

УДК 678.057:620.17:539.37

О ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНЫХ СВОЙСТВАХ
СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ТРУБ ПРИ ПОВТОРНО-
СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ
ОТКЛОНЕНИЙ ОРИЕНТАЦИИ АРМИРОВАНИЯ

Карапետян К.А.

Կ.Ա. Կարապետյան

Ապակեպլաստի խողովակների ամրությունը և դեֆորմատիվ հատկությունները
կրկնվող-ստատիկ բեռնավորման դեպքում կախված ամրանավորման
կողմնորոշվածության շեղվածությունից

Ինքուժմ են շերտավոր ապակեպլաստների ամրության և դեֆորմատիվ հատկությունների
կապերի մեծապես կետագոտությունների արդյունքները կախված նրանց պատրաստման ժամանակ
ամրանավորման կողմնորոշվածության հնարավոր շեղվածությունից:

Ստացված է, որ նախագծվածից 6-8° ամրանավորման կողմնորոշվածության շեղվածության
առկայությունը գործնականում չազդելով ապակեպլաստների ամրության և Պուասոնի գործակցի
մեծությունների վրա, բերում է նրանց դեֆորմատիվ հատկությունների էական փոփոխմանը:

К.А. Karapetyan

On strength and strain properties of glass-fibre pipes at repeatedly-static loadings depending
on deviations of orientation of reinforcement

Приводятся результаты экспериментального исследования прочности и деформативных
свойств слоистых стеклопластиков в зависимости от возможного отклонения ориентации
армирования при их изготовлении.

Получено, что отклонение от запроектированного, ориентации армирования в пределах
6-8° практически не влияет на значения прочности и коэффициента Пуассона, приводит к
существенному изменению деформативных свойств стеклопластиков.

Для оптимального проектирования конструкций из армированных
композитных материалов (АКМ) необходим учет специфики их
механических свойств при различных напряженно-деформационных
состояниях [1,2 и др.].

Анализ опубликованных данных по механическим свойствам АКМ
показывает, что в ряде случаев численные оценки для одного и того же
класса композитов существенно различаются между собой [3-6 и др.]. При
этом большой разброс объясняется не только несовершенством
технологии, но и отклонением углов армирования от запроектированных.

Согласно данным, приведенным в работе [5], при некоторых углах
вырезки ошибка в 5° может внести погрешность для значений модулей
упругости и коэффициента Пуассона высокомодульных (армированных
боро-, угле-, волокнами) композитов до 100% и более и, поэтому, при
проектировании конструкций предлагается установить жесткие допуски
на углы армирования.

Однако, как показывает практика, даже при изготовлении в лабора-
торных условиях опытных образцов на основе стеклоткани, величина угла
отклонения армирования от заданного может достигать до 6-8°.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования влияния отклонений углов армирования на прочность и деформативные свойства стеклотканевых труб, подвергнутых повторно-статическому осевому растяжению и простому кручению.

В качестве опытных образцов были использованы трубы с внутренним диаметром 38 мм, толщиной стенки 2,25 мм и длиной 285 мм, изготовленные методом горячего прессования с использованием стекловолокнистой ткани. Технология изготовления этих труб изложена в работе [7]. Образцы были изготовлены таким образом, что направления основы стеклоткани и продольной оси труб совпадали ($\varphi=0^\circ$). Однако у части образцов (около 8% от общего количества) было обнаружено отклонение угла армирования в пределах $6-8^\circ$.

При проведении опытов образцы были разделены на 2 партии. У образцов одной партии направления основы стеклоткани и их оси совпадали ($\varphi=0^\circ$). У образцов другой партии величина угла между этими направлениями составляла $\varphi=6-8^\circ$.

Значение максимального напряжения при циклическом испытании труб на растяжение (средняя скорость нагружения - 0,27 МПа/сек) и на кручение (средняя скорость нагружения - 0,1 МПа/сек) составляло, соответственно, 0,6 и 0,3 части от величины их временного сопротивления при растяжении $\sigma_B=147,1$ МПа и при кручении $\tau_B=47,1$ МПа. Базовое значение числа циклов испытаний труб было принято равным 12. При испытании в каждом случае 3-4 образцов-близнецов измерялись как продольные, так и сдвиговые деформации.

