

УДК: 539.4

## **ЗАВИСИМОСТЬ УПРУГИХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ ОТ СТРУКТУРЫ АРМИРОВАНИЯ**

Жигун В.И., Плуме Э.З.

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

### **РЕЗЮМЕ**

Исследованы упругие и прочностные свойства углерод-углеродных композитов, имеющих разные виды армирующих наполнителей и различную структуру армирования, при нагружении на растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг. Проведён анализ полученных результатов. Выявлена зависимость исследованных характеристик от вида армирующего наполнителя и от структуры армирования рассмотренных материалов.

**Ключевые слова:** углерод-углеродный композит; предел прочности; модуль упругости; модуль сдвига; растяжение; сжатие; изгиб; сдвиг

## **THE DEPENDENCE OF THE ELASTIC AND STRENGTH PROPERTIES OF CARBON-CARBON COMPOSITES FROM THE REINFORCEMENT STRUCTURE**

Zhigun V.I., Plume E.Z.

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

### **SUMMARY**

The elastic and strength properties of carbon-carbon composites with different types of reinforcing fillers and different and different structure reinforcement, for loading in tension, compression, bending and shear has been investigated. The analysis of the results was carried out. The dependence of the characteristics examined from the view of a reinforced filler and from the reinforcement structure of the described materials was identified.

**Key words:** carbon-carbon composites; ultimate strength; tensile; modulus of elasticity; shear modulus; compression; flexure; shear

### **ВВЕДЕНИЕ**

Расчётные модели деформирования и разрушения элементов конструкций из углерод-углеродных композитов (УУК) в настоящее время базируются, как правило, на характеристиках, полученных посредством механических испытаний данных композитов. Обусловлено это тем, что свойства УУК существенно зависят как от особенностей технологического процесса создания углеродной матрицы, так и от выбора исходных полимерных связующих для её изготовления [1-4].

В частности, это хорошо показано в работе [2], где рассмотрен УУК слоистой структуры, изготовленный на основе ткани полотняного плетения. Исследовано изменение прочностных характеристик данного композита при

растяжении, изгибе и сжатии после каждого из трёх основных этапов его изготовления (создание исходного углепластика с полимерной матрицей, его карбонизация и насыщение пиролитическим графитом). Установлено, что значения отмеченных характеристик исходного углепластика после процесса создания УУК снизились в среднем на 83%, 65% и 48% соответственно. Плотность последнего при этом составляла  $1,56 \text{ г/см}^3$ .

Эти данные говорят о значительном влиянии процесса формирования углеродной матрицы на прочностные свойства армирующего материала. Поэтому теоретическое определение свойств УУК на основе свойств исходных компонент может внести существенные погрешности в их расчётные значения.

Отмеченные особенности УУК следует учитывать и при экспериментальном определении их характеристик, закладываемых в расчётные модели. То есть, образцы для определения необходимых характеристик должны изготавливаться при тех же технологических условиях, что и изготавливаемые изделия, или весьма близких к ним.

Следует отметить, что механические свойства УУК ещё мало изучены. Основное внимание, как следует из множества опубликованных работ, посвящённых этим композитам, отведено оценке влияния процесса создания углеродной матрицы или отдельного технологического параметра, в частности, температуры карбонизации, на некоторые из его характеристик [5]. Ряд публикаций содержит сведения о способах повышения сопротивляемости сдвигу УУК [6-10], или об изменении их модулей упругости в зависимости от воздействия внешних факторов [11].

Более подробная информация об упругих и прочностных характеристиках имеется для серийно выпускаемых изделий из УУК [12,13]. Так, в [12] приведены данные по свойствам различных марок УУК «ССР», изготовленных на основе ткани саржевого плетения типа «12KTwill». Эти композиты выпускаются в США серийно в виде пластин различных размеров для реализации на рынке. Несмотря на то, что в указанном источнике нет ни описания структуры композита, ни информации о способах получения представленных характеристик, приведённые в нём данные имеют практический интерес. Анализ этих данных указывает на существенную зависимость упругих и прочностных свойств слоистых УУК от их плотности. Так, увеличение плотности изделия с  $1,45$  до  $1,52 \text{ г/см}^3$  (примерно на 5%) способствует росту модуля упругости и предела прочности при растяжении, соответственно, на 26 и 35%, а при изгибе в перпендикулярном направлении аналогичные характеристики возрастают, соответственно, на 59 и 54%. Наибольшее увеличение имеют пределы прочности при сжатии (на 100%) и межслойном сдвиге (на 86%). Необходимо отметить весьма низкие значения предела прочности при межслойном сдвиге всех 7 приведённых марок композитов, составляющие от 5,2 до 14 МПа.

