

Жесткость и прочность слоистых углепластиков при одноосном нагружении

В. А. Стрижало, М. П. Земцов

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Представлен метод оценки прочности и жесткости армированных углеволокном анизотропных слоистых пластин при растяжении и сжатии в плоскости укладки волокон. Экспериментально изучены закономерности деформирования и разрушения углепластиковых пластин. С помощью известных механических характеристик однонаправленного монослоя оценивается прочность многослойных пластин с различными схемами укладки волокон.

Ключевые слова: композиционный материал, углеволокно, слоистая пластина, полимерная матрица, прочность, растяжение, сжатие.

Введение. Слоистые углепластиковые пластины представляют собой пакеты однонаправленных слоев углеволокон, уложенных под определенным углом относительно выбранного направления – оси армирования. Предварительно пропитанные эпоксидной смолой пакеты формируются методом горячего прессования. Такая технология позволяет проектировать элементы конструкций с учетом направления и величины действующих на них нагрузок. Механические свойства пластин зависят от характеристик отдельного слоя и их взаимного расположения. Возможность распределения армирующей фазы в соответствии с заданными условиями эксплуатации конструкции – одно из достоинств волокнистых композиционных структур. Анизотропные многослойные углепластиковые пластины, состоящие из однонаправленных слоев углеволокна, широко применяются в современной технике. Благодаря многовариантности расположения слоев относительно друг друга можно оптимизировать механические характеристики пластины в зависимости от условий нагружения.

Для получения достоверной информации о распределении напряжений и деформаций в многофазных анизотропных материалах необходимо использовать экспериментальные методы, даже если имеются данные о механическом поведении составляющих компонентов. Аналитические методы описания напряженно-деформированного состояния композита отличаются достаточной сложностью и также требуют проведения специальных экспериментов для определения большого количества независимых переменных, характеризующих свойства композита, составляющих его компонентов и влияние технологических факторов на качество материала [1]. Основными технологическими факторами являются: искривление и разориентация волокон; их неравномерное натяжение; возникновение начальных напряжений после отвердевания смолы; непараллельность слоев; наличие дефектов в матрице и т.п.

К преимуществам углепластика, как типичного представителя неметаллических композитов, можно отнести: сравнительно простое изготовление конструктивных элементов; хорошую механическую обрабатываемость; вы-

сокую удельную прочность (удельная прочность однонаправленного углепластика в четыре раза больше, чем сплава Д16Т [2]); возможность создания конструкций с заданными механическими характеристиками благодаря оптимальному расположению волокон и применению различных способов плетения.

Образцы и методика испытаний. Испытания слоистых волокнистых композиционных материалов характеризуются рядом особенностей и отличаются от металлов различными типами разрушения при нагружении в идентичных условиях. Анизотропия и неоднородность волокнистых композитов, а также практически полное отсутствие пластических деформаций в углепластике при всех возможных видах разрушения обуславливают значительные трудности при получении объективных характеристик даже при одноосном нагружении [3, 4]. Поэтому обоснование выбора образца часто требует больших усилий, чем проектирование конструктивного элемента из композита [5].

Создание однородного поля деформаций на рабочем участке – необходимое условие корректности проведения испытаний на растяжение и сжатие.

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

Для определения механических характеристик углепластика при растяжении и сжатии использовались плоские образцы в виде вырезанных из многослойных пластин полосок шириной 12 мм под углами $\beta = 0$ и 90° к оси укладки слоев. Пластины изготавливались методом горячего прессования из однонаправленных слоев углеволокон. Для связи пакета в единое целое применялась модифицированная эпоксидная смола ЭД-20. Схемы укладки слоев представлены в табл. 1, где система обозначений соответствует принятой в работе [6]. Чтобы исключить возможность деформирования образца кручением при одноосном нагружении, все пластины имели симметричную относительно срединной поверхности укладку слоев [7].

Нагружение образцов при растяжении осуществляли с использованием клиновых захватов, при сжатии – посредством приспособления, предотвращающего потерю устойчивости образца (рис. 1). Образцы для испытаний на растяжение и сжатие представлены на рис. 2. Предотвращение разрушения образцов от контактных напряжений в местах их закрепления достигалось с помощью наклеенных текстолитовых накладок. Длину накладок выбирали из условия обеспечения сдвиговой прочности клеевого соединения [1].

