

## ОЦЕНКА РЕАЛИЗАЦИИ УПРУГИХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН В УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТАХ

Жигун В.И., Плуме Э.З.

*Латвийский университет, Институт механики материалов, г. Рига, Латвия*

### АННОТАЦИЯ

Показано, что полимерная матрица способствует хорошей реализации упругих и прочностных свойств волокон в композитах. Осуществлены исследования для оценки реализации отмеченных свойств углеродных волокон в композитах с углеродной матрицей. Исследования проведены на двух типах углерод-углеродных композитов. Первый из них имел взаимно ортогональное расположение арматуры в направлениях осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Углерод-углеродный композит второго типа представлял собой трансверсально-изотропный материал, армированный в направлении оси  $z$ . Он имел сложную структуру армирования с так называемой звездообразной укладкой арматуры в плоскости  $xy$ . Волокна в нём располагались по трём направлениям ( $0^\circ \pm 60^\circ$ ) в основной плоскости армирования (в плоскости  $xy$ ), и перпендикулярно ей, в направлении  $z$ . Были рассмотрены две разновидности материала этого типа, имевшие отличия в диаметре арматуры и плотности композита. Выбранные материалы были испытаны на растяжение, сжатие и сдвиг. Полученные экспериментальные данные для их упругих и прочностных характеристик были сопоставлены с их расчётными значениями. Показано, что замена полимерной матрицы на углеродную незначительно отражается на значениях модулей упругости исследованных углерод-углеродных композитов. В то же время такая замена не только существенно снижает степень реализации предела прочности углеродных волокон в композитах, но и оказывает заметное отрицательное воздействие на их сдвиговые характеристики. Отмечено, что возможной причиной этого является наличие дефектов в углеродной матрице и её слабая адгезионная связь с волокнами. Наименьшая степень реализации прочностных свойств армируемых волокон имеет место при растяжении. Пределы прочности при растяжении исследованных углерод-углеродных композитов не превышают 24% от предела прочности их армирующих волокон. Композиционный материал со сложной схемой армирования показал большую чувствительность к указанной замене матрицы, чем ортогонально армированный.

**Ключевые слова:** углерод-углеродный композит; модуль упругости; модуль сдвига; предел прочности; волокно; матрица; структура армирования

## EVALUATION OF THE UTILIZATION OF CARBON FIBERS ELASTIC AND STRENGTH PROPERTIES IN CARBON-CARBON COMPOSITES

Zhigun V.I., Plume E.Z

*Institute of Polymer Mechanics, University of Latvia, Riga, Latvia*

### ABSTRACT

It has been shown that the polymer matrix promotes a good utilization of fibers elastic and strength properties in composites. Researches to estimate the utilization of the noted properties

of the carbon fibers in the composites with the carbon matrix have been studied. They have been carried out with two types of carbon-carbon composites. The first one had a mutually orthogonal arrangement of the reinforcements in the  $x$ ,  $y$  and  $z$  axial direction. The carbon-carbon composite of the second type was a transversal-isotropic material reinforced in the  $z$  axial direction. It had a complex structure with so-called star-like reinforcement lying in the  $xy$  plane. Its fibers were located in three directions ( $0+60^\circ$ ) in the main plain of reinforcement (in the  $xy$  plane) and perpendicular to it, in the  $z$  direction. The two types of this material were examined. They had differences in the diameter of reinforcement and in the density of composite. The tensile, compression and shearing of the selected material were tested. The received experimental data of their elastic and strength characteristics were compared with their calculated values. It has been shown that the impact of the replacement of the polymer matrix to the carbon matrix on the elastic modules values of the examined composites has not been significant. At the same time it replacement not only significantly reduces the degree of utilization of the carbon's fibers ultimate strength in composites, but also has a significant negative influence on their shearing characteristics. It has been noted that the possible reason of that is the presence of defects in the carbon matrix and the lack of its adhesive bond with fibers. The lowest degree of utilization of the reinforcing fibers strength properties in the examined composites is the case with the tensile loading. The ultimate strength of the examined carbon-carbon composites in the case of tensile doesn't exceed 24% of their reinforcing fibers ultimate strength. The composite material with the complex scheme of the reinforcement has shown higher sensitivity to the indicated matrix replacement than the orthogonal reinforced.

**Keywords:** carbon-carbon composite; modulus of elasticity; modulus of shear; ultimate strength; fiber; matrix; structure of the reinforcement

## ВВЕДЕНИЕ

Использование углеродных волокон в композитах с полимерной матрицей, как правило, обеспечивает хорошую степень реализации их упругих и прочностных свойств. Так, о хорошей реализации упругих свойств волокон свидетельствуют данные табл.1, приведённые из работы [1]. За степень реализации свойств здесь и далее принято отношение экспериментального значения определяемой характеристики к её расчётному значению, вычисленному по формулам (1-4).

Таблица 1.

Расчётные и экспериментальные значения упругих постоянных углепластиков.

