ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ

Մեխանիկա 79, №3, 2026 Механика

УДК 678.057:620.17:53937 DOI: 10.54503/0002-3051-2026.79.3-43

СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЮ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПОДВЕРГАЕМЫХ КРАТКОВРЕМЕННОМУ ОСЕВОМУ СЖАТИЮ

Зейналян Н.Р.

Ключевые слова: углепласт, тонкостенные трубчатые элементы, осевое сжатие, несущая способность, продольные и поперечные деформации, модуль деформации по касательной, коэффициент поперечных деформаций.

Zeynalyan N.R.

Resistance to Deformation of Carbon Fiber Thin-Walled Tubular Elements Subjected to Short-Term Axial Compression

Key words: carbon fiber, thin-walled tubular elements, axial compression, bearing capacity, longitudinal and transverse deformations, tangential deformation modulus, transverse deformation coefficient**.**

The results of studies on the behavior of the deformation properties of carbon-fiber-reinforced plastic thin-walled tubular elements under stepwise increasing axial compressive load, as well as their compressive load-bearing capacity determined in accordance with the requirements of current standards, are presented and discussed.

The obtained results were interpreted based on existing concepts of the deformation behavior and failure of thin-walled tubes made of reinforced plastics subjected to short-term mechanical loading.

Զեյնալյան Ն.Ռ.

Կարճատև առանցքային սեղմման ենթարկվող ածխեպլաստե բարակապատ խողովակաձև տարրերի դիմադրությունը դեֆորմացվելուն

Հիմնաբառեր. Ածխեպլաստ, բարակապատ խողովակաձև տարրեր, առանցքային սեղմում, կրողունակություն, երկայնական և ընդլայնական դեֆորմացիաներ, դեֆորմացիայի մոդուլ ըստ շոշափողի, ընդլայնական դեֆորմացիաների գործակից:

Բերվում և քննարկվում են աստիճանաձև աճող առանցքային սեղմող ճիգով բեռնավորման դեպքում ածխեպլաստե բարակապատ խողովակաձև տարրերի ցուցաբերած դեֆորմացիոն վարքի և դրանց՝ համաձայն գործող ստանդարտների սահմանված ըստ սեղմման կրողունակության հետազոտման արդյունքները:

Ստացված արդյունքները մեկնաբանվել են ելնելով ուժային կարճատև ազդեցությանը ենթարկվող ամրանավորված պլաստիկից պատրաստված բարակապատ խողովակների դեֆորմացվելու և քայքայվելու վերաբերյալ գոյություն ունեցող պատկերացումներից:

Приводятся и обсуждаются результаты исследований поведения деформационных свойств углепластиковых тонкостенных трубчатых элементов в процессе ступенчато-возрастающего осевого сжимающего усилия и их несущей способности при сжатии, установленной согласно требованиям, предъявляемым действующими стандартами.

Полученные результаты были прокомментированы, исходя из существующих представлений о деформационном поведении и разрушении тонкостенных труб из армированных пластиков, подвергаемых кратковременному силовому воздействию.

Введение. Как известно, конструкционные элементы вращения различной геометрии, в том числе и трубчатые, изготовленные из армированных пластиков (АП), являются одними из распространенных элементов, применяемых в различных узлах современных механизмов и машин. Некоторые из таких элементов при эксплуатации, в основном, подвергаются простому кручению, к числу которых в первую очередь, относятся карданные валы машин [1], полые оси быстровращающихся роторов, высокоскоростных газогенераторов [2] и др. Однако, в некоторых случаях, упомянутые элементы могут подвергаться и кратковременному воздействию непредусмотренных условиями эксплуатации циклически повторяющихся крутящих моментов, а, иногда, и с изменяющимся направлением действия, приводящих к образованию в материале элементов кратковременно действующих растягивающих или сжимающих напряжений [3]. Это означает, что материал упомянутых элементов, а, в частности, его матрица, являющаяся самым уязвимым звеном АП, в процессе эксплуатации может оказаться в циклически повторяющемся сложном напряженно-деформационном состоянии, в некоторых случаях - знакопеременном. А, как известно, именно разрушение матрицы, а не разрушение армирующих волокон является причиной преждевременного выхода из строя элементов конструкций из АП [4]. На основе сказанного можно отметить, что экспериментальные данные о деформационном поведении при осевом сжатии и при одноосном растяжении трубчатых элементов из АП, являющихся прототипами упомянутых выше конструкционных элементов, могут быть полезными в уточнении существующих, а также разработке новых расчетных моделей таких элементов.