Длина образцов при растяжении составляла 250 мм, при сжатии – 120 мм. При этом рабочий участок равнялся соответственно 60 и 30 мм. Оптимальную длину рабочего участка при сжатии выбирали после предварительных испытаний образцов с различными схемами укладки волокон. Из рис. 3 видно, что значительное снижение прочности из-за потери устойчивости наступает при длине рабочего участка более 30 мм.

Т а б л и ц а 1

Структура и механические характеристики углепластика

№ схемы	Схема укладки слоев	β , град	$E \cdot 10^{-3}$, МПа	Π , МПа	ε_p , %
1	0_{20}^0	0	$\frac{154}{140}$	$\frac{860}{880}$	$\frac{0,57}{0,65}$
2	$[(0_3/\pm 45)_4/0_2/\pm 45/0]_s$	0	$\frac{106}{97}$	$\frac{444}{540}$	$\frac{0,45}{0,68}$
		90	$\frac{19}{19}$	$\frac{165}{210}$	$\frac{1,06}{1,57}$
3	$[(0/45(0/-45/0_2/-45/0/45/0_2/45)0/-45/0)]_s$	0	$\frac{110}{102}$	$\frac{440}{560}$	$\frac{0,43}{0,71}$
		90	$\frac{19}{20}$	$\frac{150}{250}$	$\frac{0,91}{1,60}$
4	$[0_3/90_2/0_2/\pm 45/0]_s$	0	$\frac{102}{-}$	$\frac{550}{-}$	-
		90	$\frac{43}{-}$	$\frac{210}{-}$	-
5	$[0/45/0/-45/0]_s$	0	$\frac{21}{-}$	$\frac{160}{-}$	$\frac{0,91}{-}$
6	$[0_3/\pm 30/(0_2/\pm 30)_4/0/\pm 30/0]_s$	0	$\frac{102}{103}$	$\frac{560}{530}$	$\frac{0,55}{0,55}$
		90	$\frac{10}{11}$	$\frac{95}{210}$	$\frac{1,90}{2,48}$

Примечание. Над чертой приведены данные, полученные при растяжении, под чертой – при сжатии.

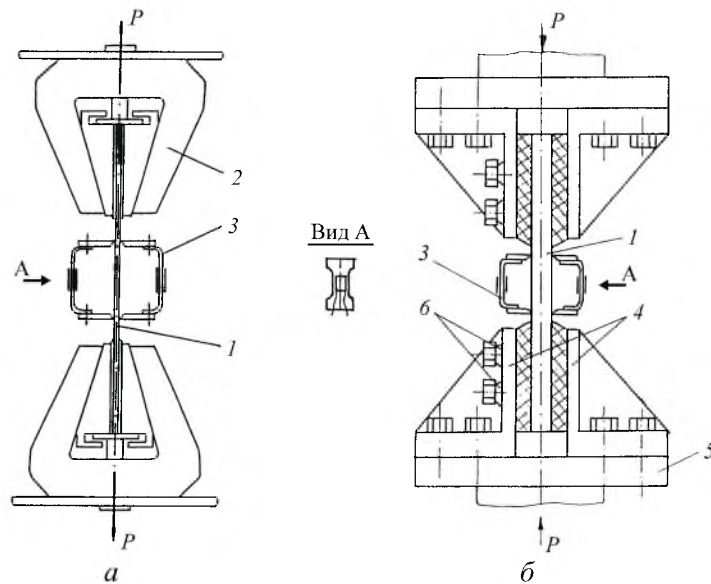


Рис. 1. Схема нагружения образцов при растяжении (а) и сжатии (б): 1 – образец; 2 – клиновидный захват; 3 – тензометр; 4 – губки захвата; 5 – упор; 6 – тарельчатые пружины.