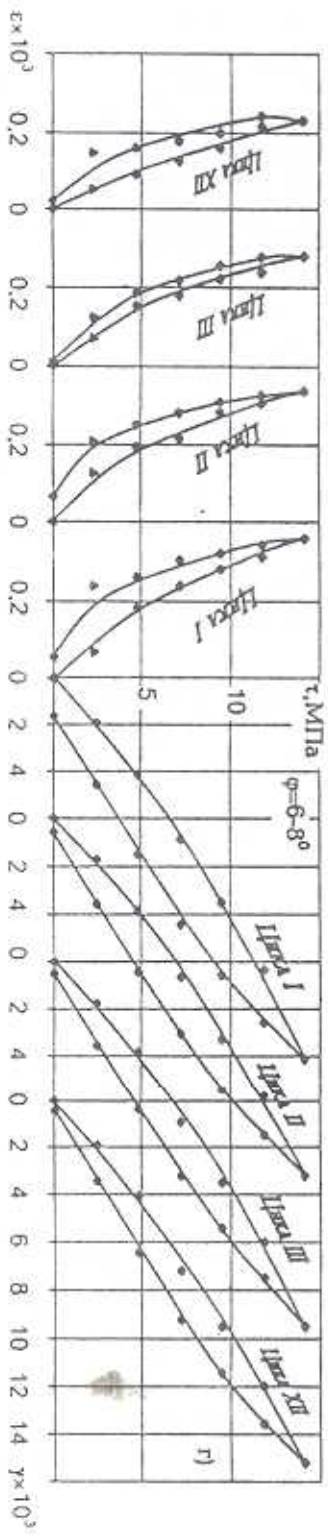
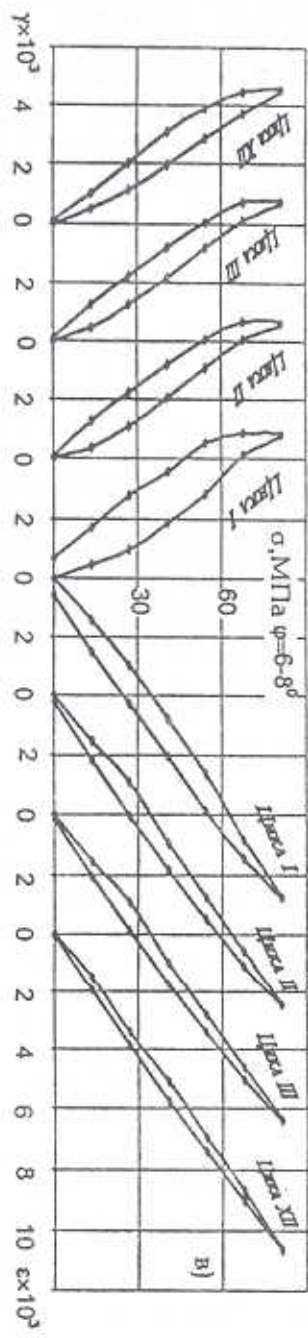
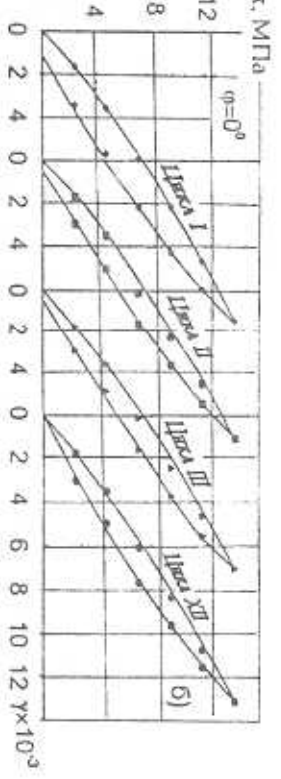
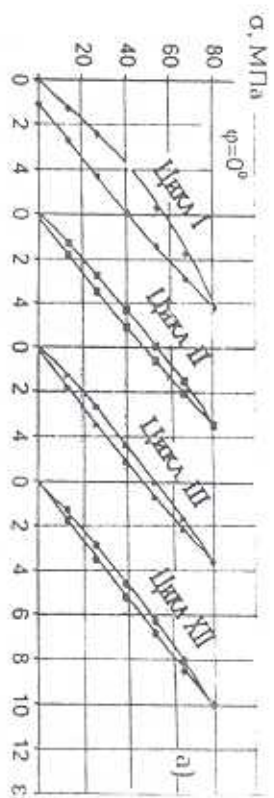
Согласно полученным экспериментальным данным, отклонение величины угла армирования на $6-8^\circ$ от нулевого его значения практически не влияет на значения прочности тонкостенных стеклотканевых труб при осевом растяжении и при кручении.