Марка волокон	ВМН-4			ВЭН-210		ВМН-3
	1:0	1:1	1:2	1:0	1:1	
Укладка	1:0	1:1	1:2	1:0	1:1	переменная по толщине
$\mu$ , %	59	50	60	42	29	54
$E_x$	179,0	70,2	57,2	118,0	80,0	32,0
$E_x/E_1$	1,09	0,94	0,91	0,97	0,95	1,18
$G_{xy}$	3,90	3,15	2,36	3,80	2,50	3,90
$G_{xy}/G_{12}$	0,89	0,97	0,59	1,26	1,09	–
$G_{xy}^{45^\circ}$	–	33,2	35,5	50,0	35,0	16,3
$G_{xy}^{45^\circ}/G_{12}^{45^\circ}$	–	0,90	0,91	1,04	0,91	1,11
$E'$	280			350		224
$E''$	2,9					

Примечания:

1. Здесь и далее экспериментальные значения характеристик обозначены снизу буквенными индексами  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , а расчётные – цифровыми 1, 2, 3.
2. Характеристики волокон обозначены одним штрихом сверху, а матрицы – двумя.
3.  $\mu$  – коэффициент объёмного содержания волокон.
4. Модули упругости и сдвига приведены в ГПа.

Как видно, расчётные значения модулей упругости в направлениях армирования, в основном, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Существенные расхождения имеют место лишь для модулей сдвига  $G_{xy}$ . Это относится к углепластикам, изготовленным на основе волокон ВМН-4 и ВЭН-210. Первый из них показывает расчётные значения  $G_{12}$  существенно выше экспериментальных, а для второго – наоборот, экспериментальное значение на 26% выше расчётного. В то же время, для модулей сдвига в направлении  $45^\circ$  к направлению укладки волокон для обоих этих углепластиков имеет место хорошее согласование расчётных и экспериментальных данных.

Отмеченные выше отклонения одних значений от других, по мнению авторов работы [1], можно объяснить допущенными погрешностями при проведении эксперимента, а также недостаточно хорошим качеством материалов, – наличием пор и микротрещин в их структуре. Анализ результатов исследований, представленных в работе [2], также показывает хорошую реализацию упругих и прочностных свойств углеродных волокон в исследованных композитах. В данной работе рассмотрены углепластики, изготовленные на основе тканей, в которых волокна не подвержены изгибу. То есть, ткань изготавливалась из однонаправленных препрегов, ориентированных в заданных направлениях. Пакет этих препрегов в трансверсальном направлении прошивался тонкой нитью. Дано сопоставление упругих и прочностных свойств этих композитов с однонаправленными композитами, изготовленными из аналогичных препрегов. В работе [3] исследовано 9 различных видов образцов слоистого углепластика, изготовленного на основе матрицы Araldite LY-5052 и волокон Torayca T700S-12-к. Образцы отличались друг от друга укладкой волокон, количеством слоёв и толщиной. Сопоставление расчётных данных и результатов испытаний образцов на растяжение показало, что реализация упругих свойств волокон в исследованных композитах достигает 80...85%, а реализация прочностных свойств, в основном, составляет порядка 50%. В работе [4] отмечено, что степень реализации прочности углеродных волокон в углепластиках обычно составляет порядка 90...95%.

Иная картина наблюдается при рассмотрении композитов с углеродной матрицей (УУК). Несмотря на значительное количество работ, посвящённых этим материалам, данные о реализации свойств армирующих волокон в них весьма ограничены. В упомянутой выше работе [4] исследовалась реализация прочности углеродных волокон в однонаправленных УУК при растяжении. Оценка осуществлялась на композитах, изготовленных из волокон, состоящих из 3000 нитей с четырьмя различными модулями упругости, а именно, 241, 516, 724 и 894 ГПа. При этом прочность волокон отличалась несущественно, и составляла, соответственно, 2,7; 2,6; 2,4; 2,5 ГПа. На основе этих волокон изготавливались

образцы с эпоксидной и углеродной матрицей. Было установлено, что прочность первых трёх УУК составляет лишь 24%...35% от прочности аналогичных композитов с эпоксидной матрицей. Для четвёртого УУК она составила 79%. Отмечено, что до разрушения УУК происходят повреждения нитей в волокне и ослабление связи волокно-матрица. В работе [5] исследовалась изгибная прочность (при  $l/h = 80$ ) однонаправленных УУК, изготовленных на основе углеродных волокон со стандартным и высоким модулем упругости. Показано, что для УУК со стандартным модулем упругости реализация прочности волокон составляет лишь 25%. При этом имеет место хрупкое разрушение. Для композитов с высоким модулем упругости и изменённым режимом процесса графитизации реализация прочности составляет 69%. При этом наблюдается «псевдоподатливое разрушение» УУК. Отмечено влияние свойств карбонизации и графитизации на реализацию свойств волокон в УУК. Согласно работе [6], предел прочности при растяжении в направлении армирования некоторых УУК составляет лишь 5...20% от прочности доли армирующих волокон. Стремление повысить данный показатель УУК за счёт увеличения предела прочности армирующих волокон не привело к положительным результатам [7].

Ограниченность имеющихся в литературе данных о реализации упругих и прочностных свойств волокон в УУК затрудняет установление причин основных недостатков этих материалов, в частности, – относительно низких показателей пределов прочности при растяжении и сдвиге в направлениях основного армирования. Поэтому представляет практический интерес оценить степень реализации упругих и прочностных свойств армирующих волокон в УУК, а также выявить, хотя бы в первом приближении, роль углеродной матрицы в формировании отмеченных свойств УУК. Решение этих задач и составляет цель настоящей работы.

## 1. ИССЛЕДОВАННЫЕ УУК И ИХ УПРУГИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА

Исследования проводились на УУК с двумя различными структурами армирования, которые нашли широкое использование в практических целях [7,8].

Структуры армирования исследованных композитов представлены на рис.1.

