

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РАЗОРИЕНТАЦИИ АРМИРОВАНИЯ
НА ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ
ТРУБ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ ИЛИ ПОВТОРНО-СТАТИЧЕСКОМ
ПРОСТОМ КРУЧЕНИИ**

К.А. Карапетян

Институт механики НАН РА

Обсуждаются вопросы влияния нарушения симметричности армирования относительно оси (разориентация), возникающего при переработке материала в изделие, на специфику деформационного поведения стеклотканевых трубчатых элементов при статическом или повторно-статическом кручении, а также на их сдвиговую прочность. Выявлено, что отклонение угла армирования в пределах $6...8^\circ$ от нулевого его значения практически не влияет на прочность стеклотканевых труб при простом кручении. Экспериментально установлено, что при статическом кручении у разориентированных стеклотканевых труб возникают и осевые, а при повторно-статическом их кручении – и циклические осевые деформации, сопутствующие основным сдвиговым деформациям. Отмечается, что путем конструктивного решения задачи можно достичь устранения, в известной мере, отрицательного влияния разориентации армирования на работу стеклотканевых трубчатых конструктивных элементов, эксплуатируемых в условиях действия статического или повторно-статического крутящего момента.

Ключевые слова: стеклопласт, трубчатый элемент, разориентация армирования, простое кручение, повторно-статическое кручение, деформационное поведение.

Введение. Разориентация армирования (отклонение направления волокон в слоях материала от проектируемого значения) является одним из макродефектов структуры армированных композитов. Наличие этого явления, обусловленного в основном несовершенством технологии переработки материала в изделие, может привести к большому разбросу величин показателей идентичных механических характеристик, полученных в результате испытания одного и того же класса армированных композитных материалов [1-5], а также может стать причиной того, что значения механических характеристик армированных композитов в изделиях существенно будут отличаться от величин одноименных характеристик, определенных стандартными методами испытаний [6]. Роль разориентации армирования может оказаться весьма существенной особенно в деформационном поведении пространственных тонкостенных конструкций из армированных композитов при различных силовых воздействиях [7].

Представление о влиянии разориентации армирования на механические свойства армированных композитов можно получить теоретически - путем вычисления коэффициентов податливости материала в координатной системе, повернутой на соответствующий угол вокруг некоторой оси [8], или экспериментально.

В данной работе обсуждается вопрос влияния разориентации армирования на деформационное поведение тонкостенных труб из слоистого стеклопластика при статическом или повторно-статическом простом кручении.

Метод исследования. Проведенные наблюдения показывают, что даже при изготовлении в лабораторных условиях стеклотканевых труб с нулевым углом армирования (направление основы стеклоткани совпадает с направлением оси труб, $\varphi = 0^\circ$) у части труб (около 7% от общего количества) обнаруживается отклонение угла армирования от заданного в пределах $6...8^\circ$ [9]. Учитывая отмеченное, а также исходя из цели поставленной здесь задачи, для осуществления экспериментальной части исследований были изготовлены две партии стеклотканевых трубчатых образцов с внутренним диаметром 38 мм, толщиной стенки 2,25 мм и длиной 285 мм. У одной партии труб величина угла между основой стеклоткани и их продольной осью составляла $\varphi = 0^\circ$, а у другой $-\varphi = 6...8^\circ$.

Опытные трубчатые образцы были получены методом намотки стеклоткани, предварительно пропитанной модифицированной эпоксидной смолой (препрег), на металлическую оправку с последующим горячим прессованием по боковой поверхности в специальных формах [10]. Была использована стекловолокнистая ткань марки Т-23 (ТУ 6-11-231-76) толщиной 0,27 мм, плотностью (число нитей на 1 см^2) 36:20 (основа: уток), производимой Севанским заводом "Электростеклоизоляция" (Республика Армения). Величина коэффициента армирования стеклопластика составляла $\mu = 0,45$ ($\mu_{\text{основа}} = 0,29$, $\mu_{\text{уток}} = 0,16$).