Примерно такое же значение данной характеристики имеют разные виды изделий, выпускаемые под заказ другим предприятием [13]. В ряде публикаций, относящихся к серийно выпускаемым изделиям из УУК [10-16], этот показатель вообще отсутствует. В них, как правило, содержатся сведения о модулях упругости и пределах прочности на растяжение или на сжатие, или на изгиб. Причём нет информации о способах их получения, что не позволяет убедиться в достоверности значений некоторых из приведённых характеристик. Так, в работе [14] содержатся данные о свойствах слоистых, а также армированных в трёх и четырёх направлениях УУК. Эти данные свидетельствуют о том, что УУК имеют

существенное расхождение в значениях модулей упругости на растяжение и сжатие. То есть, УУК присуща разномодульность. Учёт такого явления весьма важен при расчёте деталей из УУК. Однако подтверждения отмеченного фактора в других опубликованных работах не замечено. Обычно в них содержатся значения модуля упругости при одном из видов нагружения – на растяжение или сжатие [1,10,11]. Кроме того, специальное исследование, проведённое в работе [17], показало отсутствие расхождений в значениях модулей упругости УУК при испытаниях на растяжение и сжатие.

Следует отметить, что в настоящее время подробные данные о механических свойствах и их зависимости от структуры армирования УУК практически отсутствуют. Поэтому целью настоящей работы являлось получение более полной информации о механических свойствах УУК и их зависимости от структуры армирования.

## 1. ТИПЫ ИССЛЕДОВАННЫХ УУК И МЕТОДЫ ИХ ИСПЫТАНИЙ

Исследования проводились на трёхмерно-армированных композитах, изготовленных на основе двух видов армирующих наполнителей: углеродных волокон и углеродной ткани. В качестве матрицы использовался пироуглерод, осаждённый из газовой фазы термоградиентным методом. Были изготовлены три типа УУК, в которых использовались широко распространённые в серийном производстве схемы укладки арматуры [1,13,14].

Композит первого типа (УУК-1) имел простую структуру армирования (взаимно ортогональное расположение волокон в направлениях осей  $x$ ,  $y$  и  $z$ ). Он изготавливался на основе каркаса с соотношением волокон 1:1:1. Модуль упругости нити  $\geq 18 \times 10^4$  МПа, а её прочность при разрыве  $\geq 2500$  МПа. УУК-1 изготавливался в виде кубов различных размеров. Плотность композита составляла 1,65...1,73 г/см<sup>3</sup>.

Композит второго типа (УУК-2) изготавливался набором пакета слоёв углеродной ткани с последовательной ориентацией волокон её основы в направлении оси  $y$ . Пакет прошивался в трансверсальном направлении низко модульной углеродной нитью. Шаг прошивки составлял  $5 \pm 1$  мм, расстояние между строчками –  $8 \pm 2$  мм. Модуль упругости нити составлял  $(20...50) \times 10^4$  МПа. Разрывная нагрузка на полоску ткани шириной 80 мм составляла 3,5...4,5 кН по основе и 1,0...1,4 кН – по утку. Плотность композита составляла 1,2...1,5 г/см<sup>3</sup>. УУК-2 изготавливался в виде пластин толщиной 5 мм и 10 мм.

Структура композита третьего типа (УУК-3) также представляла собой пакет слоёв, прошитый в трансверсальном направлении (в направлении оси  $z$ ). Он создавался путём набора пластин-каркасов в виде колец с укладкой волокон в плоскости  $xy$  (рис.1) с изменяющимися параметрами: углом укладки волокон ( $\alpha$ ), размером ячейки (параметр «с»), и количеством нитей в ячейке. Угол  $\alpha$  по радиусу от центра к периферии (на трёх уровнях) изменялся от  $80^\circ$  до  $105^\circ$ , размер ячейки – от 2,5 до 9 мм, а количество нитей в ячейке – от 10 до 2. Модуль упругости нити и её прочность при разрыве аналогичны значениям, приведённым для УУК-1. Плотность композита составляла 1,5...1,6 г/см<sup>3</sup>. УУК-3 изготавливался в виде цилиндров разной длины в направлении оси  $z$ .

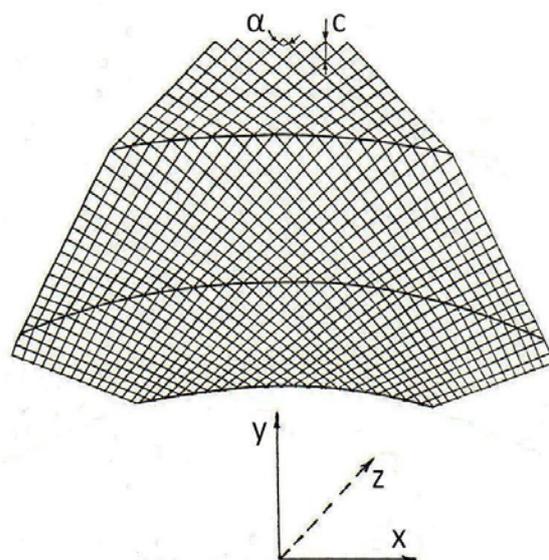


Рис.1. Схема укладки волокон УУК-3 в плоскости ху.