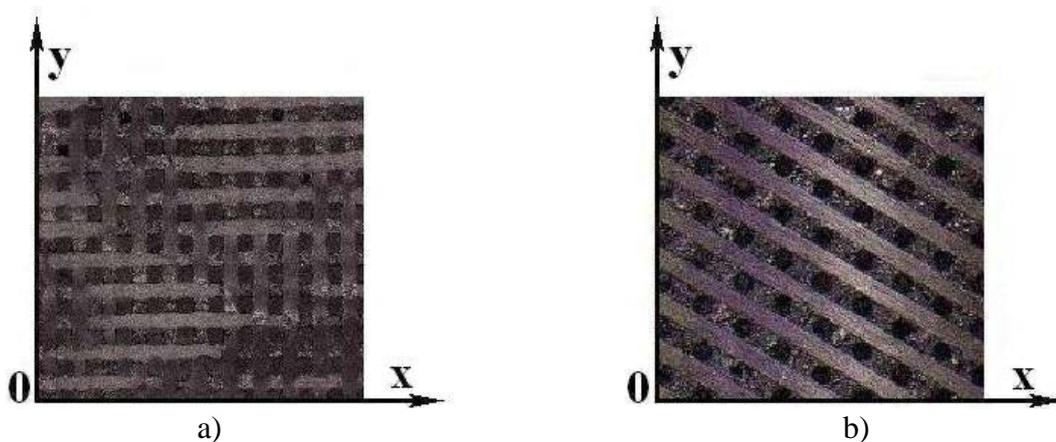


Рис.1. Структуры армирования исследованных композитов: а) – ортогонально армированный в трёх направлениях (УУК-1); б) – с укладкой волокон в плоскости  $xu$  под углами  $0^\circ(y)\pm 60^\circ$  и в трансверсальном направлении (УУК-2).

Первый тип УУК имел взаимно ортогональное расположение арматуры в направлениях осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Отношение арматуры по направлениям армирования  $x:y:z$  составляло 2:2:1. Плотность композита составляла  $\gamma = 1,65 \dots 1,7$  г/см<sup>3</sup>, а относительное объёмное содержание арматуры в нём было равным  $\mu = 0,30$ . В качестве арматуры использовались жгуты из углеродных волокон, модуль упругости которых составлял  $E' = (2,0 \dots 2,5) \times 10^5$  МН/м<sup>2</sup>, а прочность при растяжении  $\sigma' = 3 \times 10^3$  МН/м<sup>2</sup>. В качестве углеродной матрицы служил пироуглерод, полученный газофазным методом.

Второй тип УУК имел сложную структуру армирования. Волокна располагались по четырём направлениям: по трём – в основной плоскости армирования (в плоскости  $xy$ ), и перпендикулярно ей (в направлении оси  $z$ ). Такая структура армирования, в которой арматура расположена в одной плоскости по направлениям  $0^\circ \pm 60^\circ$  к одной из осей,  $x$  или  $y$ , создаёт трансверсально-изотропный материал [9]. Исследовано два композитных материала такой структуры, УУК-2а и УУК-2б, которые имели небольшие различия по плотности и по объёмному содержанию арматуры. УУК-2а имел плотность  $\gamma = 1,86$  г/см<sup>3</sup> и относительное объёмное содержание  $\mu = 0,388$ , а УУК-2б –  $\gamma = 1,88$  г/см<sup>3</sup>;  $\mu = 0,396$ . Кроме того, имелось также различие в диаметре арматуры (твёрдого жгута, используемого для армирования). Для УУК-2а  $d = 0,9$  мм, а для УУК-2б  $d = 0,7$  мм. Модуль упругости армирующих жгутов составлял  $E' = 2,5 \times 10^5$  МН/м<sup>2</sup>, а прочность при растяжении  $\sigma' = 2,5 \times 10^3$  МН/м<sup>2</sup>. Матрица полностью соответствовала матрице УУК-1. Распределение арматуры по направлениям армирования для обоих материалов было равномерным, и для каждого направления составляло 0,097 и 0,099, соответственно, для УУК-2а и УУК-2б. Все исследованные композиты изготавливались на основе каркасов по одной и той же технологии.

Выбранные типы структур армирования позволяют не только полнее исследовать реализацию упругих и прочностных свойств волокон в УУК, но и оценить роль укладки волокон в них. Опыты проводились на растяжение, сжатие и сдвиг, что даёт возможность полнее установить границы эффективного использования этих УУК. Экспериментальная оценка упругих и прочностных свойств УУК осуществлялась на машине МТС 809.40 согласно требованиям ГОСТ25601-80 и ГОСТ25602-80. Подробное описание таких исследований изложено в работах [10,11]. Экспериментальные данные по оценке модулей упругости и сдвига всех трёх исследованных УУК собраны в табл.2.

Они наглядно свидетельствуют о преимуществах и недостатках исследованных композитов. Недостатком УУК-1 с взаимно ортогональной укладкой волокон по направлениям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  является их низкая сдвиговая жёсткость в плоскости основного армирования (плоскости  $xy$ ). Модуль сдвига  $G_{xy}$  весьма существенно (в 2,7...3,7 раза) уступает по значению модулю сдвига  $G_{xy}$  УУК-2 с так называемой звездообразной укладкой арматуры в плоскости  $xy$ . Кроме того, УУК-1 также уступает УУК-2 по значению модуля упругости в трансверсальном направлении  $E_z$ . Его значения в 1,7 раз меньше, чем для УУК-2а и почти в 2 раза меньше, чем для УУК-2б. Причём, заметного различия

в значениях модуля упругости  $E_y$  для исследованных композитов не наблюдается. Некоторое преимущество УУК-1 перед другими указанными композитами наблюдается лишь в сдвиговой жёсткости в плоскости  $xz$ . Модуль сдвига  $G_{xz}$  в 1,3-1,6 раза превосходит значения  $G_{xz}$  УУК-2. Необходимо отметить, что УУК-2 достаточно чувствительны к изменению диаметра арматуры. Так снижение диаметра твёрдых жгутов с 0,9 мм (УУК-2а) до 0,7 мм (УУК-2б) заметно сказывается на изменении их упругих характеристик (см. табл.2).

