

Особенности определения характеристик упругости и прочности слоистых углепластиков, армированных тканями

Н. К. Кучер¹, М. Н. Заразовский, Е. Л. Данильчук

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

¹ kucher@ipp.kiev.ua

Представлены результаты экспериментального исследования деформирования и прочности углепластиков, армированных тканями УОЛ-300-1А, УТ-900-3А, и слоистых композитов, изготовленных на их основе, при комнатной температуре. Определены характеристики упругости и прочности материалов при плоском напряженном состоянии. Исследуются особенности определения характеристик упругости и прочности слоистых композитов, армированных углеродными тканями. Анализируется эффективность прогнозирования характеристик упругости слоистых тканых композитов на основе соответствующих параметров отдельного слоя.

Ключевые слова: углепластики, слоистые композиты, деформирование, прочность, характеристики упругости.

Введение. Полимерные слоистые углепластики широко используются в различных областях науки и техники. Например, в авиационной и ракетной, ветроэнергетике, строительстве, при разработке изделий судостроения и автомобилестроения, в атомной энергетике, металлургии, медицине, при создании товаров широкого потребления, спортивного инвентаря и т.д. В [1] представлен объем мирового потребления углеволокон и отмечаются устойчивые тенденции его роста.

Главными преимуществами углепластиков являются: высокие жесткостные и удельные прочностные характеристики, существенное сопротивление влиянию концентраторов напряжений на несущую способность, устойчивость к воздействию агрессивных сред и др. К их недостаткам относят малую прочность при сдвиге и сжатии, сложности в изготовлении однонаправленных композитов и относительно высокую стоимость. Если раньше, как правило, использовали однонаправленные углепластики, то в настоящее время предпочтение отдается углепластикам, армированным тканями. Это позволяет упростить технологии выкройки и укладки армирующих элементов, а также изготовление готовых изделий, хотя при этом не в полной мере реализуются прочностные свойства волокон [2].

Исследования механического поведения углепластиков, армированных тканями, изложены в [2–8]. На основе полученных экспериментальных данных предложены модели деформирования композитов и критерии прочности анизотропных материалов [9, 10].

Дальнейшее развитие моделей деформирования и оценка несущей способности углепластиков, армированных тканями, требуют проведения комплексных исследований механического поведения композитов при различных видах термосилового нагружения, анализа возможностей прогнозирования слоистых материалов на основе механических характеристик составляющих композитов.

Целью настоящей работы является исследование закономерностей деформирования четырех тканых углепластиков с различной анизотропией механических свойств, определение их модулей упругости и характеристик прочности в условиях плоского напряженного состояния, а также оценка точности определения вышеуказанных характеристик по различным методикам испытаний.

Композиты армированы углеродными тканями УОЛ-300-1А и УТ-900-3А и изготовлены методом горячего прессования с использованием предварительно пропитанных связующим слоев при соответствующей термообработке, давлении и выдержке.

Углеродная ткань УОЛ-300-1А представляет собой структуру типа гибридного полотна ($n_g = 2$) [2], у которого количество нитей основы в пять раз превышает количество нитей утка. Нити, образующие уток, изготовлены из стекловолна. Ткань УТ-900-3А (с таким же переплетением) имеет одинаковое количество нитей по основе и утку на единицу длины. Все ее нити изготовлены из углеволокна.

Углепластик, армированный тканью УОЛ-300-1А, получен в результате последовательной укладки слоев со схемой формирования пакета $[0]_{10}$. В сертификате данного материала указано, что он принадлежит к классу композитов, армированных однонаправленными волокнами, т.е. волокна утка и искривления нитей основы не оказывают существенного влияния на процессы деформирования. Структура формирования пакета для углепластика, упрочненного тканью УТ-900-3А, определяется выражением $[0]_{10}$. Углепластик, обозначенный как УП-1, создан при использовании тканей УТ-900-3А и УОЛ-300-1А со схемой формирования пакета $[\pm 45/\pm 45]_3$, где черточка над углом армирования обозначает, что данный слой армирован тканью УТ-900-3А, в противном случае слой армирован тканью УОЛ-300-1А. Соответственно углепластик УП-2 имеет структуру $[0/90/\pm 45/45]_3$.