Все три типа композитов разрезались на образцы одинаковой формы и размеров для испытаний на растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг. Первые три вида испытаний осуществлялись на образцах-полосках, а последний – на образцах в виде квадратных пластинок и в виде призм прямоугольного сечения. Испытания на растяжение осуществлялись согласно ГОСТ 25.601-80, а на сжатие – согласно ГОСТ 25.602-80. Подробное описание этих испытаний и использованной при этом измерительной аппаратуры приведено в работе [17]. Сведения о методах оценки прочности УУК на сдвиг и изгиб содержатся в работе [18]. Испытания осуществлялись согласно изложенным в ней рекомендациям. То есть, прочность на изгиб определялась на образцах-полосках шириной 15 мм с отношением  $l/h=15$  ( $l$  – длина пролёта,  $h$  – высота образца). Предел прочности при сдвиге определялся посредством испытаний на сжатие под углом  $45^\circ$  призм прямоугольного сечения размером  $25 \times 20 \times 10$  мм. Этот метод выбран, во-первых, вследствие простоты его реализации и получения стабильных и воспроизводимых значений определяемой характеристики, во-вторых, из-за удобной формы образца и простоты его изготовления. Оценка модуля сдвига исследованных композитов осуществлялась из опытов на кручение квадратных пластинок с отношением стороны пластинки к её толщине, равной 15. Методика испытаний и необходимая для этих целей аппаратура описаны в работе [19].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Для оценки влияния структуры армирования на механические свойства УУК остановимся подробно на анализе полученных данных каждого из исследованных композитов и сравним их.

Экспериментальные результаты, полученные при исследовании упругих и прочностных характеристик УУК-1, собраны в таблице 1. Отличительной их особенностью являются относительно низкие значения предела прочности при растяжении  $\sigma_x^b$ , которые ниже значений предела прочности при сжатии  $\sigma_x^{b,-}$  более чем в два раза. Одной из возможных причин этого является структура углеродных волокон, содержащая внутри закрытые поры, ориентированные вдоль

его оси [1]. Кроме того, на этапе карбонизации материала в нём образуется большое количество макродефектов (усадочных трещин и протяжённых межниточных пор) [2]. Всё это, в сочетании с низкой прочностью матрицы на растяжение (она в два раза ниже, чем при сжатии), может приводить к указанному явлению.

Таблица 1.

Упругие и прочностные свойства УУК-1.

Характеристика	Значение	$\nu$ , %
$E_x^-$ , ГПа	33,4 (30,0 – 38,0)	5,0
$\nu_{xy}^-$	0,025 (0,02 – 0,028)	4,4
$G_{xy}$ , ГПа	2,3 (2,2 – 2,6)	3,2
$\Pi_{xy}$ , МПа	35,4 (28,4 – 40,3)	11,2
$\sigma_x^b$ , МПа	99 (95 – 102)	4,5
$\sigma_x^{b,-}$ , МПа	210 (152 – 248)	17,7
$\sigma_{\max,x}^{\text{II}}$ , МПа	105 (97 – 112)	10,4
$E_z^-$ , ГПа	19,4 (16,7 – 24,3)	6,7
$\nu_{xy}^-$	0,017 (0,013 – 0,020)	5,5
$G_{xz}$ , ГПа	1,7 (1,6 – 2,0)	2,4
$\sigma_z^{b,-}$ , МПа	144 (114 – 162)	3,8
$\Pi_{xz}$ , МПа	28,5 (24,0 – 32,0)	10,6

Примечания: здесь и далее через  $\nu_{xy}$  обозначен коэффициент Пуассона; первый индекс при нём обозначает направление приложения нагрузки, а второй – направление измерения деформации; характеристики в направлении оси  $z$  определялись на композите с более низким значением плотности, составляющем 1,45 г/см<sup>2</sup>; через  $\nu$  обозначен коэффициент вариации значений характеристик; наряду с их средними арифметическими значениями, в скобках, приведены их минимальные и максимальные значения; на каждое значение характеристики испытано по шесть образцов.

Следует заметить, что предел прочности при растяжении УУК более чувствителен к каждому из этапов формирования углеродной матрицы, чем другие его прочностные характеристики [2]. Максимальные разрушающие напряжения  $\sigma_{\max,x}^{\text{II}}$  при испытаниях на поперечный изгиб этого композита несколько выше значений предела прочности при растяжении. УУК-1 обладает достаточно высокими и стабильными характеристиками сопротивляемости сдвигу  $\Pi_{xy}$  (см. Табл.1).

Изменение вида армирующего наполнителя в композите с прямолинейных углеродных волокон на ткань саржевого плетения приводит к существенным изменениям значений некоторых его характеристик. Это хорошо видно из таблицы 2, где приведены упругие характеристики УУК-2, полученные при испытаниях образцов с двумя разными толщинами. Модули сдвига этого композита относительно высоки. Их значения более чем в 3,5 раза превышают значения аналогичных характеристик УУК-1. Модули упругости при растяжении и сжатии рассматриваемого композита не имеют заметных расхождений. Условие  $E_x \times \nu_{yx} = E_y \times \nu_{xy}$  также примерно выполняется, что подтверждает достоверность

полученных данных. Толщина УУК-2 (в рассматриваемом диапазоне её изменения) не оказывает заметного влияния на формирование его упругих свойств.