Таблица 2.

Модули упругости и сдвига (ГПа) УУК.

Материал	УУК-1	УУК-2а	УУК-2б
$E_y$	30,1	32,7	28,4
$E_{y \min} - E_{y \max}$	29,3-30,8	28,6-36,7	25,8-29,6
$\nu$ , %	2,9	9,1	5,6
$E_z$	20,2	35,1	39,5
$E_{z \min} - E_{z \max}$	18,8-22,1	34,0-41,9	38,5-40,5
$\nu$ , %	6,3	8,8	5,1
$G_{xy}$	2,1	5,6	7,7
$G_{xy \min} - G_{xy \max}$	1,9-2,1	5,1-5,7	7,2-8,4
$\nu$ , %	5,6	3,9	6,1
$G_{xz}$	1,9	1,2	1,5
$G_{xz \min} - G_{xz \max}$	1,8-2,1	1,2-1,3	1,3-1,7
$\nu$ , %	5,1	5,8	3,2

Примечания:

1. Здесь и далее через  $\nu$  обозначен коэффициент вариации.
2. На каждое значение характеристики испытано по 5 образцов.

В отличие от упругих характеристик, для прочностных свойств рассматриваемых двух структурных типов УУК наблюдается иная картина. Эксперименты показывают (табл.3), что предел прочности при растяжении и, в особенности, при сжатии в направлении армирования (оси  $y$ ) УУК-1 существенно выше аналогичной характеристики УУК-2а и УУК-2б. При этом большого различия между объёмными коэффициентами армирования и свойствами исходных компонентов нет.

Обратное явление имеет место для пределов прочности при сдвиге. Согласно данным табл.3, УУК-2а и УУК-2б имеют значения пределов прочности при сдвиге, примерно в 1,5...1,8 раз выше, чем УУК-1. При этом плотность последнего лишь на 13...17% ниже первых двух, а объёмное содержание волокон в плоскости  $xu$  всего на 21...24% ниже, чем в первых двух. Одной из возможных причин такого превышения УУК-2 перед УУК-1 является заметное различие в значениях коэффициента объёмного армирования  $\mu_y$  этих композитов. Так, для УУК-2а и УУК-2б оно в 1,62 и в 1,65 раз соответственно превышает  $\mu_z$  УУК-1. Не исключено влияние на эти характеристики наличия большого числа пор и других различного рода дефектов в структурах УУК и слабой адгезией между волокном и матрицей [12]. Некоторые из дефектов хорошо видны на (рис.2).

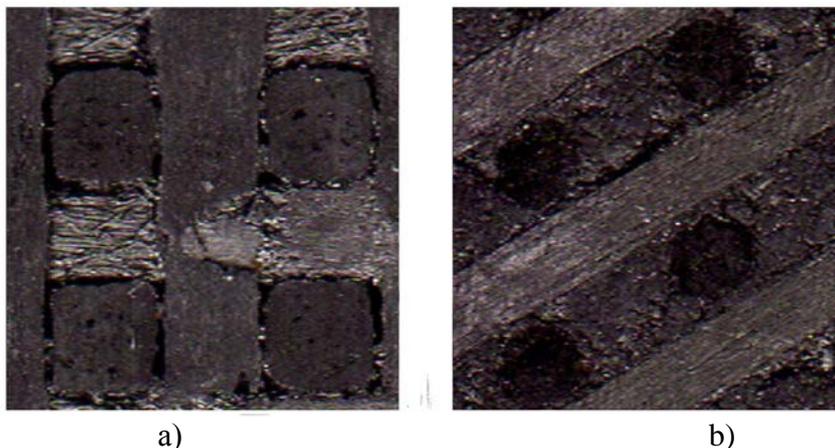
Таблица 3.

## Прочностные свойства (МПа) УУК.

Материал	УУК-1	УУК-2а	УУК-2б
$\sigma_y^b$	100	73	69
$\sigma_{y \min}^b - \sigma_{y \max}^b$	95-104	68-78	65-74
$\nu, \%$	4,3	5,5	6,1
$\sigma_y^{-b}$	290	116	112
$\sigma_{y \min}^{-b} - \sigma_{y \max}^{-b}$	270-310	112-123	108-116
$\nu, \%$	6,8	6,7	3,8
$\sigma_z^{-b}$	240	155	158
$\sigma_{z \min}^{-b} - \sigma_{z \max}^{-b}$	230-270	153-158	152-166
$\nu, \%$	5,8	2,1	3,7
$\sigma_{xy}$	35,4	62	75
$\sigma_{xy \min} - \sigma_{xy \max}$	31-39	57-64	69-84
$\nu, \%$	10,6	4,6	7,7
$\sigma_{xz}$	28,5	54	41
$\sigma_{xz \min} - \sigma_{xz \max}$	26-32	50-58	37-44
$\nu, \%$	9,0	5,9	6,8

Примечание:

На каждое значение характеристики испытано по 6 образцов.



а)

б)

Рис.2. Структура УУК при нагружении на сжатие до напряжений, составляющих 50% от разрушающих: а) – УУК-1; б) – УУК-2а.

