

УДК 621.64: 678.06:539.3

ПРОЧНОСТЬ НЕФТЕПРОВОДОВ ИЗ АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТИКОВ

Лоскутов Ю.В.

ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет»,
Йошкар-Ола, e-mail: loskutovyv@volgatech.net

Проведен численный анализ напряженного состояния многослойных пластиковых нефтепроводов. Получены результаты исследования прочности тонкостенных образцов. Образец криволинейной трубы изготовлен путём непрерывной намотки волокон на оправку. В результате намотки формируется структура с переменными углами и коэффициентами армирования. Труба рассматривается как торообразная тонкая оболочка, плавно сопряженная с цилиндрическими участками. Задача решается как нелинейная: учитывается влияние мембранных усилий на изгибную жёсткость стенки. Мембранные усилия в зависимости от внутреннего давления определяются по безмоментной теории. Для оценки прочности применяются метод конечных элементов и схема послойного анализа. Критерии прочности представляют комбинации теорий наибольших нормальных и наибольших касательных напряжений, записанных в главных осях анизотропии материала. Прочность однонаправленного слоя характеризуется пятью независимыми пределами прочности. Рассмотрена зависимость прочности образца криволинейного участка нефтепровода от угла укладки волокон на экваторе тора. На примере образца из органопластика представлены возможные формы разрушения.

Ключевые слова: нефтепроводы, трубопроводы, прочность, напряжения, деформации, полимерные композиционные материалы, метод конечных элементов

THE STRENGTH OF OIL-PIPELINES FROM FIBER-REINFORCED PLASTIC

Loskutov Y.V.

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, e-mail: loskutovyv@volgatech.net

The paper covers the areas of engineering and mechanics of composites, and deals with the problem of oil pipelines strength. The composite laminated pipeline is considered as a filament-wound tube with variable reinforcing angles and reinforcement ratios. The curvilinear pipe is modeled as a thin-walled toroid-shape shell which has a blending with the straight-line elements. The finite element method; some methods of the theory of multilayer anisotropic shells and of structural mechanics are applied to study the plane stress under bending in the flexure plane; the elastic deformation and the strength of composite pipes. The problem is solved as a nonlinear. There is included the impact of membrane forces on the flexural rigidity of the wall. Membrane forces are determined depending on the internal pressure by the membrane theory of shells. The layers scheme analysis is used to estimate the strength of pipes. The strength criteria represents combination of maximum stress theory and maximum shear theory marked on the principal axes of the material anisotropy. The strength dependence on the reinforcing angle at the equator of the torus is considered for the composite laminated curvature. The possible fracture modes are analyzed for the organic-plastic sample.

Keywords: oil-pipelines, piping, strength, stiffness, polymer composite materials, FEM

У традиционно используемых в нефтепроводах, системах сбора нефти и системах закачки воды труб из углеродистой стали весьма непродолжительный срок службы. Такие трубы обладают слабым антикоррозионным сопротивлением, подвержены влиянию содержащихся в углеводородах агрессивных компонентов, минерализованной воды, продуктов коррозии.

Увеличение срока службы трубопроводов возможно благодаря введению катодной защиты, системе закачки антикоррозионных ингибиторов, проведению дорогостоящих ремонтов. Однако наличие в перемещаемой жидкости солей, песка и иных примесей ведет к разрушению защитной пленки, делая ингибирование неэффективным.

Решением проблемы будет применение труб, которые не подвержены коррозии. Это позволяет впоследствии не заботиться об антикоррозионном покрытии, не проводить ингибирование, исключить дорогостоящие ремонты. То есть получить трубопроводы

со сроком безремонтной эксплуатации, эквивалентным сроку разработки месторождений – до 50 лет. С точки зрения экономической эффективности одним из наиболее приемлемых способов решения проблемы является переход к композитным трубам.

Анализ литературы показывает [1, 2], что существующие математические модели и методы относятся главным образом к конструкциям, изготовленным из традиционных (однородных и изотропных) материалов. Исследования с учетом особенностей слоисто-волокнутой структуры криволинейных трубопроводов из современных полимерных композиционных материалов (ПКМ) практически отсутствуют. Наиболее напряженными (в то же время и наиболее сложными в технологическом отношении) элементами трубопроводов являются криволинейные элементы (отводы или гибы). С одной стороны, они используются для обхода «препятствий», с другой – служат компенсаторами упругих деформаций. Упругие

свойства гибов в решающей степени определяют поведение трубопровода под нагрузкой в целом.