Таблица 2.

Упругие и прочностные свойства УУК-2.

Характеристика	Толщина пластины Н=5мм		Толщина пластины Н=10мм	
	Значения	v, %	Значения	v, %
$E_x$ , ГПа	22,20 (21,0-23,8)	4,0	24,6 (24,2-24,8)	1,8
$E_x^-$ , ГПа	23,4 (22,9-23,9)	1,6	25,5 (25,2-25,9)	2,0
$E_y^-$ , ГПа	26,2 (24,8-27,0)	3,8	24,0 (23,3-24,4)	1,9
$\nu_{xy}$	0,178 (0,154-0,200)	3,7	0,173 (0,160-0,190)	2,8
$\nu_{xy}^-$	0,183 (0,166-0,195)	2,4	0,180 (0,161-0,195)	3,1
$G_{xy}$ , ГПа	8,05 (7,60-8,51)	4,7	7,62 (7,28-7,96)	6,3
$G_{xz}$ , ГПа	6,39 (6,30-7,57)	13,0	7,35 (6,80-8,00)	7,0
$\sigma_x^{b,-}$ , МПа	175 (173-178)	2,2	179 (173-185)	4,6
$\sigma_y^{b,-}$ , МПа	191 (177-204)	10,0	153 (143-162)	8,5
$\sigma_x^b$ , МПа	48 (45-49)	4,1	63 (60-67)	4,8
$\sigma_y^b$ , МПа	94 (87-98)	4,3	61 (50-77)	10,5
$\sigma_{\max,x}^{b,И}$ , МПа	96 (90-102)	4,6	123 (112-140)	9,8
$\sigma_{\max,y}^{b,И}$ , МПа	160 (150-174)	9,1	105 (100-112)	4,8
$\Pi_{xz}$ , МПа	44,1 (38,5-48,7)	9,0	38,1 (34,6-42,3)	9,4

Примечание: на каждое значение характеристики испытано по 6 образцов.

Из таблицы видно, что увеличение толщины с 5 мм до 10 мм (обе пластины изготавливались в одних и тех же условиях) привело к повышению значения модуля упругости  $E_x$  в направлении укладки ткани утка на 9...11%, а в направлении её основы – к снижению модуля упругости  $E_y^-$  на 9%. При этом значение модуля межслойного сдвига  $G_{xz}$  увеличилось на 15%, а модуля  $G_{xy}$  снизилось на 9,5%. Рассматриваемый композит обладает также и высоким значением предела прочности при межслойном сдвиге (см. Табл.2). Его значения на 8...25% превышают предел прочности при сдвиге композита с прямолинейным расположением волокон (УУК-1). При этом осреднённая плотность последнего на 26% выше осреднённой плотности УУК-2.

Одной из особенностей композитов, армированных тканью, является низкая прочность при растяжении в направлении утка ткани. Так, например, для материала толщиной 5 мм отношение предела прочности при сжатии в направлении оси x к пределу прочности при растяжении составляет 3,6. В то время как в направлении укладки волокон основы ткани (оси y) этот показатель равен 2. Вероятной причиной этого является наличие искривлений в волокнах утка ткани.

При испытании на поперечный изгиб влияние данного фактора менее значительно, а, следовательно, и расхождения в отношениях максимальных

разрушающих напряжений при изгибе к пределу прочности при растяжении в направлении осей  $x$  и  $y$  не столь существенны: соответственно 2 и 1,7.

Приведённые в таблице 2 данные не дают однозначного ответа о влиянии толщины изготавливаемого композита на его прочностные характеристики.

Анализ показывает, что повышение толщины композита в два раза в разной степени влияет на эти характеристики. Так, в направлении искривлённых волокон утка (по оси  $x$ ) они возрастают, причём наибольшее увеличение имеет место для предела прочности при растяжении и максимальных разрушающих напряжений при изгибе. Их значения увеличились на 31 и 28% соответственно, а предел прочности при сжатии изменился лишь на 2%. В то же время, характеристики в направлении основы ткани (по оси  $y$ ) значительно снизились. Пределы прочности при растяжении, сжатии и межслойном сдвиге снизились, соответственно, на 35, 20 и 14%, а максимальные разрушающие напряжения при изгибе – на 34%. Следует отметить, что значения отношений пределов прочности при растяжении к пределам прочности при сжатии в направлении прямолинейных волокон для обоих типов УУК оказываются достаточно близкими, независимо от структуры армирования композитов. Так, для УУК-1 это отношение составляет 0,47, а для УУК-2 – 0,49 ( $h=5$  мм) и 0,40 ( $h=10$  мм).

Структура армирования третьего типа композита УУК-3 имела некоторые заметные отличия от двух рассмотренных. Характерную их черту составляет изменяющийся угол укладки нитей  $\alpha$  по трём зонам в плоскости  $xu$ , а также их плотность укладки в этих зонах (см. рис.1).

