

УДК 539.3

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА УПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕРОД - УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ

Жигун В.И.¹, Плуме Э.З.¹, Зицанс Я.Я.², Мерийс-Мери Р.В.²¹Латвийский университет, Институт механики материалов, г. Рига, Латвия²Рижский технический университет, г. Рига, Латвия

АННОТАЦИЯ

В настоящей работе исследовано влияние ряда структурных параметров на упругие характеристики углерод-углеродных композитов. Рассмотрены два типа таких материалов, имеющие различные схемы армирования: с ортогональной укладкой волокон в трёх направлениях и с расположением волокон в плоскости xu под углами $0^\circ(y)$, $\pm 60^\circ$, а также в трансверсальном направлении. Материал второго типа имел три разновидности, отличающиеся характером распределения волокон направления z по осям x , y , направления y по осям z , x , и диаметром армированных жгутов. Проведено экспериментальное исследование этих композитов при четырёх различных видах нагружения: при растяжении, сжатии, изгибе и сдвиге. Полученные экспериментальные данные сопоставлены с расчётными. Оценено влияние диаметра арматуры и плотности её укладки на упругие характеристики исследованных материалов. Показано, что композиты с меньшим диаметром армирующих жгутов имеют более высокие показатели модулей упругости и сдвига. Уменьшение диаметра армирующих жгутов способствует повышению плотности их укладки при таком же объёмном содержании и оказывает положительное влияние на упругие свойства. Рассмотрена роль изменения объёма трансверсального армирования на свойства исследованных композитов. Показано, что даже незначительное содержание арматуры в направлении z (до 3%) приводит к значительному улучшению свойств материала в этом направлении без существенного снижения упругих характеристик в других направлениях. Исследовано влияние схем армирования на формирование упругих свойств углерод-углеродных композитов. Показано, что трёхмерно армированные углерод-углеродные композиты с укладкой волокон по направлениям 0° , $\pm 60^\circ$ позволяют эффективно управлять упругими свойствами в заданных направлениях за счёт перераспределения объёма волокон по направлениям армирования.

Ключевые слова: углерод-углеродный композит; модуль упругости; модуль сдвига; структура армирования

EVALUATION OF THE EFFECT OF STRUCTURAL PARAMETERS ON ELASTIC CHARACTERISTICS OF CARBON-CARBON MATERIALS

Zhigun V.I.¹, Plume E.Z.¹, Zicans J.J.², Merijs-Meri R.V.²¹Institute of Material Mechanics, University of Latvia, Riga, Latvia²Riga Technical University, Riga, Latvia

ABSTRACT

This work is devoted to exploring of few structural parameters effect on elastic characteristics of carbon-carbon composites. Two such material types have been investigated.

They have different systems of reinforcing: with orthogonal fibers arrangement in three directions, and with fibers arrangement in the xy plane with angles $0^\circ(y)$, $\pm 60^\circ$ and in transversal direction. The material of the second type had three varieties which differ with the character of fibers allocation of z direction in x,y axis, of y direction in z,x axis, and with the diameter of reinforced bundles. The experimental research of these composites under four different types of loadings (tension, compression, bending and shearing) is made. The received experimental data are compared with the calculated data. The effect of diameter of reinforcement and its arrangement density on elastic characteristics of researching materials has been evaluated. It's shown that composites with the smaller diameter of reinforcing bundles have higher values of elasticity modulus and shear modulus. The reduction of reinforcing bundles diameter contributes to their layup density with the same volumetric content and has a beneficial effect on their elastic properties. The effect of changing of volume of transversal reinforcing on the studied composites characteristics has been reviewed. It's shown that even insignificant content of reinforcement in the direction z (to 3%) leads to significant properties increasing of the material in that direction without important reduction of elastic characteristics in another direction. The effect of reinforcement design on formation of carbon-carbon composites properties has been investigated. It's shown that three-dimensional reinforced carbon-carbon composites with fibers arrangement in the directions 0° , $\pm 60^\circ$ help to manage effectively of elastic characteristics in specified direction because of fibers volume relocation in reinforcing direction.

Keywords: carbon-carbon composite; modulus of elasticity; modulus of shear; structure of the reinforcement

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач при создании композитов с заданными свойствами является обеспечение хорошей адгезионной взаимосвязи между составляющими их компонентами, что существенно отражается на реализации свойств этих компонентов. Даже для композитов на основе полимерной матрицы данная задача ещё полностью не решена. Главные трудности состоят в обеспечении хорошей реализации свойств матрицы. Свидетельством этого служит тот факт, что прочность композита на отрыв в трансверсальном направлении и его прочность при межслойном сдвиге не превышают 50% от соответствующих значений полимерной матрицы. Для неё эти значения примерно равны, соответственно, $\sigma_z^+ = 75$ МПа; $\tau_{xz} = 40$ МПа.

Ещё в большей степени отмеченная задача является актуальной для углерод-углеродных композитов (УУК), для которых степень реализации свойств углеродных волокон в материале при некоторых видах нагружения не превышает 25% [1]. Причём указанные характеристики для углеродной матрицы гораздо выше отмеченных, однако их реализация в материале существенно уступает полимерной. Поэтому изыскиваются различные способы преодоления этих трудностей. Наиболее простым и распространённым из них является образование поперечных связей путём переноса части арматуры из плоскости слоя основного армирования xu в ортогональное ему направление z . Это приводит к повышению одних характеристик композита, в то же время, снижая другие. Поэтому имеет большое значение установление всех факторов, влияющих на свойства рассматриваемых композитов как в плоскости укладки основного армирования, так и в перпендикулярных ей плоскостях. Некоторые из этих факторов детально установлены и их влияние на свойства частично исследовано.

