

УДК 678.073:621.643.07

ОПТИМАЛЬНАЯ СТРУКТУРА СИЛОВЫХ СЛОЕВ В ТРУБАХ ИЗ АРМИРОВАННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ

д-р техн. наук, проф. В.П. СТАВРОВ, А.Б. ГОМАНЬКОВА
(Белорусский государственный технологический университет)

Приведены обоснования для оптимизации анизотропной структуры силового слоя в трубах из армированных термопластов с учетом различных эксплуатационных факторов.

Введение. К наиболее существенным факторам, определяющим ресурс трубопроводов, относится коррозионный износ материала под воздействием транспортируемого вещества и внешней среды. Для обеспечения долговечности трубопроводов в условиях эксплуатации применяют различные средств защиты поверхности труб или материалы, обладающие повышенной коррозионной стойкостью. В качестве конструкционных материалов для изготовления коррозионно-стойких труб и материала защитного слоя для стальных труб и труб из стеклопластиков широко используют термопластичные полимеры [1-2].

Они не подвержены электрохимической коррозии и отложениям, имеют малые значения коэффициентов трения, стойки к гидравлическим ударам. Однако трубы из термопластов имеют ограниченные диапазоны рабочих давлений и температур. Для транспортирования сред с повышенными рабочими давлениями и температурами требуются пластмассовые трубы с увеличенной толщиной стенки, что существенно снижает эффективность их использования. В так называемых бипластмассовых трубах [2] внутренняя оболочка из термопластичного полимера выполняет функцию защитного и герметизирующего слоя. Силовой слой получают намоткой на нее стеклянных волокон, пропитанных эпоксидным связующим. Бипластмассовые трубы характеризуются высокой прочностью, герметичностью, стойкостью в условиях эксплуатации, в то же время намотка силовых слоев из дорогостоящих компонентов, нанесение промежуточного (праймерного) слоя обуславливают высокую стоимость изделия. Этих недостатков лишены трубы из термопластичных полимеров, армированных высокопрочными волокнами [3 - 5], но ввиду высокой вязкости расплавов матричных термопластичных полимеров возникают трудности при пропитке ими волокнистых армирующих наполнителей. Один из перспективных путей преодоления данного недостатка - формирование силовых слоев из лент на основе термопластичных полимеров, однонаправленно армированных волокнами [5, 6]. Такие ленты получают в результате пултрузионной пропитки стекловолокна расплавами термопластичных полимеров [7]. Силовой слой, полученный намоткой лент из однонаправленно армированных термопластов, имеет анизотропную структуру. От типа структуры зависят эксплуатационные свойства труб. Ввиду различия требований, предъявляемых к трубе и, соответственно, к ее силовому слою в условиях эксплуатации, его структура, выбранная только исходя из основного фактора нагружения - внутреннего давления, может оказаться не оптимальной.

Цель данной работы - оптимизация анизотропной структуры силового слоя в трубах из армированных термопластов с учетом различных эксплуатационных факторов.

Структура и свойства силовых слоев. Типичная конструкция трубы из армированных термопластов показана на рис. 1. Внутреннюю герметизирующую и защитную оболочку получают экструзией из термопластичного полимера. В соответствии с нормативами на пластмассовые трубы (ГОСТ 18599-73, СТБ 1293-2001) наружный диаметр этой оболочки d_o принят в качестве номинального диаметра трубы. Материал и толщина этого слоя h_o задаются в зависимости от химической активности транспортируемой среды, интенсивности ее эрозионного воздействия и расчетного ресурса. В дальнейших расчетах толщина герметизирующей оболочки принята равной толщине пластмассовой трубы при стандартном отношении размеров $d_o / h_o = 41$, что соответствует геометрическим параметрам стандартных труб из полипропилена и полиэтилена низкого давления при номинальном давлении рабочей среды 0,25 МПа.