Более полную информацию о преимуществах и недостатках рассматриваемых УУК можно получить по данным реализации свойств армирующих волокон в них. Для этого сопоставим расчётные и экспериментальные значения рассматриваемых характеристик.

## 2. РАСЧЁТ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК УУК

Расчёт модулей упругости и сдвига УУК с взаимно ортогональным расположением арматуры по направлениям осей  $x, y, z$  проводился по зависимостям [8], которые представляются в виде

$$E_i = \mu_i E' + \frac{(1 + \mu_k) \left[ (1 - \mu_i - \mu_j)^2 \mu_i + (1 + \mu_i + \mu_j) \mu_j \right] E''}{(1 - \mu_k)(1 - \mu_i - \mu_j)(\mu_i + \mu_j)} \quad (1)$$

$$G_{ij} = \frac{1 + \mu_i + \mu_j}{(1 - \mu_i - \mu_j)(1 - \mu_k)} G''; \quad i, j, k = 1, 2, 3; \quad i \neq j \neq k \quad (2)$$

Эти зависимости, как показано в отмеченной работе, хорошо описывают модули упругости и сдвига композитов аналогичных структур с полимерной матрицей, армированных волокнами различных видов. Упругие и прочностные свойства полимерной и углеродной матриц отличаются весьма значительно [6,8]. Полимерная матрица уступает по этим показателям углеродной. Поэтому представляет практический интерес оценить вклад последней в значения определяемых характеристик.

С целью более наглядного представления о вкладе матрицы в значения определяемых характеристик для рассматриваемого типа УУК-1 с заданным характером распределения арматуры по направлениям ( $x : y : z = 2 : 2 : 1$ ), формулы (1) и (2) можно представить как

$$E_1 = E_2 = \mu_1 E' + 1,357 E''; \quad E_3 = \mu_3 E' + 1,568 E'';$$

$$G_{12} = 1,74 G''; \quad G_{13} = 1,64 G''.$$

В случае равномерного расположения арматуры по направлениям  $x : y : z = 1 : 1 : 1$ , имеем

$$E_1 = E_2 = E_3 = \mu_1 E' + 1,41 E''; \quad G_{12} = G_{13} = 1,67 G''.$$

Здесь, как и раньше, одним штрихом сверху отмечена арматура, а двумя – матрица.

Приведённые зависимости чётко отражают роль матрицы в формировании упругих свойств композита. Как нетрудно заметить из упрощённых зависимостей, использование углеродной матрицы позволяет (теоретически) вносить существенный вклад в повышение упругих свойств УУК. О достоверности этого предположения можно судить только по реализации свойств матрицы в исследованных композитах.

Для расчёта упругих характеристик композита трансвесально-изотропного типа, УУК-2, используем зависимости работы [1], предложенные для слоистых композитов с подобным расположением арматуры в основной плоскости армирования

$$E_y = B_{yy} - \frac{B_{xy}^2}{B_{xx}}; \quad E_x = B_{xx} - \frac{B_{xy}^2}{B_{yy}}; \quad \nu_{xy} = \frac{B_{xy}}{B_{xx}}; \quad B_{yy} = B_{xx} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned}
B_{yy} &= \frac{E'}{4} \left\{ \frac{[\mu + (1-\mu)\beta](3 + 3\alpha^2 + 2\nu_1\alpha^2)}{2(1-\nu_1^2\alpha^2)} + \frac{\beta}{(1+\nu')\beta\mu + (1+\nu^*)(1-\mu)} \right\}; \\
B_{xy} &= \frac{E'}{4} \left\{ \frac{[\mu + (1-\mu)\beta](1 + \alpha^2 + 6\nu_1\alpha^2)}{2(1-\nu_1^2\alpha^2)} - \frac{\beta}{(1+\nu')\beta\mu + (1+\nu^*)(1-\mu)} \right\}; \\
G_{xy} &= \frac{E'}{4} \left\{ \frac{[\mu + (1-\mu)\beta](1 + \alpha^2 - 2\nu_1\alpha^2)}{2(1-\nu_1^2\alpha^2)} + \frac{\beta}{(1+\nu')\beta\mu + (1+\nu^*)(1-\mu)} \right\}.
\end{aligned} \tag{4}$$

Здесь

$$\alpha^2 = \frac{1}{1 + \mu(1-\mu) \frac{(1-\beta)^2 - (\nu')^2(\bar{\nu}-\beta)^2}{\beta}}; \quad \beta = \frac{E^*}{E'}; \quad \bar{\nu} = \frac{\nu^*}{\nu'}; \quad \nu_1 = \nu_{21} = \nu'[\mu + (1-\mu)\bar{\nu}];$$

$E', E^*, \nu', \nu^*$  – соответственно, модули упругости и коэффициенты Пуассона углеродных волокон (арматуры) и приведённой матрицы. Модуль упругости приведённой матрицы определяется по формуле

$$E^* = \frac{1 + \mu_3}{1 - \mu_3} E''$$

Здесь  $E''$  – модуль упругости связующего,  $\mu_3$  – относительное объёмное содержание волокон трансверсального ( $z$ ) направления.