Широкое применение композиционных материалов в современных конструкциях, стремление максимально использовать их достоинства определяет актуальность разработки методов исследования деформирования и напряженного состояния многослойных нефтепроводов и трубопроводов. Поэтому одной из актуальных задач является задача расчета криволинейных труб из многослойных композитов.

1. Методика расчета прочности композитных трубопроводов. В [1] представлена расчетная модель, дан анализ упругого деформирования и напряженного состояния композитных криволинейных труб при пространственном изгибе. Труба рассматривается как торообразная тонкая оболочка, плавно сопряженная с цилиндрическими участками. Для решения задачи применяется МКЭ. Задача решается как нелинейная: учитывается влияние мембранных усилий на изгибную жесткость стенки. Мембранные усилия в зависимости от внутреннего давления определяются по безмоментной теории.

В настоящей работе на основе численного анализа напряженного состояния приведены результаты исследования прочности образцов. Образец криволинейной трубы изготовлен путём непрерывной намотки волокон на оправку. В результате намотки формируется структура пакета слоёв с переменными параметрами армирования. Анализ распределения углов и коэффициентов армирования, а также упругих свойств в зависимости от технологической схемы намотки представлен в [2].

Оценка прочности композитных конструкций включает несколько стадий, соответствующих естественным структурным уровням материала. На каждой стадии определяются осреднённые физико-механические характеристики материала. Упругие свойства композита описываются при помощи модели ортотропного тела. Используется схема послойного анализа [3], которая включает в себя:

- Определение приведённых упругих характеристик однонаправленного слоя в зависимости от углов и коэффициентов армирования.

- Расчёт приведённых упругих характеристик пакета слоёв с учётом структуры материала.

- Определение приведённых напряжений и деформаций однонаправленного слоя в зависимости от параметров НДС пакета слоёв (обратный переход).

Отметим, что при нагружении однонаправленного слоя реализуются различные формы разрушения: разрыв волокон, разрыв связующего, расслоение материала, разрыв адгезионных связей волокон и связующего, потеря устойчивости волокон при сжатии и т.д. Эти формы считаются взаимно независимыми. Критерии прочности имеют следующий вид [4, 5]:

$$F_{-1} \leq \sigma_{11} \leq F_{+1}; \quad F_{-2} \leq \sigma_{22} \leq F_{+2};$$

$$|\sigma_{12}| \leq F_{12}, \quad (1)$$

где F_{+1} и F_{+2} – предельные растягивающие напряжения вдоль и поперёк волокон, F_{-1} и F_{-2} – соответственно предельные сжимающие напряжения, F_{12} – предельное касательное напряжение чистого сдвига; Σ_{11} , Σ_{22} , Σ_{12} – расчётные напряжения, записанные в главных осях анизотропии материала. Прочность однонаправленного слоя при плоском напряжённом состоянии характеризуется пятью независимыми пределами прочности, каждый из которых определяется путём отдельного эксперимента.

Следует иметь в виду, что прочность волокон стекла, бора, углерода на разрыв на один – два порядка выше прочности матрицы. Поэтому при прочих равных условиях, характеристики прочности однонаправленного слоя пропорциональны содержанию волокон. Считаем, что с увеличением коэффициента армирования ψ предел прочности вдоль волокон линейно возрастает, то есть:

$$F_{+1} = \psi \sigma' + (1 - \psi) \sigma''. \quad (2)$$

Здесь σ' и σ'' – пределы прочности волокна и матрицы соответственно. Соотношение (2) отражает так называемое «правило смесей» – вклад каждого компонента пропорционален его объёмной доле в композите.

2. Оценка прочности композитных образцов. Рассмотрим образец с угломгиба $\phi_0 = 180^\circ$ и укладкой волокон по геодезическим траекториям. Представим, что труба изготовлена перекрестной спиральной намоткой двух симметричных систем волокон. Характеристики образца приведены в табл. 1, где R – радиус кривизны оси трубы, r – средний радиус поперечного сечения, h – толщина стенки.