Так, зависимость упругих и прочностных свойств слоистых композитов от схем армирования изучена в работах [2-5]. Показано, что изменение схем

армирования и объёмного содержания волокон по направлениям их укладки существенно влияет на упругие и прочностные характеристики в плоскости укладки. Влияние этих факторов на характеристики в других плоскостях в работах не рассмотрено. Зависимость упругих свойств слоистых композитов от архитектуры плетения волокон и тканей исследована в работах [6-9]. Установлено заметное влияние угла плетения волокна и угла расположения волокон ткани на модули упругости и сдвига слоистых композитов. Механические свойства гибридных композитов, изготовленных на основе стеклянных и углеродных волокон, исследованы в работе [10]. Оценено влияние объёма фракции волокон и формы их поперечного сечения на модули упругости и сдвига. Ряд работ посвящён разработке методов расчёта упругих свойств как слоистых [11], так и трёхмерно армированных композитов [12-14]. Разработанные методы использованы для численной оценки влияния некоторых структурных параметров, таких как объём фракции волокна, тип волокна и угол плетения волокна на упругие свойства композитов. О влиянии перераспределения арматуры на упругие характеристики композитов с полимерной матрицей, ортогонально армированных в трёх направлениях, подробно изложено в работе [15]. Показано, что в случае использования высокомодульной арматуры (что характерно для УУК), отношение модулей упругости и сдвига трёхмерно армированных и слоистых композитов с одинаковым объёмом армирования при $\mu_1=\mu_2$; $\mu=\text{const}$, имеет вид

$$\frac{E_1}{E_1^0} = 1 - \chi_1 \mu_3; \quad \frac{E_3}{E_3^0} = 1 + \chi_3 \mu_3; \quad \frac{G_{12}}{G_{12}^0} = 1 - \kappa_1 \mu_3; \quad \frac{G_{13}}{G_{13}^0} = 1 + \kappa_3 \mu_3;$$

где

$$\chi_1 = \frac{n(1-\mu)^2 - (1-2\mu)[(1-\mu)^2 + 2]}{n\mu(1-\mu)^2 + (1-\mu)^3 + 1 - \mu^2}; \quad \chi_3 = \left(\frac{2-\mu}{2+\mu}\right)^2 n - \frac{6-\mu}{2+\mu}; \quad \kappa_1 = \frac{1+\mu^2}{1-\mu};$$

$$\kappa_3 = (2+\mu)^{-1}.$$

Здесь μ и μ_3 – соответственно, коэффициент объёмного армирования композита и коэффициент объёмного армирования композита в направлении z ; $n = \frac{E'}{E''}$;

“’” – арматура; “”” – матрица. То есть, введение арматуры в третьем направлении

увеличивает значение E_3 в $\frac{n\mu(2-\mu)^2}{(2+\mu)^2}$ раз больше, чем снижает значение E_1 .

Уменьшение G_{12} оказывается в $\frac{(1+\mu^2)(2+\mu)}{1-\mu^2}$ раз больше, чем приращение

модуля сдвига G_{13} . В случае использования высокомодульной арматуры с $E' = 250$ ГПа и матрицы с $E'' = 10$ ГПа (кокс), имеем: $E' / E'' = 25$. Эти добавки, как показывают расчёты, приводят к увеличению E_3 в 4,5 раза и снижению G_{12} в 3,7 раза. При отношении $E' / E'' = 83,37$ добавка для E_3 увеличивается в 15 раз по сравнению с величиной снижения E_1 . Изменение в значениях модулей сдвига G_{12} и G_{23} при этом не зависит от отношения модулей упругости. Практическая реализация переноса части арматуры, то есть, введение армирования в третьем направлении, осуществляется путём прошивки пакета армирующих слоёв в трансверсальном направлении, или изготовлением трёхмерно армированного

каркаса. При этом возникает необходимость в точном установлении требуемого объёма арматуры в направлении 3 и характера её расположения перпендикулярно плоскости основного армирования. Последняя из этих задач также рассмотрена в отмеченной работе, где предложена модель, учитывающая относительную плотность укладки волокон направления 3 вдоль осей 1, 2. Данные расчёта по этой модели свидетельствует о том, что модули упругости и сдвига в плоскости основного армирования 12 практически не зависят от изменения этого параметра, а эти же характеристики в плоскостях, перпендикулярных ей, весьма чувствительны к его изменению. Это иллюстрирует рис.1, на котором приведены содержащиеся в работе [15] кривые изменения упругих характеристик трёхмерно армированного композита в зависимости от относительной плотности укладки волокон третьего направления по оси 1.

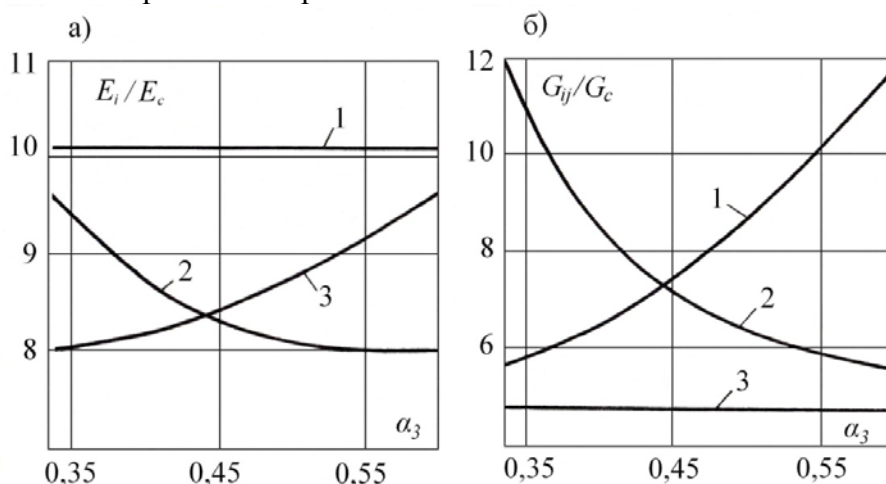


Рис.1. Влияние относительной плотности укладки волокон направления z вдоль оси x на упругие характеристики трёхмерно армированного композита. а) – модули упругости: 1 – E_3/E_c ; 2 – E_2/E_c ; 3 – E_1/E_c ; б) – модули сдвига: 1 – G_{13}/G_c ; 2 – G_{23}/G_c ; 3 – G_{12}/G_c ; Индексом “ c ” обозначено связующее.

При расчёте этих кривых объёмное содержание арматуры во всех трёх направлениях считалось одинаковым и равным $\mu_1=0,20$; $i=1,2,3$; относительная плотность волокон первого и второго направлений принималась равной $\alpha_1=\alpha_2=0,40$. Важно отметить, что при малом содержании арматуры в третьем направлении ($\mu_3=0,03$; $\mu_1=\mu_2=0,30$) и высокой относительной плотности укладки волокон первого и второго направлений ($\alpha_1=\alpha_2=0,60$), изменения параметра α_3 , как показано в [15], сказывается только на значениях модуля сдвига в плоскостях 13

и 23 (рис.1). Остальные характеристики при этом малочувствительны к изменению относительной плотности укладки волокон третьего направления α_3 по оси 1.

Экспериментальных данных по исследованию зависимости упругих и прочностных свойств от рассматриваемых параметров нами не установлено. Поэтому целью работы является оценка влияния структурных параметров – объёма арматуры трансверсального направления, диаметра арматуры и характера её распределения в плоскости xu на упругие и прочностные свойства УУК.