Представленные зависимости проверены на трансверсально-изотропных боро- и углепластиках с полимерной матрицей [1]. Отношение расчётных значений модулей упругости и сдвига к экспериментальным для боропластиков составляет

$$\frac{E_1}{E_x} = 0,87; \quad \frac{E_1^{45^\circ}}{E_x^{45^\circ}} = 0,89; \quad \frac{E_2}{E_y} = 0,87; \quad \frac{G_{12}}{G_{xy}} = 0,88;$$

$$\text{а для углепластиков} - \frac{E_1}{E_x} = 0,85; \quad \frac{E_2}{E_y} = 1,11; \quad \frac{G_{12}}{G_{xy}} = 0,85; \quad \frac{G_{12}^{45^\circ}}{G_{xy}^{45^\circ}} = 0,85.$$

Индексом  $45^\circ$  сверху отмечены характеристики под углом к главным осям упругости.

Модули упругости  $E_3$  и сдвига  $G_{13}$  УУК-2 вычислялись по формулам (1), (2) при допущении, что весь объём армирующих волокон, расположенных в плоскости  $xu$ , равномерно распределён только по двум ортогональным направлениям

$$\mu_i = \mu_j = \frac{\mu - \mu_z}{2}.$$

Очевидно, что такое допущение вносит некоторые погрешности при оценке влияния жёсткости углеродной матрицы на вычисляемые значения  $E_3$  УУК-2, но качественная картина при этом вряд ли изменится.

Расчётные значения упругих характеристик для исследованных УУК приведены в табл.4. Исходные данные, принятые при расчётах для УУК-1 и УУК-2 составляли, соответственно:  $E' = 225$  ГПа;  $E'' = 220$  ГПа;  $\nu' = \nu^* = 0,25$ ;  $E'' = 2,9$  ГПа;  $\nu'' = 0,35$ .

Таблица 4.  
Сопоставление расчётных и экспериментальных значений модулей упругости и сдвига (ГПа) исследованных композитов.

Материал	УУК-1			УУК-2а			УУК-2б		
	$E''$	$E_2$	$E_y/E_2$	$E_3$	$E_z/E_3$	$G_{12}$	$G_{xy}/G_{12}$	$G_{13}$	$G_{xz}/G_{13}$
$E''$	2,90	4,27	6,11	2,90	4,27	6,11	2,90	4,27	6,11
$E_2$	30,94	32,79	35,29	28,45	30,34	32,84	28,95	28,88	31,37
$E_y/E_2$	0,97	0,92	0,85	1,15	1,09	1,00	0,98	0,98	0,91
$E_3$	18,05	20,20	23,08	29,25	31,62	34,80	30,30	32,92	36,43
$E_z/E_3$	1,11	1,00	0,88	1,18	1,09	0,98	1,30	1,20	1,09
$G_{12}$	1,87	2,99	4,27	10,75	11,56	12,53	11,10	12,75	15,43
$G_{xy}/G_{12}$	1,11	0,69	0,49	0,52	0,49	0,45	0,69	0,60	0,50
$G_{13}$	1,75	2,80	4,0	2,05	3,28	4,68	2,31	3,41	4,89
$G_{xz}/G_{13}$	1,09	0,68	0,48	0,59	0,37	0,26	0,66	0,43	0,30

### 3. ОЦЕНКА РЕАЛИЗАЦИИ СВОЙСТВ АРМИРУЮЩИХ ВОЛОКОН В УУК

Наличие расчётных и экспериментальных данных для модулей упругости и сдвига исследованных УУК (табл.4) позволяет, хотя бы в первом приближении, оценить эффективность использования в них выбранного вида армирующих волокон. Для полного решения этой задачи требуются более точные сведения о свойствах используемых компонентов и их содержании в исходном материале, а также данные о зависимости этих компонентов от технологического процесса изготовления УУК. Следует отметить, что реальные значения упругих и прочностных характеристик углеродной матрицы точно неизвестны. Поэтому расчёт упругих свойств исследованных композитов производился для одного значения модуля упругости, соответствующего исходной полимерной матрице, и для двух значений модуля упругости углеродной матрицы, соответствующих чистому графиту, поперёк и вдоль волокон (см. табл.4). Это обусловлено установлением отличительных особенностей упругих и прочностных характеристик исходного композита с полимерной матрицей относительно характеристик УУК с аналогичными структурой и содержанием исходных компонентов. В связи с этим здесь, наряду с расчётными значениями характеристик, приведены также их отношения к экспериментальным данным для каждого УУК. Из приведённых в табл.4 данных видно, что экспериментальные значения модуля упругости  $E_y$  в плоскости основного армирования, в основном, хорошо согласуются с расчётными его значениями. Исключение составляют лишь две позиции: УУК-1 с модулем упругости матрицы 6,11 ГПа и УУК-2а с модулем упругости матрицы 2,9 ГПа, где разница расчётных и экспериментальных значений составляет 15%. Причём, для УУК-1 экспериментальное значение ниже расчётного, а для УУК-2а имеет место обратная картина. Аналогичное явление имеет место и для модуля упругости отмеченных композитов в трансверсальном направлении  $E_z$ . А именно, экспериментальные значения  $E_z$  для всех трёх значений модулей упругости матрицы выше расчётных на 9...30%. То есть, степень реализации модуля упругости углеродных волокон в исследованных