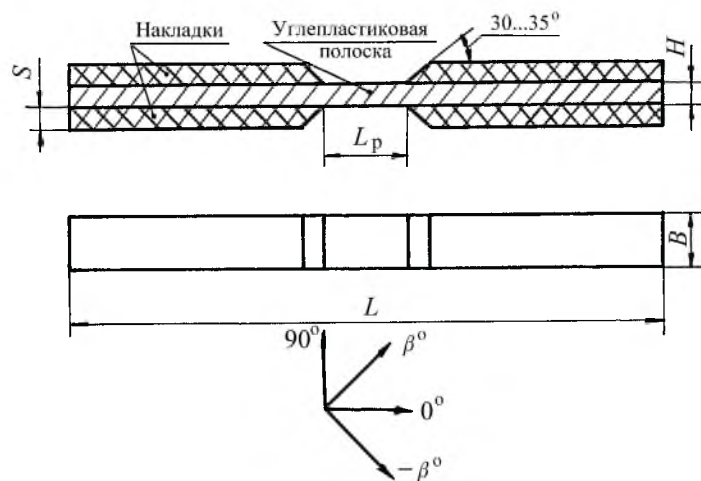


Рис. 2. Образцы для испытаний на растяжение и сжатие.

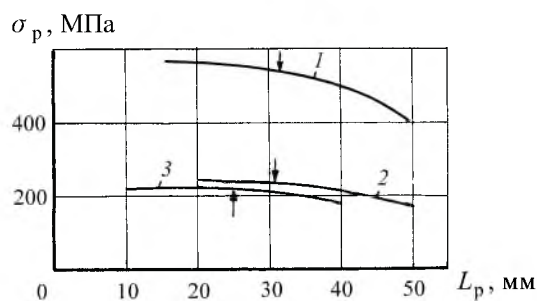


Рис. 3. Влияние длины рабочего участка на напряжение разрушения углепластика при статическом сжатии: 1 – схема № 2, $\beta = 0^\circ$; 2 – схема № 2, $\beta = 90^\circ$; 3 – схема № 6, $\beta = 90^\circ$. (Стрелками показаны предельные значения рабочего участка L_p .)

Испытания проводили на испытательной машине Instron-1126 в жестком режиме нагружения с постоянной скоростью деформирования $3,3 \cdot 10^{-5}$ м/с. Деформации измеряли с помощью тензометра, состоящего из симметрично закрепленных с двух сторон образца плоских чувствительных элементов (рис. 1). На боковые стороны каждого упругого элемента наклеивали тензорезисторы, расположенные на плоских упругих элементах, подверженных растягивающим и сжимающим деформациям. Две пары тензорезисторов соединены в мостовую схему, разбаланс которой измерялся и регистрировался во время нагружения. Для повышения чувствительности тензометра ширина упругих элементов в месте наклейки тензорезисторов выбрана меньшей, чем в остальной части, благодаря чему достигается локализация в зоне размещения тензорезисторов больших упругих деформаций. Такая конструкция тензометра позволяет компенсировать погрешности, вызванные возможным перекосом образцов в захватах из-за геометрических неточностей их изготовления, и обеспечивает надежную термокомпенсацию.

Достоверность определения экспериментальных значений напряжений и полных деформаций при разрушении обеспечивалась испытанием не менее пяти образцов. Модуль упругости при растяжении и сжатии находили после повторных нагружений одного и того же образца до напряжений,

составляющих 30% разрушающих, с последующим осреднением полученных данных. При этом проводилось не менее трех нагружений на каждом из пяти образцов.

Деформирование и разрушение слоистых образцов. Характер деформирования и разрушения углепластика при одноосном нагружении в плоскости слоев главным образом определяется свойствами армирующей фазы. Углепластиковые волокна не имеют заметной остаточной деформации после разрушения. Однако диаграммы деформирования в основном носят нелинейный характер. Отклонение от линейности, как правило, проявляется при нагрузках, близких к разрушающим. В большей степени нелинейность проявляется при испытании образцов, вырезанных из пластин с максимальной анизотропией, в направлении минимальной прочности. На рис. 4 показаны наиболее характерные диаграммы. Их нелинейность вызвана постепенным разрушением волокон. Зависимость нагрузка–деформация однонаправленного углепластика в направлении укладки волокон является линейной до разрушения. Нагружение однонаправленного углепластика поперек волокон осуществить не удалось из-за низкой прочности материала в этом направлении.

