

Расчет конструкций из композиционных материалов

ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ НАМОТКИ НА ЖЕСТКОСТЬ И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ТРУБ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ¹

Ю.В.ЛОСКУТОВ, канд.техн. наук, доцент, докторант

С.П. ИВАНОВ, д-р техн. наук, профессор

И.Н. БАГАУТДИНОВ, канд.техн. наук, доцент

Р.Г.ГИЗАТУЛЛИН, аспирант

А.В. ЕГОРОВ, канд.техн. наук, доцент

Марийский государственный технический университет

424024, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3; LoskutovYV@marstu.net

Рассмотрено влияние технологических схем намотки и способов укладки слоёв на параметры деформирования и напряженное состояние при чистом изгибе многослойных криволинейных композитных труб.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: композиты, схемы намотки трубопроводов, нефтепроводы, напряженное состояние, жесткость, метод конечных элементов

В мире в настоящее время производится более 200 тыс. тонн труб из композиционных материалов (КМ) в год. Трубопроводы из композитов нашли широкое применение в нефтяной и газовой промышленности, в химическом машиностроении, коммунальном хозяйстве. Особое место они занимают в конструкциях авиационной и ракетно-космической техники. Это связано с тем, что эксплуатацию трубопроводов летательных аппаратов отличает высокий уровень напряженности. Одновременно к ним предъявляют повышенные требования по прочностной надежности при жестких ограничениях по массе и габаритам.

Наиболее напряженными, ответственными и сложными в технологическом отношении элементами трубопроводов являются криволинейные участки (отводы или гибы). Упругие свойства гибов в решающей степени определяют поведение конструкции трубопровода под нагрузкой в целом – его прочность и жесткость, ресурс и безопасность работы.

Аналізу напряженно-деформированного состояния криволинейных труб посвящены многочисленные исследования, включая классические работы Т. Кармана, С.П. Тимошенко, В.И. Феодосьева и многих других исследователей. Установлено, что криволинейные тонкостенные трубы при изгибе проявляют значительно большую податливость, чем прямолинейные. Причиной повышенной податливости при изгибе является сплющивание поперечного сечения труб. Существенно отметить, что сплющивание поперечного сечения приводит не только к увеличению податливости, но и оказывает большое влияние на напряженное состояние.

Анализ литературы показывает, что существующие разработки относятся главным образом к конструкциям, изготовленным из традиционных – однородных и изотропных материалов. Исследования с учетом особенностей слоисто-волоконистой структуры криволинейных труб и трубопроводов из современных композитов практически отсутствуют.

¹Результаты получены при выполнении поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, а также гранта РФФИ № 10-08-97017-р_поволжье_a.

1. Анализ схем намотки. Одним из наиболее распространенных технологических процессов получения композитных труб является процесс непрерывной спиральной намотки волокон или армированной ленты на оправку. При намотке криволинейных труб возможны два способа укладки слоев: с нахлестом и без нахлеста [1]. В первом случае труба получается с переменной толщиной стенки – $h=h(\alpha)$, при этом объемная доля волокон в материале, характеризующаяся коэффициентом армирования ψ , постоянна. Во втором случае наоборот – $h=const$, $\psi=\psi(\alpha)$. Функции, характеризующие изменение параметров по окружности, имеют вид:

$$h = h_m \frac{R \sin \theta_m}{(R + r \cos \alpha) \sin \theta}, \quad \psi = \psi_m \frac{R \sin \theta_m}{(R + r \cos \alpha) \sin \theta}. \quad (1)$$

Здесь R – радиус кривизны осевой линии трубы, r – средний радиус поперечного сечения, θ – угол армирования (угол между касательными к траектории и осевым направлением), α – окружная координата (отсчитывается от внешней поверхности), θ_m и h_m – угол укладки и толщина стенки на экваторе ($\alpha=\pm\pi/2$). Толщины стенки и углы укладки волокон на экваторе криволинейной трубы и на примыкающих прямолинейных участках считаются равными (предполагается их совместная намотка). Причём, распределения толщин стенки и коэффициентов армирования подчиняются единым закономерностям (1).