Принятые гипотезы и обозначения. Исходя из гипотезы континуума полагали, что исследуемый углепластик является гомогенным материалом с одинаковыми характерными механическими свойствами для всех точек среды [10, 11].

Слоистые углепластики с симметричными относительно срединной поверхности композита схемами армирования относятся к классу ортотропных материалов. При комнатной температуре их деформирование достаточно хорошо описывается соотношениями линейной теории упругости анизотропного тела [12].

На основе модели ортотропного тела деформирование углепластика, армированного тканью, в рамках плоской задачи теории упругости полностью описывается четырьмя линейно независимыми параметрами [12]: двумя модулями продольной упругости E_1 , E_2 , модулем сдвига G_{12} и главным коэффициентом Пуассона ν_{12} .

В обозначениях коэффициента Пуассона ν_{12} принято, что индекс 1 относится к направлению прикладываемого усилия, а 2 – к направлению вызванной им поперечной деформации. Другой коэффициент Пуассона ν_{21} определяется из соотношения, которое следует из условия существования упругого потенциала $E_1\nu_{21} = E_2\nu_{12}$.

Ортотропный материал, который находится в условиях плоского напряженного состояния, описывается тремя независимыми характеристиками σ_1 , σ_2 , σ_{12} . Принято, что напряжение при сдвиге в плоскости армирования не зависит от направления действующих усилий и определяется величиной σ_{12} .

Предельное состояние углепластика, исходя из простейшего тензорно-полиномиального критерия разрушения [10, 11], характеризуется пятью эффективными параметрами прочности σ_{+1}^b , σ_{-1}^b , σ_{+2}^b , σ_{-2}^b и σ_{12}^b , где знак “+” указывает, что величина определяется по данным испытания на растяжение, “–” – то же на сжатие.

Методики испытаний и регламентирующие документы. Для определения диаграмм деформирования в главных направлениях, а также характеристик упругости и прочности слоистые углепластики испытывали на растяжение, сжатие и сдвиг при комнатной температуре. Все эксперименты проводили на сервогидравлической универсальной установке (модель BiSS Bi-00-701) для испытаний на растяжение–сжатие.

Для испытаний на растяжение согласно ГОСТ 25.601 [13] и ASTM D 3039 [14] использовали призматические образцы размером $250 \times 25 \times 2$ мм с накладками. Для более точного определения разрушающих напряжений использовали образцы в виде “лопаток”.

Продольные деформации измеряли экстензометром фирмы ViSS с базой 25 мм, а поперечные – тензорезисторами КФ5П1-5-400-Б-12.

Испытания углепластиков на сжатие проводили на призматических образцах размером 150×25×2 мм с накладками [15, 16]. Передачу усилий на образец осуществляли по торцам и боковым граням. Во время экспериментов снимали показания усилия, перемещения активного захвата и двух деформаций в продольном и поперечном направлениях. Деформирование образцов проводили в жестком режиме нагружения со скоростью перемещения активного захвата 0,03 мм/с. Погрешность измерений по обеим характеристикам не превышает 1%.

В настоящее время при определении характеристик сдвига используются методики [8, 17–20], которые имеют определенные преимущества и недостатки, связанные в первую очередь с точностью отыскания искомым параметров, количеством определяемых характеристик и необходимым количеством материала для изготовления образцов. Ввиду отсутствия соответствующих стандартов в Украине для исследований механического поведения тканых структур при сдвиге использовали стандарты ASTM [19, 20], а также метод растяжения анизотропной полосы, вырезанной под углом $\theta = 10^\circ$ к главной оси композита [17, 18]. Отметим, что вышеуказанные стандарты распространяются на однонаправленные композиты и слоистые композиты, армированные тканями. Образцы для растяжения, сжатия и сдвига вырезали в направлениях главных осей упругой симметрии материала.