На фиг. 1 приведены диаграммы деформирования, полученные при I, II, III и XII циклах испытания на осевое растяжение и на кручение стеклотканевых труб с $\varphi=0^\circ$ и $\varphi=6-8^\circ$.

По расчетам, проведенным на основе экспериментальных данных, отклонение угла армирования стеклотканевых труб на $6-8^\circ$ от нулевого угла армирования приводит к снижению величин модулей Юнга и сдвига в среднем на 24 и 16% соответственно.

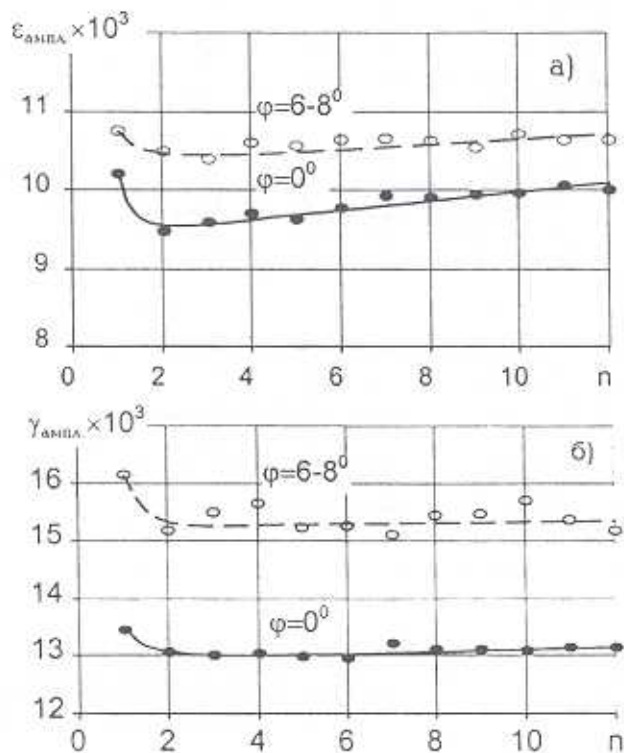
Из левых частей фиг. 1, в и 1, г следует, что отклонения угла армирования стеклотканевых труб в вышеуказанных пределах приводит к возникновению существенных сдвиговых деформаций при осевом растяжении и некоторых осевых деформаций при кручении, что закономерно [8]. Расчеты показывают, что при нагружении аналогичных стеклотканевых труб растягивающим напряжением $\sigma_x=0,6\sigma_B$ величина угла закручивания на 1 м длины составляет $13-14^\circ$. При кручении таких труб крутящим моментом, соответствующим $0,3\tau_B$, абсолютное удлинение или укорочение (в зависимости от направления крутящего момента [8]) составляет 0,30-0,35 мм на 1 м длины.

На фиг. 2 и 3 приведены кривые изменения амплитудных продольных и сдвиговых, зафиксированных при σ_{max} и τ_{max} , а также остаточных деформаций в пределах цикла в зависимости от номера цикла l .



Фиг. 1 Анаграммы деформирования в приводах (цикал и режине нагружение-разгрузка в условиях осевого растяжения и простого кручения) стержневых труб с углом армирования $\varphi=0^\circ$ (а и б) и $\varphi=6-8^\circ$ (в и г).

Согласно графикам фиг. 2, независимо от вида нагружения, значения амплитудных деформаций цикла обеих партий труб после первого цикла испытания несколько уменьшаются, а в дальнейшем, с увеличением числа циклов n наблюдается их монотонное увеличение. Величина отношений амплитудных деформаций труб с $\varphi=6-8^\circ$ и $\varphi=0^\circ$ практически не зависит от числа циклов n и составляет 1,06-1,1 при осевом растяжении и 1,16-1,2 — при кручении.



