых композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2014. № 1 (133). С. 18-23.

8. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.

9. Аристов В.Ф., Халиманович В.И., Миронович В.В., Ислентьева Т.А., Гуров Д.А. Цианат-эфирные связующие в аэрокосмической отрасли. Каталитические свойства органометаллических комплексов и солей диазония с комплексными анионами в отверждении цианат-эфирных связующих // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнёва. 2013. № 2 (48). С. 159-165.

10. Комков М.А., Тарасов В.А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения: уч. пособие. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 431 с.

11. Vasiliev V.V., Morozov E.V. Advanced Mechanics of Composite Materials and Structural Elements. Elsevier, 2013. 816 p.

12. Молодцов Г.А., Биткин В.Е., Симонов В.Ф., Урмансов Ф.Ф. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 2000. 352 с.

13. Биткин В.Е., Жидкова О.Г., Денисов А.В., Бородавин А.В., Митюшкина Д.В., Родионов А.В., Нонин А.С. Математическое моделирование напряжённо-деформированного состояния размеростабильных композитных элементов конструкций оптических телескопов с помощью метода конечных элементов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2016. Т. 20, № 4. С. 707-729. DOI: 10.14498/vsgtu1514

14. Полилов А.Н., Татусь Н.А. Критерии прочности полимерных волокнистых композитов, описывающие некоторые экспериментально наблюдаемые эффекты // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2008. № 3. С. 103-109.

15. Комаров В.А., Кишов Е.А., Чарквиани Р.В., Павлов А.А. Расчётно-экспериментальный анализ прочности изделий из тканевого эпоксидного углепластика // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2015. Т. 14, № 2. С. 106-112. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-2-106-112

16. Стрижало В.А., Земцов М.П. Жёсткость и прочность слоистых углепластиков при одноосном нагружении // Проблемы прочности. 2001. № 6. С. 61-71.

17. Гуняев Г.М., Сорина Т.Г., Хорошилова И.П., Румянцев А.Ф. Конструкционные эпоксидные углепластики // Авиационная промышленность. 1984. № 12. С. 41-45.

18. ГОСТ 25.601-80. Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. М.: Издательство стандартов, 1980. 14 с.

19. ГОСТ 25.602-80. Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах. М.: Издательство стандартов, 1980. 18 с.

20. ГОСТ Р 50578-93. Материалы композиционные полимерные. Метод испытания на сдвиг перекашиванием пластин. М.: Издательство стандартов, 1993. 15 с.

## CHOICE OF MATERIALS FOR PRODUCING DIMENSIONALLY STABLE LOAD-CARRYING STRUCTURES

© 2018

- V. E. Bitkin** First Deputy General Director, General Designer for Measuring Systems; LLC Special Development and Technology Bureau Plastik, Syzran, Russian Federation; [gksi@sktb-plastik.ru](mailto:gksi@sktb-plastik.ru)
- O. G. Zhidkova** Deputy General Designer for Scientific Research; LLC Special Development and Technology Bureau Plastik, Syzran, Russian Federation; [opriokr-prg@sktb-plastik.ru](mailto:opriokr-prg@sktb-plastik.ru)
- V. A. Komarov** Doctor of Science (Engineering), Professor; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [vkomarov@ssau.ru](mailto:vkomarov@ssau.ru)

The article deals with the problems of choosing materials for producing dimensionally stable load-carrying structures of space optical electronic complexes. Physical and mechanical properties of successfully applied and promising composite materials obtained by theoretical and experimental



research are presented. A comparative analysis of properties of carbon-filled plastics is given according to the percentage of filler content in a composite matrix and the elastic modulus of carbon fiber. Experimental data related to the properties of carbon-filled plastics based on various fibers are presented. The dependence of the temperature coefficient of linear expansion (TCLE) of various carbon-filled plastics with unidirectional and quasi-isotropic structures is studied theoretically and experimentally. The stability of TCLE is shown to be approximately equal to  $1 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  in the area with 50-60% volume filler content. The TCLEs and elastic moduli of carbon-filled plastics and optical glasses of telescope elements are compared. The task of developing a composite material with a TCLE value characteristic of titanium alloys is discussed. Recommendations for applying the analyzed composite materials in the development of dimensionally stable space structures are given.