Метод растяжения полосы с укладкой слоев $\pm 45^\circ$ используется для определения модуля сдвига G_{12} , диаграммы деформирования $\sigma_{12} - \gamma_{12}$ и предела прочности при сдвиге σ_{12}^b [19].

При испытаниях деформирования полосы с укладкой слоев $\pm 45^\circ$ предел прочности при сдвиге вычисляли из соотношения

$$\sigma_{12}^b = \frac{P^m}{2bh}, \quad P^m = \min \left\{ \begin{array}{l} P_{\max} \\ P|_{\gamma_{12}=5\%} \end{array} \right., \quad (1)$$

где b , h – ширина и высота образца; P – действующее усилие; γ_{12} – сдвиговая деформация,

$$\gamma_{12} = \varepsilon_x - \varepsilon_y; \quad (2)$$

ε_x , ε_y – осевая и поперечная деформация образца.

Модуль упругости при внутрислойном сдвиге вычисляли из прямолинейного участка диаграммы деформирования $\sigma_{12} - \gamma_{12}$:

$$G_{12} = \frac{\Delta\sigma_{12}}{\Delta\gamma_{12}}, \quad (3)$$

где $\Delta\sigma_{12}$ – величина сдвигового напряжения в конце прямолинейного участка диаграммы деформирования; $\Delta\gamma_{12}$ – соответствующее значение сдвиговой деформации на том же участке.

Метод Иосипеску основывается на результатах испытания на несимметричный изгиб пластин с V-образными надрезами [20]. Схема нагружения по данному методу и образцы для испытаний приведены на рис. 1. От точности изготовления образцов с надрезами существенно зависят получаемые результаты (рис. 1, б).

При испытаниях на сдвиг снимали показания усилия, перемещения штока и двух деформаций. Последние измеряли с помощью тензорезисторной розетки, состоящей из тензорезисторов со взаимно ортогональной ориентацией. Розетка наклеивалась на

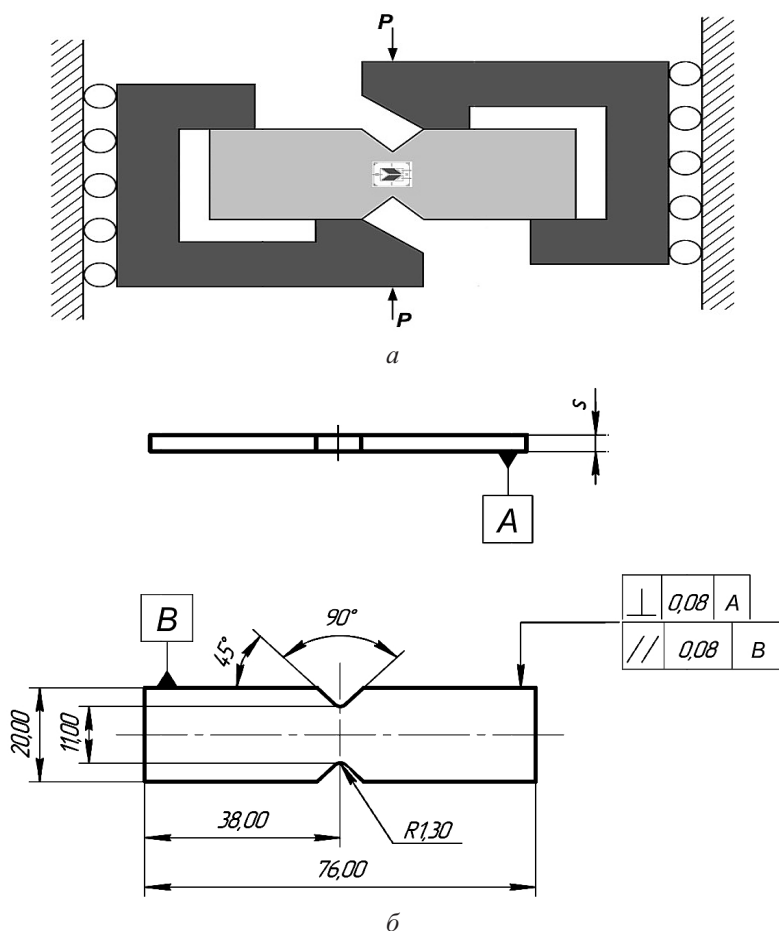


Рис. 1. Схема нагружения по методу Иосипеску (а) и образец для испытаний на сдвиг (б).