Определение прочности стеклотканевых труб на чистый сдвиг $\tau_{\theta z}^B$ проводилось при относительной скорости поворота зажимов испытательной машины $5 \pm 0,5 \text{ град/мин}$. Для построения диаграмм напряжение-деформация испытания труб производились ступенчатым повышением крутящего момента с шагом, соответствующим $0,05...0,07 \tau_{\theta z}^B$, и выдержкой под каждой ступенью лишь на время, необходимое для снятия отсчетов по приборам, измеряющим как угловые, так и продольные деформации.

При проведении испытаний труб на повторно-статическое ступенчатое кручение (средняя скорость нагружения 6 МПа/мин) величина амплитудного крутящего момента соответствовала $0,3 \tau_{\theta z}^B$. Базовое значение числа циклов n испытаний труб составляло 12. При этом кручение производилось в

направлении увеличения отклонения угла армирования, как это было осуществлено в случае статических испытаний труб.

Повторность опытов в случае испытания труб на статическое кручение была принята шестикратной, а в случае повторно–статического кручения – трех–четырёхкратной. В первом случае максимальная величина коэффициента вариации не превышала 0,11 в случае прочности и 0,14 – в случае показателей деформаций. Во втором случае максимальный разброс амплитудных (зафиксированных при $\tau_{\theta z \max}$) и остаточных (после полной разгрузки) деформаций цикла по отношению к их средней арифметической величине составлял соответственно, %: +2,6; -2,7 и +3,1; -4,5.

Отметим, что испытания стеклотканевых трубчатых образцов были осуществлены через 8...9 лет после их изготовления. До этого образцы хранились в лабораторном помещении при температуре $20 \pm 6^\circ$ и относительной влажности $60 \pm 8\%$.

Результаты исследования. Прежде чем перейти к обсуждению рассматриваемых здесь задач, отметим, что в работах [5 и 9] представлены результаты исследования влияния изначальной разориентации армирования на прочность и специфику деформационного поведения стеклотканевых труб, подвергнутых соответственно статическому и повторно-статическому осевому растяжению, а также простому кручению. В настоящей статье представлены отдельные данные из указанных работ, позволяющие сформулировать некоторые обобщающие выводы.

Согласно данным, полученным в результате проведения статических испытаний, отклонение угла армирования в пределах $6...8^\circ$ от нулевого его значения практически не влияет на сдвиговую прочность стеклотканевых труб.

Среднее значение этой характеристики можно принять равным $\tau_{\theta z}^B = 47 \text{ МПа}$.

Из сравнения данных, представленных в правом поле рис. 1, замечаем, что сопротивляемость деформированию при статическом простом кручении разориентированных стеклотканевых труб значительно меньше, чем труб с нулевым углом армирования. При этом величина отношения сдвиговых деформаций труб с $\varphi = 6...8^\circ$ и $\varphi = 0^\circ$, зафиксированных при одном и том же уровне касательного напряжения $\tau_{\theta z}$, практически не зависит от уровня напряжения и составляет 1,2...1,3.

В результате статических испытаний также было выявлено, что при кручении стеклотканевых труб с углом армирования $\varphi = 6...8^\circ$ возникают и осевые (продольные) деформации ε_{zz} , сопутствующие основным сдвиговым $\gamma_{\theta z}$ (см. левое поле рис. 1). При уровне напряжения $\tau_{\theta z} = 0,3\tau_{\theta z}^B$ значение продольных деформаций составляет $\varepsilon_{zz} = 0,62 \cdot 10^{-3}$, в то время как величина деформаций сдвига этих же труб составляет $\gamma_{\theta z} = 20,4 \cdot 10^{-3}$. Это означает, что при кручении аналогичных труб крутящим моментом, соответствующим

$0,3\tau_{\theta_z}^B$, абсолютное удлинение или укорочение (в зависимости от направления крутящего момента [7]) составит приблизительно 0,62 мм на 1 м длины.

Очевидно, что и в случае простого кручения композитных трубчатых элементов, изготовленных путем перекрестной намотки, нарушение симметричности намотки относительно оси приведет к возникновению продольных деформаций, сопутствующих основным сдвиговым.

