

Деформирование и прочность слоистых углепластиков при температурах 293 и 77 К

Н. К. Кучер, М. П. Земцов

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Изучены закономерности деформирования углепластика с симметричной схемой укладки слоев относительно его срединной поверхности при температурах 293 и 77 К. По данным испытаний на растяжение, сжатие и трехточечный изгиб образцов на основе принципа энергетического сглаживания Болотина определены параметры упругости и прочности "эквивалентного" ортотропного тела. Исследовано влияние охлаждения материала до 77 К и последующего термоциклирования на механическое поведение слоистого углепластика. Проанализирована достоверность определения его упругих и прочностных параметров в зависимости от вида испытаний.

Ключевые слова: композиционные материалы, углеволокно, армированные пластики, слой, напряженно-деформированное состояние.

Обозначения

XYZ	– система декартовых координат
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \dots, \gamma_{yz}$	– компоненты тензора деформации
$\sigma_x, \sigma_y, \dots, \tau_{yz}$	– компоненты тензора напряжения
E_x, E_y, E_z	– модули упругости ортотропного тела
G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}	– модули сдвига ортотропного тела
$\nu_{xy}, \nu_{xz}, \dots, \nu_{yz}$	– коэффициенты Пуассона ортотропного тела
$\Pi_x, \Pi_y, \dots, \Pi_{yz}$	– характеристики нормальной и сдвиговой прочности ортотропного тела
$\varepsilon_x^+, \sigma_x^+, E_x^+, \Pi_x^+$	– компоненты тензора деформации, напряжения, модуля упругости и нормальная прочность материала при растяжении образца в направлении OX
$\varepsilon_x^-, \sigma_x^-, E_x^-, \Pi_x^-$	– аналогичные параметры материала при сжатии
l, b, h	– длина, ширина и высота призматического образца
F, I	– площадь и момент инерции поперечного сечения образца
Δl	– удлинение рабочей части образца
$E_x^H, E_x^H, \dots, G_{yz}^H$	– модули упругости и сдвига ортотропного тела, определенные по данным испытаний на изгиб
w_{\max}	– максимальный прогиб образца
E_f	– фиктивный модуль упругости
χ	– параметр анизотропии материала
$\sigma_{\max}, \tau_{\max}$	– максимальные значения напряжений образца при изгибе
T	– абсолютная температура

Современные композиционные материалы, среди которых особое место занимают углепластики, находят все более широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. Интерес к ним объясняется не только высокими удельными прочностными свойствами, но и возможностью организации многотоннажного производства. В недалеком будущем, по некоторым прогнозам [1, 2], производство углепластиков возрастет и даже превысит выпуск стеклопластиков.

Углепластики успешно используются в авиационной, ракетной и космической технике, в автомобиле- и судостроении, при изготовлении спортивного инвентаря и в других областях. При этом для проектирования новых элементов конструкций и совершенствования существующих изделий требуется достаточно полная информация об их сопротивлении деформированию и разрушению в широком температурном диапазоне.

Цель настоящей работы – изучение закономерностей деформирования и разрушения слоистых углепластиков при температурах 293 и 77 К, а также анализ достоверности определения их механических характеристик по данным испытаний на трехточечный изгиб.

Основным структурным элементом слоистых углепластиков является монослой, представляющий собой плоский или изогнутый слой материала из полимерной матрицы и углеродных волокон, уложенных равномерно в одном направлении. Слоистые материалы получают в результате последовательной укладки друг на друга монослоев в определенном направлении. Практически все автоматизированные технологические процессы формирования слоистых пакетов обеспечивают симметричную укладку слоев относительно срединной поверхности. Так, слою с углом армирования $+\theta$ отвечает такой же слой с углом армирования $-\theta$.

Для анализа механического поведения слоистых углепластиков воспользуемся макромеханическим подходом, когда исследуемый композиционный материал заменяется “эквивалентной” однородной анизотропной средой [2]. Согласно методу энергетического сглаживания Болотина, такая замена вполне допустима, так как слоистые углепластики обладают регулярным строением и содержат большое количество структурных элементов, которые в большинстве случаев не рационально рассматривать отдельно.