центральную часть образца таким образом, чтобы тензорезисторы составляли угол с горизонтальной осью образца, равный -45° и $+45^\circ$.

Предел прочности при сдвиге определяли по формуле

$$\sigma_{12}^b = \frac{P_{\max}}{bh}, \tag{4}$$

P_{\max} – максимальное усилие в ходе эксперимента.

Для определения модуля сдвига использовали соотношение (3). Деформацию сдвига вычисляли из выражения

$$\gamma_{12} = |\varepsilon_{+45}| + |\varepsilon_{-45}|, \tag{5}$$

где $|\varepsilon_{+45}|$, $|\varepsilon_{-45}|$ – модули деформаций центральной зоны образца в направлениях, составляющих угол $+45^\circ$ и -45° к горизонтальной оси образца.

Для сопоставления вычисленных предельных напряжений при сдвиге проводили также испытания на растяжение анизотропной пластины, вырезанной под углом $\theta = 10^\circ$ к главной оси упругой симметрии [17, 18].

Тогда получим

$$\sigma_{12}^b = \frac{1}{2} \frac{P_{\max}}{bh} \sin(\pi/9). \quad (6)$$

Отметим, что данную методику не рекомендуется использовать для вычисления модуля сдвига из-за трудностей определения деформации сдвига γ_{12} и компоненты матрицы податливости слоя a_{16} [17]. Кроме того, действующие напряжения в этом случае очень чувствительны к изменению угла θ , поэтому определены жесткие допуски ($\pm 1^\circ$) на углы вырезки образца, наклейки тензорезистора и направления действия нагрузки.

С целью определения однородности распределения механических характеристик и условия повторяемости результатов экспериментов все опыты проводили для пяти образцов при каждом виде деформирования. При этом определяли средние значения искомых величин, их дисперсию, а также коэффициенты вариации, что позволяет судить об их однородности.

Результаты испытаний и их анализ. На рис. 2 представлена диаграмма деформирования углепластика УТ-900-3А в направлении основы. Аналогичная диаграмма при растяжении имеет место и в направлении утка.

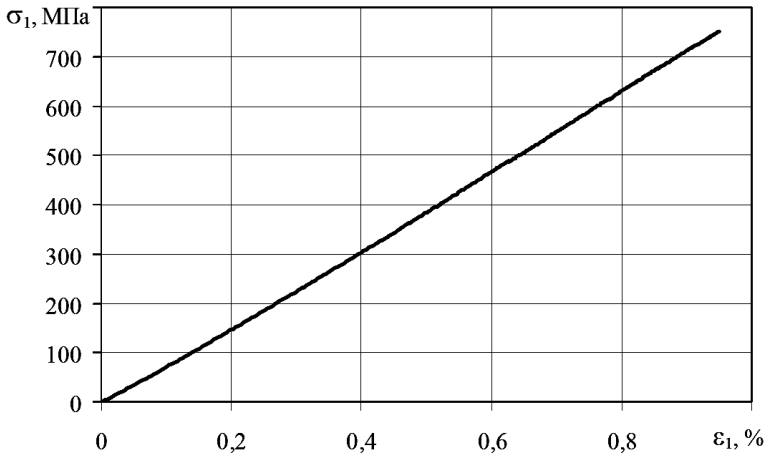


Рис. 2. Зависимость напряжения σ_1 от деформации ϵ_1 углепластика, армированного тканью УТ-900-3А.

Из полученных соотношений для тканых полимерных углепластиков УОЛ-300-1А и УТ-900-3А видно, что зависимости между напряжениями и деформациями в направлениях основы и утка при комнатной температуре достаточно хорошо описываются линейными функциями.

Несмотря на небольшую нелинейность при сдвиге в плоскости армирования, для описания деформирования углепластиков, изготовленных на основе углеродных лент УОЛ-300-1А и УТ-900-3А, можно использовать соотношения линейной теории упругости анизотропного тела.