Предполагается, что разрушение труб из армированных термопластов под действием внутреннего давления может произойти только после разрушения волокнистого каркаса силового слоя. Это соответствует так называемой сеточной теории волокнистых композитов. Согласно данной теории, прочность однонаправленных лент при растяжении в направлении армирования пропорциональна разрывной прочности волокон и их объемной доле: $\sigma_p \cong \sigma_a P_a$ (σ_a - среднее разрушающее напряжение волокнистого наполнителя; P_a - его объемная доля в ленте). Очевидно, что для получения высокопрочных лент необходимо задавать максимально возможную (по технологическим критериям) степень наполнения и использовать наполнитель с большой разрывной нагрузкой. Реально достижимая степень наполнения при пропитке волокнистых

наполнителей полимерными расплавами составляет 0,5 - 0,6. Проницаемость волокнистых наполнителей для высоковязких полимерных расплавов возрастает с увеличением диаметров волокон, но с увеличением диаметров волокон уменьшается их прочность. С учетом этого в дальнейших расчетах использовались характеристики лент из полипропилена и стеклоровинга РБТ13-2400 с массовой степенью наполнения 0,6 ($P_a = 0,356$). Разрушающие напряжения таких лент при растяжении $\sigma_p = 400$ МПа.

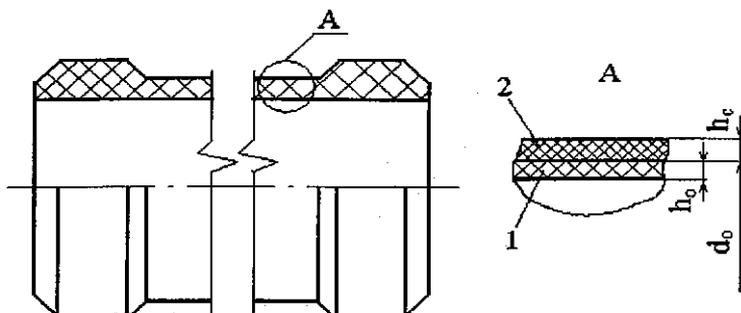


Рис. 1. Труба из армированных термопластов:
1 – защитный слой; 2 – силовой слой

Согласно сеточной теории, продольно-поперечная намотка силовых слоев с соотношением окружных и продольных слоев 2:1 и спиральная намотка под углом $\pm 54^\circ 44'$ к образующей цилиндра эквивалентны в отношении прочности. Толщина силового слоя h_c , рассчитанная по сеточной теории, равна

$$h_c = \frac{3p_0 n d_0}{4\sigma_p}, \quad (1)$$

где p_0 – номинальное внутреннее давление; n – коэффициент запаса прочности; σ_p – разрушающее напряжение при растяжении ленты.

Толщина силового слоя как толщина герметизирующей оболочки изменяется пропорционально заданному давлению и номинальному диаметру трубы. При номинальном внутреннем давлении $p_0 = 1,6$ МПа и коэффициенте запаса прочности $n = 4$ толщина силового слоя составляет $0,49 h_0$, а полная толщина стенки трубы в 2,7 раза меньше толщины трубы из неармированного полипропилена для такого же рабочего давления. Эти соотношения сохраняются и при различных значениях номинального диаметра трубы (рис. 2).

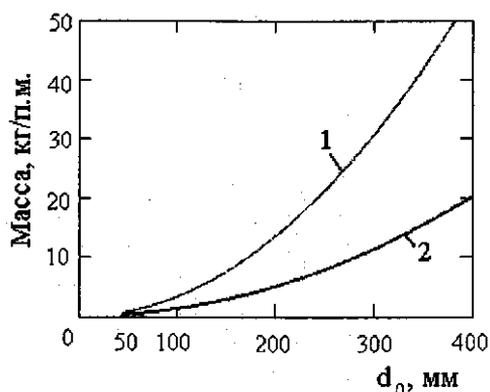


Рис. 2. Зависимость массы 1 м трубы из полипропилена (1) и из полипропилена, армированного стеклоровингом (2), от номинального диаметра (для номинального давления 1,6 МПа)

Принятый коэффициент запаса прочности примерно соответствует коэффициенту запаса для стандартных труб из полипропилена по отношению к пределу текучести. Применение силовых слоев из армированных термопластов, имеющих небольшой разброс разрушающих напряжений (коэффициент вариации прочности лент обычно не превышает 10 %), позволяет снизить коэффициент запаса прочности до 3, тем самым снизить стоимость и еще более повысить технико-экономические показатели труб из армированных термопластов.