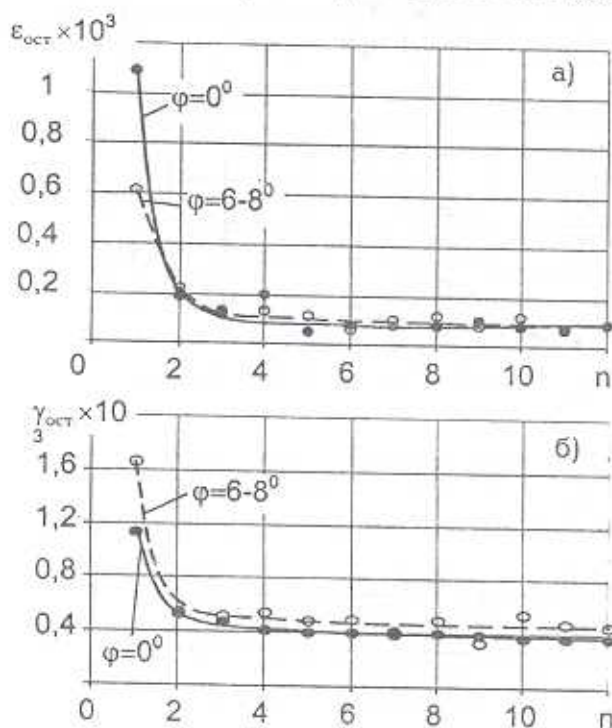
Фиг. 2. Кривые изменения амплитудных продольных (а) и сдвиговых (б) деформаций цикла стеклотканевых труб с углом армирования $\varphi=0^\circ$ и $\varphi=6-8^\circ$ в зависимости от номера цикла испытаний.

Отметим, что величины амплитудных сдвиговых деформаций цикла у труб с $\varphi=6-8^\circ$, зафиксированных при их осевом растяжении, и продольных осевых деформаций аналогичных труб, подвергнутых кручению, не зависят от количества циклов испытаний и составляют $(4,5-4,8) \times 10^{-3}$ и $(0,3-0,35) \times 10^{-3}$ соответственно.

Из графиков фиг. 3 следует, что в рассматриваемых видах испытания, величины остаточных деформаций цикла у обеих партий опытных образцов с увеличением числа циклов n монотонно стремятся к величинам, существенно меньшим их соответствующих значений, полученных при 1 цикле.

При 1 цикле испытания на осевое растяжение величина остаточных деформаций цикла у образцов с $\varphi=0^\circ$ получилась существенно большей (приблизительно в 1,8 раза), чем у образцов с $\varphi=6-8^\circ$ (фиг. 3а). В случае же кручения наблюдается обратное явление — значение указанного выше отношения составляет приблизительно 0,7 (фиг. 3б). Несмотря на это, на

основе сравнения амплитудных и остаточных величин деформаций, полученных при одном и том же цикле аналогичных испытаний, можно считать, что в рассматриваемых случаях образование замкнутой петли гистерезиса практически происходит через 5-6 циклов.



Фиг. 3. Кривые изменения остаточных продольных (а) и сдвиговых (б) деформаций цикла стеклотканевых труб с углом армирования $\varphi=0^\circ$ и $\varphi=6-8^\circ$ в зависимости от номера цикла испытаний.

Динамика образования петли гистерезиса сдвиговых и продольных деформаций стеклотканевых труб с отклонением направления основы ткани от продольной оси в пределах $6-8^\circ$ оказывается аналогичной.

Известно, что для определения некоторых характеристик материала, деформируемого в режиме нагрузка-разгрузка (например, коэффициент рассеяния энергии) целесообразно исходить из зависимости между интенсивностями касательных напряжений T и деформаций сдвига Γ [9].

Учитывая вышесказанное, для аналитического описания процесса деформирования стеклотканевых труб за цикл испытания исходили из экспериментально полученных зависимостей между указанными выше характеристиками, выражения которых в цилиндрической координатной системе соответственно следующие [10]:

$$T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{zr}^2 + \tau_{r\theta}^2 + \tau_{\theta z}^2)} \quad (1)$$

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{zr}^2 + \gamma_{r\theta}^2 + \gamma_{\theta z}^2)} \quad (2)$$

В случае осевого растяжения и простого кручения обеих партий тонкостенных трубчатых образцов для интенсивностей касательных

напряжений, соответственно, имеем

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}} |\sigma_z| \quad (3)$$

$$T = |\tau_{\theta z}| \quad (4)$$

Выражения интенсивностей деформаций сдвига при осевом растяжении и простом кручении труб с $\varphi=0^\circ$ следующие:

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2} \quad (5)$$

$$\Gamma = |\gamma_{\theta z}| \quad (6)$$

При растяжении и простом кручении труб с углом армирования $\varphi=6^\circ-8^\circ$, выражения интенсивностей деформаций сдвига в обоих случаях принимают следующий вид:

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + \frac{3}{2} \gamma_{\theta z}^2} \quad (7)$$

В случае действия осевого растяжения в направлении z в выражениях (5) и (7) $\varepsilon_r = \nu_1 \varepsilon_z$, $\varepsilon_\theta = \nu_2 \varepsilon_z$, где ν_1 и ν_2 — коэффициенты Пуассона соответственно в радиальном и окружном направлениях.