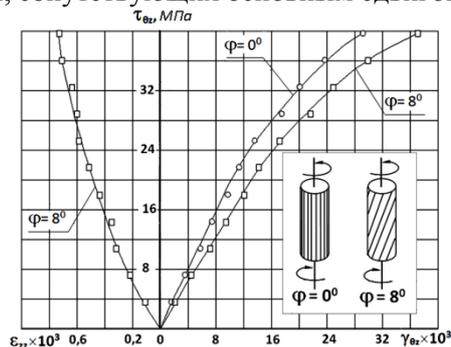


Рис. 1. Кривые деформирования стеклотканевых труб с углом армирования φ , подвергнутых простому кручению

Рассмотрим результаты повторно-статических испытаний.

На рис. 2 представлены диаграммы деформирования, полученные при I, II, III и XII циклах испытания стеклотканевых труб на повторно-статическое простое кручение.

Из диаграмм, приведенных на рис. 2а и б, замечаем, что в рассматриваемом случае нагружения-разгрузки с увеличением номера цикла испытаний n имеет место тенденция сближения восходящих и нисходящих ветвей петель гистерезиса независимо от величины угла φ армирования труб. При этом ветви петли гистерезиса сохраняют направление выпуклости или вогнутости при всех циклах нагружения – разгрузки.

Согласно данным, приведенным в левом поле рис. 2б, при повторно-статическом кручении у разориентированных стеклотканевых труб возникают и циклические осевые деформации, сопутствующие основным сдвиговым, независимо от номера цикла испытаний. При этом поведение кривых сопутствующих и основных деформаций в рассматриваемом диапазоне циклов испытаний труб практически носит один и тот же характер.

Можно ожидать, что и в случае повторно-статического кручения труб из армированных композитов, изготовленных путем перекрестной намотки, нарушение симметричности намотки относительно их оси может явиться причиной возникновения циклических продольных деформаций. На рис. 3 приведены диаграммы изменения амплитудных и остаточных сдвиговых (основных) деформаций в пределах цикла в зависимости от номера цикла испытаний n стеклотканевых труб.