1. МАТЕРИАЛЫ И ИХ СВОЙСТВА

Для проведения экспериментального исследования использовались УУК высокой плотности, изготовленные в виде трёхмерно армированных каркасов. Выбраны УУК, имеющие две разные схемы армирования и различные структурные параметры, что дало возможность подробнее оценить их влияние на упругие свойства материалов. Исследовано четыре разных УУК. Первый из них (УУК-1) имел обычную схему армирования с ортогональной укладкой волокон в трёх направлениях. Остальные три композита (УУК-2а,б,в) имели одну и ту же схему армирования – расположение волокон в плоскости xu под углами $0^\circ(y)$, $\pm 60^\circ$ и в трансверсальном направлении. Их отличие состояло как в характере распределения волокон направления z по осям x , y и направления y по осям z , x , так и в диаметрах армированных жгутов. Это дало возможность точно определять как объёмное содержание волокон в каждом направлении, так и характер их распределения по направлениям армирования, в отличие от прошивки пакета слоёв. Часть из исследованных материалов, а именно, УУК-1, УУК-2а и УУК-2б, уже использовались авторами в работе [1] при решении других задач. В связи с этим здесь сохранены принятые ранее обозначения. Материал, исследованный дополнительно, с целью более полной оценки влияния структурных параметров на свойства УУК, обозначен как УУК-2в. С целью удобства восприятия, исходя из особенностей структуры, далее, на рисунке и в таблицах его данные размещены перед данными УУК-2а. Структурные параметры каждого композита содержатся в таблице 1.

Таблица 1.

Структурные параметры исследованных композитов.

характеристика		УУК-1	УУК-2в	УУК-2а	УУК-2б
γ , г/см ³		1,67	1,92	1,86	1,88
μ , %		30,0	34,1	38,8	39,6
μ_{xy} , %		24,0	25,6	29,1	29,7
μ_z , %		6,0	8,5	9,7	9,9
$d_{\text{твёрдого жгута}}$, мм		–	1,16	0,9	0,7
шаг волокон направления z по осям, мм	x	–	4,5	3,5	2,6
	y	–	2,8	2,2	1,5
шаг волокон направления y по осям, мм	z	–	3,8	3,2	2,2
	x	–	2,4	2,0	1,3

Примечание: γ – плотность композита; μ – коэффициент объёмного армирования композита; μ_{xy} , μ_z – коэффициенты объёмного армирования композита в плоскости xu и в направлении оси z .

Схемы армирования композитов с различной плотностью укладки в них волокон приведены на рис.2. Модуль упругости армирующих жгутов для всех композитов был одинаков и равен $E' = 2,5 \times 10^5$ МН/м², а их прочность при растяжении $\sigma' = 2,5 \times 10^3$ МН/м². Распределение волокон в плоскости xu в каждом из трёх направлений также было одинаковым. В качестве углеродной матрицы использован пироуглерод, полученный газофазным методом.

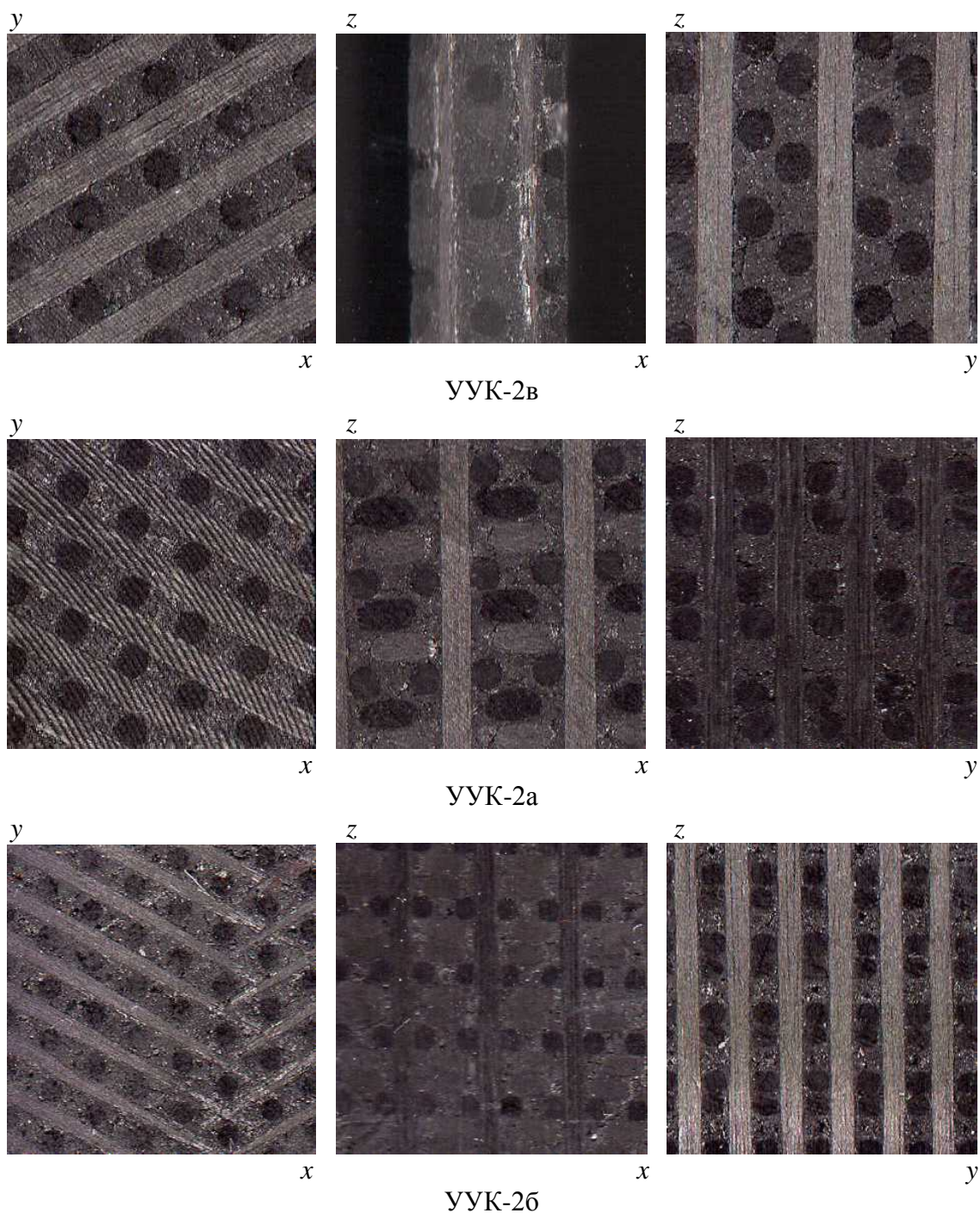


Рис.2. Структура армирования исследованных УУК-2.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ АНАЛИЗ

Все композиты испытывались в одинаковых условиях на растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг. Экспериментальные значения упругих характеристик исследованных УУК и их отношение к расчётным приведены в таблице 2, где представлены лишь средние их величины. Полные сведения о них содержатся в работе [1]. Там же описаны и методы их получения.