Поэтому экспериментальные исследования упругих и прочностных свойств УУК-3 проводились по трём его зонам: внутренней, средней и наружной в плоскости  $xu$ , а также интегрально по всей толщине композита в направлении оси  $z$ . Для этого вырезка образцов нужной формы и размеров производилась по трём отмеченным зонам композита, а в направлении оси  $z$  – по всей его толщине.

Наличие отмеченных особенностей в структуре композита вызывает практическую необходимость оценки его поведения при нагружении на растяжение и сжатие вплоть до разрушения. Диаграммы деформирования при растяжении и сжатии УУК-3 в направлении оси  $z$  приведены на рис.2. Их снятие осуществлялось согласно требованиям ГОСТ 25.601-80 и ГОСТ 25.602-80.

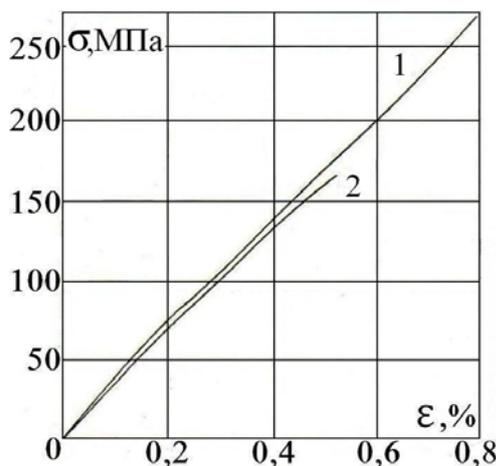


Рис.2. Диаграммы деформирования при сжатии (1) и растяжении (2) УУК-3 по оси  $z$ .

Из рис.2 видно, что характер кривых практически одинаков в диапазоне напряжений, не превышающих 135 МПа, которые составляют примерно 80% от разрушающих при растяжении. Обе кривые состоят из трёх участков. Начальный и средний участки весьма близки к прямолинейным. Каждый из участков отличается от другого изменением угла наклона к оси  $x$ , которое происходит при определённых уровнях напряжений. Начальные участки при растяжении и сжатии переходят в средние (т.е. меняют угол своего наклона к оси  $x$ ) примерно при одинаковом уровне напряжений (70-80 МПа). Средние участки кривых, в свою очередь, переходят в конечные в диапазоне напряжений, составляющих 75...80% от разрушающих при соответствующем виде нагружения. Конечные участки рассматриваемых кривых отличаются направлением их вогнутости: при сжатии вогнутость направлена к оси  $y$ , а при растяжении – к оси  $x$ . Разрушающие напряжения при сжатии, как видно из рис.2, значительно выше их значений при растяжении.

Совершенно иной характер имеют диаграммы деформирования при нагружении в направлении осей  $x,y$  (рис.3).

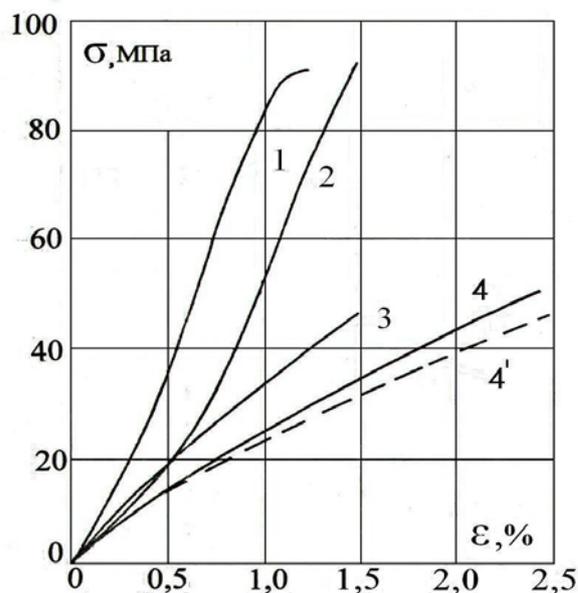


Рис.3. Диаграммы деформирования при сжатии (1,2) и при растяжении (3,4,4') УУК-3 по оси  $x$  (1,3) и по оси  $y$  (2,4).

Характер кривых при сжатии весьма отличен от характера кривых при растяжении. Две первые из них имеют линейные начальные участки, а при напряжениях, примерно 20 МПа они плавно изменяют наклон в сторону оси  $y$ . Их участки выше напряжений 30 МПа, также близки к линейным. Материал как бы уплотняется и становится жёстче. Для кривых при растяжении, как видно из рис.3, характерно наличие нелинейных начальных участков в указанном уровне напряжений (до 20 МПа), а выше него они близки к линейным. Нетрудно заметить, что упругие и прочностные свойства рассматриваемого композита при нагружении на сжатие в направлении выбранных осей  $x,y$  существенно отличаются от аналогичных свойств при растяжении. Причём повторное нагружение образцов на растяжение способствует ещё большему их расхождению. То есть, имеет место заметное приращение деформаций по

сравнению с первоначальным нагружением при одном и том же уровне напряжений, что не наблюдается при повторном сжатии.

Более подробные данные о свойствах УУК-3 содержатся в Табл.3.

Таблица 3.