Таблица 1

R , см	r , см	h , см	r/R	r/h
19,05	6,274	0,157	0,329	40,0

Для оценки прочности монослоя определяем напряжения вдоль и поперек волокон ($\bar{\sigma}_{11}$ и $\bar{\sigma}_{22}$), а также касательные напряжения $\bar{\sigma}_{12}$. Рассматриваем точки

наружной и внутренней поверхностей стенки центрального сечения. Напряжения представим в безразмерном виде: $\bar{\sigma} = \sigma / \sigma_0$, где $\sigma_0 = Mr/I$, I – осевой момент инерции поперечного сечения трубы, $M = M_x = M_z = 0,1$ Нм.

На рис. 1 и 2 показано распределение нормальных напряжений соответственно вдоль и поперёк волокон, на рис. 3 – касательных напряжений. Анализ эпюр показывает, что в распределении напряжений наблюдается определённая симметрия. Расчётные напряжения на наружной поверхно-

сти с точностью до 7–8% равны напряжениям на внутренней поверхности трубы.

Рассмотрим зависимости напряжений от угла укладки волокон на экваторе тора: $\theta_m = \pm 50^\circ, \pm 60^\circ, \pm 70^\circ$ и 90° . Сравнительный анализ эпюр на рис. 2–4 показывает, что при увеличении угла θ_m амплитуды нормальных напряжений вдоль волокон $\bar{\sigma}_{11}$ увеличиваются, а поперёк волокон $\bar{\sigma}_{22}$ – наоборот, уменьшаются. Амплитуды касательных напряжений $\bar{\sigma}_{12}$ сначала увеличиваются, затем – уменьшаются и становятся наименьшими при $\theta_m = 90^\circ$.

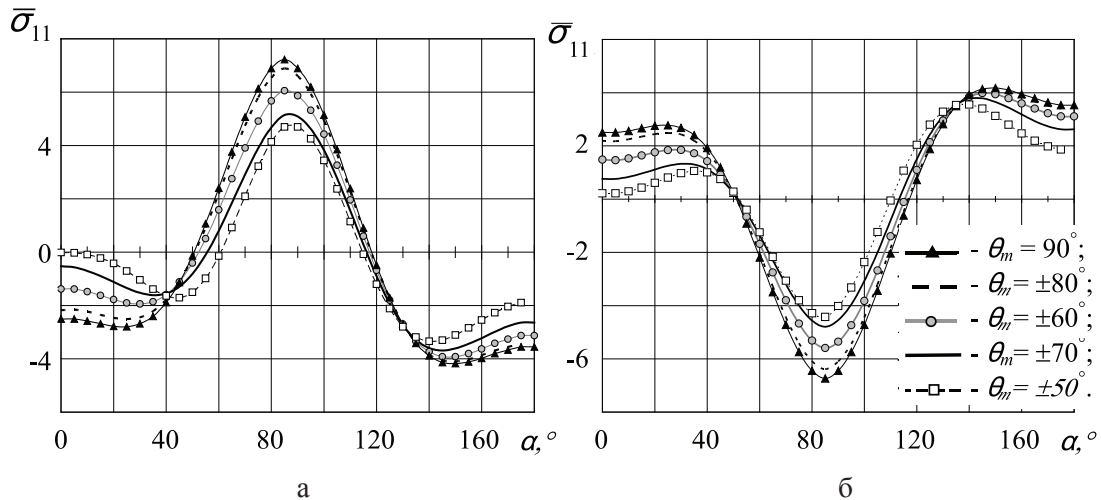


Рис. 1. Напряжения вдоль волокон:
а – на внутренней поверхности; б – на наружной поверхности