Примем, что на прямолинейных участках трубы $\theta=\theta_m=Const$. Тогда, при совместной намотке на криволинейных участках углы укладки θ в общем случае получаются переменными и оказываются некоторыми функциями угла α . Вид функции определяется в зависимости от схемы намотки.

1. Намотка по геодезической линии (геодезическая схема намотки). В этом случае угол укладки определяется на основе теоремы Клеро следующей зависимостью [2]:

$$\cos \theta = \frac{(R + r \cos \alpha)}{R} \cos \theta_m. \quad (2)$$

где θ_m – угол укладки на экваторе ($\alpha = \pm\pi/2$). Считается, что при совместной намотке углы укладки на экваторе и цилиндрических участках равны друг другу. Очевидно, что $(R + r) \cos \theta_m / R \leq 1$.

Следовательно, угол укладки на экваторе θ_m торообразной поверхности ограничен условием

$$\theta_m \geq \arccos \{R/(R + r)\}. \quad (3)$$

2. Намотка нити с постоянным углом укладки. В этом случае:

$$\theta = \theta_m = Const. \quad (4)$$

3. Намотка, при которой равнодействующая "главных" напряжений (усилий) направлена по касательной к нити (равновесная схема намотки). При этом [2]:

$$tg^2 \theta = \frac{(2R + r \cos \alpha)}{(R + r \cos \alpha)}. \quad (5)$$

Если $\alpha=\pm\pi/2$, то получим $tg^2 \theta_m=2$. Откуда $\theta_m = 54^\circ 44'$.

4. Намотка по линиям "постоянных скоростей" (ЛПС, пропорциональная схема намотки) [3]. Перемещения (проекции приращения траектории нити) по координатам α и φ пропорциональны друг другу. В этом случае:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{R}{(R+r\cos\alpha)} \operatorname{tg}\theta_m. \quad (6)$$

Таким образом, каждой представленной схеме намотки отвечает определенный закон изменения угла армирования. Вместе с тем, для всех схем намотки характерно следующее ограничение на величину угла укладки [3]. При $\alpha = \pi$:

$$\frac{\pi}{2} - \sqrt{\frac{R-r}{R}} \leq \theta_{\alpha=\pi} \leq \frac{\pi}{2}. \quad (7)$$

Наибольшее распространение в качестве траекторий армирования получили геодезические линии. Эти линии обеспечивают наиболее устойчивое положение нитей при намотке на оправку.

На основе полученных расчетных соотношений выполнен численный анализ распределений структурных и геометрических параметров, эффективных упругих постоянных пакета слоев образца криволинейной трубы [1]. Образец изготовлен из органопластика Kevlar 49/ PR-286. В зависимости от технологической схемы намотки (равновесной, геодезической, пропорциональной, равноугловой), способа укладки слоёв и угла укладки волокон на экваторе θ_m построены поверхности и кривые. Установлены пределы изменения параметров.

2. Расчетная модель. С целью анализа упругого деформирования и напряженного состояния при изгибе многослойной композитной трубы разработана конечно-элементная модель (рис. 1). Криволинейная труба считается как торообразная тонкая оболочка, плавно сопряженная с цилиндрическими. Для дискретизации поверхности используется треугольный конечный элемент (КЭ) [4]. Это универсальный КЭ естественной кривизны, предназначенный для аппроксимации произвольных поверхностей. Расчетные соотношения строятся на основе смешанной вариационной формулировки принципа Хеллингера-Рейсснера и теории анизотропных слоистых оболочек с использованием гипотез С.П. Тимошенко. На основе независимой аппроксимации перемещений и деформаций получена система разрешающих уравнений вида

$$[C(p_m)]\{q\} = \{P\}, \quad (8)$$

где $[C(p_m)]$ – матрица жесткости конструкции, $\{q\}$ – вектор перемещений, $\{P\}$ – вектор нагрузки.