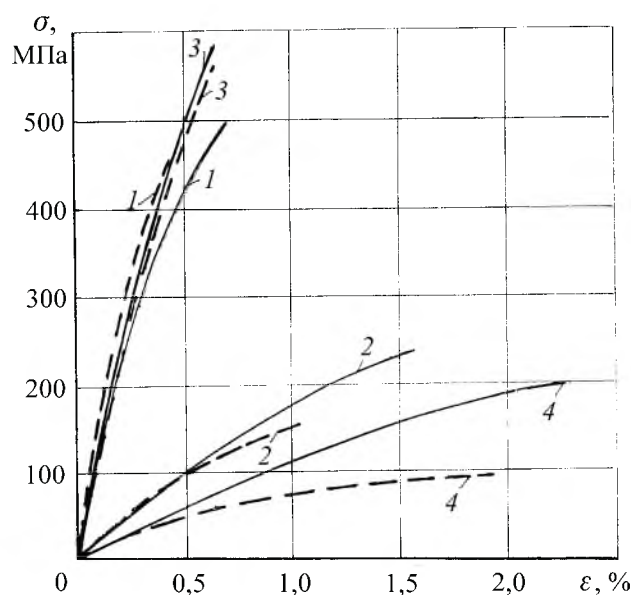


Рис. 4. Диаграммы деформирования углепластиковых образцов при растяжении (штриховые линии) и сжатии (сплошные линии): 1 – схема № 2, $\beta = 0^\circ$; 2 – схема № 2, $\beta = 90^\circ$; 3 – схема № 6, $\beta = 0^\circ$; 4 – схема № 6, $\beta = 90^\circ$.

Жесткость слоистой пластины. Механические характеристики многослойного углепластика главным образом зависят от свойств армирующих волокон и их ориентации в плоскости укладки. Жесткость слоя в продольном и поперечном направлении отличается в десятки раз [3, 7]. Несовпадение направления укладки волокон отдельных слоев с направлением действующей нагрузки приводит к уменьшению воспринимаемой ими доли нагрузки.

Деформирование пластины обуславливает возникновение совместных деформаций, приводящих к перераспределению напряжений между слоями. Поэтому долю нагрузки, воспринимаемую слоем, необходимо оценивать с учетом взаимодействия слоев пакета в целом.

Примем, что каждый слой в определенном направлении представляет собой материал со своими характеристиками упругости. Если толщина слоев в углепластиковой пластине одна и та же, то объемное содержание одного слоя обратно пропорционально их количеству. Используя правило смесей [1] для пакета из n слоев, уложенных под разными углами к оси армирования, можно составить уравнение для эффективного модуля упругости композита в направлении α :

$$E_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i, \quad (1)$$

где E_i – модуль упругости каждого слоя в направлении α .

На практике в каждом пакете имеются группы слоев, направление укладки волокон в которых совпадает. В этом случае уравнение (1) принимает вид

$$E_c = \sum_{i=1}^m E_i V_i, \quad (2)$$

где m – количество групп слоев с одинаковым направлением укладки; $V_i = n_{ci}/n$ (n_{ci} – количество слоев с одинаковым направлением укладки).

Если модули упругости отдельных групп слоев с различным направлением укладки неизвестны, то для определения модуля упругости каждой группы необходимо составить систему из m уравнений:

$$E_{cj} = \sum_{i=1}^m E_i V_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (3)$$

где E_{cj} – экспериментальное значение модуля упругости пластины в направлении α ; V_{ij} – объемное содержание волокон в пластине j , уложенных под углом α .

Очевидно, что на напряженно-деформированное состояние многослойных анизотропных систем оказывает влияние не только соотношение распределенных под разными углами слоев, но и взаимодействие смежных слоев. Такое же влияние может иметь место при определении механических характеристик пластин с одинаковым объемным содержанием волокон, уложенных в заданных направлениях, но с различной последовательностью.