В результате проведенных испытаний образцов в виде удлиненных двухсторонних лопаток по DIN 53455 [11] установлено, что в случае тканевых стеклопластиков отклонение угла армирования на $6-8^\circ$ от нулевого его значения практически не влияет на величины ν_1 и ν_2 и при расчетах их значения можно принять равным приблизительно 0,2 и 0,16, соответственно.

В случае же действия крутящего момента $M_{\theta z}$, как это имело место и при первом цикле нагружения, осевые деформации оказались существенно меньшими касательной деформации $\gamma_{\theta z}$, что позволило ими пренебречь в формуле (7).

Аналитическое описание экспериментально полученных соотношений между T и Γ на участках восходящей (\rightarrow) и нисходящей (\leftarrow) ветвей петли гистерезиса при рассматриваемых случаях испытания трубчатых образцов осуществлено дробнолинейной аппроксимацией следующего вида:

$$\bar{T} = \frac{T_B}{\bar{a}} \cdot \frac{\Gamma}{1 \pm \Gamma \bar{b} / \bar{a}} \quad (8)$$

Для касательных модулей по ветвям петли гистерезиса с учетом зависимости (8) имеем:

$$\frac{d\bar{T}}{d\Gamma} = \frac{T_B}{\bar{a}} \left(1 \mp \bar{b} \frac{\Gamma}{T_B} \right)^2 \quad (9)$$

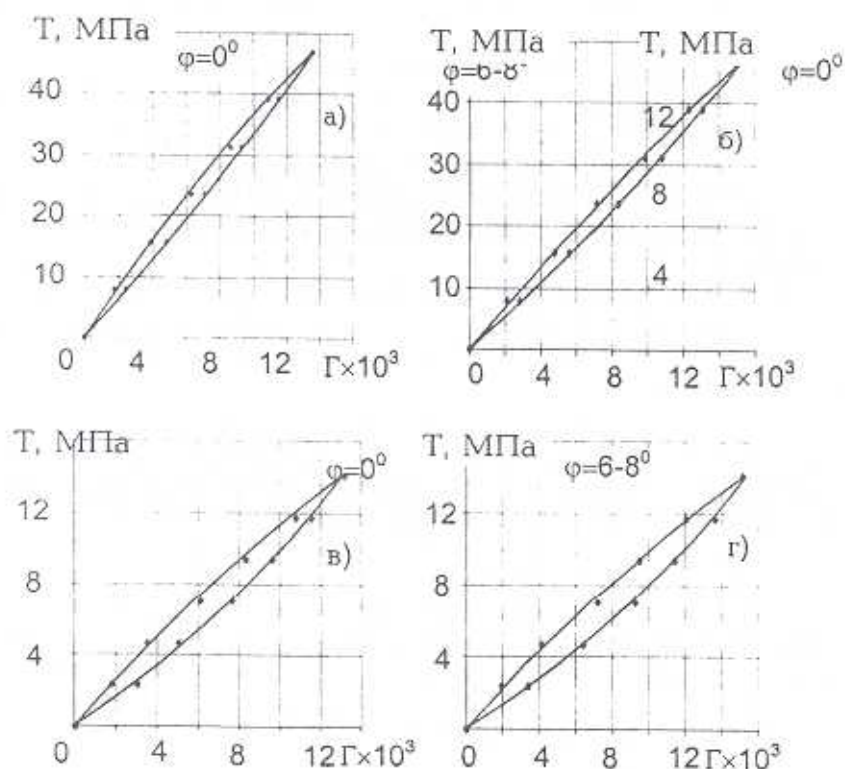
В выражениях (8), (9) T и Γ — текущие значения интенсивностей касательных напряжений и деформации сдвига, T_B — предельное значение T , рассчитанное по формулам (3) и (4) с использованием данных, полученных при соответствующих испытаниях труб, a и b — геометрические параметры петли гистерезиса, определяемые непосредственно из опытных данных.

Значения параметров, входящих в (8) и (9), рассчитанные для XII цикла испытания образцов, приведены в табл. 1.