В настоящей работе обсуждаются результаты исследования сопротивления деформированию и разрушению углепластиковых тонкостенных трубчатых элементов, подвергаемых кратковременному осевому сжатию.

Метод проведения исследований: В качестве исследуемых объектов были использованы углепластиковые опытные трубчатые образцы с внутренним диаметром 32мм, толщиной стенки 1мм и длиной 550мм, размеры которых соответствуют опробированным рекомендациям [5]. Они были получены вырезанием из несущих трубчатых элементов экспоната силовой рамы солнечной батареи космической станции “Мир”, изготовленной в 1990г в СКТБ Института Механики НАН РА. После вырезки на токарном станке была проведена подрезка торцов труб строго перпендикулярно их оси. Несущие трубчатые элементы силовой рамы были получены известным из литературы методом “самопрессование”, разработанным профессором М.М. Мартиросяном [6]. Суть этого метода заключается в намотке препрега (армирующий ингредиент, пропитанный связующим компонентом) на металлическую (дюралюминиевую) оправку с последующим горячим прессованием по боковой поверхности в специальный форме, изготовленной из стали. Прессование по боковой поверхности труб происходит за счет разности в величинах термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) материалов оправки и наружной формы.

Для изготовления несущих трубчатых элементов силовой рамы в качестве препрега была использована пропитанная модифицированной эпоксидной смолой лента из углеродных тонких волокон (шпон) шириной 25мм, толщиной 0,1мм, которая путем перекрестной намотки под углом ±13° относительно оси труб наматывалась на дюралюминиевую оправку.

В качестве связующего компонента был использован модифицированный полимер ЭД-20+Э341 в соотношении по массе 7.0 : 3.0.

Испытания углепластиковых трубчатых образцов на осевое сжатие с целью определения их несущей способности при сжатии (разрушающего напряжения σ_{ZZ}^{P}) осуществляли при линейной скорости относительного движения друг к другу рабочего органа испытательной машины $V = 8 \pm 0.4$ мм/мин, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым соответствующими стандартами [7].

Достоверные данные об экспериментально установленной зависимости напряжение-деформация можно получить и в результате кратковременного испытания, осуществленного согласно методу, описанному в работе [8]. При этом, практика подтверждает целесообразность использования предложенной в работе [8] формулы (она приводится ниже под номером (1)) для аналитического описания экспериментально установленных связей между напряжениями и деформациями, полученными при испытаниях на сжатие опытных образцов с различными поперечными сечениями, изготовленных из цементных бетонов [8] и цементогрунтов [9], а также тонкостенных стеклопластиковых труб, испытанных на осевое растяжение [10].

Согласно упомянутому выше методу нагружение испытуемого объекта производится ступенчатообразно с шагом, соответствующим примерно 0.1R (R - предел разрушающего объект напряжения), и выдержкой на каждой ступени лишь на время, необходимое для снятия данных о деформации. При уровне нагрузки 0.8R индикаторы, измеряющие деформации, снимаются и объекты доводятся до разрушения.

Предложенная в работе [8] формула имеет следующий вид:

$$\varepsilon = \frac{a\sigma / R}{1 - b\sigma / R}, \tag{1}$$

где σ -текущее напряжение, a и b параметры аппроксимации.

В рассматриваемом здесь случае испытания тонкостенных углепластиковых труб на осевое сжатие экспериментальные данные кратковременных продольных $\left(\varepsilon_{np}\right)$ и поперечных $\left(\varepsilon_{non}\right)$ деформаций были аппроксимированы следующими зависимостями, соответственно

$$\varepsilon_{np} = \frac{a_1\sigma_{ZZ} / \sigma_{ZZ}^{P}}{1 - b_1\sigma_{ZZ} / \sigma_{ZZ}^{P}} \tag{2}$$

$$\varepsilon_{non} = \frac{a_2\sigma_{ZZ} / \sigma_{ZZ}^{P}}{1 - b_2\sigma_{ZZ} / \sigma_{ZZ}^{P}}, \tag{3}$$

где σ_{ZZ} - приложенное к трубе текущее напряжение.