Таблица 2.
Экспериментальные значения упругих характеристик УУК (ГПа) и их отношение к расчётным.

Характеристика	УУК-1	УУК-2в	УУК-2а	УУК-2б
E_y	30,10	27,20	32,70	28,40
E_y / E_2	0,97	1,09	1,15	0,98
E_z	20,20	33,00	35,10	39,50
E_z / E_3	1,11	1,32	1,18	1,30
G_{xy}	2,10	5,63	5,60	7,70
G_{xy} / G_{12}	1,11	0,60	0,52	0,69
G_{xz}	1,90	1,23	1,20	1,50
G_{xz} / G_{13}	1,09	0,84	0,59	0,66
E_3^n	-	28,42	32,33	33,00
E_z / E_3^n	-	0,96	1,01	0,86

Примечание: Расчёт модуля упругости E_3^n осуществлялся по формуле: $E_3^n = \frac{1}{3} \mu E'$ [1], где E' – модуль упругости армирующих волокон.

Рассматриваются УУК, имеющие две разные схемы армирования и различные структурные параметры, что даёт возможность подробнее исследовать их влияние на свойства УУК. Кроме того, собранные данные позволяют установить причины такого явления как некоторое превышение значений трансверсального модуля упругости E_z УУК-2 над значениями модуля упругости E_y в основной плоскости армирования, где сосредоточен основной объём арматуры. Такое явление, как следует из теории армированных сред [16], не свойственно слоистым полимерным композитам.

Данные таблицы 2 наглядно показывают явное преимущество композитов УУК-2 перед УУК-1 в значениях модулей сдвига G_{xy} и упругости E_z . Для более полной оценки этого преимущества с учётом коэффициента объёмного армирования произведён расчёт упругих характеристик УУК-1, волокна которого в плоскости xu (12) расположены (переориентированы) точно по схеме УУК-2. Объёмное содержание волокон в направлении оси z (3) и в плоскости xu (12) осталось неизменным. Расчёты показывают, что принятое перераспределение волокон приводит к увеличению значения модуля сдвига G_{12} более чем в 4 раза, а модуля упругости E_3 – на 25%. При этом значение модуля упругости E_2 снижается только на 47%. Рассматривая перераспределение волокон, например, УУК-2б по схеме УУК-1, и сохраняя неизменными μ_3 и μ_{12} , имеем снижение значения модуля сдвига G_{12} в 5 раз. Значение модуля упругости E_2 при этом повышается лишь на 44%. Таким образом, используя перераспределение волокон в плоскости основного армирования, можно эффективно управлять упругими свойствами в заданных направлениях.

Из анализа данных (см. таблицу 2) также следует, что расчёт E_3 по обычным зависимостям, разработанным для трёхмерно армированных композитов, даёт заметно заниженные его значения. Использование для его расчёта упрощённой

зависимости $E_3 \approx \frac{1}{3} \mu E'$, которая приемлема для оценки модуля упругости E_2 трансропного композита в основной плоскости его армирования [16], приводит к довольно хорошим результатам.

Хорошее согласование экспериментальных и расчётных значений E_3 свидетельствует о том, что схема армирования УУК-2 оказывает заметное влияние на формирование его свойств не только в плоскости основного армирования xu , но и в перпендикулярных к ней плоскостях. Это даёт основание полагать, что композит с отмеченной схемой армирования в плоскостях zx и zy становится почти трансверсально-изотропным, подобно тому, как это имеет место в плоскости xu .

Однако, существенные отличия в значениях модулей сдвига ($G_{xy} \gg G_{xz}, G_{yz}$) как бы противоречат этому. Поэтому, учитывая важность этого вопроса при создании композитов, рассмотрим способ создания УУК-2 с учётом его структурных особенностей: общего объёмного содержания волокон, объёма распределения последних по направлениям армирования и характера расположения волокон по его плоскостям. Для этого мысленно разделим УУК-2 на слои толщиной в диаметр волокна по направлениям, параллельным плоскостям zy и xu , и оценим их отличие и сходство. Отметим, что относительное объёмное содержание волокон в каждом направлении одинаково и составляет 25% от общего (см. таблицу 1). Причём, это отношение является одинаковым для всех трёх УУК-2. Следовательно, каждый слой имеет одинаковый объём волокон, расположенных в его плоскости. Отличие слоёв, параллельных плоскости xu от слоёв, параллельных плоскости zy , составляет лишь объёмное содержание волокон, пронизывающих их в перпендикулярных направлениях. Так, для слоя xu – это волокна направления z , общий объём которых в УУК-2а составляет 9,7%. Для слоя, параллельного плоскости zy , это волокна, которые пронизывают его под углами $\pm 60^\circ$. Объёмное содержание этих волокон в два раза выше, чем волокон направления z . То есть, два перпендикулярные друг другу слоя имеют одинаковый основной параметр – объём волокон, расположенных в плоскости слоя. Отличие их состоит лишь в объёме волокон, пронизывающих их. Однако структура композита в плоскости xu заметно отличается от его структуры в плоскости zy (см. рис.2). Основное различие, как видно из рис.2, составляют волокна, уложенные в плоскости xu под углами $\pm 60^\circ$, которые с волокнами, уложенными параллельно оси y , создают трансверсально-изотропную структуру в этой плоскости. Расположение волокон в плоскости zy подобно ортогонально-армированной структуре УУК-1, но пронизанной волокнами в перпендикулярном к оси z направлении под углами к оси y . Такая ориентация волокон оказывает некоторое положительное влияние на модуль сдвига G_{yz} , по-видимому, только за счёт отмеченного наклона волокон. Как уже было отмечено раньше, волокна, пронизывающие плоскость в перпендикулярном направлении, не оказывают влияния на значения модуля сдвига в этой плоскости. Поэтому имеют место большие различия в значениях модулей сдвига G_{xy} и G_{xz} , G_{yz} исследованных УУК-2. На модуль упругости E_z такая структура, как было показано выше, также имеет положительное влияние.