Построенные согласно зависимости (8), кривые петли гистерезиса в координатной системе Т-Г с использованием данных табл. 1 приведены на фиг. 4. На этой же фигуре точками показаны экспериментальные результаты.

Таблица 1.

Вид испытания образцов	Величина угла армирования	T_B МПа	Величины параметров					
			$\Gamma_{ампл} \times 10^3$	По восходящей ветви гистерезиса		По нисходящей ветви гистерезиса		ψ
				$\bar{a} \times 10^3$	\bar{b}	$\bar{a} \times 10^3$	\bar{b}	
Растяжение	$\varphi=0^\circ$	84.93	13.58	19.641	0.359	26.984	0.156	0.11
	$\varphi=6-8^\circ$	84.93	15.20	24.61	0.19	32.828	0.339	0.10
Кручение	$\varphi=0^\circ$	47.1	13.10	34.636	0.682	59.986	1.238	0.17
	$\varphi=6-8^\circ$	47.1	15.20	41.459	0.597	73.422	1.452	0.19



Фиг. 4. Кривые петли гистерезиса, построенные согласно зависимости (8), в случае осевого растяжения и простого кручения стеклотканевых труб с $\varphi=0^\circ$ (а и в) и труб с $\varphi=6-8^\circ$ (б и г).

Из фиг. 4 можно заключить, что дробнолинейная зависимость (8) с достаточной для практики точностью описывает процесс деформирования в режиме нагружение-разгрузка в условиях осевого растяжения и

простого кручения стеклотканевых труб с $\varphi=0^\circ$ и $\varphi=6-8^\circ$.

Величины касательных модулей по восходящей и нисходящей ветвям петли гистерезиса, рассчитанные по зависимости (9) при различных уровнях T с использованием данных табл. 1, приведены в табл. 2.

Из данных табл. 2 можно заключить, что в случае растяжения при некотором уровне интенсивности касательных напряжений T^* (в данном случае $T^*=40$ МПа) отклонение угла армирования стеклотканевых труб на $6^\circ-8^\circ$ от нулевого угла практически не влияет на величину касательных модулей, определенных как по восходящей, так и по нисходящей ветвям петли гистерезиса. При $T < T^*$ вышеупомянутое отклонение угла армирования приводит к уменьшению величин касательных модулей по сравнению с аналогичными характеристиками, полученными для труб с $\varphi=0$. При $T > T^*$ имеет место обратное явление (табл. 2).

В случае же кручения значения касательных модулей для одного и того же уровня T у труб с $\varphi=0^\circ$ оказались существенно большими, чем у труб с $\varphi=6^\circ-8^\circ$ как по восходящей, так и по нисходящей ветвям петли гистерезиса (табл. 2). С увеличением уровня T указанная выше разница между значениями касательных модулей уменьшается (табл. 2).

Таблица 2

Направление обхода по петле гистерезиса	Величина угла армирования φ	Значения касательных модулей, МПа $\times 10^{-3}$					
		В случае растяжения при T , МПа			В случае кручения при T , МПа		
		0	40	80	0	7	14
По восходящей ветви	0°	4.324	2.985	1.894	1.360	1.098	0.864
	$6-8^\circ$	3.450	2.860	2.326	1.136	0.943	0.769
По нисходящей ветви	0°	3.147	3.626	4.140	0.785	1.100	1.469
	$6-8^\circ$	2.587	3.480	4.503	0.641	0.948	1.314

Известно, что неупругое поведение материала, деформируемого в режиме нагружение-разгрузка, оценивается по коэффициенту относительного рассеяния энергии ψ , исходя из зависимости [12,13]

$$\psi = \frac{\Delta W}{W} \quad (10)$$

где ΔW — энергия рассеяния, W — полная энергия деформации.