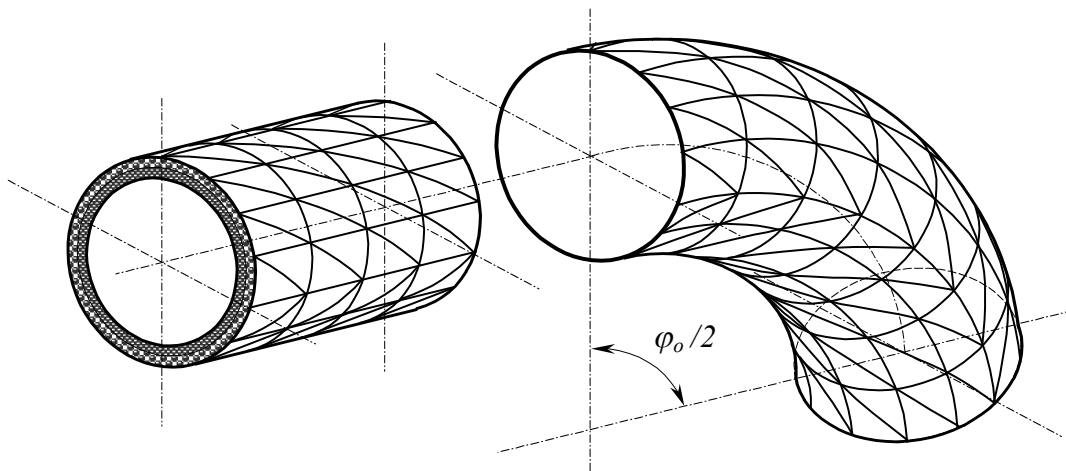


Рис. 1

Рассмотрено статическое двухкомпонентное нагружение, включающее внутреннее давление p_m и пространственный изгиб. Задача решается в нелинейной постановке: учитывается влияние мембранных усилий на изгибную жесткость стенки [5]. Мембранные усилия рассчитаны в зависимости от внутреннего давления по безмоментной теории. Коэффициенты матрицы жесткости КЭ вычисляются при помощи 7-точечной схемы квадратур Гаусса. В каждой точке интегрирования рассчитываются параметры армирования, толщины стенки и эффективные упругие постоянные.

С целью оценки эффективности и точности разработанной модели МКЭ проведено тестирование. На рис. 2 представлена тонкостенная цилиндрическая оболочка, нагруженная сосредоточенной силой P . Края оболочки шарнирно закреплены "по кольцу". Стенка оболочки изготовлена из ортогонально армированного стеклопластика (рис. 2). Показано, что результаты расчета МКЭ для прогиба w хорошо согласуются с данными аналитического решения и эксперимента [6].

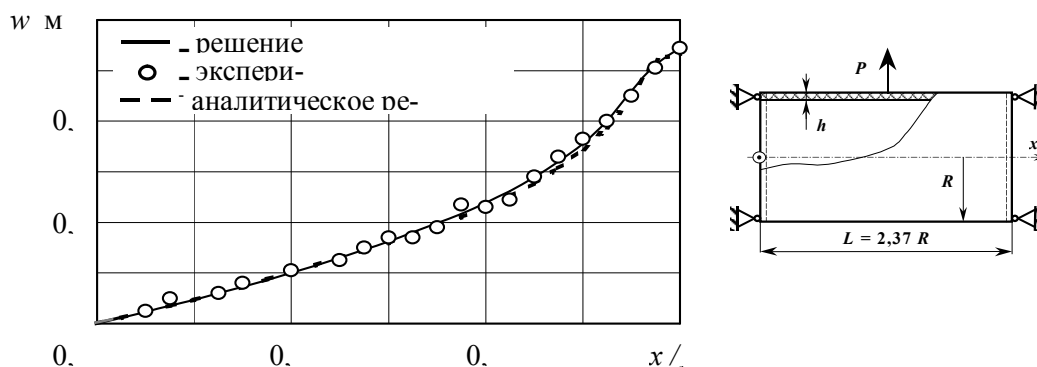


Рис.2

Для серии 4 образцов из перекрестно армированного стеклопластика с углом гифа $\phi_0 = 180^\circ$ проведен анализ жесткости при чистом изгибе. Установлено (табл. 1), что расчетные коэффициенты увеличения гибкости криволинейной трубы по сравнению с прямолинейной k удовлетворительно согласуются с данными эксперимента [7].