Влияние изменения последовательности укладки слоев на эффективный модуль упругости E , разрушающее напряжение Π и разрушающую деформацию ε_p оценивали на образцах со схемами укладки № 2 и 3 (табл. 1). При одинаковом соотношении направленных под различными углами слоев ($0^\circ - 60\%$, $\pm 45^\circ - 40\%$) последовательность их укладки существенно отлича-

лась. Испытания показали, что модули упругости при растяжении образцов (схемы № 2 и 3) в направлении $\beta = 0^\circ$ отличаются на 4000 МПа при стандартном отклонении 10000 МПа. В направлении $\beta = 90^\circ$ результаты совпадают, стандартное отклонение не превышает 1500 МПа. Коэффициент вариации в обоих случаях составляет 7% при отклонении средних значений до 4%. Подобные результаты получены также при испытаниях на сжатие.

Характеристики прочности и деформационной способности углепластиков с укладкой слоев по схемам № 2 и 3 также существенно не отличаются. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о незначительном влиянии последовательности укладки слоев на механические характеристики. Более точная оценка влияния взаимодействия слоев на характеристики материала, по-видимому, невозможна без учета разброса последних, что связано с влиянием технологических параметров.

Анизотропию модуля упругости однонаправленного слоя углепластика можно оценить по результатам испытаний многослойных образцов, представленных в табл. 1. Из уравнений, составленных для схем № 1, 2, $\beta = 0^\circ$ и № 2, $\beta = 90^\circ$, в соответствии с (3) вычислим эффективные модули упругости однонаправленного слоя E_{45} и E_{90} (индексы обозначают угол в градусах относительно направления укладки волокон в слое). Повторяя эту процедуру для других схем армирования, получаем дополнительные значения эффективных модулей. Усредненные зависимости изменения жесткости слоя от направления нагружения представлены на рис. 5,а.

Следует отметить, что для слоев, расположенных под углом 45° к направлению деформирования, отклонение эффективного модуля упругости от среднего значения достигает 15%, в то время как для слоев, уложенных под углом 90° , – 60%. Низкая точность оценки модуля упругости уложенных под углом 90° слоев связана с его невысоким значением. При неизменной абсолютной погрешности относительная погрешность принимает наибольшие значения при наименьшей определяемой величине.

Эффективный модуль упругости слоя в поперечном направлении укладки волокон можно оценить также по экспериментальным значениям однонаправленного углепластика и матрицы. Модуль Юнга материала матрицы составляет 3500 МПа, объемное содержание волокон в углепластике – 55%. По результатам испытаний однонаправленного углепластика в соответствии с правилом смесей значение модуля упругости волокна равно $2,77 \cdot 10^5$ МПа.

Уравнение правила смесей для композита с последовательно расположенными компонентами имеет вид [7]

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m}, \quad (4)$$

где f и m соответствуют обозначению волокна и матрицы.

Эффективный модуль упругости в этом случае равен 7700 МПа. В соответствии с (3) эффективный модуль упругости слоя в поперечном направлении при растяжении составляет 6000 МПа, при сжатии – 9000 МПа (рис. 5).