Усредненные значения эффективных характеристик упругости и предельных напряжений приведены в таблице. Там же для каждой характеристики представлены значения стандартного отклонения.

Как видно из данных таблицы, при испытании на растяжение с использованием обоих стандартов получены практически одинаковые значения модулей Юнга. Использование образцов в виде “лопаток” имеет некоторое преимущество при определении разрушающих напряжений.

**Характеристики упругости и предельные напряжения
тканых полимерных углепластиков при комнатной температуре**

Механические характеристики	УОЛ-300-1А	УТ-900-3А	УП-1	УП-2
E_1 , ГПа	$\frac{150,7 \pm 7,6}{149,8 \pm 4,4}$	$\frac{80,9 \pm 3,0}{79,2 \pm 1,5}$	$\frac{15,7 \pm 1,8}{15,8 \pm 0,3}$	$\frac{45,4 \pm 1,2}{45,6 \pm 2,6}$
E_2 , ГПа	$\frac{8,0 \pm 0,3}{-}$	$\frac{68,2 \pm 5,7}{-}$	$\frac{14,8 \pm 0,6}{16,8 \pm 1,1}$	$\frac{45,6 \pm 1,0}{44,9 \pm 0,7}$
$G_{12}^{(1)}$, ГПа	$3,7 \pm 0,6$	$4,4 \pm 0,5$	–	–
$G_{12}^{(2)}$, ГПа	$6,0 \pm 0,7$	$5,7 \pm 0,3$	$40,6 \pm 3,3$	$26,5 \pm 1,2$
$G_{12}^{(3)}$, ГПа	$4,0 \pm 0,4$	$6,4 \pm 0,6$	$42,0 \pm 3,3$	$27,8 \pm 1,3$
ν_{12}	$0,29 \pm 0,03$	$0,4 \pm 0,005$	$0,67 \pm 0,006$	$0,33 \pm 0,002$
σ_{+1}^b , МПа	$\frac{1571,4 \pm 71,8}{1604,6 \pm 42,5}$	$\frac{759,2 \pm 34,9}{775,3 \pm 33,6}$	$\frac{139,0 \pm 8,8}{138,8 \pm 1,8}$	$\frac{407,6 \pm 18,8}{440,0 \pm 16,9}$
σ_{-1}^b , МПа	$721,5 \pm 45,1$	$482,2 \pm 26,4$	$149,6 \pm 7,1$	$353,4 \pm 25,1$
σ_{+2}^b , МПа	$\frac{22,9 \pm 2,4}{-}$	$\frac{627,7 \pm 18,8}{-}$	$\frac{149,5 \pm 5,7}{146,0 \pm 1,1}$	$\frac{420,7 \pm 18,6}{452,7 \pm 13,5}$
σ_{-2}^b , МПа	$123,5 \pm 4,0$	$448,8 \pm 2,0$	$140,9 \pm 1,0$	$349,0 \pm 22,0$
$(\sigma_{12}^b)^{(1)}$, МПа	$76,0 \pm 3,0$	$87,6 \pm 0,7$	–	–
$(\sigma_{12}^b)^{(2)}$, МПа	$97,5 \pm 3,8$	$108,5 \pm 5,0$	$202,6 \pm 9,1$	$218,1 \pm 26,3$
$(\sigma_{12}^b)^{(3)}$, МПа	$36,3 \pm 3,0$	$103,1 \pm 3,3$	$208,7 \pm 8,0$	$278,9 \pm 9,5$
$(\sigma_{12}^b)^{(4)}$, МПа	$56,5 \pm 2,0$	$67,9 \pm 1,3$	–	–

Примечание. Над чертой приведены результаты, полученные при использовании стандарта ASTM D 3039 [14], под чертой – ГОСТ 25.601 [13] и образцов в виде “лопаток”.

При вычислении параметров сдвига использовали три метода: метод растяжения полосы с укладкой $[\pm 45]_s$ [19], метод Иосипеску [20] для образцов с надрезами, вырезанных в главных направлениях, и метод растяжения анизотропной полосы, вырезанной под углом $\theta = 10^\circ$, к главному направлению в плоскости слоя [18].