Таблица 1

R , см	Угол укладки на экваторе ϕ_0 , °	r , см	Номинальная толщина h_m , см	r/R	r/h_m	λ	Коэффициенты увеличения гибкости	
							Эксперимент	Расчет
8,0	85,6	4,16	0,191	0,52	21,8	0,088	13,9	12,5
9,0	83,5	3,12	0,179	0,35	17,4	0,166	8,1	6,7
8,0	79,8	2,13	0,172	0,27	12,4	0,303	4,9	3,1
12,0	78,9	2,19	0,163	0,18	13,5	0,407	3,2	2,3

3. Анализ упругого деформирования и напряженного состояния. На базе разработанной модели МКЭ выполнен анализ параметров упругого деформирования и напряженного состояния при изгибе образцов криволинейных композитных труб с углом гифа $\phi_0 = 180^\circ$. Образцы изготовлены перекрестной спиральной намоткой волокон или армированной ленты, уложенных с нахлестом и

без нахлеста. Материал – органопластик *Kevlar 49/ PR-286*. Исследовано влияние геометрии, структуры пакета слоев, технологической схемы армирования и внутреннего давления.

На рис. 3 изображены эпюры радиальных перемещений стенки в центральном сечении образца при чистом изгибе его в плоскости кривизны.

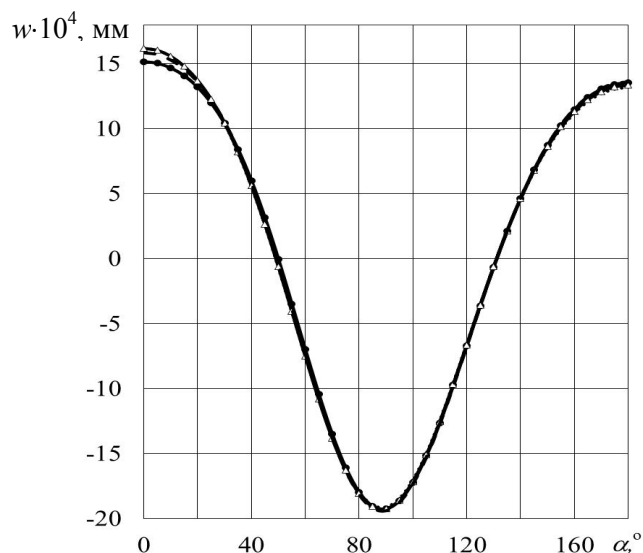


Рис. 3. Перемещения $w(\alpha)$ в зависимости от схемы намотки ($h=\text{vary}, \psi=\text{const}$)

На рис. 4 изображены эпюры осевых $\bar{\sigma}_\varphi$ и окружных $\bar{\sigma}_\alpha$ напряжений в точках наружной поверхности стенки в центральном сечении криволинейного участка в зависимости от угла укладки θ_m . На рис. 3-4 приняты следующие обозначения:

— \triangle — - равновесная; — \bullet — - геодезическая; - равноугловая;
 - - - - пропорциональная.

Напряжения представляются в безразмерном виде: $\bar{\sigma} = \sigma/\sigma_o$, где $\sigma_o = M_z r / I_z$, I_z – осевой момент инерции поперечного сечения относительно нейтральной оси, $M_z = 0,1$ Нм – изгибающий момент.

Толщина стенки считается переменной. Установлено, что технологические схемы намотки и способы укладки слоёв не оказывают заметного влияния на параметры деформирования и напряженное состояние: расхождение результатов в зависимости от траектории намотки не превышает 2 %, от способа укладки – 8 %.

Заключение. Представлен обзор существующих схем и способов намотки композитных труб.

Представлена расчетная модель многослойной криволинейной трубы, изготовленной намоткой волокнистого композита. Труба рассматривается как тонкостенная торообразная оболочка с переменными параметрами армирования и толщиной стенки. Для вывода расчётных зависимостей используются теория анизотропных слоистых оболочек и метод конечных элементов.

Выполнена проверка достоверности расчетной модели на основе сравнения результатов решений ряда задач. Показано, что результаты расчета МКЭ хорошо согласуются с данными известных аналитических решений и экспериментов.

Рассмотрено влияние технологических схем намотки и способов укладки слоёв на параметры деформирования и напряженное состояние при чистом изгибе многослойных криволинейных композитных труб. Установлено, что технологические схемы намотки и способы укладки слоёв не оказывают заметного влияния на параметры деформирования и напряженное состояние.