2.1. Влияние диаметра армирующих жгутов на модули упругости и сдвига.

Все три УУК-2 содержат одинаковый относительный объём волокон в трансверсальном направлении (см. таблицу 1). Их различие заключается лишь в величине диаметра используемого жгута, который изменялся от 0,7 мм (для УУК-2б) до 0,9 мм и 1,16 мм (для УУК-2а и УУК-2в, соответственно). Поэтому влияние этого параметра на исследуемые характеристики можно оценить как непосредственно, сопоставляя их значения между собой, так и косвенно – по отношению значений двух исследуемых характеристик, зависимость одной из которых от рассматриваемого параметра хорошо прослеживается, или уже установлена. Непосредственное сравнение экспериментальных значений модуля упругости E_y , как видно из таблицы 2, показывает его заниженное значение для УУК-2в по сравнению с двумя другими материалами. То есть, использование жгута большего диаметра (см. таблицу 1), способствует снижению этой характеристики. Некоторое несоответствие этому имеет место в данных для УУК-2а, экспериментальное значение модуля упругости E_y которого заметно выше соответствующего значения УУК-2б, в то время как диаметр армирующего жгута УУК-2б, примерно, на 29% ниже диаметра жгута УУК-2а. Это несоответствие не подтверждают расчётные значения модуля упругости E_y . Согласно данным расчёта, наибольшее его значение имеет место для УУК-2б, диаметр армирующего жгута которого – наименьший из трёх УУК-2, а наименьшее значение – для УУК-2в, диаметр армирующего жгута которого – наибольший. Дополнительную информацию по данному вопросу дают экспериментальные данные для трансверсального модуля упругости E_z исследованных УУК-2 (см. таблицу 2). Анализ этих данных наглядно показывает чёткую зависимость значений E_z от диаметра армирующих жгутов: чем меньше диаметр, тем больше значение E_z . Указанная зависимость подтверждается расчётными данными, выполненными по упрощённой формуле, предложенной для трансверсально-изотропных структур [16].

Влияние диаметра армирующих жгутов исследуемых УУК-2 на значение их модулей сдвига G_{xy} и G_{xz} аналогично его влиянию на значение модуля упругости E_z . Экспериментальные значения G_{xy} и G_{xz} для УУК-2б, армированного жгутами наименьшего диаметра, заметно превышают его значения для двух других УУК-2. Различия в экспериментальных значениях модулей сдвига для УУК-2а и УУК-2в, как видно из таблицы 2, весьма незначительны. Расчётные значения модулей сдвига G_{12} и G_{13} для рассмотренных УУК-2 увеличиваются, по мере уменьшения диаметра армирующих жгутов. При этом следует отметить, что расчёт модуля сдвига G_{xy} осуществляется по зависимостям, учитывающим как схему укладки волокон (без учёта их диаметра), так и их объёмное содержание в композите [16]. Зависимости же для расчёта модуля сдвига G_{xz} учитывают лишь объёмное содержание волокон, без учёта особенностей их укладки в композите [15]. Поэтому достоверность расчётных значений G_{xz} требует подтверждения. Для этого сопоставим отношения значений G_{xz} к соответствующим значениям G_{xy} . Отношение G_{xz}/G_{xy} для УУК-2в, УУК-2а и УУК-2б составляет 0,22, 0,21 и 0,20, соответственно, то есть остаётся почти неизменным. Но значение G_{xy} зависит от изменения диаметра армирующих жгутов. Это можно рассматривать как подтверждение того, что модуль G_{xz} также зависит от указанного параметра, а также как подтверждение достоверности полученных результатов.

Таким образом, полученные результаты исследования указывают на заметную зависимость упругих характеристик исследуемых УУК-2

от диаметра армирующих их жгутов. Наименьший диаметр жгута, равный 0,7мм, является наиболее приемлемым из трёх рассмотренных для обеспечения более высоких значений модулей упругости и модулей сдвига УУК-2.

2.2. Влияние объёма трансверсального армирования.

Необходимость трансверсального армирования композитов, в особенности УУК, обусловлена слабой реализацией у них свойств матрицы на отрыв и сдвиг. Исходя из этого, требуемое значение μ_z арматуры для обеспечения трансверсальной прочности композита на отрыв, равной прочности его матрицы, составляет

$$\mu_z = \frac{\sigma_b'''}{\sigma_b'}$$

где σ_b' , σ_b'' – пределы прочности при растяжении арматуры и матрицы. Это значение μ_z является завышенным, так как не учитывает вклад матрицы в формирование трансверсальной прочности на отрыв. Учитывая относительно невысокую составляющую этого вклада от общей прочности на отрыв, можно рассматривать её как запас прочности. Максимальное значение предела прочности при растяжении распространённых полимерных матриц составляет, примерно, 80 МН/м², а прочность при растяжении углеродных жгутов для УУК-1 и УУК-2 равна, примерно, 3000 МН/м² и 2500 МН/м² соответственно. Следовательно, необходимые значения μ_z армированных жгутов для обеспечения прочности на отрыв УУК-1 и УУК-2 равны 0,0262 и 0,032 соответственно. Отметим, что за основу здесь взята полимерная матрица, так как хорошая реализация свойств углеродных волокон в УУК, как показано в [1], имеет место при свойствах матрицы, равных их исходной.

Реальные значения μ_z исследуемых УУК значительно превышают их расчётные (см. таблицу 1). Учитывая важность учёта значений этого параметра при создании рассматриваемого класса композитов, исследуем более подробно его влияние на другие характеристики УУК. Для этой цели примем более простую схему армирования, типа УУК-1, необходимые данные которого приведены в таблице 1. Общий объём армирования примем неизменным и равным $\mu=0,30$ и $\mu_1=\mu_2$ при изменении лишь μ_z . Для расчёта модулей упругости и сдвига используем зависимости [15]

$$E_1 = \mu_i E' + \frac{(1 + \mu_k) \left[(1 - \mu_i - \mu_j)^2 \mu_i + (1 + \mu_i + \mu_j) \mu_j \right]}{(1 - \mu_k)(1 - \mu_i - \mu_j)(\mu_i + \mu_j)} E'';$$

$$G_{12} = \frac{(1 + \mu_1 + \mu_2) G''}{(1 - \mu_3)(1 - \mu_1 - \mu_2)}; \quad G_{13} = \frac{(1 + \mu_3)(1 + \mu_1 + \mu_2) G''}{(1 - \mu_3)(1 - \mu_1 - \mu_2)(1 + \mu_2)}$$

$$G_{23} = \frac{(1 + \mu_3)(1 + \mu_1 + \mu_2) G''}{(1 - \mu_3)(1 - \mu_1 - \mu_2)(1 + \mu_1)}$$

Эти формулы весьма просты и удобны для расчёта. Причём экспериментальные значения характеристик хорошо согласуются с расчётными. При расчёте упругие модули арматуры и матрицы соответствовали УУК-1 ($E' = 225$ ГПа; $G'' = 1,07$ ГПа). Вычисленные значения характеристик приведены в таблице 3, где дано их отношение к значениям характеристик слоистых композитов при одинаковых коэффициентах объёмного армирования. Эти данные наглядно показывают, какое

влияние оказывает наличие трансверсального армирования и его объём на изменение упругих характеристик УУК. Наличие даже незначительного объёма (3%) в направлении 3 позволяет увеличить модуль упругости в этом направлении более чем в 3 раза без заметного снижения модулей сдвига (на 1-3%) и модуля упругости в направлении основного армирования (на 9%).