композитах достаточно хорошая. Однако существенной зависимости этих характеристик от жёсткости углеродной матрицы не наблюдается. Так, изменение  $E''$  матрицы в 2,1 раза (с 2,90 до 6,11 ГПа), способствует увеличению значений  $E_2$  и  $E_3$  УУК-1 лишь на 16% и 27% соответственно (см. табл.4). А для УУК-2а и УУК-2б повышение  $E_2$  и  $E_3$  составляет, соответственно, 15% и 18% для УУК-2а, и 8% и 19% для УУК-2б. То есть, замена полимерной матрицы на углеродную не оказывает существенного влияния на модули упругости композитов. Рассматривая значения модулей сдвига, можно заметить их значительную чувствительность к изменению типа матрицы. Так, при значении модуля упругости углеродной матрицы, равном значению модуля упругости полимерной матрицы (2,9 ГПа), расчётные значения модулей сдвига  $G_{xy}$  и  $G_{xz}$  УУК-1 хорошо согласуются с их экспериментальными значениями. Причём последние выше расчётных на 11% и 9% соответственно. То есть, реализация сдвиговых свойств волокон и матрицы в УУК-1 высокая. Увеличение модуля упругости матрицы снижает степень её реализации, и чем выше модуль упругости углеродной матрицы, тем ниже степень реализации свойств волокон и матрицы в УУК. Для рассматриваемого композита УУК-1 с модулем упругости матрицы 6,11 ГПа степень реализации сдвиговых свойств компонентов в нём составляет: 49% для  $G_{xy}$  и 48% для  $G_{xz}$ . Особое внимание привлекают сдвиговые свойства УУК-2, где они в значительной мере формируются укладкой волокон. Степень реализации свойств компонентов в УУК-2а для  $G_{xy}$  не превышает 52%, а для  $G_{xz}$  – 59%, в то время как для УУК-2б эти показатели составляют 69% для  $G_{xy}$  и 66% для  $G_{xz}$ . При этом следует отметить, что для всех трёх исследованных УУК наибольшая степень реализации упругих свойств компонентов в них имеет место при меньших значениях модуля упругости матрицы, то есть при её значении, равном 2,9 ГПа.

В отличие от расчёта упругих свойств, теоретическое определение пределов прочности, даже для слоистых композитов на основе полимерной матрицы, в настоящее время представляет определённые трудности. Такое положение в некоторой степени затрудняет проведение точной оценки реализации прочностных свойств армирующих волокон в УУК. Поэтому для качественного решения этой задачи воспользуемся элементарным методом суммирования, позволяющим оценить предел прочности при растяжении в направлениях армирования без учёта влияния расположения волокон других направлений. Необходимые для расчёта данные:  $\sigma' = 3,0$  ГПа;  $\mu_z = 0,06$ ;  $\mu_x = \mu_y = 0,12$  – для УУК-1;  $\sigma' = 2,5$  ГПа;  $\mu_z = \mu_x = \mu_y = 0,097$  – для УУК-2а;  $\sigma' = 2,5$  ГПа;  $\mu_z = \mu_x = \mu_y = 0,099$  – для УУК-2б. Прочность углеродной матрицы принята равной 75 МПа [6]. Полученные расчётные значения для трёх УУК собраны в табл.5. В ней представлены также отношения экспериментальных значений определяемых характеристик к их вычисленным значениям на основе свойств исходных компонент и их объёмного содержания. Анализ этих данных показывает, что степень реализации прочностных свойств углеродных волокон в исследованных УУК при нагружении на растяжение не превышает 24%. В случае нагружения УУК на сжатие значения этого показателя оказываются существенно более высокими из-за влияния поперечного армирования.

Таблица 5.

Расчётные значения пределов прочности (МПа) УУК и их сопоставление с экспериментальными данными.

Материал	УУК-1	УУК-2а	УУК-2б
$\sigma_2$	426	310	315
$\sigma_y^b / \sigma_2$	0,24	0,24	0,22
$\sigma_2^-$	426	310	315
$\sigma_y^{b-} / \sigma_2^-$	0,68	0,37	0,36
$\sigma_3^-$	251	310	315
$\sigma_z^{b-} / \sigma_3^-$	0,96	0,50	0,50

Примечание:

Предел прочности обозначен сверху буквой, а характеристика при сжатии – знаком «-».

### ВЫВОДЫ

1. Замена полимерной матрицы на углеродную незначительно отражается на значениях модулей упругости, исследованных УУК, но существенно снижает их сдвиговые и прочностные свойства.
2. Степень реализации сдвиговых свойств волокон и матрицы в исследованных композитах с модулем упругости матрицы 6,11 ГПа не превышает 50%.
3. Степень реализации прочностных свойств углеродных волокон в исследованных композитах при растяжении не превышает 24%, а при сжатии в направлении  $y$  для УУК-1 составляет 68%, а в направлении  $z$  – 96%; степень реализации прочностных свойств углеродных волокон в УУК-2 при сжатии не превышает 50%.
4. Композиционный материал со сложной схемой армирования показал большую чувствительность к указанной замене матрицы, чем ортогонально армированный. Но это заметно сказывается лишь на значениях модуля сдвига  $G_{xz}$  и реализации прочностных свойств волокон при сжатии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гуняев Г.М., Жигун И.Г., Перов Б.В., Поляков В.А., Булавс Ф.Я., Кобец Л.П., Сорина Т.Г., Ярцев В.А., Морозов О.А. *Механические свойства эпоксидных боро- и углепластиков*. – М.: ОНТИ, 1973. – 101 с.
2. Vallons K. *The behavior of carbonfibre-epoxy NCF composites under various mechanical loading conditions / Doctoral dissertation*. – Dept. of Metallurgy and Materials Engineering. Katholieke Universiteit Leuven. – 2009. – 246 p.
3. Rahmani H., Najafi S.M., Ashori A., Gorkiz M. *Elastic properties of carbon fibre-reinforced epoxy composites // Polymers and Polymer Composites*. – 2015. – Vol.23. – No.7. – Pp.475-481.
4. Zaldivar R.J., Rellick G.S., Yang J.M. *Fiber strength utilization in carbon/carbon composites // J. of Materials Research*. – 1993. – Vol.8. – Pp.501-511.
5. Appleyard S.P., Rand B., Ahearn C.E. *Processing, structure and properties of pitch-based carbon-carbon composites / 40<sup>th</sup> Intern. Sampe Symposium, Proceedings*. Anaheim, CA. – 1995. – Pp.260-264.