В слоистых композитах с симметричной схемой армирования два монослоя одинаковой толщины с углами армирования $+\theta$ и $-\theta$ при расчете можно считать как один симметрично армированный слой. Если каждый из монослоев – анизотропный, то, работая совместно, они образуют ортотропный слой. Поэтому слоистые углепластики с симметричной укладкой армирования можно отнести к классу ортотропных материалов.

Как показывают эксперименты [3, 4], слоистые углепластики являются линейно-упругими материалами, для характеристики которых с достаточной степенью точности можно использовать теорию упругости анизотропного тела [5].

Для описания механического поведения слоистых композиций будем использовать систему декартовых координат (XYZ) , которая совпадает с осями ортотропии тела.

Деформационные свойства ортотропного упругого тела характеризуются 12 упругими постоянными, из которых независимыми являются 9: три модуля упругости E_x, E_y, E_z , три модуля сдвига G_{xy}, G_{xz}, G_{yz} и три коэффициента Пуассона $\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{zx}$. Остальные три упругие постоянные (коэффициенты Пуассона) определяются из зависимостей

$$E_x \nu_{xy} = E_y \nu_{yx}; \quad E_x \nu_{xz} = E_z \nu_{zx}; \quad E_y \nu_{yz} = E_z \nu_{zy}. \quad (1)$$

Как и упругие свойства, прочность ортотропного тела зависит от направления нагрузки. В качестве основных прочностных характеристик ортотропного тела в координатах XYZ принимают прочности по нормальным напряжениям Π_x, Π_y, Π_z и на сдвиг $\Pi_{xy}, \Pi_{yz}, \Pi_{zx}$. Прочность по нормальному напряжению Π_x определяют как предельное значение напряжения σ_x , при котором происходит разрушение материала. Аналогично определяют прочности $\Pi_y, \Pi_z, \Pi_{xy}, \Pi_{yz}, \Pi_{zx}$.

В случае плоской задачи ортотропное тело характеризуется четырьмя независимыми постоянными $E_x, E_y, G_{xy}, \nu_{xy}$ и тремя характеристиками прочности Π_x, Π_y, Π_{xy} . Коэффициент Пуассона ν_{yx} определяется из соотношения $E_x \nu_{xy} = E_y \nu_{yx}$. В большинстве случаев параметры $E_x, E_y, \nu_{xy}, \Pi_x, \Pi_y$ определяются по данным испытаний на растяжение плоских образцов. Величины G_{xy}, Π_{xy} вычисляются из экспериментов на сдвиг плоских или кольцевых образцов. Весьма распространенным методом определения характеристик межслойного сдвига G_{xz}, Π_{xz} является трехточечный изгиб прямых стержней. Обзор других подходов для определения вышеприведенных характеристик можно найти в работах [6–8].

Следует отметить, что большинство слоистых и волокнистых материалов слабо сопротивляется межслойному сдвигу. Поэтому определение характеристик E_x / G_{xz} и Π_x / Π_{xz} – весьма важно для оценки деформирования и прочности слоистых углепластиков.

Объектом экспериментального исследования служил слоистый углепластик, содержащий 21 монослой: из них девять слоев армированы в направлении $\theta = 0^\circ$, шесть – в направлении $\theta = 90^\circ$ и шесть, волокна которых уложены в направлении $\theta = \pm 45^\circ$. Расположение слоев в материале определяется кодом схемы армирования, который в соответствии с [6] имеет вид $[(0/90)_s \pm 45 / (0/90)_2 / 45 / 0]_s$.