Характеристики упругих свойств силовых слоев, полученных ортогональной и спиральной укладкой, оценивали по свойствам и объемным долям компонентов. Модуль Юнга стекловолнистого наполнителя E_n принят равным 70 ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_n = 0,22$. Модуль упругости матричного полимера (полипропилена) при нормальной температуре – 1,78 ГПа. С увеличением температуры модуль упругости полимеров снижается. Температурную зависимость модуля на основании данных [8] задавали в виде функции $E_n = E_n^0 \exp[-(a_n T)^2]$, где $E_n^0 = 2$ ГПа; $a_n = 0,017$ °C⁻¹; T – температура, °C. Коэффициент Пуассона независимо от температуры $\nu_n = 0,4$. По указанным значениям постоянных упругости компонентов сначала рассчитывали постоянные упругости однонаправленной ленты [9], а затем по методу осреднения (с учетом ориентации лент) – постоянные упругости силового слоя. При расчете свойств силового слоя, полученного продольно-поперечной укладкой, учитывали также отклонение волокон в окружающем слое на угол подъема спирали $\alpha = \arcsin b/\pi d_0$ (b – ширина ленты). При армировании труб диаметром более 50 мм лентами шириной 10 – 20 мм этот угол мал, но, как показали расчеты, модули упругости в главных направлениях силового слоя с такой квазиортогональной структурой заметно снижаются. По температурным коэффициентам линейного расширения (ТКЛР) компонентов рассчитывали ТКЛР композитов в силовых слоях.

Приняты следующие значения ТКЛР компонентов: $\alpha_a = 48,10^5$ K⁻¹; $\alpha_n = 11,10^5$ K⁻¹. Результаты расчетов (для температуры 20 °C) приведены в таблице.

Постоянные упругости силовых слоев различной структуры

Показатель	Структура			
	Однонаправленная	Ортогональная 2:1	Квазиортогональная 2:1	Спиральная
Модуль Юнга окружной E_t , ГПа	26,1	18,5	16,4	4,8
Модуль Юнга осевой E_o , ГПа	2,9	10,7	10,6	3,2
Модуль сдвига в плоскости слоя $G_{то}$, ГПа	1,37	1,37	1,38	2,24
Коэффициент Пуассона в плоскости $\nu_{от}$	0,34	0,09	0,10	0,40
ТКЛР в осевом направлении $\alpha_o \cdot 10^5, K^{-1}$	10,1	2,3	2,3	2,4

Из таблицы видно, что модули Юнга материала силового слоя в большей степени зависят от его структуры и практически не зависят от способа укладки лент, модуля сдвига и ТКЛР силовых слоев. Следует ожидать наиболее существенной зависимости от структуры силового слоя тех показателей эксплуатационных свойств труб, которые определяются модулями упругости материала.

Жесткость при изгибе. При монтаже трубопровода на опорах трубу рассматривают как неразрезную балку, нагруженную равномерно распределенным по длине усилием от силы тяжести самой трубы и транспортируемой среды. Если расстояние между опорами равно L , удельная нагрузка от транспортируемой среды и силы тяжести самой трубы q , то максимальный прогиб между опорами [1]:

$$f = \frac{qL^4}{384D_x}, \tag{2}$$

где $D_x = E_n I_n + E_o I_o$ – жесткость трубы при изгибе (E_n и E_o – модули упругости в осевом направлении защитной оболочки и силового слоя; I_n и I_o – моменты инерции слоев).