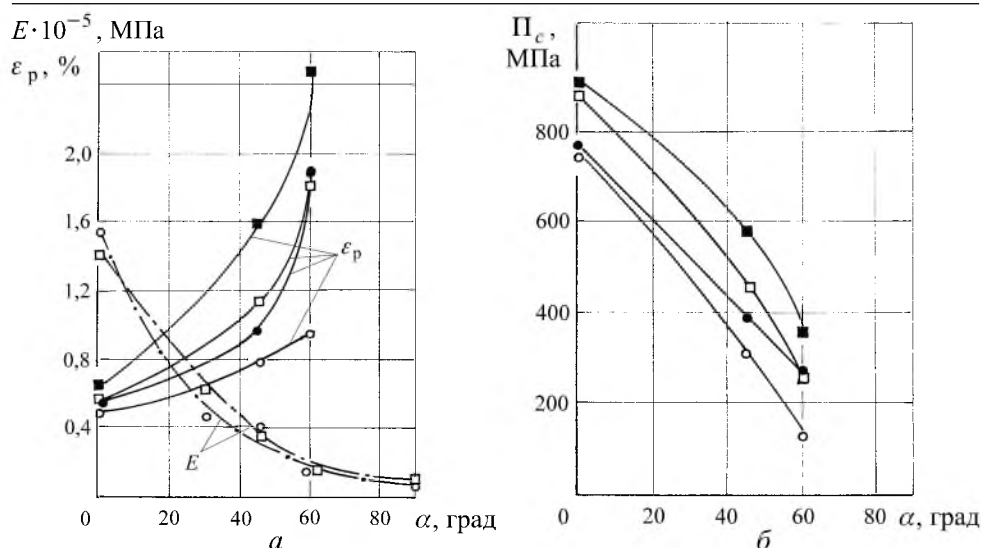


Рис. 5. Расчетные (светлые точки) и экспериментальные (темные точки) значения механических характеристик монослоя при одноосном нагружении: ●, ○ – растяжение; ■, □ – сжатие.

Прочность слоистой пластины. С особенностями структуры многослойных пластин связана неравномерность распределения напряжений по толщине материала даже при однородном поле деформаций. Усилия в этом случае распределяются между слоями пропорционально их жесткости. Знание зависимости эффективного модуля упругости от направления укладки волокон (рис. 5) позволяет получить картину распределения напряжений для каждого отдельного слоя пластины.

Наибольшие нормальные напряжения в слое возникают, если нагрузка приложена в направлении максимальной жесткости слоев – вдоль волокон. Деформационная способность слоя при этом является минимальной, а прочность – максимальной. С увеличением угла между направлением действия силы и укладкой волокон значения разрушающих напряжений уменьшаются, деформационная способность увеличивается. Следовательно, величина разрушающей деформации слоистой пластины определяется слоями, в которых угол между волокнами и направлением действия силы минимальный.

Необходимо отметить, что разрушение отдельных, наиболее нагруженных волокон не всегда ведет к потере несущей способности всей пластины. Если количество таких волокон невелико и они не несут основной доли нагрузки, то после их разрушения последняя перераспределяется к менее жестким слоям. На диаграмме в этом случае наблюдается резкое падение нагрузки или уменьшение наклона соответствующего участка диаграммы к оси деформаций.

Выражение для определения разрушающего напряжения в слоистой пластине в соответствии с правилом смесей можно записать в виде

$$\Pi = \varepsilon_p \sum_{i=1}^n E_i V_i. \quad (5)$$

Однако для корректной оценки разрушающих напряжений с помощью (5) необходимо учесть некоторые обстоятельства. Очевидно, что величина разрушающей деформации ε_p зависит не только от деформационной способности наиболее нагруженных слоев, но и от конкретной схемы укладки последних.

Учитывая нелинейность диаграмм деформирования для некоторых схем укладки слоев, интересно оценить соответствие вычисленных значений разрушающих напряжений экспериментальным. В табл. 2 приведены результаты оценки разрушающих напряжений слоистых пластин Π_1 и Π_2 , полученные в соответствии с (5) по экспериментальным ε'_p и расчетным ε''_p значениям разрушающей деформации.

Т а б л и ц а 2

Значения разрушающих напряжений

№ схемы	β , град	Π_1 , МПа		Π_2 , МПа	
		Растяжение	Сжатие	Растяжение	Сжатие
1	0	770	910	770	784
2	0	526	640	526	551
2	90	157	317	130	226
3	0	526	640	526	551
3	90	157	317	130	226
4	0	468	604	468	521
4	90	204	264	204	227
5	0	167	334	138	238
6	0	530	685	530	590
6	90	233	381	118	277

Экспериментальные кривые разрушающих деформаций ε'_p построены при испытании образцов с укладкой волокон под углом α и 90° к их продольной оси. Слои, в которых волокна расположены нормально к направлению деформирования, существенного сопротивления нагружению не оказывают. Поэтому значения разрушающих напряжений слоя Π_c (рис. 5,б) и деформаций ε'_p испытанных образцов соответствуют характеристикам слоев, уложенных под углом α .