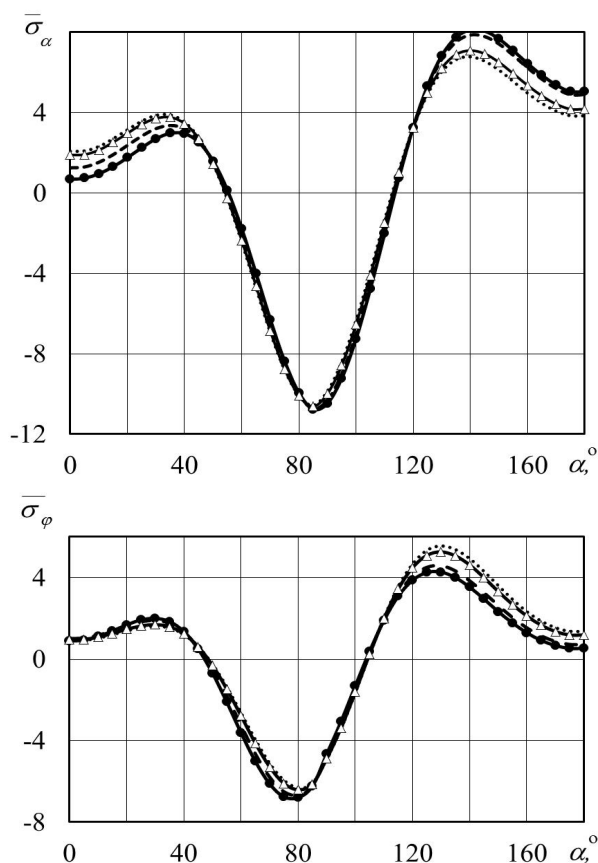


Рис. 4. Осевые $\bar{\sigma}_\varphi$ и окружные $\bar{\sigma}_\alpha$ напряжения в зависимости от технологической схемы намотки

Л и т е р а т у р а

1. Лоскутов Ю.В., Куликов Ю.А., Шлычков С.В., Темнова Е.Б. Упругие характеристики многослойных криволинейных труб из армированного пластика// Механика композиционных материалов и конструкций. ИПРИМ РАН.- 2006.- Москва.-2006.-Т.12, № 2.- С. 219-233.
2. Комков М.А., Буланов И.М., Шишацкий В.А. Выбор ширины однонаправленных лент при плотной намотке торовых оболочек// Сб. тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана (М.).- 1986.- № 21.- С.55-63.
3. Нехороших Г.Е., Комков М.А., Мулюгина М.В. Влияние различных схем намотки на весовые характеристики криволинейных трубопроводов// Применение пластмасс в машиностроении: Сб. тр. МВТУ им. Н.Э.Баумана (М.). – 1977. – № 16. – С. 33-39.
4. Попов Б.Г. Расчет многослойных конструкций вариационно-матричными методами. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1993.–294 с.
5. Лоскутов Ю.В., Куликов Ю.А. Прочность и жёсткость криволинейных многослойных композитных труб при чистом изгибе// Механика композиционных материалов и конструкций. ИПРИМ РАН.– 2008.– Москва.–2008.–Т.14, № 2.– С. 157-166.
6. Елпатьевский А.Н., Васильев В.В. Прочность цилиндрических оболочек из армированных материалов. – М.: Машиностроение, 1972. – 168 с.

7. Тышкевич В.Н., Харитонов В.Н. Экспериментальное исследование прочности и жесткости стеклопластиковых криволинейных труб при чистом изгибе/ Волгогр. гос. техн. ун-т.- Волгоград, 1998.– 11 с. (Деп. рук.ВИНИТИ; № 390-В98).

EFFECT OF WINDING PATTERN ON STIFFNESS AND STRESS STATE OF CURVED MULTILAYER PIPES OF COMPOSITE MATERIALS

Yu.V. Loskutov, S.P. Ivanov, I.N. Bagautdinov, R.G. Gizatullin, A.V. Egorov

The article examines the impact of technological schemes and the winding ways of stacking the layers on the parameters of strain and stress state in pure bending of curved multi-layer composite pipes.

KEY WORDS: composites, winding patterns of pipelines, oil pipelines, stress, stiffness, finite element method