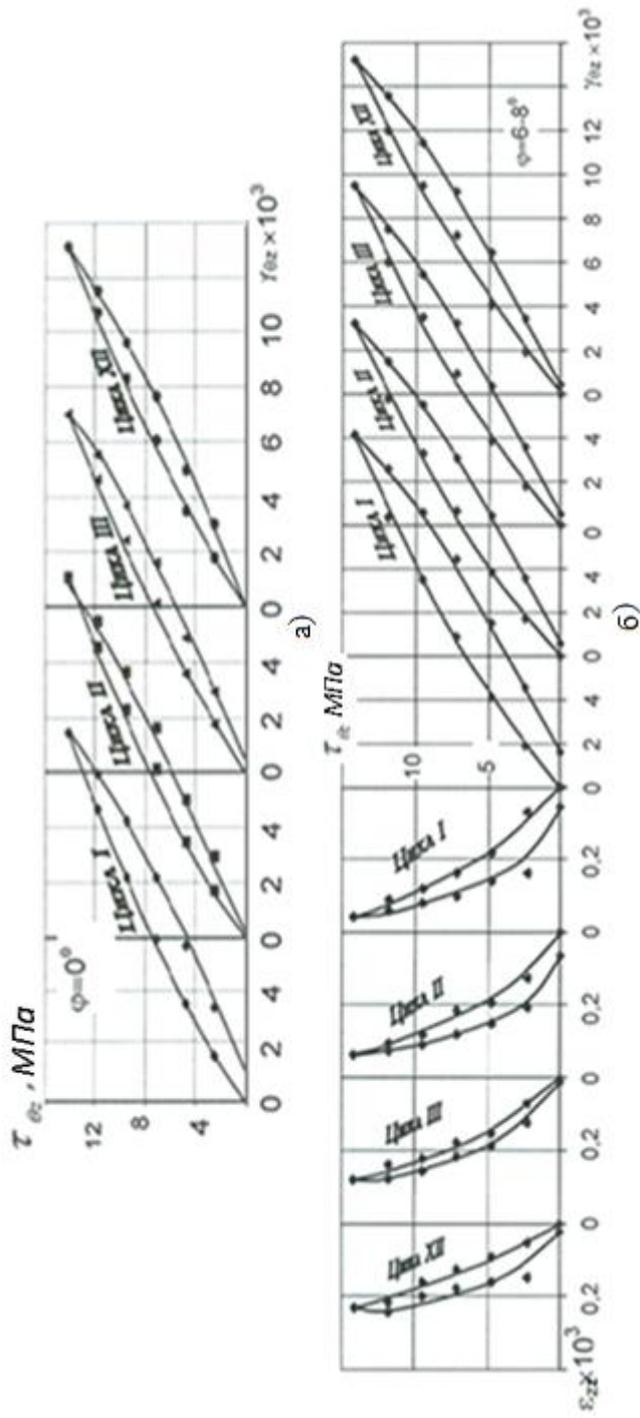


Рис. 2. Диаграммы деформирования в пределах цикла в режиме
нагружение-разгрузка в условиях простого кручения стеклопластиковых
труб с углом армирования $\varphi=0^\circ$ (а) и $\varphi=6-8^\circ$ (б)

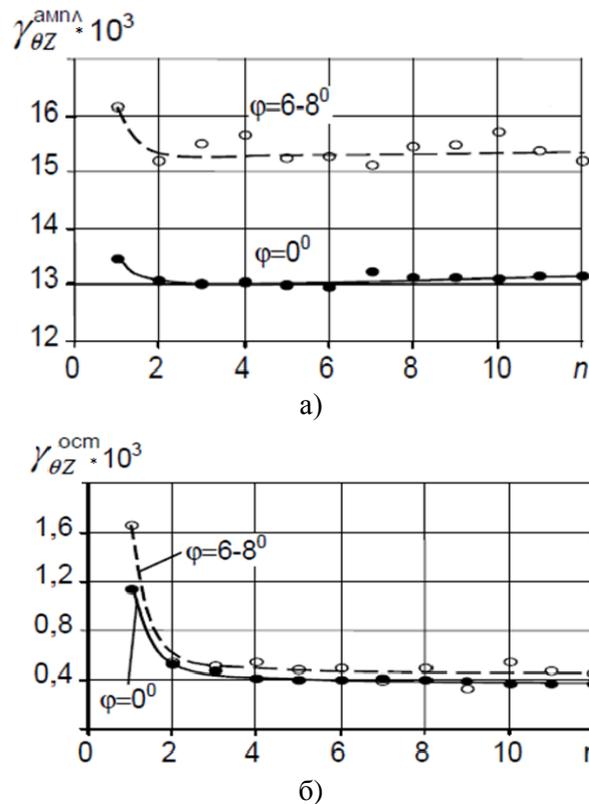


Рис. 3. Кривые изменения амплитудных (а) и остаточных (б) сдвиговых деформаций цикла стеклотканевых труб с углом армирования φ в зависимости от номера цикла испытаний

Из приведенных на рисунке кривых замечаем, что в условиях повторно-статического кручения отклонение угла армирования на $6...8^\circ$ от нулевого его значения приводит к увеличению как амплитудных (рис. 3а), так и остаточных (рис. 3б) сдвиговых основных деформаций цикла в рассматриваемом диапазоне циклов нагружения-разгрузки стеклотканевых труб. Указанное явление оказывается более существенным в случае амплитудных деформаций.

Согласно экспериментально установленным данным, значения как амплитудных (рис. 3а), так и остаточных (рис. 3б) сдвиговых деформаций цикла вышеуказанных обеих партий стеклотканевых труб после первого цикла нагружения-разгрузки уменьшаются, и это явление оказывается более существенным в случае остаточных деформаций. При этом процесс уменьшения с затухающей скоростью величины последних продолжается до VI цикла испытания труб. С дальнейшим увеличением числа n циклов испытаний наблюдаются монотонное возрастание амплитудных и слабая тенденция увеличения остаточных сдвиговых деформаций цикла трубчатых образцов.

Сравнение амплитудных и остаточных величин основных сдвиговых деформаций, полученных при одном и том же номере цикла испытаний, показывает, что образование замкнутой петли гистерезиса у указанных выше обеих партий труб практически происходит через 5...6 циклов нагружения-разгрузки.

Проведенные измерения показали, что динамика образования замкнутой петли гистерезиса сопутствующих продольных деформаций разориентированных стеклотканевых труб качественно носит такой же характер, что и в случае основных сдвиговых деформаций этих же труб.