Для испытания материала на одноосное растяжение или сжатие использовали плоские образцы, вырезанные в виде полосок из слоистых пластин в направлении главных осей упругой симметрии. Нагружение осуществлялось на испытательной машине “Instron-1126” с помощью клиновидных захватов. Для предотвращения разрушения образцов в местах крепления использовались текстолитовые накладки. Размеры образцов для растяжения таковы: $250 \times 12 \times 3,6$ мм, для сжатия – $120 \times 12 \times 3,6$ мм, что соответствует стандарту [7, 8], длина рабочей части образцов соответственно составляет 60 и 30 мм. При испытаниях на сжатие применялось специальное приспособление, которое исключало потерю устойчивости образца, но не ограничивало его осевую деформацию.

Систему координат XYZ выберем таким образом, чтобы ось X совпадала с осью образца, Y – была направлена по его ширине, а Z – перпендикулярна к плоскости XOY . Тогда по данным испытаний на растяжение получим

$$\sigma_x^+ = \frac{P^+}{F}; \quad \Pi_x^+ = \frac{P_p^+}{F}; \quad E_x^+ = \frac{\sigma_x^+}{\varepsilon_x^+}; \quad \varepsilon_x^+ = \frac{\Delta l}{l};$$

$$\nu_{yx} = -\frac{\varepsilon_y^+}{\varepsilon_x^+}; \quad \nu_{zx} = -\frac{\varepsilon_z^+}{\varepsilon_x^+},$$
(2)

где P^+ – усилие, растягивающее образец; F – площадь поперечного сечения образца; P_p^+ – разрушающая нагрузка; Π_x^+ – кратковременная статическая прочность при растяжении; σ_x^+ , ε_x^+ – условные нормальное напряжение и относительная продольная деформация; Δl – удлинение рабочей части образца длиной l .

Выполненные исследования деформирования образцов при растяжении и сжатии показали, что упругие характеристики углепластика практически не изменяются. Прочность материала при сжатии приблизительно на 12% больше, чем при растяжении. Поэтому с достаточной для практики степенью точности можно считать, что углепластик относится к классу равносопротивляющихся материалов. В дальнейшем верхний индекс в компонентах тензоров напряжения, деформации и упругих модулей опускается. Для более точного определения параметров материала с учетом возможного разброса экспериментальных данных измерения проводились при пяти значениях фиксированной нагрузки для пяти образцов как при растяжении, так и при сжатии. Полученные величины затем усреднялись. При определении характеристик упругости образцы деформировались до значений нагрузки, не превышающей 30% разрушающей. Результаты испытаний представлены в таблице.

Упругие и прочностные характеристики слоистого углепластика

T, K	$E_x \cdot 10^{-3},$ МПа	$E_y \cdot 10^{-3},$ МПа	ν_{yx}	ν_{zx}	ν_{zy}	$G_{xy},$ МПа	$G_{xz},$ МПа	$G_{yz},$ МПа	$\Pi_x,$ МПа	$\Pi_y,$ МПа	$\Pi_{xz},$ МПа
Растяжение											
293	100,6	46,3	0,278	0,464	0,468	–	–	–	370	190	–
77	–	–	–	–	–	–	–	–	280	170	–
Изгиб											
293	103,0	41,2	–	–	–	2670	2630	1370	660	250	30,5...48,1
77	–	–	–	–	–	–	–	–	550	190	–

Характеристики межслойного сдвига определяли при испытаниях на изгиб прямых стержней с прямоугольным поперечным сечением. Основная трудность заключалась в обработке результатов испытаний. При этом свойства материала прогнозируются на основании измеренных величин нагрузки

и прогиба с помощью формул, точность которых определяется гипотезами, лежащими в основе рассматриваемой модели.

В частности, при использовании подхода Тимошенко [9] предполагается, что материал является изотропным, однородным, равносопротивляющимся растяжению и сжатию, а величина прогиба – мала.