Приняв $L = 6$ м, по формуле (2) рассчитывали прогибы труб с силовыми слоями различной структуры. При спиральной намотке силового слоя прогибы труб, эксплуатируемых при температуре 20 °C, в 2,15 раза больше, чем при квазиортогональной. С увеличением температуры эксплуатации это отношение увеличивается: при 100 °C – до 21,4, т.е. почти на порядок (рис. 3). Следовательно, при монтаже труб со спиральной намоткой потребуется уменьшить расстояние между опорами. Для труб диаметром 225 мм при квазиортогональной намотке прогиб находится в пределах допустимого (12 мм) вплоть до температуры среды 60 °C, тогда как при спиральной намотке он превышает допустимые значения даже при 20 °C. При различных значениях номинального диаметра труб указанные соотношения прогибов труб с различной структурой силового слоя сохраняются, поскольку пропорционально изменяются толщины слоев. Абсолютные значения прогибов с увеличением номинального диаметра уменьшаются.

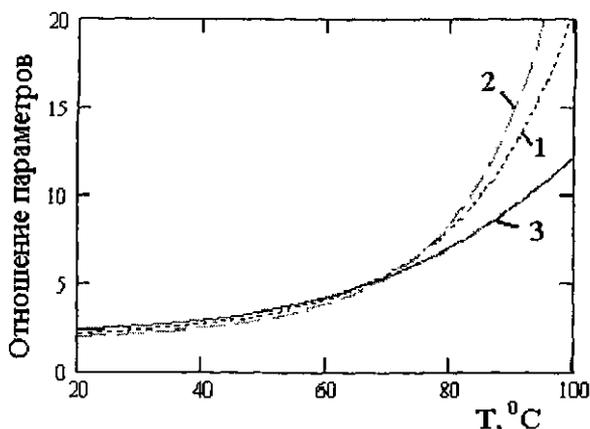


Рис. 3. Отношения жесткости при изгибе (1); критических напряжений изгиба (2); критических давлений (3) для труб с квазиортогональными и спиральными силовыми слоями как функции температуры эксплуатации

Для оценки эффективности армирования рассчитывали также прогибы труб из полипропилена, толщина которых соответствует номинальному давлению 1,6 МПа. При температуре 20 °С прогиб таких труб с номинальным диаметром 225 мм на 35 % больше, чем труб с квазиортогональным армированием, а при 60 °С – в 2,4 раза, несмотря на то, что толщина их почти вдвое больше.

При изгибе труб, смонтированных на опорах, возникают дополнительные изгибающие моменты. Из-за относительно малой толщины стенки возможна потеря устойчивости. Критическое осевое напряжение оценивали с учетом анизотропии силового слоя по формуле [10]:

$$\sigma_{\text{осп}} = \frac{E_0 h}{R + 2\delta} \left[1 + 4 \left(\frac{\delta}{R} \right) + 64 \left(\frac{\delta}{R} \right)^2 \right] \sqrt{\frac{8E_0}{9E_t}}, \quad (3)$$

где $h = h_o + h_c$; $R = d_o/2$; δ – отклонение от цилиндричности (принято $\delta = 2$ мм).

Критическое напряжение для труб диаметром 225 мм с квазиортогональным армированием, рассчитанное по формуле (3), при 20 °С вдвое больше, чем для труб со спиральной укладкой лент, а при 60 °С – почти в 4 раза (см. рис. 3). Для труб из полипропилена критическое напряжение при нормальной температуре выше, чем у более тонких армированных, но при повышенной температуре (60 °С) – уже меньше на 20 %. Трубы со спиральным силовым слоем по этому показателю также уступают трубам с квазиортогональным армированием.

