

РАСЧЕТ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ АРМИРОВАННЫХ ТРУБ

С.В. Шаляпин, аспирант, *И.В. Гвоздев, директор НТЦ,

И.Д. Симонов-Емельянов, заведующий кафедрой

кафедра Химии и технологии переработки пластических масс и полимерных композитов

МИТХТ им. М.В. Ломоносова

*НТЦ «Пластик», группа «Полипластик», Москва

e-mail: shalyapinsergey@gmail.com

В работе предложен вариант проектирования и прочностного расчета многослойной полимерной армированной трубы, а также метод оценки длительной прочности на основе мирового опыта в полимерной трубной промышленности.

The authors propose a variant of the design and strength calculation for multilayer polymer-reinforced pipes, as well as a methodology to assess long-term strength based on international experience in plastic pipe industry.

Ключевые слова: армированные трубы, длительная прочность, сшитый полиэтилен, арамидное волокно, расчет рабочего давления.

Key words: reinforced pipes, long-term strength, cross-linked polyethylene, aramid yarn, calculation of the operation pressure.

Армирование полимерных труб высокопрочными материалами на сегодняшний день является самым эффективным способом увеличения прочности и, следовательно, максимально допустимых значений рабочего давления и температуры в трубе при существенном снижении материалоемкости и стоимости труб [1–3].

Многослойная армированная труба состоит из (рис. 1):

- внутренний слой – герметизирующая полимерная камера, по которой транспортируется жидкая или газообразная среда под давлением;
- армирующий слой – каркас из высокопрочных материалов (стальные, синтетические, минеральные нити или ленты) нанесенных, чаще всего, в форме сетки на внутреннюю камеру методом обмотки или оплетки. Армирующий слой воспринимает на себя основную нагрузку, возникающую от действия внутреннего давления;
- наружный слой – полимерный слой, закрывающий армирующий каркас, защищая его от механических повреждений и обеспечивающий монолитность конструкции при адгезии к внутренней камере через ячейки сетчатого каркаса.

При проектировании многослойной армированной трубы необходимо решить две основные задачи: необходимо подобрать материалы каждого из слоев и рассчитать геометрию трубы и армирующего слоя, чтобы обеспечить работоспособность многослойной конструкции в течение срока эксплуатации трубы при заданных эксплуатационных параметрах.

Отсутствие обоснованных методов прочностного расчета и эксплуатационных харак-

теристик армированных труб приводит к тому, что используются методы, не учитывающие температурно-временные зависимости прочности. Примером может служить расчет рабочего давления на основе разрывного давления и произвольно назначенных коэффициентов запаса прочности.

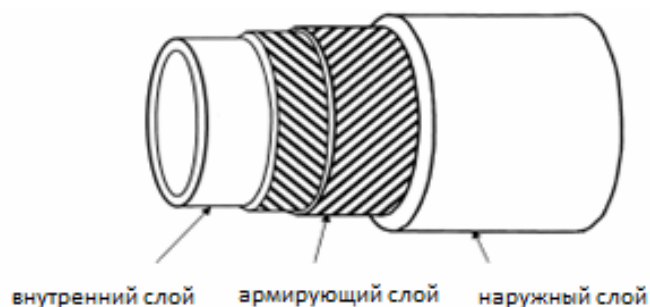


Рис. 1. Конструкция многослойной армированной трубы.

В настоящей работе предложен метод определения температурно-временной зависимости прочности армированных труб, основанный на общепринятых, предписанных международными стандартами для напорных полимерных труб принципах.

Для расчета рабочего давления однослойных полимерных труб используется известное уравнение (1) расчета давления для толстостенных сосудов [4]:

$$P = \frac{2 \cdot e}{(D_n - e)} \cdot [\sigma] \quad (1)$$

где P – внутреннее давление в трубе, D_n – наружный диаметр трубы, e – минимальная толщина стенки, $[\sigma]$ – допускаемое напряжение в материале.

В принятой для напорных полимерных труб системе стандартизации размеров формула (1) может быть преобразована с использованием, так называемого «стандартного соотношения размеров $SDR = D_H/e$ »:

$$P = \frac{2}{(SDR - e)} \cdot [\sigma] \quad (2)$$

где первый множитель правой части уравнения представляет собой чисто геометрические размеры трубы, второй – допускаемое напряжение, как прочностную характеристику материала, из которого она изготовлена.