Таблица 3.

Зависимость модулей упругости и сдвига УУК-1 (ГПа) от изменения коэффициента объёмного армирования μ_z .

μ_z	μ_1	E_1	E_1/E_1°	E_3	E_3/E_3°	G_{12}	G_{12}/G_{12}°	G_{13}	G_{13}/G_{13}°
0	0,15	37,46	1,00	3,71	1,00	2,00	1,00	1,73	1,00
0,03	0,135	34,18	0,91	13,43	3,62	1,93	0,97	1,75	1,01
0,06	0,12	30,94	0,83	18,16	4,89	1,87	0,94	1,77	1,02
0,10	0,10	26,58	0,71	26,58	7,16	1,79	0,90	1,79	1,03

Примечание: Значком “°” обозначены характеристики слоистого композита с аналогичным коэффициентом объёмного армирования.

Перераспределение арматуры с основной плоскости армирования в трансверсальное направление, осуществляемое в небольшом объёме (до 3%), не вносит существенных изменений в значения упругих характеристик в этой плоскости (см. таблицу 3). Рациональное её перераспределение, как следует из данных таблицы 3, даёт возможность эффективно управлять свойствами УУК, улучшая их в трансверсальном направлении без заметного снижения в основных направлениях армирования. Следует отметить, что изменение двух рассмотренных параметров – диаметра арматуры и её объёма в направлении 3 вызывает необходимость выбора правильного шага укладки этой арматуры по осям 1, 2. В особенности это относится к УУК, трансверсальное армирование которых создаётся за счёт прошивки пакета слоёв тканей. Использование обычных методов прошивки, без варьирования структурных параметров укладки арматуры, как следует из [17], порождает в материале различные дефекты в процессе создания углеродной матрицы, и существенно снижает его прочностные характеристики при растяжении, сжатии и изгибе.

2.3. Оценка плотности (шага) укладки арматуры.

Правильный выбор диаметра арматуры при создании УУК с заданными свойствами не является единственным важным фактором. Не менее значимым является также установление оптимальной плотности (шага) её укладки. В особенности, это является необходимым в случае создания трансверсального армирования за счёт прошивки пакета слоёв ткани. Этот параметр при требуемом объёме арматуры в заданном направлении тесно связан с диаметром. Увеличение последнего вызывает уменьшение плотности её укладки и наоборот. Поэтому представленные экспериментальные данные для трёх УУК-2, армированных жгутами разного диаметра (см. таблицу 2), позволяют, хотя бы косвенно, оценить влияние плотности их укладки на исследуемые характеристики. Снижение диаметра жгута приводит к увеличению плотности его укладки во всех направлениях (см. рис.2). Наибольшую плотность укладки, как видно из рисунка, имеет УУК-2б. Ему и соответствует некоторое превышение значений модулей сдвига и модуля упругости E_z по сравнению с УУК-2а и УУК-2в. Для последних двух, в этом случае, имеет место заметное увеличение модуля упругости E_y в основной плоскости армирования. Это подтверждают данные таблицы 4, где

приведены относительные значения (отнесённые к общему объёму μ) исследованных характеристик (помечены сверху “*”).

Таблица 4.

Зависимость относительных значений модулей упругости и сдвига УУК-2 (ГПа) от шага укладки арматуры направления z по оси y .

Характеристика	УУК-2в	УУК-2а	УУК-2б
шаг по оси y , мм	2,8	2,2	1,5
E_y^*	79,76 (1,11)	84,28 (1,18)	71,72
E_z^*	96,77 (0,97)	90,46 (0,91)	99,74
G_{xy}^*	16,42 (0,85)	14,43 (0,74)	19,44
G_{xz}^*	3,61 (0,95)	3,09 (0,82)	3,79

Примечание: В скобках приведены отношения значений характеристик к их соответствующим значениям для УУК-2б.

То есть, изменение шага укладки жгутов, как показывает анализ полученных данных, приводит к изменению практически всех модулей упругости и сдвига, только в разной степени.

Теоретическая оценка влияния плотности укладки арматуры на упругие характеристики трёхмерно армированных композитов, как уже было отмечено, рассмотрена в работе [15]. Там же приведены зависимости для расчёта модулей сдвига с учётом шага укладки арматуры по направлениям армирования. Зависимости весьма громоздки. Поэтому используем лишь одну из них для расчёта модуля сдвига G_{23} , который, наряду с G_{13} , как показано в отмеченной работе, весьма чувствителен к изменению плотности укладки арматуры. В случае использования одинаковых волокон во всех трёх направлениях, упрощённая запись для модуля сдвига имеет вид

$$G_{23} = G_c \left\{ \frac{\left[1 + (\alpha_2 + \alpha_3)(m-1) \right] \left[1 + (\alpha_2 + \alpha_3 - \mu_2 - \mu_3)(m-1) + (\alpha_2 - \mu_2)(\alpha_3 - \mu_3)(m-1)^2 \right] + \mu_2 \mu_3 (m-1)^2}{\left[1 + (\alpha_2 + \alpha_3)(m-1) \right] \left[1 + (\alpha_2 + \alpha_3)(m-1) + \alpha_2 \alpha_3 (m-1)^2 \right]} - \frac{\mu_1 (m-1)}{m_1} \right\}^{-1}$$

Здесь $m = \frac{G'}{G''}$; $a_2 = a_1^{(2)}$; $a_3 = a_1^{(3)}$; $a_1^{(2)} = \frac{d^{(2)}}{d^{(2)} + h_1^{(2)}}$, индексы, указанные сверху

в скобках обозначают направление волокон вдоль соответствующих осей; индексы снизу обозначают координатные оси измерения шага расположения волокон, направление которых отмечено сверху в скобках; d – длина стороны квадратного сечения волокна, равная толщине армированного слоя; h – расстояние между ближайшими точками поперечных сечений волокон (размер прослойки).