Упругие и прочностные свойства УУК-3.

Характеристика	Зона вырезки образца					
	Наружная		Средняя		Внутренняя	
	Значение	$\nu$ , %	Значение	$\nu$ , %	Значение	$\nu$ , %
$E_x^-$ , ГПа	3,5(3,0-4,0)	19,7	3,6(3,1-4,1)	13,0	4,3(4,0-4,9)	10,4
$E_y^-$ , ГПа	5,8(5,1-6,7)	12,7	4,6(4,3-4,9)	5,0	5,6(4,9-6,4)	14,3
$E_z^-$ , ГПа	47,5(46,4-48,0)	1,1	45,2(40,1-51,1)	22,0	47,3(46,1-50,1)	5,7
$G_{xy}$ , ГПа	4,0(3,9-4,1)	2,4	4,1(4,0-4,8)	13,4	4,5(4,1-5,1)	12,1
$\nu_{yx}^-$	0,87(0,76-0,92)	10,3	0,78(0,69-0,88)	12,9	0,67(0,60-0,75)	10,5
$\sigma_y^{b,-}$ , МПа	89(80-92)	8,5	85(80-89)	6,2	72(63-82)	9,3
$\sigma_x^{b,-}$ , МПа	71(65-78)	9,2	82(78-86)	4,9	87(80-93)	4,7
$\Pi_{xy}$ , МПа	32(30-40)	9,0	44(38-48)	14,2	57(52-60)	6,1
$\Pi_{xz}$ , МПа	80(70-88)	10,7	84(74-92)	11,0	79(69-87)	12,8
$\sigma_z^b$ , МПа	182(170-196)	9,6	192(185-205)	8,9	171(159-186)	11,7
$\sigma_z^{b,-}$ , МПа	319(300-330)	6,4	347(325-360)	8,4	336(320-346)	7,6

Примечание: на каждое значение характеристики испытано по 5 образцов.

Наибольший интерес с практической стороны эти данные представляют для оценки влияния угла укладки волокон и их плотности в плоскости  $xu$  на изменение упругих и прочностных свойств композита. С этой целью рассмотрим значения характеристик его внутренней и средней зон по отношению к соответствующим их значениям внешней зоны, где отмеченные два параметра имеют наибольшие значения. Анализ показывает, что изменение варьируемых параметров (угла  $\alpha$  от  $105^\circ$  до  $80^\circ$ , «с» с 9 до 2,5 мм, и количества нитей в ячейке с 2 до 10) приводит к увеличению модуля упругости  $E_x^-$  и предела прочности при сжатии внутренней зоны  $\sigma_x^{b,-}$  примерно на 23%. При этом значения модуля упругости  $E_y^-$ , предел прочности при сжатии  $\sigma_y^{b,-}$  и коэффициент Пуассона  $\nu_{yx}^-$  снизились соответственно на 3, 19 и 23%. Аналогичные изменения имеют место и для средней зоны, только в меньшей степени. Более чувствительным к варьированию отмеченных параметров оказался предел прочности при сдвиге  $\Pi_{xy}$ . Его значения увеличились для средней и внутренней зон, по сравнению с наружной, примерно на 38 и 78%. Заметного отличия в значениях характеристик трансверсального направления (по оси  $z$ ), как следует из табл. 3, не наблюдается. Максимальное расхождение по зонам в значениях модуля  $E_z^-$  не превышает 5%, а пределов прочности при растяжении и сжатии – 9%.

Отличительной особенностью этого композита от рассмотренного УУК-1 являются высокие свойства в направлении армирования (оси  $z$ ). Его пределы прочности при сжатии и растяжении наружной зоны выше аналогичных характеристик первого композита примерно на 52 и 84% соответственно, а превышение значения модуля упругости составляет более 40%. Весьма заметное

превосходство имеет место и в сопротивляемости сдвигу. Модуль сдвига  $G_{xy}$  и предел прочности при сдвиге  $\Pi_{xy}$  средней зоны превышают соответствующие характеристики УУК-1 примерно на 79 и 24% соответственно. При этом средняя плотность УУК-3 ниже средней плотности УУК-1, а свойства армирующих наполнителей одни и те же.

Свойства УУК-2 также заметно уступают УУК-3 в направлении армирования (оси  $z$ ). Пределы прочности при растяжении, сжатии, и модули упругости УУК-3 в указанном направлении наружной зоны выше этих характеристик УУК-2 в направлении основы ткани, соответственно, на 92, 67 и 81%, а предел прочности при сдвиге  $\Pi_{xz}$  – на 81%. Однако УУК-2 имеет большое превосходство по жёсткости при сдвиге. Значение его модуля сдвига  $G_{xy}$  практически в два раза превышает соответствующее значение УУК-3 (см. Табл.2 и Табл.3). В то время как плотность последнего выше плотности УУК-2. Свойства армирующего наполнителя УУК-3 также весьма существенно превосходят свойства низко модульной углеродной ткани.