Как известно, для полимерных материалов характерна температурно-временная зависимость прочности, как функция времени и температуры [5, 6], поэтому для определения допускаемого напряжения в стенке полимерной трубы необходимо иметь представления о ней. Определение длительной прочности и допускаемого напряжения для полимеров, применяемых в производстве труб, осуществляется по Международному стандарту ИСО 9080 «Трубы из термопластов. Определение длительной гидростатической прочности на образцах труб путем экстраполяции» [7]. В соответствии с этим стандартом проводятся длительные гидростатические испытания как минимум 90 образцов при трех различных температурах, длительностью не менее 9000 часов. Полученное уравнение длительной прочности в виде зависимости $\tau = f(T, \sigma)$ позволяет производить экстраполяцию величин прочности на 50 лет при температуре 20°C. Эта величина прочности носит название «Минимальное значение прочности» и обозначается как «MRS». Используя для различных трубопроводов (водопроводы, газопроводы) коэффициенты запаса прочности (C), получают допускаемое напряжение:

$$[\sigma] = \frac{MRS}{C} \quad (3)$$

Необходимо особо подчеркнуть, что испытания проводятся на трубных образцах нагружаемых внутренним давлением. То есть не используется простой, менее дорогостоящий метод нагружения стандартных образцов (лопаток) одноосным растягивающим усилием с получением временной зависимости прочности полимера. Необходимость испытания трубных образцов вызвана дополнительным воздействием на полимер в процессе переработки, возможностью появления анизотропии свойств полимера и, самое главное, появлением остаточных напряжений в трубе, что в совокупности оказывает влияние на длительную прочность полимера.

Таким образом, рабочее давление однослойной трубы определяется двумя пара-

метрами: геометрией трубы и длительной прочностью материала, из которого она изготовлена.

При оценке длительной прочности многослойной армированной трубы, состоящей из различных материалов, с различными физико-механическими и прочностными свойствами, но имеющей в своем наличии жесткий армирующий каркас, можно применить тот же самый принцип, что и для однослойной трубы.

При транспортировке среды под давлением внутреннюю камеру рассматривают как цилиндрическую толстостенную трубу, прочно привулканизованную к армирующему каркасу и находящуюся в условиях трехмерного напряженного состояния. Поскольку деформации внутренней камеры, ограниченные каркасом, незначительны, к внутренней камере применимы закон Гука и уравнение Ляме, относящиеся к расчету напряжений в толстостенных трубах [8, 9]. Модуль внутренней камеры и армирующего каркаса отличаются на 2-3 порядка, поэтому практически всю основную нагрузку под действия внутреннего рабочего давления воспринимает на себя армирующий каркас. Таким образом, необходимо оценить длительную прочность материала, из которого он изготовлен, но работающего в армирующей системе.

Давление, которое выдержит армирующий каркас, определяется следующим уравнением [10, 11]:

$$P = \frac{2 \cdot n \cdot \sin \phi}{D \cdot L} \cdot R, \quad (4)$$

где ϕ – угол намотки элементов каркаса к оси трубы, n – общее количество элементов в двух слоях, уложенных во взаимно противоположных направлениях, D – диаметр намотки, мм, L – шаг намотки элемента, мм, R – нагрузка, которую должен выдерживать элемент при заданных режимах эксплуатации. В свою очередь шаг намотки определяется выражением (5):

$$L = \frac{\pi D}{\operatorname{tg} \phi}, \quad (5)$$

Нагрузка, которую должен выдерживать элемент каркаса, равна произведению допускаемого напряжения $[\sigma]$ на площадь сечения элемента A :

$$P = [\sigma] \cdot A. \quad (6)$$

В случае, когда в качестве армирующего элемента используется нити, то площадь сечения рассчитывают следующим образом:

$$A = \frac{LD}{\rho} \cdot 10^{-3}, \quad (7)$$

где ρ – плотность нити, г/см³, LD – линейная плотность нити, текс (кг/1000м).

Подставив выражения 6 и 7 в выражение 4, получим:

$$P = \left[\frac{2 \cdot n \cdot \sin \phi}{D \cdot L} \cdot \frac{LD \cdot 10^{-3}}{\rho} \right] \times [\sigma_H] = Z \cdot [\sigma_H] \quad (8)$$

Из уравнения 8 видно, что давление, как и для однослойных труб, определяется двумя параметрами: геометрией армирующего каркаса (первый член произведения в правой части уравнения) и прочностью материала из которого изготовлен армирующий каркас (второй член произведения в правой части уравнения). В этом случае Z является геометрическим параметром трубы и армирующего каркаса, а $[\sigma_H]$ – допускаемым напряжением на нить. Полная аналогия с формулой 2.