При использовании волокон круглого сечения диаметром d вводится коэффициент перехода квадратного сечения, равный $\sqrt{\pi}/2$. Тогда

$$a_1^{(2)} = \frac{d^{(2)}}{d^{(2)} + h_1^{(2)}} \frac{\sqrt{\pi}}{2}; \quad d - \text{диаметр волокон.}$$

$$\mu_1 = \frac{\pi}{4} \frac{d^{(2)^2}}{(d^{(2)} + h_1^{(2)})(d^{(2)} + h_3^{(2)})};$$

μ_1 – коэффициент объёмного армирования по направлению оси 1; G' , G'' – модули сдвига армирующих волокон и матрицы, соответственно. При расчетах принято: $G' = \frac{E'}{2(1+\nu')}$; $\nu' = 0,25$; $G' = 100000$ МН/м²; $G'' = 1074$ МН/м²;

$$m = \frac{G'}{G''} = 93.$$

Диаметры арматуры для рассматриваемых УУК-2 приведены в таблице 1. Необходимые для расчёта размеры прослоек $h_1^{(2)}$, $h_1^{(3)}$ также определялись по данным таблицы 1, как разность между шагом волокон соответствующего направления, измеренным между их центрами по оси x , и их диаметром. Вычисленные значения модуля G_{23} для УУК-2в, УУК-2а и УУК-2б составили, соответственно: 2860 МН/м², 3200 МН/м² и 3455 МН/м². То есть, УУК-2б, волокна в котором уложены с наименьшим шагом, имеет наибольший модуль сдвига. Наименьший же модуль сдвига имеет УУК-2в, волокна которого расположены по направлениям армирования с большим шагом, по сравнению с двумя другими УУК-2. Зависимость модулей сдвига G_{13} и G_{12} от плотности укладки волокон в работе не рассматривалась. Однако, исходя из данных таблицы 2, наибольшие их значения также соответствуют УУК-2б.

Таким образом, на основании анализа представленных данных можно предположить, что при создании трансверсального армирования путём прошивки пакета слоёв, её целесообразно осуществлять не параллельно к основным осям упругой симметрии пакета, а под углами 0° , $\pm 60^\circ$ к одной из них. Это позволяет, даже при малом объёме трансверсального армирования, существенно повысить не только трансверсальные характеристики композита, но и модуль сдвига в основной плоскости армирования.

Использование меньшего диаметра трансверсального армирования позволяет получать более высокие характеристики композита. Применение арматуры в виде жгутов больших диаметров способствует увеличению шага укладки волокон по направлениям осей x , y , что приводит к снижению упругих характеристик композита.

ВЫВОДЫ

Выбор схемы армирования оказывает существенное влияние на упругие характеристики УУК.

УУК с укладкой волокон в плоскости основного армирования под углами 0° , $\pm 60^\circ$ к одной из осей их упругой симметрии и с армированием в трансверсальном направлении имеют существенное преимущество по упругим свойствам перед УУК с ортогональной укладкой волокон в трёх направлениях.

Схема армирования УУК-2 позволяет эффективно управлять упругими свойствами не только в плоскости основной укладки арматуры, но и в перпендикулярных ей плоскостях.

Рациональный выбор объёма трансверсального армирования позволяет улучшать свойства УУК в этом направлении без заметного их снижения в направлениях основного армирования.

Использование арматуры меньшего диаметра в исследованном диапазоне (0,7...1,16 мм) позволяет получать более высокие значения упругих характеристик УУК.

Плотность укладки волокон трансверсального направления по осям упругой симметрии рассмотренных УУК играет существенную роль в формировании модулей сдвига в плоскостях, перпендикулярных плоскости укладки арматуры, а также модулей упругости в плоскости укладки арматуры.

Трансверсальное армирование УУК путём прошивки пакета слоёв лучше осуществлять не параллельно осям упругой симметрии пакета, а под углами 0° , $\pm 60^\circ$ к одной из них. Это позволит существенно повысить модули сдвига в плоскостях, перпендикулярных плоскости укладки арматуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жигун В.И., Плуме Э.З. *Оценка реализации упругих и прочностных свойств углеродных волокон в углерод-углеродных композитах* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2017. – Т.23. – №3. – С.360-373.
2. Гуняев Г.М., Жигун И.Г., Душин М.И., Воронцов И.А., Якушин В.А., Румянцев А.Ф. *Зависимость упругих и прочностных характеристик высокомодульных композитов от схем армирования* // Механика полимеров. – 1974. – №6. – С.1019-1027.
3. Rahmani H, Najafi S.H.M., Ashori A., Gorliz M. *Elastic properties of carbon fibre-reinforced epoxy composites* // Polymers & Polymer Composites. – 2015. – Vol.23. – No.7. – Pp.475-481.
4. Peng Qu, Xiaojun Guan, Yuxi Jia, Shuai Lou, Jiaqi Nie *Effective elastic properties and stress distribution of 2d biaxial nonorthogonally braided composites* // J. of Composite Materials. – 2011. – Vol.46. – No.8. – Pp.997-1008.
5. Cichosz J., Bueckle J., Hinterhoelzl R., Wolfhart M. *Predicting the constitutive behavior of biaxial braided composites using beam unit cells* / The 19th Intern. Conf. on composite materials. Proceedings. – 2013. – Paper No.1296. – Pp.1-10.
6. Neumeister J., Jansson S., Leckie F. *The effect of fiber architecture on the mechanical properties of carbon/carbon fiber composites* // Acta Materialia. – 1996. – Vol.44. – No.2. – Pp.573-585.
7. Mohamad Ismail, Ali Ismail, Mohammad Hammoud, Ali Hallal *Parametric study of tri-axially braided composites* // Intern. J. of Composite Materials. – 2016. – Vol.6. – No.3. – Pp.68-78.
8. Joon-Hyung Byun *Stiffness modeling of triaxially braided textile composites* // The 12th Intern. Conf. on composite materials. Proceedings. – 1999. – Paper No.578. – Pp.1-10.
9. Xu L., Kim S.J., Ong C.H., Ha S.K. *Prediction of material properties of biaxial and triaxial braided textile composites* // J. of composite materials. – 2012. – Vol.46. – No.18. – Pp.1-16.
10. Banerjee S., Sankar B.V. *Mechanical properties of hybrid composites using finite element method based micromechanics* // Composites, Part B: Engineering. – 2014. – Vol.58. – Pp.318-327.
11. Соловьёв А.Н., Зиборов Е.Н., Шевцов С.Н. *Определение упругих свойств армированных композиционных материалов на основе конечно-элементного моделирования* // Наука юга России (Вестник южного научного центра). – Т.12. – №2. – С.3-10.