Полагаем, что ориентация системы координат XYZ такая же, как и при описании одноосного растяжения плоских образцов. Тогда для свободно опертого на двух опорах стержня, нагруженного сосредоточенной силой P в середине пролета l , максимальный прогиб w_{\max} определяется выражением

$$w_{\max} = \frac{Pl^3}{48IE_x^{\text{н}}} + \frac{\alpha}{4} \frac{Pl}{G_{xz}^{\text{н}} F}, \quad (3)$$

где I и F – момент инерции и площадь поперечного сечения стержня; α – коэффициент, зависящий от формы сечения (для прямоугольного сечения $\alpha = 1, 2$). Верхний индекс “н” при модулях упругости означает, что эти величины определяются из опытов на изгиб.

Если ввести понятие фиктивного модуля упругости

$$E_f = \frac{Pl^3}{48Iw_{\max}}, \quad (4)$$

то зависимость между $E_f, E_x^{\text{н}}, G_{xz}^{\text{н}}$ в соответствии с представлениями (3), (4) имеет вид

$$\frac{1}{E_f} = \frac{1}{E_x^{\text{н}}} + \frac{1,2}{G_{xz}^{\text{н}}} \left(\frac{h}{l} \right)^2, \quad (5)$$

где h – высота перпендикулярного сечения образца.

С помощью единичного эксперимента по формуле (5) нельзя вычислить модули упругости $E_x^{\text{н}}, G_{xz}^{\text{н}}$, поскольку она содержит две неизвестные величины. Поэтому необходимо провести испытания нескольких образцов с разными соотношениями h/l и построить график, по оси абсцисс которого откладывается величина $(h/l)^2$, по оси ординат – $1/E_f$. В этих координатах зависимость (5) должна определять прямую линию, пересекающую ось ординат в точке $1/E_x^{\text{н}}$, а тангенс ее угла наклона к оси абсцисс равен $1,2/G_{xz}^{\text{н}}$.

Для более корректного определения модулей упругости $E_x^{\text{н}}, G_{xz}^{\text{н}}$ воспользуемся методом наименьших квадратов. Предположим, что из эксперимента известны несколько значений нагрузки и максимального прогиба для образцов с разными соотношениями h/l . Пронумеруем следующую тройку чисел $\{P_i, (w_{\max})_i, (h/l)_i\}$, где $i = 1, 2, \dots, m$. Тогда m будет равно

числу всех замеров $(nh/l)_j$, а n – числу измерений прогиба при $(h/l)_j = \text{const}$. Следовательно, для каждого значения $(h/l)_i$ по формуле (4) можно вычислить $(E_f)_i$.

В результате, аппроксимируя зависимость $(1/E_f)_i$ от $(h/l)_i^2$ прямой линией, получаем

$$E_x^u = \frac{mS_{11} - S_1^2}{S_{11}S_2 - S_1S_2}; \quad (6)$$

$$G_{xz}^u = \frac{1,2(mS_{11} - S_1^2)}{mS_{12} - S_1S_2}, \quad (7)$$

где

$$S_1 = \sum_{j=1}^m \left(\frac{h}{l}\right)_j^2; \quad S_{11} = \sum_{j=1}^m \left(\frac{h}{l}\right)_j^4; \quad S_2 = \sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{E_f}\right)_j; \quad S_{12} = \sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{E_f}\right)_j \left(\frac{h}{l}\right)_j^2. \quad (8)$$

Сопоставляя значения E_x^u с величиной E_x , определенной из опытов на растяжение, в случае их равенства легко убедиться в правильности принятых гипотез и корректности обработки результатов испытаний стержней на изгиб. Кроме того, размеры образцов для испытаний на изгиб зависят от степени анизотропии материала, которая характеризуется величиной χ [2, 4]:

$$\chi = \pi \frac{h}{2l} \sqrt{\frac{E_x^u}{G_{xz}^u}}. \quad (9)$$

Поэтому при их определении вначале необходимо обратиться, если есть такая возможность, к регламентирующему документу [10] или хотя бы приблизительно теоретически вычислить значение χ . При выборе толщины h необходимо соблюдать условие, которое обеспечивает обоснованность перехода к сплошной среде. Результаты вычислений по методу Ржаницина [11] устанавливают взаимосвязь между величиной χ и минимальным количеством монослоев n в пакете. Если $\chi = 1, 3, 5, 7, \dots$, то $n \geq 5, 15, 17, 20$ и т.д. В нашем случае $h = 3,6$ мм, что соответствует толщине 21 монослоя. Следовательно, параметр анизотропии должен быть меньше семи.