*Composite materials; structures; dimensional stability; carbon fiber; epoxy binder; carbon-filled plastics; design.*

---

*Citation:* Bitkin V.E., Zhidkova O.G., Komarov V.A. Choice of materials for producing dimensionally stable load-carrying structures. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 1. P. 100-117. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-100-117

### References

1. Testoedov N.A., Dvirniy G.V., Permyakov M.Yu. Temperature deformation value definition of size stable reflectors. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva*. 2011. No. 2 (35). P. 67-71. (In Russ.)
2. Popov N.N., Filonov A.S., Dontsov G.A. Vursol A.V., Rodimkina E.Yu., Matveev D.S. Structural materials of optical modules for Earth's remote sensing. *Izvestia vuzov «Geodesy and aerophotography»*. 2012. No. 5. P. 101-105. (In Russ.)
3. Alieva S.G., Al'tman M.B., Ambartsumyan S.M. *Promyshlennyye alyuminievyye splavy* [Industrial aluminum alloys]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1984. 527 p.
4. Chechulin B.B., Ushkov S.S., Razuvaeva I.N., Gol'dfayn V.N. *Titanovyye splavy v mashinostroyeni* [Titanium alloys in mechanical engineering]. Leningrad: Mashinostroyeniye Publ., 1977. 248 p.
5. Abdulkadyrov M., Semenov A. Modern ways of production of astronomical and space mirrors. *Photonics*. 2015. No. 3 (51). P. 62-79. (In Russ.)
6. Komarov V.A. Theoretical basis for design of load-bearing structures produced using additive technologies. *Ontology of Designing*. 2017. V. 7, no. 2 (24). P. 191-206. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-191-206. (In Russ.)
7. Bitkin V.E., Denisov A.V., Zhidkova O.G., Bitkina O.V. Technological complex for manufacturing of high-precision dimensionally stable composite elements of structures of integrated type. *Composite Materials Constructions*. 2014. No. 1 (133). P. 18-23. (In Russ.)
8. Vasil'ev V.V. *Mekhanika konstruksiy iz kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of structures made of composite materials]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 272 p.
9. Aristov V.F., Khalimanovich V.I., Mironovich V.V., Isentyeva T.A., Gurov D.A. Cyanate ester coupling agents in aerospace industry. Catalytic properties of organometallic complexes and diazonium salts with complex anions in the curing reaction of cyanate ester coupling agents. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva*. 2013. No. 2 (48). P. 159-165. (In Russ.)
10. Komkov M.A., Tarasov V.A. *Tekhnologiya namotki kompozitnykh konstruksiy raket i sredstv porazheniya: uch. posobie* [Winding procedures for composite space rocket structures]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ., 2011. 431 p.
11. Vasiliev V.V., Morozov E.V. *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structural Elements*. Elsevier, 2013. 816 p.
12. Molodtsov G.A., Bitkin V.E., Simonov V.F., Urmansov F.F. *Formostabil'nyye intellektual'nyye konstruksii iz kompozitsionnykh materialov* [Size-stable and smart composite structures]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 2000. 352 p.

13. Bitkin V.E., Zhidkova O.G., Denisov A.V., Borodavin A.V., Mityushkina D.V., Rodionov A.V., Nonin A.S. Mathematical simulation for strain-stress state of optical telescope stable-size composite elements with finite-element method. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki*. 2016. V. 20, no. 4. P. 707-729. DOI: 10.14498/vsgtu1514. (In Russ.)
14. Polilov A.N., Tatous N.A. FRP strength criteria for some experimental effects substantiation. *Engineering and Automation Problems*. 2008. No. 3. P. 103-109. (In Russ.)
15. Komarov V.A., Kishov E.A., Charkviani R.V., Pavlov A.A. Numerical and experimental study of the strength of fabric carbon-epoxy composite structures. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2015. V. 14, no. 2. P. 106-112. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-2-106-112. (In Russ.)
16. Strizhalo V.A., Zemtsov M.P. Rigidity and Strength of Laminated Carbon Plastics under Uniaxial Loading. *Strength of Materials*. 2001. V. 33, Iss. 6. P. 548-555. DOI: 10.1023/A:1014126822257
17. Gunyaev G.M., Sorina T.G., Khoroshilova I.P., Rumyantsev A.F. Structural carbon-epoxy composites. *Aviation Industry*. 1984. No. 12. P. 41-45. (In Russ.)
18. GOST 25.601-80. Design calculation and strength testings. Methods of Mechanical testing of Polymeric Composite Materials Test for Tensile Properties on Plane Specimens at Normal, Elevated and Low Temperatures. Moscow: Izdatel'stvo Standartov Publ., 1980. 14 p. (In Russ.)
19. GOST 25.602-80. Design calculation and strength testings. Methods of Mechanical testing of Polymeric Composite Materials. Test for Compression Properties at normal, elevated and low temperatures. Moscow: Izdatel'stvo Standartov Publ., 1980. 18 p. (In Russ.)
20. GOST R 50578-93. Polymer composites. Plate distortion shear test. Moscow: Izdatel'stvo Standartov Publ., 1993. 15 p. (In Russ.)