В таблице верхний индекс (1) при обозначении модуля сдвига в плоскости слоя указывает, что данная характеристика определена на основании результатов, полученных при деформировании пластины со схемой формирования пакета $[\pm 45]_s$, индексы (2) и (3) относятся к экспериментальным результатам, полученным методом Иосипеску, индекс (4) при обозначении предельных напряжений сдвига соответствует результатам, полученным при растяжении анизотропной полосы, вырезанной под углом 10° к главному направлению композита. Как и следовало ожидать, при использовании метода Иосипеску получены заниженные значения прочности при сдвиге в плоскости слоя для композитов, упрочненных углеродными тканями.

Параметр $G_{12}^{(2)}$ определен при обработке результатов испытаний пластины с надрезами, если продольная ось образца совпадает с главным направлением максимальной продольной жесткости. И соответственно модуль сдвига $G_{12}^{(3)}$ получен этим

же методом при сдвиге в направлении минимальной продольной жесткости. Применительно к однонаправленным композитам отметим, что параметр $G_{12}^{(2)}$ определяет модуль сдвига при действии усилия перпендикулярно армирующим волокнам в плоскости слоя, а $G_{12}^{(3)}$ – то же при сдвиге вдоль упрочняющих волокон.

Таким образом, при использовании метода Иосипеску [20] получены разные значения модулей сдвига для существенно анизотропных материалов в зависимости от направления действующего усилия. При этом прочность при сдвиге также значительно различается. При испытаниях на растяжение полосы с укладкой слоев $\pm 45^\circ$ определяем только одно значение модуля сдвига и прочности при сдвиге.

Результаты испытаний на растяжение и сжатие углепластика УОЛ-300-1А показывают, что данный композит характеризуется очень высокой степенью анизотропии свойств: прочность при растяжении в направлении нитей основы почти в 70 раз выше, чем в направлении утка; модуль Юнга в направлении основы в 18 раз выше, чем в направлении утка. Данный углепластик обладает достаточно высокой прочностью при сжатии в направлении утка, которая приблизительно в шесть раз выше, чем при растяжении. При этом прочность при сжатии в направлении нитей основы в 2,2 раза меньше соответствующей прочности при растяжении. Заметим, что упругие характеристики при растяжении существенно отличаются от таковых при сжатии.

Опыты на растяжение и сжатие образцов из тканого углепластика УТ-900-3А показывают, что он практически изотропен. Незначительное различие в характеристиках упругости и прочности в главных направлениях может быть обусловлено разбросом данных и неточностей при изготовлении композита.

Отметим, что указанный углепластик обладает существенной “анизотропией” знака: прочность при сжатии в 1,5 раза меньше, чем при растяжении.

Слоистые углепластики УП-1 и УП-2 можно считать квазиизотропными, поскольку их прочность при растяжении и сжатии, а также модуль Юнга практически равны в направлениях главных осей.

Сравнение результатов испытаний на растяжение показывает, что углепластик УП-2 в три раза прочнее и его жесткость в три раза больше таковых углепластика УП-1 в обоих главных направлениях. Кроме того, как следует из данных таблицы, УП-2 при сжатии в 2,3 раза прочнее УП-1 в обоих главных направлениях.

Анализ результатов испытаний на сдвиг в плоскости армирования свидетельствует о том, что тканый углепластик УОЛ-300-1А очень чувствителен к направлению действия сдвиговой нагрузки: различие в значениях прочности составляет 2,7 раза, в значениях модулей сдвига – 1,5 раза. Этот факт должен учитываться при проектировании несущих элементов конструкций из данного материала. Тканый углепластик УТ-900-3А оказывает практически одинаковое сопротивление при сдвиге в плоскости армирования.

Существенное различие в значениях прочности наблюдается при сдвиге также для углепластика УП-2, хотя расхождение между модулями сдвига составляет всего 5%.