Как отмечалось в [4], влияние деформаций сдвига на распределение напряжений по высоте стержня значительно меньше, чем на прогиб. Поэтому можно пренебречь отклонениями законов распределения нормальных напряжений от линейного и касательных от параболического, если $\chi \geq 1,2$. Для приближенной оценки максимальных напряжений по результатам эксперимента можно использовать зависимости

$$\sigma_{\max} = \pm \left(1 + \frac{\chi^2}{15} - \frac{\chi^4}{525}\right) \frac{P_p l h}{8I}; \quad (10)$$

$$\tau_{\max} = \left(1 - \frac{\chi^2}{60} + \frac{\chi^4}{12600}\right) \frac{3P_p}{4F}. \quad (11)$$

При больших прогибах ($w \geq 0,1l$) вместо формулы (11) необходимо применять соотношение, которое учитывает дополнительный изгиб, обусловленный горизонтальными составляющими реакций опор. Тогда

$$\tau_{\max} = \left(1 - \frac{\chi^2}{60} + \frac{\chi^4}{12600}\right) \left(1 + \frac{6w^2}{l^2} - \frac{4wh}{l^2}\right) \frac{3P_p}{4F}, \quad (12)$$

где w – прогиб в момент разрушения.

Для вычисления напряжений при изгибе можно использовать и другие подходы, в частности уточненные формулы Стокса [12], которые получены при использовании гипотез Бернулли. Однако для рассматриваемых условий нагружения и материала вычисленные значения напряжений практически совпадают.

При разрушении образца от нормальных напряжений, когда наблюдается перелом крайних растянутых или сжатых слоев, определяем $\Pi_x^{\text{н}} = \sigma_{\max}$. Если имеет место разрушение от касательных напряжений, что соответствует скалыванию по слою на уровне срединной поверхности, вычисляем прочность межслойного сдвига $\Pi_{xz}^{\text{н}} = \tau_{\max}$. При испытаниях слоистых материалов возможны также разрушения от смятия–среза и от нормальных напряжений, когда наблюдается отслоение хлопком сжатого наружного слоя. В наших экспериментах такие виды разрушения не зафиксированы.

Как показали исследования, прочность межслойного сдвига данного материала зависит от соотношения h/l . Чем меньше относительный прогиб, тем выше сдвиговая прочность углепластика. Однако при соотношениях $l/h < 6$ [4] перестает работать теория элементарного изгиба, и формулы (10)–(12) не имеют места, что необходимо учитывать в расчетах. Из опытов следует, что при $7 \leq l/h \leq 16$ справедливо соотношение $30,5 \text{ МПа} \leq \Pi_{xz}^{\text{н}} \leq 48,1 \text{ МПа}$.

Зависимость величины прочности межслойного сдвига от относительного прогиба при использовании результатов испытаний на изгиб определяется как погрешностью расчетной модели при вычислении распределения напряжений в образце, так и влиянием краевого эффекта. Поэтому вычисленное значение $\Pi_{xz}^{\text{н}}$ может быть привлечено в качестве первого приближения при оценке механических свойств слоистых углепластиков.

Модуль сдвига в плоскости армирования $G_{xy}^{\text{н}}$ определялся на основе данных испытаний на трехточечный изгиб. При этом образцы вырезали из слоистой пластины таким образом, чтобы плоскость, на которую будет действовать сосредоточенная нагрузка при изгибе, совпадала с плоскостью XOZ . Вычисленная характеристика материала представлена в таблице.