Разрушающие напряжения Π_2 определяли исходя из предположения, что диаграммы деформирования слоев линейны до разрушения. Расчетные значения разрушающих деформаций для построения кривых $\varepsilon_p(\alpha)$ – рис. 5,а определим из выражения

$$\varepsilon''_p = \frac{\Pi_3}{\sum_1^m E_i V_i}, \quad (6)$$

где Π_3 – экспериментальное значение разрушающего напряжения многослойной пластины.

Разрушающие деформации в этом случае соответствуют слоям с наибольшей удельной жесткостью $E_i V_i$. Для схем армирования, приведенных в табл. 1, наибольшее значение удельной жесткости соответствовало слоям, модуль упругости которых максимален.

Сравнение расчетных разрушающих напряжений Π_1 и Π_2 (табл. 2) с экспериментальными значениями Π (табл. 1) показало преимущество определения деформации разрушения углепластика (для оценки его прочности) по формуле (6). Отличие разрушающих напряжений Π_2 от экспериментальных Π , за исключением схемы № 6, $\beta = 90^\circ$, не превышает 20%, а напряжений Π_1 достигает 50%. Расхождение между разрушающими напряжениями Π_1 и экспериментальными Π для схемы № 6, $\beta = 90^\circ$ достигает 145%, а для Π_2 – 32%.

По-видимому, такое различие между результатами эксперимента и расчета для образцов с укладкой волокон по схеме № 6, $\beta = 90^\circ$ обусловлено неполной реализацией прочности волокон, уложенных под углом 60° к направлению нагружения, из-за недостаточной ширины образца.

Расхождение расчетных и экспериментальных данных для образцов, у которых диаграмма нагрузка–деформация линейна до разрушения, объясняется значительным разбросом последних. Коэффициенты вариации разрушающих напряжений при растяжении достигают 10%, при сжатии – 16%, эффективного модуля упругости – соответственно 10 и 16%, разрушающих деформаций – 10 и 24%.

Заключение. Экспериментальные исследования закономерностей деформирования и разрушения углепластиковых пластин позволили оценить несущую способность слоистых пластин при их одноосном нагружении в плоскости укладки волокон. Деформирование многослойных углепластиковых пластин при одноосном нагружении по достижении определенного уровня нагрузки, как правило, вызывает постепенное разрушение наиболее нагруженных волокон, завершающееся катастрофической потерей несущей способности.

Показана возможность оценки прочности и жесткости многослойной анизотропной пластины с помощью экспериментальных зависимостей механических характеристик монослоя от угла между направлением армирования и нагрузкой. Отклонение расчетных значений жесткости и прочности от экспериментальных в значительной степени связано с разбросом механических характеристик углепластика.

Прочность и жесткость пластины главным образом определяются прочностью и жесткостью волокон, ориентированных в направлении действия нагрузки.

Резюме

Запропоновано метод оцінки міцності й жорсткості армованих вуглеволокном анізотропних шаруватих пластин при розтязі та стиску в площині укладання волокон. Експериментально досліджено закономірності деформування і руйнування вуглепластикових пластин. За допомогою відомих механічних характеристик односпрямованого моношару оцінено міцність багатопшарових пластин із різними схемами укладання волокон.

1. *Тарнопольский Ю. М., Кинцис Т. Я.* Методы статических испытаний армированных пластиков. – М.: Химия, 1981. – 270 с.
2. *Справочник по алюминиевым сплавам.* – М.: ВИЛС, 1978. – 18 с.
3. *Композиционные материалы.* Справочник / Под ред. Д. М. Карпиноса. – Киев: Наук. думка, 1985. – 592 с.
4. *Композиционные материалы.* Справочник / Под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
5. *Берт Ч. В.* Механические испытания композитов // *Композиционные материалы.* – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 8. – С. 81 – 97.
6. *Код ориентации волокон в слоях композиционного материала, разработанный Лабораторией материалов ВВС США* // *Композиционные материалы.* – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 3. – С. 496 – 503.
7. *Фудзин Т., Дзако М.* Механика разрушения композиционных материалов. – М.: Мир, 1982. – 232 с.

Поступила 29. 06. 2000