Сложность технологического процесса получения УУК вызывает необходимость оценки зависимости его свойств от числа слоёв (однородности свойств по толщине изделия). Экспериментальные данные по оценке влияния числа продольных слоёв волокон на некоторые характеристики при растяжении УУК-1 и УУК-3 приведены в Табл.4, откуда видно, что упругие характеристики обоих композитов более однородны по толщине, чем прочностные.

Таблица 4.

Зависимость упругих и прочностных свойств УУК-1 и УУК-3 от числа продольных слоёв арматуры.

Тип композита	УУК-1			УУК-3		
	3	7	11	3	6	9
$E_x (E_z^-)$ , ГПа	32,4 (28,1-34,6)	33,6 (28,3-40,4)	35,6 (29,9-43,2)	43,6 (37,6-52,0)	41,3 (36,5-44,3)	42,6 (38,0-55,1)
$\nu_{xy} (\nu_{zx}^-)$	0,032 (0,025-0,046)	0,032 (0,017-0,047)	0,030 (0,02-0,048)	0,06 (0,04-0,08)	–	–
$\sigma_x^b (\sigma_z^b)$ , МПа	85(70-100)	98(95-100)	77(76-79)	203 (150-229)	166 (162-170)	165 (149-179)

Примечания: в скобках указаны характеристики для УУК-3; коэффициент вариации для значений модуля упругости и коэффициента Пуассона не превышал 6%, а для предела прочности – 12%.

Расхождения в значениях модуля упругости и коэффициента Пуассона УУК-1 не превышают 10% и 7%, соответственно, а для модуля упругости УУК-3 – 6%. При этом пределы прочности этих композитов при растяжении изменяются, соответственно, на 27 и 23%.

Проведённые исследования и анализ опубликованных работ свидетельствуют о том, что прочностные свойства УУК существенно зависят от технологического процесса их изготовления. В то же время, опубликованные данные о зависимости их упругих свойств от отмеченного фактора практически отсутствуют, поэтому рассмотрим расчётные значения упругих характеристик до стадии их карбонизации и сопоставим эти значения с экспериментальными.

Наиболее приемлемым, с точки зрения расчёта характеристик, для этого является УУК-1. Его модули упругости и сдвига с достаточной для практики точностью определяются по зависимостям [1].

При равномерном распределении арматуры в трёх ортогональных направлениях ( $M_x = M_y = M_z$ ) они имеют вид

$$E_x = E_z = M_x E' + \frac{1 - M_x}{(1 - M_z)^2} E'',$$

$$G_{xy} = G_{xz} = \frac{(1 + M_x)^2}{(1 - M_z)^3} G''$$

Здесь одним штрихом сверху обозначена арматура, а двумя штрихами - связующее. Объёмное содержание арматуры  $M=0,41$ .

$$M_x = M_y = M_z = 0,137; E' = 180000 \text{ МПа}; E'' = 3300 \text{ МПа}.$$

Расчётные значения модуля упругости и сдвига, соответственно, равны: 28400 МПа и 2450 МПа. Отношение расчётных значений модуля упругости к экспериментальным составляет 0,85, а для модуля сдвига – 1,07. Некоторое превышение экспериментального значения модуля упругости над расчётным в его начальном состоянии (с полимерной матрицей) свидетельствует о том, что процесс образования углеродной матрицы не вносит заметного изменения в модуль упругости арматуры. Что касается незначительного отличия в значениях модуля сдвига, как видно из их отношения, то оно находится в пределах разброса его экспериментальных значений.

Разрушение УУК при нагружении на растяжение и сжатие в направлении армирования происходит мгновенно при достижении предельного уровня напряжений. Разрушение образцов, как правило, происходило в середине их рабочей зоны. Типичный характер их разрушения показан на рис.4.

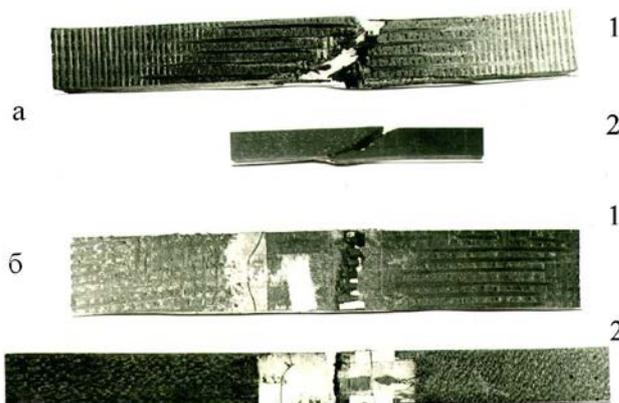


Рис.4. Характер разрушения при сжатии (а) и растяжении (б) УУК-1 (1) и УУК-2 (2).

Разрушение образцов при растяжении, как видно из рис.4, отличается от разрушения при сжатии. Характер последнего напоминает срез под углом, близким к  $45^\circ$  к его продольной оси.

Следует отметить, что пределы прочности при растяжении и сжатии определялись на образцах-полосках согласно ГОСТ 25-602-80.