Как отмечалось выше, представленные в таблице эффективные характеристики материалов получены при усреднении результатов пяти испытаний. Для более точного определения искомых параметров необходимо учитывать данные, полученные при растяжении материалов согласно стандартам [17, 18].

Небольшие среднеквадратичные отклонения от средних значений параметров (таблица) свидетельствуют о соблюдении технологии изготовления композитов и хорошем уровне подготовки образцов для испытаний.

В инженерных расчетах в качестве модуля сдвига необходимо использовать среднее значение из двух приведенных $G_{12}^{(2)}$ и $G_{12}^{(3)}$, а также минимальное значение предельного сдвигового напряжения $(\sigma_{12}^b)^{(2)}$ и $(\sigma_{12}^b)^{(3)}$ – таблица.

Прогнозирование характеристик жесткости слоистых тканых композитов.

Исходя из механических характеристик нитей и матрицы, структуры ткани, объемного содержания арматуры и схемы укладки слоев можно рассчитать как характеристики жесткости элементарного слоя, так и слоистых композиций в целом [2].

Самая простая модель деформирования – мозаичная – позволяет определить только верхнюю и нижнюю границы жесткости композитов и служит для приближенной оценки таких параметров. Волнистая модель [2], в отличие от мозаичной, хотя и является одномерным приближением, позволяет учитывать непрерывность и криволинейность волокон. Значения модулей упругости и сдвига, полученные по этой модели, более точные. Модель преимущественно используется для анализа композитов с малыми значениями n_g , при расчетах материалов, армированных тканями сатинового или атласного переплетения, она менее эффективна.

Однако для такого анализа необходимо располагать более полной информацией о нитях используемых тканей. Например, знать углы поверхностной крутки нитей, их эффективный модуль упругости, высоту элементарного слоя и армирующей ткани, относительные объемные доли нитей основы и утка в композите и др. Возможности прогнозирования для стеклопластиков рассматривались в [21].

Эффективные характеристики прочности композитов, армированных тканями, могут быть определены только из соответствующих опытов.

На основании механических параметров элементарного слоя достаточно легко можно рассчитать эффективные характеристики жесткости слоистого пакета.

Будем считать известными механические характеристики жесткости слоев на основе углеродных лент УОЛ-300-1А и УТ-900-3А. Определим эффективные характеристики жесткости слоистых материалов исходя из термомеханических параметров слоев на основе уравнений теории упругости неоднородных сред, удовлетворяя при этом всем внешним краевым условиям и условиям непрерывности на поверхностях раздела слоев [11].

В результате вычислений для композита УП-1 получим: $E_1 = E_2 = 19,0$ ГПа, $G_{12} = 36,2$ ГПа, $\nu_{12} = 0,76$, для углепластика УП-2 – $E_1 = 50,4$ ГПа, $E_2 = 50,6$ ГПа, $G_{12} = 22,7$ ГПа, $\nu_{12} = 0,34$. Сравнение полученных значений с характеристиками упругости слоистых композитов (таблица) свидетельствует о хорошем соответствии модулей продольной упругости в главных направлениях. Несколько хуже коррелируют с результатами опытов модули сдвига G_{12} , однако максимальное расхождение при их определении не превышает 16,2%, что допустимо для материалов такого класса.

Оценивая в целом полученные характеристики жесткости, можно говорить об удовлетворительной корреляции расчетных данных с экспериментальными. Вычисленные характеристики жесткости слоистых структур, исходя из механических параметров отдельного слоя, могут быть использованы в качестве первого приближения на стадии проектирования композитов, армированных тканями материалами.

Выводы

1. В рамках модели ортотропного тела для случая плоского напряженного состояния определены характеристики упругости и прочности четырех слоистых композитов, армированных углеродными тканями.

2. Показано, что модули сдвига в плоскости слоя существенно анизотропных углепластиков зависят от направления приложенной нагрузки.

3. Полученные характеристики могут быть использованы в инженерной практике непосредственно для расчетов деформирования и несущей способности слоистых элементов конструкций, изготовленных на основе углеродных лент УОЛ-300-1А и УТ-900-3А.