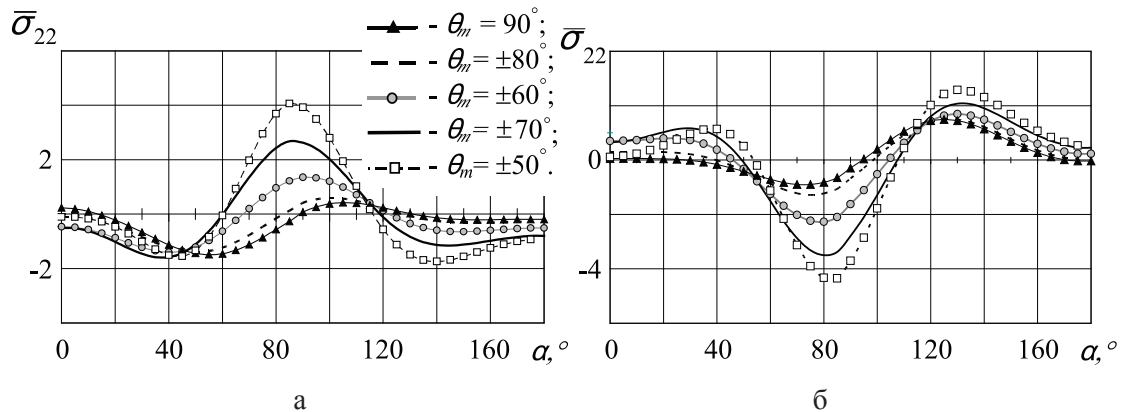


Рис. 2. Напряжения поперек волокон:
а – на внутренней поверхности; б – на наружной поверхности

Анализ показывает [1, 2], что при увеличении угла укладки волокон на экваторе тора θ_m упругие перемещения стенки и коэффициенты увеличения гибкости при изгибе криволинейной трубы уменьшаются, труба становится более жесткой

Наиболее напряжённой областью оказывается область наружной поверхности трубы с координатой $\alpha \approx 90^\circ$ (на эквато-

ре тора). Эта область работает в условиях двухосного растяжения (как вдоль, так и поперёк волокон). Нормальные напряжения поперёк волокон и касательные напряжения получают порядка с нормальными напряжениями вдоль волокон.

Отметим, что армированный пластик – материал с ярко выраженной анизотропией прочности. Сопоставим характеристики

прочности органопластика Kevlar 49/PR-286 при растяжении его вдоль и поперёк волокон, а также при чистом сдвиге. Получим:

$$\frac{F_{+1}}{F_{+2}} \approx 12; \quad \frac{F_{+1}}{F_{12}} \approx 4.$$

В табл. 2 в зависимости от угла укладки волокон на экваторе θ_m дано сопоставление максимальных значений расчётных напряжений.

Очевидно, форма разрушения однонаправленного слоя зависит от угла укладки

волокон на экваторе. При $\theta_m = 90^\circ$ следует ожидать разрыва волокон. При $\theta_m \leq 80^\circ$ – разрыва связующего или адгезионных связей волокон и связующего.

Заметим, что при работе однонаправленного композита в составе пакета многослойного материала, содержащего разноориентированные слои, после разрушения отдельного слоя этот слой будет продолжать вносить вклад в общую несущую способность материала.