Известно, что для определения некоторых характеристик, в том числе и относительного коэффициента рассеяния или диссипации энергии ψ материала, деформируемого в режиме нагружение-разгрузка, целесообразно исходить из зависимости между касательными напряжениями T и деформациями сдвига Γ [11].

Согласно расчетам, проведенным с учетом рекомендаций [11], после стабилизации процесса деформирования (через 5...6 циклов нагружения-разгрузки) величина коэффициента ψ у разориентированных труб составляет 0,19, а у труб с $\varphi = 0^\circ - 0,17$. Т.е. отклонение угла армирования стеклотканевых труб в пределах $6...8^\circ$ от нулевого его значения приводит к увеличению величины коэффициента относительного рассеяния энергии ψ примерно на 12%.

Заключение. Нарушение симметричности армирования относительно оси композитных тонкостенных трубчатых элементов конструкций, претерпевших постоянно действующие эксплуатационные крутящие моменты, может явиться причиной возникновения дополнительных осевых деформаций, приводящих к изменению как расчетного напряженно-деформированного состояния, так и изначальной геометрической формы конструкций в целом.

В случае эксплуатации в условиях циклически изменяющегося крутящего момента к вышеуказанным отрицательным явлениям прибавляется и то, что матрица разориентированных композитных трубчатых элементов будет находиться в условиях циклически изменяющегося сложного напряженного состояния. Одновременно, как показывает практика, в большинстве случаев именно разрушение матрицы, а не волокон арматуры является причиной выхода из строя изделий из армированных композитов [12].

Таким образом, технологическая разориентация армирования на этапе переработки материала в изделие может явиться причиной ускорения процесса выхода из строя композитных трубчатых конструктивных элементов, эксплуатируемых как при постоянно действующем, так и при циклически изменяющемся во времени крутящих моментах. Одним из способов предотвращения, в известной мере, указанного отрицательного явления на работу таких элементов может явиться увеличение их жесткости относительно кручения, а именно - для трубчатых элементов из армированных композитов

целесообразно предусмотрение симметрично ориентированных ребер жесткости, так как достаточная точность их ориентации может быть обеспечена технологическими особенностями изготовления.

Литература

1. **Тарнопольский Ю.М., Розе А.В., Портнов Г.Г.** Отрицательные особенности материалов, армированных волокнами // Мех. полим. – 1969.- № 1.– С. 140 - 149.
2. **Тарнопольский Ю.М., Розе А.В., Жигун И.Г., Гуняев Г.М.** Конструкционные особенности материалов, армированных высокомодульными волокнами // Мех. полим. – 1971.– № 4.– С. 676-685.
3. **Ермоленко С.Ф., Ермоленко А.Ф.** Прочность слоистого пакета со случайными отклонениями в схеме армирования // Мех. композит. мат.- 1991.- № 1.- С.40 – 44.
4. **Карпетян К.А.** Влияние начальной разориентации армирования на ползучесть стеклопластиковых труб при одноосном растяжении // Сб. материалов годичной научной конференции Государственного инженерного университета Армении. – Ереван, 2004.– Т.1.– С. 276-279.
5. **Карпетян К.А.** Влияние начальной разориентации армирования на механическое поведение слоистых стеклопластиков при статических нагрузках // Докл. НАН Армении. - 2005. - Т.105, № 3. - С. 249-255.
6. **Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я.** Методы статических испытаний армированных пластиков. - М.: Химия, 1981. – 272 с.
7. **Мовсисян Л.А.** О некоторых специфических особенностях анизотропных оболочек // Изв. АН АрмССР. Физ.–мат. науки. – 1958. – XI, № 4. – С. 137 – 144.
8. **Лехницкий С.Г.** Анизотропные пластинки. - М.: Гос. изд-во техн-теорет. лит., 1957.- 463 с.
9. **Карпетян К.А.** О прочности и деформативных свойствах стеклопластиковых труб при повторно-статических нагрузках в зависимости от отклонений ориентации армирования // Изв. НАН Армении. Механика. – 2001.– Т. 54, №2. – С.70-79.
10. **Мартиросян М.М.** Получение прессованных тонкостенных труб из стеклопластиков // Промышленность Армении. – 1971.– № 10.– С. 56–57.
11. **Илюшин А.А.** Пластичность. - М.–Л.: Гостехиздат, 1948. - 376 с.
12. **Hahn H.T.** A Note on Determination of the Shear Stress-Strain Response of Unidirectional Composite // J. Compos. Mater.- 1973. - № 7.- P. 383-386.