Учитывая то, что величины рассеиваемой за цикл энергии ΔW и полной энергии деформирования W эквивалентны соответственно величинам площади петли гистерезиса и площади, ограниченной

восходящей ветвью гистерезиса и осью Γ , обозначая $\frac{\bar{a}}{\bar{b}} = \bar{\chi}$ и учитывая

зависимости (8) и (10), для коэффициента рассеяния энергии имеем:

$$\psi = \frac{\Delta W}{W} = \frac{\int_0^{\Gamma_{\text{ампл}}} \frac{T_B}{\bar{a}} \cdot \frac{\Gamma}{1+\Gamma/\bar{\chi}} d\Gamma - \int_0^{\Gamma_{\text{ампл}}} \frac{T_B}{\bar{a}} \cdot \frac{\Gamma}{1-\Gamma/\bar{\chi}} d\Gamma}{\int_0^{\Gamma_{\text{ампл}}} \frac{T_B}{\bar{a}} \cdot \frac{\Gamma}{1+\Gamma/\bar{\chi}} d\Gamma} \quad (11)$$

После некоторых выкладок для коэффициента ψ получим следующее выражение:

$$\psi = 1 - \frac{\bar{b} \left\{ -\Gamma_{\text{ампл}} - \bar{\chi} \ln \left| 1 - \Gamma_{\text{ампл}} / \bar{\chi} \right| \right\}}{\bar{b} \left\{ \Gamma_{\text{ампл}} - \bar{\chi} \ln \left| 1 + \Gamma_{\text{ампл}} / \bar{\chi} \right| \right\}} \quad (12)$$

где $\Gamma_{\text{ампл}}$ — амплитудное значение интенсивности деформации сдвига.

Рассчитанные по (12), с использованием данных табл. 1, величины коэффициента ψ при вышеуказанных случаях испытания стеклотканевых трубчатых образцов приведены в этой же таблице.

Выводы

1. Изменения величин прочности при осевом растяжении и при простом кручении тонкостенных стеклотканевых труб, вследствие отклонения направления основы ткани от направления продольной оси в пределах $6-8^\circ$, несущественны, и они находятся в пределах разброса полученных опытных данных.

2. При нулевых углах армирования тканевых стеклопластиковых труб ошибка в угле армирования на $6-8^\circ$ может внести погрешность для значений модулей Юнга и сдвига в среднем на 24 и 16% соответственно, хотя и такое отклонение угла армирования практически не влияет на значения коэффициента Пуассона тканевых стеклопластиков.

3. Отклонение угла армирования на $6-8^\circ$ практически не влияет на динамику образования петли гистерезиса и на величину коэффициента рассеяния энергии тонкостенных стеклотканевых труб, деформируемых в режиме нагружение-разгрузка как в условиях осевого растяжения, так и простого кручения.

4. При проектировании конструкций из тканевых стеклопластиков следует учесть, что возможное несоблюдение угла ориентации армирования их элементов в виде длинных тонкостенных труб, претерпевающих эксплуатационные осевые растягивающие или крутящие нагрузки, может привести к существенному искажению напряженно-деформативного состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Механика композитов. В 12 томах. Механика разрушения. Т. 5. (под общей редакцией Гузя А.Н.) Киев: ПТОО "А.С.К.", 1996. 340 с.
2. Симонян А.М. Некоторые вопросы ползучести. Ереван: Изд. Гитутюн НАН РА, 1999. 255 с.
3. Гольдман А.Я., Савельева Н.Ф. О напряженном состоянии и некоторых особенностях разрушения образцов стеклопластиков при растяжении под углом к направлению армирования // Механика полимеров. 1967. №6, с. 1030-1039.
4. Розе А.В. Влияние межслойной жесткости и прочности при плоском нагружении материалов, армированных волокнами // Механика полимеров. 1970. №5. С. 876-883.
5. Тарнопольский Ю.М., Розе А.В., Жигун И.Г., Гуняев Г.М. Конструкционные особенности материалов, армированных высококомодульными волокнами // Механика полимеров. 1971. №4. С. 676-685.
6. Chiao C.C., Chiao T.T. Aramid Fibers and Composites. Preprint UCRL-80400. California: Livermore, 1977. 120 p.
7. Карапетян К.А., Саркисян Н.Е., Хачикян А.Г. Прочность и деформативность слоистых пластиков при сложном нагружении // Изв. НАН и ГИУ Армении. ТН. 1998. LI. №2, С. 127-132.
8. Мовсисян Л.А. О некоторых специфических особенностях анизотропных оболочек. // Изв. АН Арм. ССР. Сер физ-мат. наук. 1958. Т. XI. №4. С. 137-144.
9. Ильющин А.А. Пластичность. М.-Л.: Гостехиздат, 1948. 376 с.
10. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.
11. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. М.: Изд. Химия, 1981. 272 с.
12. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. М.: Гос. изд. физ.-мат. литературы, 1960. 193 с.
13. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. Киев: Наукова думка, 1971. 375 с.

Институт механики
НАН Армении

Поступила в редакцию
27.12.2000