Устойчивость при наружном давлении. Трубы, эксплуатируемые под водой или укладываемые в грунт, при отсутствии внутреннего давления могут потерять устойчивость. Критическое наружное давление определяет допустимую глубину укладки трубопровода. Его рассчитывали с учетом анизотропии силового слоя по формуле [11]:

$$P_{\text{кр}} = \frac{1,75\pi h^{2,5}}{LR^{1,5}} \sqrt[4]{E_0 \left(\frac{E_t}{12} \right)^3}. \quad (4)$$

Согласно расчетам, критическое наружное давление для труб с квазиортогональным армированием при нормальной температуре в 2,3 раза больше, чем для труб со спиральной намоткой. С увеличением температуры это отношение возрастет (см. рис. 3), т.е. спиральная намотка становится еще менее эффективной. От номинального диаметра трубы (при фиксированном номинальном давлении p_o , для которого, согласно формуле (1), рассчитывается толщина силового слоя) соотношение значений критического наружного давления при различной схеме армирования не зависит. Критическое давление для более толстостенных труб из неармированного полипропилена существенно выше, чем для тонкостенных армированных: толщина входит в формулу (4) в степени 2,5, тогда как модули Юнга только в первой степени. С увеличением температуры эксплуатации преимущество толстостенных пластмассовых труб теряется.

Осевое температурное удлинение. Температурный коэффициент линейного расширения силовых слоев, как видно из данных, приведенных в таблице, значительно меньше, чем ненаполненного матричного полимера. При этом влияние структуры слоя не существенно. Наличие в трубе герметизирующего

слоя из ненаполненного матричного полимера еще более нивелирует это различие. В результате относительное удлинение труб из армированных термопластов в осевом направлении лишь на 10 - 15 % меньше, чем удлинение пластмассовых труб (из такого же полимера). Это обстоятельство следует учитывать при монтаже трубопроводов из армированных термопластов.

Заключение, Как следует из приведенных данных, трубы из армированных термопластов значительно легче стандартных пластмассовых труб. По критерию прочности при действии только внутреннего давления структура силового слоя, получаемая при квазиортогональной намотке армирующих лент, эквивалентна структуре, получаемой при спиральной намотке, однако более выгодна по критерию жесткости при изгибе (монтаже трубопровода на опорах) и по критерию устойчивости при действии наружного давления (эксплуатация трубопровода под водой или в грунте), особенно при повышенных температурах эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шапиро Г.И., Ехлаков С.В., Абрамов В.В. Пластмассовые трубопроводы. - М: Химия, 1986. - 144 с.
2. Ларионов А.Ф., Поспелов А.Б. Конструкция и технология производства бипластмассовых труб нефтяного назначения // Аэрокосмическая техника и высокие технологии-2000: Тез. докл. конф. - Пермь, 2000. - С. 118.
3. Gibson A.G. Composite materials in the offshore industry // Comprehensive composite materials. Vol. 6. - Oxford: Elsevier, 2000. - P. 459 - 478.
4. Mitschang P., Schledjewski R. Faserverstaerkte Kunststoffe verarbeiten // Kunststoffe. - 2003. - № 10. - S. 189-194.
5. Трубопроводы из армированных термопластов / В.П. Ставров, А.Б. Гоманькова, О.И. Карпович, А.Л. Наркевич // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: Тез. докл. IV межд. науч.-техн. конф. - Новополюк: ПГУ, 2003. - С. 80 - 82.
6. Патент РБ № 1322. Труба из термопластичных полимеров, армированных волокнами /В.П. Ставров, О.И. Карпович, А.Б. Гоманькова; Заявл. 23.05.2003.
7. Ставров В.П., Наркевич А.Л., Карпович О.И. Пултрузионная технология получения стеклоармированных термопластичных материалов и их применение в высокопрочных изделиях // Новые технологии в химической промышленности: Материалы конф. - Мн.: БГТУ, 2002. - Ч. 1. - С. 55 - 56.
8. Erhard G. Konstruieren mit Kunststoffe. - Muenchen: C. Hanser Verlag. - 1993. -310 s.
9. Ставров В.П. Механика композиционных материалов. - Мн.: БГТУ, 1996. - 164 с.
10. Зайцев Г.П. Потеря устойчивости прямых анизотропных труб при чистом изгибе // Деформирование и разрушение конструкций летательных аппаратов. - М.: МАТИ, 1989. - С.48-55.
11. Королев В.И. Слоистые анизотропные пластинки и оболочки из армированных пластмасс. - М.: Машиностроение, 1965. - 272 с.