6. Прохоров В.Ю., Дьяконов А.Ю., Костогорова О.Я. *Поиск путей реализации прочности углеродных волокон в углерод-углеродных композиционных материалах* // Межд. симп. «Надёжность и качество». Труды – 2006. – Т.2. – С.82-84.
7. Потапов А.М. *Перспективы использования углерод-углеродных композиционных материалов на основе вискозных углеродных волокон для потребностей ракетно-космической техники* // ВАНТ. – 2015. – №5(99). – С.152-156.
8. Васильев В.В. и др. *Композиционные материалы: Справочник*. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
9. Бидерман В.Л. *Упругость и прочность анизотропных стеклопластиков* // Расчёты на прочность. – Вып.11. – М.: Машиностроение, 1965. – С.3-30.
10. Жигун В.И., Павелко И.В. *Оценка влияния параметров образцов на механические свойства углерод-углеродных композитов* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2013. – Т.9. – №2. – С.196-210.
11. Жигун В.И., Павелко И.В. *Оценка прочности углерод-углеродных композитов при поперечном изгибе и при сдвиге* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2014. – Т.20. – №3. – С.375-388.
12. Долгодворов А.В. *Влияние структуры углерод-углеродного материала на механические свойства* // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2014. – №37. – С.187-201.

#### REFERENCES

1. Gunyaev G.M., Zhigun I.G., Perov B.V., Polyakov V.A., Bulavs F.J., Kobec L.P., Sorina T.G., Yarcsev V.A., Morozov O.A. *Mekhanicheskie svoistva epoksidnykh boro- i ugleplastikov [Mechanical properties of epoxy boron and carbon plastics]*. Moskva, ONTI, 1973, 101 p.
2. Vallons K. *The behavior of carbonfibre-epoxy NCF composites under various mechanical loading conditions / Doctoral dissertation*. Dept. of Metallurgy and Materials Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, 2009, 246 p.
3. Rahmani H., Najafi S.M., Ashori A., Gorliz M. *Elastic properties of carbon fibre-reinforced epoxy composites*. Polymers and Polymer Composites, 2015, Vol.23, No.7, Pp.475-481.
4. Zaldivar R.J., Rellick G.S., Yang J.M. *Fiber strength utilization in carbon / carbon composites*. J. of Materials Research, 1993, Vol.8, Pp.501-511.
5. Appleyard S.P., Rand B., Ahearn C.E. *Processing, structure and properties of pitch-based carbon-carbon composites*. 40<sup>th</sup> International Sampe Symposium, Proceedings, Anaheim, CA, 1995, Pp.260-264.
6. Prohorov V.Y., Djakonov A.Y., Kostogorova O.J. *Poisk putei realizatsii prochnosti uglerodnykh volokon v uglerod-uglerodnykh kompozitsionnykh materialakh [The search of ways of realization of the strength of carbon fibers in carbon-carbon composite materials]*. Intern. Symp. «Reliability and quality», Proceedings 2006, Vol.2, Pp.82-84.
7. Potapov A.M. *Perspektivy ispol'zovaniia uglerod-uglerodnykh kompozitsionnykh materialov na osnove viskoznykh uglerodnykh volokon dlia potrebnostei raketno-kosmicheskoi tekhniki [Prospects in using carbon-carbon composite materials based on viscose carbon fibers for the space technology needs]*. VANT, 2015, No.5, Pp.152-156.

8. Vasil'ev V.V., etc. *Kompozitsionnye materialy: Spravochnik [Composite materials: Handbook]*. Moskva, Mashinostroenie, 1990, 512 p.
9. Biderman V.L. *Uprugost' i prochnost' anizotropnykh stekloplastikov [Elasticity and strength of anisotropic GFRP]*. Strength analysis. Iss.11, Moskva, Mashinostroenie, 1965, Pp.3-30.
10. Zhigun V.I., Pavelko I.V. *Otsenka vliianiia parametrov obrazcov na mekhanicheskie svoistva uglerod-uglerodnykh kompozitov [Effect of parameters of samples on mechanical properties of carbon-carbon composites]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2013, Vol.19, No.2, Pp.196-210.
11. Zhigun V.I., Pavelko I.V. *Otsenka prochnosti uglerod-uglerodnykh kompozitov pri poperechnom izgibe i pri sdvige [Assessment of the strength of the carbon-carbon composites under transverse flexure and under shear]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2014, Vol.20, No.3, Pp.375-388.
12. Dolgodvorov A.V. *Vliianie strukturi uglerod-uglerodnogo materiala na mekhanicheskie svoistva [The effect of structure of carbon-carbon material on its mechanical properties]*. Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaia tekhnika, 2014, No.37, Pp.187-201.

Поступила в редакцию 28 июня 2017 года

---

Сведения об авторах:

Жигун Валерий Иванович – д.т.н., н.с., Латвийский университет, Институт механики материалов, г. Рига, Латвия; e-mail: [goracij.goracij@yahoo.com](mailto:goracij.goracij@yahoo.com)

Плуме Эгил Зигурдович – д.и.н., дир., Латвийский университет, Институт механики материалов, г. Рига, Латвия; e-mail: [egils@pmi.lv](mailto:egils@pmi.lv)