4. Отмечено, что эффективные характеристики упругости слоистых тканых полимерных композитов могут быть вычислены на основании соответствующих параметров отдельного слоя и структуры пакета.

Авторы выражают искреннюю благодарность Главному конструктору ГП “Антонов” А. И. Семенцу за внимание и помощь в подготовке данной работы.

Резюме

Представлено результати експериментального дослідження деформування і міцності вуглепластиків, армованих тканинами УОЛ-300-1А та УТ-900-3А, і шаруватих композитів, виготовлених на їх основі, за кімнатної температури. Визначено характеристики пружності і міцності матеріалів в умовах плоского напруженого стану. Досліджуються особливості визначення характеристик пружності і міцності шаруватих композитів, армованих вуглецевими тканинами. Аналізується ефективність прогнозування характеристик пружності шаруватих тканних композитів на основі відповідних параметрів окремого шару.

1. Кондратьев А. В., Коваленко В. А. Обзор и анализ мировых тенденций и проблем расширения применения в агрегатах ракетно-космической техники полимерных композиционных материалов // *Вопр. проектирования и пр-ва конструкций летательных аппаратов*. – 2011. – № 3 (67). – С. 7–18.
2. *Тканые конструкционные композиты* / Пер. с англ. под ред. Н. П. Жмудя, В. Л. Кулакова. – М.: Мир, 1991. – 432 с.
3. Key C. T., Six R. W., and Hausen A. C. A tree constituent multicontinuum theory for woven fabric composite materials // *Compos. Sci. Technol.* – 2003. – 13, No. 13. – P. 1857–1864.
4. Cruz J. R., Shah C. H., and Postyn A. S. Properties of Two Carbon Composite Materials Using LTM25 Epoxy Resin // *NASA Technical Memorandum 110286*, Langley Research Center, Hampton, VA, 1996.
5. Гуняев Г. М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. – М.: Химия, 1981. – 232 с.
6. *Углеродные волокна и углекомпозиты* / Пер. с англ. под ред Э. Фитцера. – М.: Мир, 1988. – 336 с.
7. *Composite Materials Handbook. Vol. 2: Polymer Matrix Composite, Materials Properties*. – MIL-HDBK-17-2F. Department of Defense, USA, 1999. – 529 p.
8. *Композиционные материалы. Справочник* / Под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
9. *Композиционные материалы. В 8 т. Т. 5: Разрушение и усталость* / Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. – М.: Мир, 1978. – 484 с.
10. *Кристенсен Р. Введение в механику композитов* / Пер. с англ. под ред. Ю. М. Тарнопольского. – М.: Мир, 1978. – 564 с.
11. *Композиционные материалы. В 8 т. Т. 2: Механика композиционных материалов* / Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока, Дж. Сендецки. – М.: Мир, 1978. – 564 с.
12. Лехницкий С. Г. Теория упругости анизотропного тела. – М.: Наука, 1977. – 415 с.
13. *ГОСТ 25601-80. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытаний плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах*. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 16 с.

14. *ASTM D3039/D3039M-14*. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials // ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
15. *ГОСТ 25602-80*. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытаний плоских образцов на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 18 с.
16. *ASTM D3410/D3410M-16*. Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading // ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
17. *Тарнопольский Ю. М., Кинцис Т. Я.* Методы статических испытаний армированных пластиков. – М.: Химия, 1981. – 272 с.
18. *Tarnopol'skii Yu. M. and Kulakov V. L.* Test methods for composites. Survey of investigations carried out in the PMI of Latvian Academy of Sciences in 1964–2000 // *Mech. Compos. Mater.* – 2001. – **37**, No. 5/6. – P. 431–448.
19. *ASTM D3518/D3518M-13*. Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate // ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
20. *ASTM D5379/D5379M-12*. Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method // ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
21. *Кучер Н. К., Земцов М. П., Двейрин А. З., Анкянец О. К.* Модели деформирования и прочность материалов сатиновой структуры // *Надійність і довговічність машин і споруд.* – 2004. – № 2. – С. 62–68.

Поступила 01. 04. 2015