12. Chung-Li Hwan, K.-H. Tsai, Wen-Liang Chen, S.J. Sun *Predicting the elastic moduli of three-dimensional (four-step) braided tubes using a spatial spring model* // J. of Composite Materials. – 2013. – Vol.47. – No.8. – Pp.991-1000.
13. Yi-bo Wang, Zhen-guo Liu, Long Hu, Zhe Wu *Predicting the elastic modulus of 3d braided composite tubes using geometrical mapping approach* // The 21th Intern. Conf. on composite materials. Proceedings. – 2017. – Paper No.2845. – Pp.1-12.
14. Issam Q.Quamhia, Seyedmohammad S.Shams, Rani F.El-Hajjar *Quasi-isotropic triaxially braided cellulose-reinforced composites* // Mechanics of Advanced Materials and Structures. – 2015. – Vol.22. – Pp.988-995.
15. Жигун И.Г., Поляков В.А. *Свойства пространственно-армированных пластиков.* – Рига: Зинатне, 1978. – 215с.
16. Бидерман В.Л. *Упругость и прочность анизотропных стеклопластиков* // Расчёты на прочность. – Вып.11. – М. Машиностроение, 1965. – С.3-30.
17. Долгодворов А.В. *Влияние структуры углерод-углеродного материала на механические свойства* // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2014. – №37. – С.187-201.

REFERENCES

1. Zhigun V.I., Plume E.Z. *Otsenka realizatsii uprugikh i prochnostnykh svoistv uglerodnykh volokon v uglerod-uglerodnykh kompozitakh* [Evaluation of the utilization of carbon fibers elastic and strength properties in carbon-carbon composites]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsii*, 2017, Vol.23, No.3, Pp.360-373.
2. Gunyaev G.M., Zhigun I.G., Dushin M.I., Vorontsov I.A., Jakushin V.A., Rumyantsev A.F. *Zavisimost' uprugikh i prochnostnykh kharakteristik visokomodulykh kompozitov ot skhem armirovaniya* [Dependence of elastic and strength characteristics of high-modulus composites on schemes of reinforcement]. *Mekhanika polimerov*, 1974, No.6, Pp.1019-1027.
3. Rahmani H., Najafi S.H.M., Ashori A., Gorliz M. *Elastic properties of carbon fibre-reinforced epoxy composites*. *Polymers & Polymer Composites*, 2015, Vol.23, No.7, Pp.475-481.
4. Peng Qu, Xiaojun Guan, Yuxi Jia, Shuai Lou, Jiaqi Nie *Effective elastic properties and stress distribution of 2d biaxial nonorthogonally braided composites*. *J. of Composite Materials*, 2011, Vol.46, No.8, Pp.997-1008.
5. Cichosz J., Bueckle J., Hinterhoelzl R., Wolfhart M. *Predicting the constitutive behavior of biaxial braided composites using beam unit cells*. The 19th Intern. Conf. on composite materials. Proceedings, 2013, Paper No.1296, Pp.1-10.
6. Neumeister J., Jansson S., Leckie F. *The effect of fiber architecture on the mechanical properties of carbon/carbon fiber composites*. *Acta Materialia*, 1996, Vol.44, No.2, Pp.573-585.
7. Mohamad Ismail, Ali Ismail, Mohammad Hammoud, Ali Hallal *Parametric study of tri-axially braided composites*. *Intern. J. of Composite Materials*, 2016, Vol.6, No.3, Pp.68-78.
8. Joon-Hyung Byun *Stiffness modeling of triaxially braided textile composites*. The 12th Intern. Conf. on composite materials. Proceedings, 1999, Paper No.578, Pp.1-10.

9. Xu L., Kim S.J., Ong C.H., Ha S.K. *Prediction of material properties of biaxial and triaxial braided textile composites*. J. of composite materials, 2012, Vol.46, No.18, Pp.1-16.
10. Banerjee S., Sankar B.V. *Mechanical properties of hybrid composites using finite element method based micromechanics*. Composites, Part B, Engineering, 2014, Vol.58, Pp.318-327.
11. Soloviev A.N., Ziborov E.N., Shevtsov S.N. *Opredelenie uprugikh svoistv armirovannykh kompozitsionnykh materialov na osnove konechno-elementnogo modelirovaniya [Determination of elastic properties of reinforced composite materials based on finite element modeling]*. Nauka yuga Rossii (Vestnik yuzhnogo nauchnogo tsentra), 2016, Vol.12, No.2, Pp.3-10.
12. Chung-Li Hwan, K.-H. Tsai, Wen-Liang Chen, S.J. Sun *Predicting the elastic moduli of three-dimensional (four-step) braided tubes using a spatial spring model*. J. of Composite Materials, 2013, Vol.47, No.8, Pp.991-1000.
13. Yi-bo Wang, Zhen-guo Liu, Long Hu, Zhe Wu *Predicting the elastic modulus of 3d braided composite tubes using geometrical mapping approach*. The 21th Intern. Conf. on composite materials. Proceedings, 2017, Paper No.2845, Pp.1-12.
14. Issam Q.Quamhia, Seyedmohammad S.Shams, Rani F.El-Hajjar *Quasi-isotropic triaxially braided cellulose-reinforced composites*. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2015, Vol.22, Pp.988-995.
15. Zhigun I.G., Polyakov V.A. *Svoistva prostranstvenno-armirovannykh plastikov [Properties of spatially-reinforced plastics]*. Riga, Zinatne, 1978, 215p.
16. Biderman V.L. *Uprugost' i prochnost' anizotropnykh stekloplastikov [Elasticity and strength of anisotropic GFRP]*. Strength analysis, Iss.11, Moskva, Mashinostroenie, 1965, Pp.3-30.
17. 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, Aerokosmicheskaya tekhnika, 2014, No.37, Pp.187-201.

Поступила в редакцию 21 июня 2018 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

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

Зицанс Янис Янович – д.и.н., дир., Рижский технический университет, Институт полимерных материалов, г.Рига, Латвия; e-mail: Janis.Zicans@rtu.lv

Мерийс-Мери Ремо Вальдекович – д.и.н., рук. каф., Кафедра технологии полимерных материалов, Рижский технический университет, г. Рига, Латвия; e-mail: Remo.Merijs-Meri@rtu.lv