Как видно, для углепластика с рассматриваемой схемой укладки волокон наблюдается значительная разность упругих свойств материала в направлении главных осей. Сопоставление таких параметров, как $E_x^н$, $E_y^н$, с аналогичными величинами, вычисленными по результатам испытаний на одноосное растяжение, показывает, что максимальная разность при этом не превышает 16%. Это подтверждает правомочность использования расчетных методик для определения упругих характеристик слоистых материалов.

Сравнение максимальных нормальных напряжений $\sigma_x^н$, $\sigma_y^н$ с пределами прочности Π_x , Π_y , определенными по данным экспериментов на одноосное растяжение образцов, свидетельствует о необходимости совершенствования как методики расчета напряжений в композитных балках при изгибе, так и критериев разрушения слоистых углепластиков для таких видов нагружения.

Для испытания углепластика на изгиб при температуре 77 К исследуемые образцы помещали в криостат, в который заливали жидкий азот. При комнатной температуре прогиб измеряли с помощью тензометра. В среде жидкого азота прогиб не измеряли. Для его определения использовали диаграммы, полученные в условиях комнатной температуры при испытаниях образцов на изгиб для каждого соотношения h/l . При $T=293$ К записывались две диаграммы: нагрузка – время и стрела прогиба – время. Диаграммная лента перемещалась с постоянной скоростью ($v = 8,33 \cdot 10^{-4}$ м/с). В связи с тем что скорость перемещения траверсы испытательной машины также постоянна, диаграмма стрела прогиба – время представлялась в виде линейной зависимости. В опытах при $T=77$ К записывалась только диаграмма стрела прогиба – время. Скорость перемотки бумаги и геометрические параметры систем нагружения и регистрации оставались такие же, как и в опытах при комнатной температуре. Постоянные параметры нагружения и регистрирующей системы гарантируют точное определение величины прогиба при температуре жидкого азота по диаграмме нагрузка – время.

Вычисленные механические характеристики углепластика при низких температурах представлены в таблице. Согласно данным испытаний, понижение температуры образца до 77 К не приводит к заметному изменению его упругих свойств. Однако прочность углепластика при этом уменьшается на 10...25%. Понижение температуры материала до 77 К оказывает упрочняющее воздействие на его прочностные свойства при последующем деформировании в условиях комнатной температуры на 6...8%. Такое влияние низких температур характерно только для первого охлаждения. При последующем термоциклировании прочностные свойства углепластика не изменялись. Необходимо отметить, что этот экспериментально наблюдаемый факт имел место при аналогичных испытаниях авторами боропластика.

При прогнозировании деформирования слоистых композиционных материалов на основе механических характеристик составляющих композиций важное значение имеют упругие и прочностные характеристики отдельного

монослоя. Характеристики жесткости монослоя углепластика определяются по данным соответствующих испытаний образцов с одним направлением армирования или рассчитываются исходя из свойств компонентов: волокна и матрицы.

Согласно паспортным данным, продольные модули упругости и прочности углеродного волокна равны: $E_x^f = 235000$ МПа; $\Pi_x^f = 1400$ МПа. Механические характеристики изотропной эпоксидной смолы таковы: $E^m = 500$ МПа; $G^m = 1200$ МПа; $\nu = 0,32$; $\Pi^m = 700$ МПа. На основании этих параметров по известным подходам [2–4] можно рассчитать упругие и прочностные характеристики монослоя. Однако такое прогнозирование в нашем случае приводит к значительным погрешностям, за исключением таких параметров, как E_x , Π_x , которые вычисляются достаточно точно. Поэтому вышеизложенные методики могут быть использованы только в качестве первого приближения при поворочных расчетах.

Как следует из результатов экспериментов, упругие характеристики монослоя углепластика при комнатной температуре следующие: $E_x = 140000$ МПа; $E_y = 3300$ МПа; $\nu_{xy} = 0,31$.

Понижение температуры испытаний до 77 К не приводит к заметному изменению упругих параметров монослоя. Его продольная прочность при комнатной температуре равна 900 МПа, при температуре жидкого азота – 870 МПа.