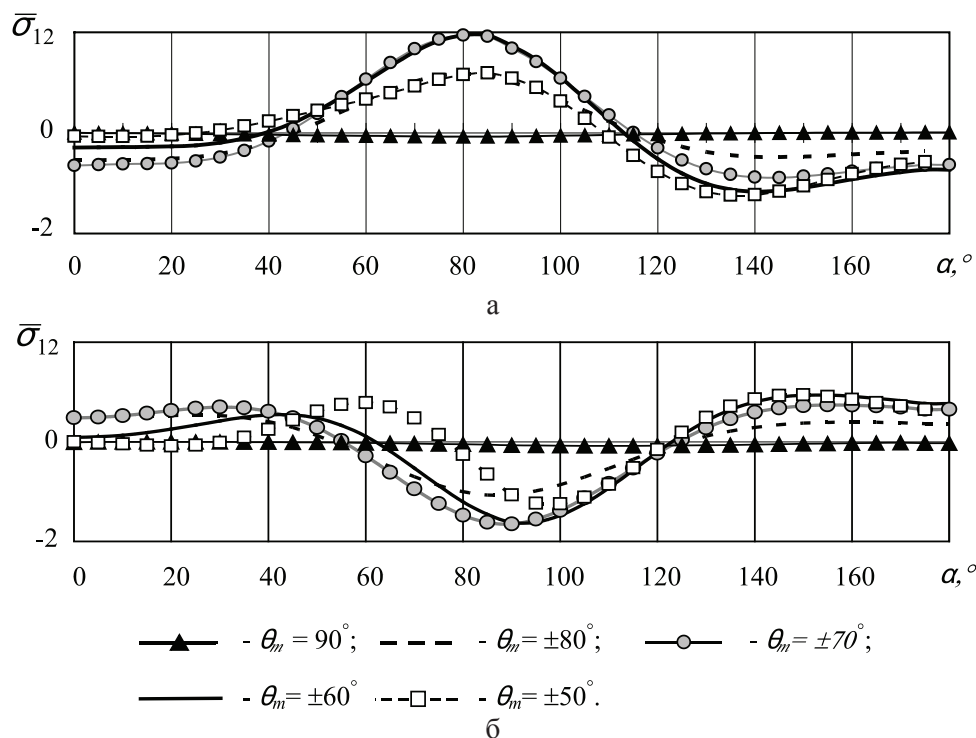


Рис. 3. Касательные напряжения:
 а – на внутренней поверхности; б – на наружной поверхности

Таблица 2

Угол θ_m	Отношение максимальных напряжений	
	$\bar{\sigma}_{11}$	$\bar{\sigma}_{11}$
	$\bar{\sigma}_{22}$	$\bar{\sigma}_{12}$
90°	17	97
80°	11,5	14,5
70°	4,5	3,1
60°	1,9	2,6
50°	1,2	3,8

В то же время при анализе прочности многослойных композитных трубопроводов и нефтепроводов следует иметь в виду, что трещины в отдельных слоях могут привести к разгерметизации системы в целом.

Заключение

Таким образом, предложена методика расчета прочности композитных трубопроводов и нефтепроводов. В рамках методики 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. Выполнен анализ прочности многослойного композитного образца. В зависимости от геометрии, структуры пакета слоёв и схемы армирования дан сопоставительный анализ результатов.

Список литературы

1. Лоскутов Ю.В. Прочность и жёсткость криволинейных многослойных композитных труб при чистом изгибе / Ю.В. Лоскутов, Ю.А. Куликов // *Механика композиционных материалов и конструкций*, ИПРИМ РАН. – М., 2008. – Т.14, № 2. – С. 157–166.

2. Куликов Ю.А., Лоскутов Ю.В. Механика трубопроводов из армированных пластиков. – Йошкар-Ола: Изд-во МарГТУ. 2004.

3. Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 263 с.

4. Zinoviev P.A., Grigoriev S.V., Lebedeva O.V., Tairova L.P. Strength of multilayered composites under a plane-stress state// *Composite Science and Technology*. – 1998. – Vol. 58. – P. 1209–1223.

5. Зиновьев П.А., Смердов А.А. Предельные возможности многослойных композитных структур // *Известия РАН. Механика твёрдого тела*. – 1994. – Т.1. – С. 7–17.

References

1. Loskutov Yu.V., Kulikov Yu.A., *Journal on Composite Mechanics and Design*, 2008, Vol. 14, no. 2, pp. 157–166.

2. Kulikov Yu.A., Loskutov Yu.V. *Mekhanika truboprovodov iz armirovannykh plastikov* [The Mechanics of Fiber-Re-

inforced Plastic Pipelines], Yoshkar-Ola, Mari State Technical University, 2004, 156 p.

3. Alfutov N.A., Zinoviev P.A., Popov B.G. *Raschet mnogoslonykh plastin i obolochek iz kompozitsionnykh materialov* [Analysis of laminated composite plates and shells], Moscow: Izdatt. Mashinostroenie, 1984, 263 p.

4. Zinoviev P.A., Grigoriev S.V., Lebedeva O.V., Tairova L.P. *Composite Science and Technology*. 1998. Vol. 58. pp. 1209–1223.

5. Zinoviev P.A., Smerdov A.A. *Mechanics of Solids: A Journal of Russian Academy of Sciences*. 1994. Vol. 1. pp.7–17.

Рецензенты:

Салихов М.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой автомобильных дорог, ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», г. Йошкар-Ола;

Поздеев А.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой водных ресурсов, ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», г. Йошкар-Ола.

Работа поступила в редакцию 17.01.2014.