Величины касательного модуля деформации $\bar{E}_{ZZ}$ при различных уровнях напряжения σ_{ZZ} были определены следующей зависимостью, полученной из (1):

$$\bar{E}_{ZZ} = \bar{E}_{0ZZ}\left(1 - b_1\sigma_{ZZ} / \sigma_{ZZ}^{P}\right)^2, \tag{4}$$

где $\bar{E}_{0ZZ}$ - начальный модуль деформаций (при $\sigma_{ZZ} = 0$), определяемый формулой $\bar{E}_{0ZZ} = \sigma_{ZZ}^{P} / a$ [8].



Рис.1 Фото углепластикового трубчатого образца вместе с приспособлением для измерения продольных и поперечных деформаций, установленного на испытательной машине.

Зависимость коэффициента поперечных деформаций $\overline{\vartheta}$ (аналог коэффициента Пуассона для линейно-упругих тел) от σ_{ZZ} имеет следующий вид:

$$\overline{\vartheta} = \frac{\varepsilon_{non}}{\varepsilon_{np}} = \frac{a_2\left(\sigma_{ZZ}^{P} - b_1\sigma_{ZZ}\right)}{a_1\left(\sigma_{ZZ}^{P} - b_2\sigma_{ZZ}\right)} \qquad (5)$$

Экспериментальная часть исследований была проведена на испытательной машине немецкого производства типа ZD-10 (рис.1). Деформации опытных образцов, как продольные, так и поперечные (диаметральные) измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,01мм, и 0,001мм, соответственно. База измерения продольных деформаций составляет 60мм.

В каждом рассматриваемом случае испытанию подвергались по 3 образца-близнеца. При этом, максимальный разброс ±7,1% измеренных одноименных данных отдельных образцов по сравнению с их средней арифметической величиной наблюдался в случае поперечных деформаций труб.

Обсуждение полученных результатов: Результаты испытаний, проведенных согласно требованиям, предъявляемым действующими стандартами [7], показали, что средняя величина сжимающего усилия, при воздействии которого происходит разрушение углепластиковых тонкостенных трубчатых образцов (несущая способность труб при осевом сжатии) составляет примерно $F = 204H$, что соответствует разрушающему трубы напряжению $\sigma_{ZZ}^{P} \approx 196МПа.$ Отметим при этом, что разрушение опытных трубчатых образцов носило хрупкий характер и местные потери устойчивости не наблюдались (рис.2). Здесь следует отметить, что аналогичная упомянутой картина разрушения наблюдалась и у углепластиковых трубчатых образцов-близнецов, доведенных до разрушения после кратковременного их испытания согласно методу [8]. Отметим также, что разница в величинах несущих способностей углепластиковых трубчатых образцов, определенных, в одном случае, после их кратковременного испытания согласно методу [8], а в другом - согласно действующим стандартам [7], оказывается несущественной.



Рис.2 Углепластиковый трубчатый образец с типичной зоной разрушения, подвергнутый осевому сжатию и доведенный до разрушения.

На рис.3 приведены экспериментальные данные (показаны метками) продольных $\left(\varepsilon_{пр}\right)$ (правое поле рисунка) и поперечных $\left(\varepsilon_{поп}\right)$ (левое поле рисунка) деформаций, полученных в результате проведения кратковременных испытаний на осевое сжатие углепластиковых тонкостенных трубчатых образцов, осуществленных согласно описанному выше методу [8]. На этом же рисунке сплошными линиями показаны кривые, построенные согласно зависимостям (2) и (3) и описывающие поведение продольных ($\varepsilon_{пр}$) и поперечных ($\varepsilon_{поп}$) деформаций углепластиковых трубчатых образцов в процессе пошагового увеличения осевого сжимающего напряжения σ_{ZZ}. Значения коэффициентов аппроксимации, фигурирующих в (2) и (3) были приняты следующими:

$$a_1 = 2.082;\quad b_1 = 0.0005;\quad a_2 = 0.314;\quad b_2 = -3.227.$$

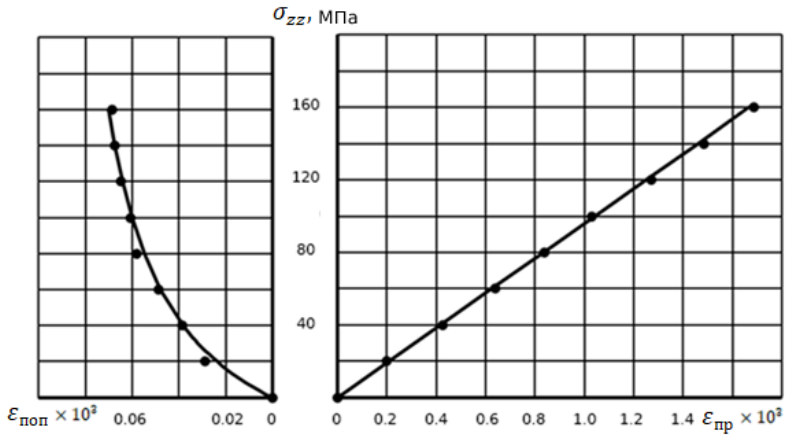


Рис.3 Экспериментальные данные и кривые, описывающие деформирование углепластиковых труб, подвергаемых осевому сжатию, в продольном и в поперечном направлениях.

Как следует из данных рис.3, аппроксимацию полученных экспериментальных результатов для продольных и поперечных деформаций углепластиковых трубчатых образцов зависимостями (2) и (3) можно считать приемлемой.

Из сравнения данных рис.3 замечаем, что связь между сжимающими напряжениями и деформациями в продольном направлении углепластиковых трубчатых образцов близка к прямолинейной (правая часть рисунка). В случае поперечных (диаметральных) деформаций, кривая, описывающая зависимость между напряжениями и деформациями носит выпуклый характер, т.е. по мере увеличения напряжения имеет место неравномерное, с убывающей скоростью, увеличение поперечных деформаций труб (происходит их расширение) (левое поле рис.3).

Известно, что на основе экспериментально установленных данных об изменении модуля деформаций по касательной от уровня напряжения можно получить более

ясное количественное представление способности материала сопротивляться деформированию в направлении действия напряжения в зависимости от его уровня [8].

В табл.1 представлены величины касательного модуля деформаций $\bar{E}_{ZZ}$ в продольном направлении углепластиковых трубчатых образцов, рассчитанные, согласно (4), для различных уровней осевого сжимающего напряжения σ_{ZZ}.

Табл.1 Модуль деформации по касательной при разных уровнях сжатия

σ_{zz}, МПа	0	40	80	120	160
$\bar{E}_{ZZ}$, МПа	96082	96063	96044	96025	96005

Сравнение данных табл.1 показывает, что значения касательного модуля деформаций по осевому направления углепластиковых трубчатых образцов, рассчитанные для различных уровней осевого сжимающего напряжения σ_{ZZ}, мало зависят от этих уровней. Об этом свидетельствует и поведение приведенной на рис.4 кривой зависимости $\bar{E}_{ZZ}/\bar{E}_{0ZZ}$ ($\bar{E}_{0ZZ}$ - начальный модуль деформации по касательной, определенный при $\sigma_{ZZ}=0$) от σ_{ZZ}, построенной на основе данных, взятых из табл.1.

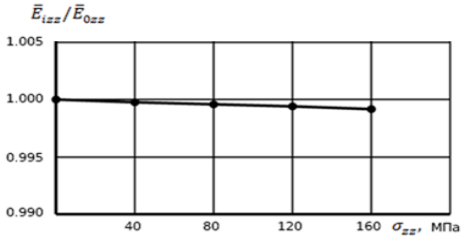


Рис.4. Кривая зависимости $\bar{E}_{ZZ}/\bar{E}_{0ZZ}$ от уровня сжимающего напряжения σ_{ZZ}

Сказанное выше свидетельствует о том, что способность сопротивляться деформированию в осевом направлении углепластиковых тонкостенных трубчатых образцов оказывается практически инвариантной относительно уровня сжимающего напряжения.

На рис.5 представлены экспериментальные данные коэффициента поперечных деформаций $\bar{\vartheta}$ углепластиковых трубчатых образцов (показаны метками), полученные при различных уровнях сжимающего напряжения σ_{ZZ}, в сравнении с построенной согласно (5) кривой, описывающей эту зависимость.

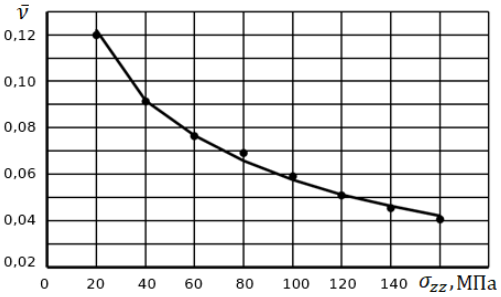


Рис.5. Экспериментальные данные и построенные согласно (5) кривые, описывающие зависимость коэффициента поперечных деформаций от сжимающего напряжения.