Выводы

1. Установлено, что углепластик с рассмотренной схемой укладки волокон имеет низкое сопротивление межслойному сдвигу и поперечному отрыву. В данном случае предельные разрушающие сдвиговые напряжения более чем в 5,4...21,6 раза меньше соответствующих максимальных нормальных составляющих тензора напряжения. В направлении, перпендикулярном к направлению максимальной прочности, наблюдается аналогичная картина. Сопротивление исследуемого материала в поперечном направлении в 2,64 раза меньше, чем в направлении максимальной прочности при комнатной температуре, и в 2,9 раза – при $T = 77$ К. Понижение температуры эксплуатации до 77 К не приводит к заметному изменению упругих свойств углепластика. Прочностные свойства материала при низких температурах уменьшаются примерно на 15...25%. Однократное понижение температуры материала до 77 К приводит к увеличению его прочности при очередном деформировании в условиях комнатной температуры на 6...8%. При последующем термоциклировании свойства углепластика не изменяются.

2. Опыты на трехточечный изгиб образцов могут достаточно эффективно использоваться для вычисления упругих характеристик углепластика. Привлечение их для вычисления нормальной прочности слоистых материалов на основе рассмотренных расчетных методик в сочетании с критерием максимальных напряжений приводит к завышенным (почти в 1,8 раза) результатам.

3. Установлено, что прочность межслойного сдвига углепластика, определенная из опытов на изгиб, зависит от относительного пролета и схемы укладки арматуры. Поэтому вычисленные значения разрушающих напряжений при сдвиге могут служить только для качественной оценки возможностей различных армированных композиционных материалов.

Резюме

Досліджено закономірності деформування вуглепластика із симетричною схемою укладки шарів відносно його середньої поверхні за температур 293 і 77 К. За даними випробувань на розтяг, стиск і триточковий згин на основі принципу енергетичного вирівнювання Болотіна визначено характеристики пружності і міцності “еквівалентного” ортотропного тіла. Досліджено вплив охолодження до 77 К і наступного термоцилювання на механічну поведінку шаруватого вуглепластика. Проаналізована достовірність визначення його пружних і міцнісних параметрів у залежності від виду експерименту.

1. *Механика композитов*. В 12 т. / Под ред. А. Н. Гузя. – Киев: Наук. думка, 1998.
2. *Васильев В. В., Протасов В. Д., Болотин В. В. и др.* Композиционные материалы: Справочник / Под ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
3. *Вишняков Л. Р., Грудина Т. В., Кадыров В. Х. и др.* Композиционные материалы: Справочник / Под ред. Д. М. Карпиноса. – Киев: Наук. думка, 1985. – 592 с.
4. *Тарнопольский Ю. М., Кинцис Т. Я.* Методы статических испытаний армированных пластиков. – М.: Химия, 1981. – 272 с.
5. *Лехницкий С. Г.* Теория упругости анизотропного тела. – М.: Наука, 1977. – 416 с.
6. *Приложение II.* Код ориентации волокон в слоях композиционных материала, разработанный Лабораторией материалов ВВС США // Композиционные материалы. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 3. – С. 496 – 503.
7. *ГОСТ 25601-80.* Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 13 с.
8. *ГОСТ 25602-80.* Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – М.: Из-во стандартов, 1980. – 17 с.
9. *Тимошенко С. П.* Соппротивление материалов. – М.: Наука, 1965. – Т. 1. – 364 с.

10. *ГОСТ 25604-82*. Расчеты и методы испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 11 с.
11. *Тарнопольский Ю. М., Розе А. В.* Особенности расчета деталей из армированных пластиков. – Рига: Зинатне, 1969. – 276 с.
12. *Поляков В. А., Жигун И. Г.* Контактная задача для балок из композиционных материалов // *Механика полимеров*. – 1977. – № 1. – С. 63 – 74.

Поступила 18. 05. 2000