## ВЫВОДЫ

1. Упругие и прочностные свойства углерод-углеродных композитов существенно зависят от вида армирующего наполнителя и от структуры армирования материала. Так, УУК-2, армированный тканью, обладает высокими показателями сопротивляемости межслойному сдвигу. Его модуль межслойного сдвига и предел прочности при межслойном сдвиге превышают аналогичные характеристики УУК-1, соответственно, в 2,8 и в 1,25 раза, а модуль сдвига  $G_{xy}$  превышает  $G_{xy}$  УУК-3 наружной зоны в 2 раза.
2. УУК-3 обладает высоким значением предела прочности при межслойном сдвиге, превышающем значения аналогичных характеристик УУК-1 и УУК-2, соответственно, в 2,26 и в 2,28 раза.
3. УУК-3 при нагружении под углом к направлению укладки волокон (по осям  $x$  и  $y$ ) имеет существенные различия в диаграммах деформирования в случае испытания на растяжение и сжатие. Испытание на сжатие приводит к увеличению наклона диаграммы к оси ординат (оси  $y$ ); композит как бы «становится жёстче». При растяжении наклон кривой непрерывно увеличивается к оси абсцисс (оси  $x$ ).
4. Все три типа исследованных УУК в направлениях армирования имеют существенное превышение в значениях пределов прочности при сжатии по отношению к пределам прочности при растяжении. Так, для УУК-1 и УУК-2 (с прямолинейной арматурой)  $\frac{\sigma^{b,-}}{\sigma^b} \geq 2$ , а для УУК-3 это отношение по зонам находится в пределах 1,75...1,96.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Васильев В.В. и др.* Композиционные материалы: Справочник. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
2. *Долгодворов А.В.* Влияние структуры углерод-углеродного материала на механические свойства // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2014. – №37. – С.187-201.
3. *Мелешко А.И., Половников С.П.* Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2007. – 192 с.
4. *Шавшуков В.Е.* Прогнозирование термомеханических свойств пироглеродной матрицы углерод-углеродных композитов / Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. – Пермь, 2003. – 94 с.
5. *Kamal K. Kar, Ravikumar N.L.* Effect of graphite fillers on carbon-carbon composites. // Society of Plastics Engineers. Plastics research online. – 2010. 10.102 / 003019. <http://www.4spepro.org/view.php?source=003019-2010-06-15>.
6. *Yi-Luen Li, Ming-Yuan Shen, Huang-Suo Su, Chin-Lung Chiang, Ming-Chuen Yip* A study on mechanical properties of CNT-reinforced carbon/carbon composites // J. of Nanomaterials. – 2012. – Vol.2012. – Article ID 262694. – 6 p. – <http://dx.doi.org.10.1155/2012/262694>.
7. *Shinn-Shyong Tzeng, Yu-Hun Lin* Mechanical properties of carbon-carbon composites reinforced with carbon nanotubes or carbon nanofibers / 16<sup>th</sup> Intern. Conf. of Composite Materials. Proceedings. – Kyoto, 2007. – [http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM16proceedings/contents/pdf/WedH/WeHM1-08ge\\_tzengs223433p.pdf](http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM16proceedings/contents/pdf/WedH/WeHM1-08ge_tzengs223433p.pdf).

8. *Xiaowen Wu, Ruiving Luo* Mechanical properties investigation of carbon/carbon composites fabricated by a fast densification process // *Materials&Design*. – 2011. – Vol.32. – Iss.4. – P.2361-2364.
9. *Кулик В.И., Борковских В.А., Борковских Н.Н., Савин В.В.* Структурные и физико- механические характеристики уплотнённых пироуглеродом углерод-углеродных композиционных материалов на основе тканевых наполнителей // *Вопросы материаловедения*. – 2006. – №3. – С.70-77.
10. *Zhang Ming-yu, Su Zhe-an, Li Jian-li, Huang Qi-zhong* Bending properties and fracture mechanism of c/c composites with high density perform // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. – 2011. – Vol.21. – P.1795-1800.
11. *Кузнецов С.И., Камашев А.В., Петров А.Л., Тарасова Е.Ю.* Влияние лазерной обработки на структуру и упругие свойства углерод-углеродных композитов // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2004. – Т.6. – №1. – С.65-71.
12. <http://www.Carboncompositesinc.com/pdf/C-C%20Data%20Sheet.pdf>.
13. <http://www.ceramaterials.com/carboncarboncomposites.html>.
14. <http://www.niigraphit.ru/produksiya/kompozity.php>.
15. <http://www.sohim.by/rus/production/carbon/basis>.
16. <http://uglecom.com/ProductShoSVOIS.asp.htm>.
17. *Жигун В.И., Павелко И.В.* Оценка влияния параметров образцов на механические свойства углерод-углеродных композитов // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2013. – Т.19. – №2. – С.196-210.
18. *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.
19. Методические указания. Расчёты и испытания на прочность в машиностроении. Материалы композиционные. Методы испытаний на межслойный сдвиг. Р.Д 50-675-88. – М.: Госстандарт, 1989.

*Поступила в редакцию 18 мая 2015 года.*

---

Сведения об авторах:

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

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