Из сравнения данных этого рисунка следует, что описание зависимостью (5) изменения коэффициента поперечных деформаций $\bar{\vartheta}$ от сжимающего напряжения σ_{ZZ} дает удовлетворительное совпадение с экспериментально установленными данными для этого коэффициента.

Сравнение данных рис.5 показывает, что по мере увеличения сжимающего на-

пряжения σ_{ZZ} наблюдается уменьшение коэффициента $\overline{\vartheta}$ с начальной высокой (в пределах $\sigma_{ZZ} \le 60 МПа$) и, в дальнейшем, затухающей скоростью, что, в основном, согласуется с закономерностью изменения поперечных деформаций ε_{non} этих же труб, наблюдаемой в процессе пошагового увеличения σ_{ZZ}. Отметим также установленную существенную разницу (примерно в 3.7 раза) в значениях $\overline{\vartheta}$, определенных при низких ($\sigma_{ZZ} = 20 МПа$) и при высоких ($\sigma_{ZZ} = 160 МПа$) уровнях действующего на углепластиковый трубчатый образец сжимающего напряжения.

Заключение. Проведенными исследованиями установлено, что деформационное поведение углепластиковых тонкостенных трубчатых элементов в продольном направлении в процессе нагружения их ступенчато-возрастающим осевым сжимающим усилием практически носит прямолинейный характер. А связь между сжимающими напряжениями и поперечными деформациями, как и коэффициентом поперечных деформаций, этих же труб оказывается строго нелинейной.

Установлено также, что величина касательного модуля деформаций в направлении оси углепластиковых труб мало зависит от уровня приложенного на них осевого сжимающего напряжения, что, в основном, свойственно материалам, разрушение которых происходит в результате хрупкого излома.

ЛИТЕРАТУРА

1. Непершин Р.И., Клименов В.В. Оптимальное проектирование на ЭВМ композитного карданного вала по критериям стоимости и веса. Механика полимеров; 1968. №4. с. 690-695.
2. Грапис О, Тамуж В, Олсон Н, Андерсон Я, Вилкс У. Использование углепластиков в осях быстровращающихся роторов. Механика композитных материалов, Т. 31; 1995. №2. с. 227-240.
3. Карапетян К.А., Валесян С.Ш., Мурадян Н.С. Влияние внутреннего гидростатического давления и осевого растягивающею усилия на сопротивление разрушению стеклопластиковых труб при кручении. Докл. НАН Армении, Т. 118; 2018. №3. с. 246-253.
4. Hahn H.T. A note on determination of the shear stress-strain response of unidirectional composites. J. Compos. Mater; 1973. №7. p. 383-386.
5. Pagano M.J., Whitney J.M. Geometric design of composite cylindrical characterization specimens. J. Compos. Mater. July. 1970. p. 360-378.
6. Мартирсян М.М. Получение прессованных тонкостенных труб из стеклопластика. // Промышленность Армении. 1971, №10. с. 56-57.
7. Пластмассы. Метод испытания на сжатие. ГОСТ 4651-82 (СТ С7В 2896-81). М.: Издательство стандартов. с. 8.

8. Карапетян К.С. Влияние анизотропии на ползучесть бетона при сжатии и растяжении в зависимости от масштабного фактора. // Изв. АН Арм. ССР. Серия физ.-мат. наук. 1964. Т. 17, №4. с. 71-90.

9. Karapetyan K.A., Hayroyan S.G. and Manukyan E.S. Deformability during short-term loading, shrinkage and creep of cementations soil composite on the basis of belozems of carbonate. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. series 1474 (2020) 012019.

10. Карапетян К.А. Влияние нарушения симметричности армирования на деформационное поведение стеклопластиковых труб в условиях осевого растяжения. // Тр. международной конференции “Актуальные проблемы механики сплошной среды”. 4-8 октября. Дилижан. Армения, 2010. Т.1. с. 278-282.

Сведения об авторе

Зейналян Нарине Рафиковна – Старший лаборант Института механики,
тел. (+374) 91-55-98-40, E-mail: narine.zeynalyan@gmail.com

Поступила в редакцию 10 февраля 2026