*Поступила в редакцию 07.11.2016.
Принята к опубликованию 05.12.2016.*

ԱՄՐԱՆԱՎՈՐՄԱՆ ՈՒՂՈՒԹՅԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ԱՊԱԿՈՂՄՆՈՐՈՇՄԱՆ
ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՍՏԱՏԻԿ ԿԱՄ ԿՐԿՆՎՈՂ-ՍՏԱՏԻԿ ՊԱՐԶ ՈԼՈՐՄԱՆ ԵՆԹԱՐԿՎՈՂ
ԱՊԱԿԵՊԼԱՍՏԵ ԽՈՂՈՎԱԿՆԵՐԻ ԴԵՖՈՐՄԱՑՄԱՆ ՎԱՐՔԻ ՎՐԱ

Կ.Ա. Կարապետյան

Ուսումնասիրվել են ստատիկ կամ կրկնվող-ստատիկ պարզ ոլորման ենթարկվող շերտավոր ապակեպլաստե խողովակաձև տարրերի դեֆորմացման առանձնահատկությունների, ինչպես նաև դրանց ամրության վրա առանցքի նկատմամբ ամրանավորման համաչափության խախտման ազդեցության հարցերը: Բացահայտվել է, որ նախատեսված զրոյական արժեքի համեմատ ամրանավորման անկյան շեղումը $6-8^\circ$ սահմանում ոլորման դեպքում գործնականում չի ազդում շերտավոր ապակեպլաստե խողովակների ամրության վրա: Փորձնականորեն հաստատվել է, որ ստատիկ ոլորման ենթարկվող ապակողմնորոշված շերտավոր ապակեպլաստե խողովակներում առաջանում են առանցքային, իսկ կրկնող-ստատիկ ոլորումների դեպքում՝ պարբերական առանցքային դեֆորմացումներ՝ համապատասխան սահքի հիմնական դեֆորմացիաներին: Նշվում է, որ ստատիկ կամ կրկնվող-ստատիկ ոլորող մոմենտի առկայության պայմաններում շահագործվող շերտավոր ապակեպլաստե խողովակների աշխատանքի վրա ամրանավորման ապակողմնորոշման բացասական ազդեցության բացառմանը, հայտնի սահմաններում, կարելի է հասնել խնդրի կոնստրուկտիվ լուծման ճանապարհով:

Առանցքային բառեր. ապակեպլաստ, խողովակաձև տարր, ամրանավորման ապակողմնորոշում, պարզ ոլորում, կրկնվող-ստատիկ ոլորում, դեֆորմացման վարք:

THE EFFECT OF THE TECHNOLOGICAL DESORIENTATION OF
REINFORCEMENT ON THE DEFORMATION BEHAVIOUR OF GLASS-PLASTIC
TUBES AT STATIC OR REPEATED-STATIC SIMPLE TORSION

K.A. Karapetyan

The issues on the impact of violation caused by processing the material into goods, the symmetry of reinforcement relative to the axis (desorientation) on the specific character of the deformation behavior of the glass-fabric tubular elements under the static or repeated static torsion, as well as on their shear strength are discussed. It is revealed that the divergence of the reinforcement angle in the range of $6-8^\circ$ from its zero value does not practically affect the strength of the glass-fabric tubes at simple torsion. It is experimentally determined that under the static torsion, the disoriented glass-fabric tubes have both axial, and at their repeated static torsion, and cyclic axial deformations, accompanying the basic shear deformations. It is noted that the negative effect elimination, the elimination of the desorientation reinforcement negative effect on the work of the glass-fabric tubular construction elements, exploited under the conditions of the effect of static or repeated-static torque may be achieved by the constructive solution of the problem.

Keywords: glass-plastics, tubular element, desorientation of reinforcement, simple torsion, repeated-static torsion, deformation behaviour.