Понятно, что в случае армированных труб необходимо определять температурно-временную зависимость прочности путем испытания труб, а не нитей, поскольку армирующая конструкция вносит гораздо больший вклад в прочность трубы, чем влияние переработки при производстве однослойной трубы, как и рекомендуется в международном стандарте ИСО/ТС 18226 и американским стандартом API 15S [12, 13]. Для органических полимерных волокон характерна ярко выраженная температурно-временная зависимость длительной прочности, поэтому для прогнозирования работоспособности труб, армированных органоволокнами, на

заданный срок и при различных температурах эксплуатации необходимо применять тот же подход, что и для оценки длительной прочности материалов, применяемых для однослойных труб. Т.е. сначала необходимо определить температурно-временную зависимость прочности волокна, работающего в армирующей системе по методике, аналогичной предписанной международными стандартами ИСО 9080 или ИСО/ТС 18226, а затем уже рассчитать геометрию армирующего каркаса.

В качестве примера рассмотрим трубы с диаметрами проходного сечения 51 и 113 мм, с внутренней камерой из сшитого полиэтилена РЕХ, толщиной 2.5 и 5.5 мм соответственно. Материал армирующего каркаса, нанесенного методом оплетки, нити Кевлар из полиарамидного волокна, наружного слоя – ПЭВП, толщиной 1.5 мм. Рабочее давление в трубе – 1 МПа, температура транспортируемой среды – 65°C и 95°C, срок эксплуатации 20 лет.

Убедимся в том, что армирующий каркас будет воспринимать основную нагрузку, для этого необходимо рассчитать давление на внутренней поверхности каркаса по уравнениям Ляме [8], при этом наружный покровной слой трубы можно не учитывать [9]. Модуль для РЕХ принят 200 МПа, для Кевлара – $70 \cdot 10^3$ МПа [14], коэффициент Пуассона 0.42 и 0.5 соответственно. Результаты расчета представлены в табл. 1:

Таблица 1. Расчет давления на внутренней поверхности армирующего каркаса

Диаметр сечения трубы, мм	Внутренний радиус камеры из РЕХ, мм	Наружный радиус камеры из РЕХ, мм	Давление на внутренней поверхности камеры из РЕХ, МПа	Давление на внутренней поверхности каркаса, МПа
51	25.5	28	1	0.93
113	56.5	62	1	0.93

Таким образом, при выбранных толщинах внутренней камеры из РЕХ 97% от внутреннего давления в трубе воспринимает на себя армирующий каркас из Кевлара.

Теперь необходимо рассчитать геометрию армирующего каркаса, чтобы напряжение в нитях под действием внутреннего давления не превышало допустимое значение напряжения. Поскольку для арамидных волокон характерна температурно-временная зависимость прочности [15], то на первом этапе проектирования в расчет можно принять минимальное значение прочности для температур 65°C и 95°C при 20 годах равными 1.018 ГПа и 0.774 ГПа соответственно [16].

Если принять количество нитей и угол армирования для двух труб одинаковым, то

тогда, с учетом (5), уравнение для расчета давления (8) упрощается:

$$P = \left[\frac{2 \cdot n \cdot \sin \phi \cdot \operatorname{tg} \phi}{\pi D^2} \cdot \frac{LD \cdot 10^{-3}}{\rho} \right] \cdot [\sigma_H] = \left[\frac{2 \cdot n \cdot \sin \phi \cdot \operatorname{tg} \phi}{1000 \cdot \pi \cdot \rho} \right] \cdot \left[\frac{LD}{D^2} \right] \cdot [\sigma_H] \Rightarrow P = [a] \cdot \left[\frac{LD}{D^2} \right] \cdot [\sigma_H] \quad (9)$$

Решая уравнения 9 относительно линейной плотности, определяем текс нитей Кевлара, которые необходимо использовать для оплетки внутренней камеры из РЕХ. Результаты расчета представлены в табл. 2:

Таблица 2. Расчет линейной плотности нитей оплетки

Диаметр сечения трубы, мм	Диаметр оплетки, D, мм	Кол-во нитей в оплетке, n, шт.	Угол оплетки нитями, φ	Плотность нити, ρ, г/см ³	[a]	Рабочее давление, P, МПа	Допускаемое напряжение на нить, [σ _н], ГПа		Линейная плотность нитей, LD, текс	
							65°C	95°C	65°C	95°C
51	56	48	55	1.44	0.025	0.93	1.018	0.774	115	151
113	124	48	55	1.44	0.025	0.93			562	739

В номенклатуре продукции не всегда удается найти нужный текст нити, поэтому необходимо подбирать геометрию трубы и армирующего каркаса, чтобы избежать перерасхода по нити, но обеспечить выполнение условий по передаче гидростатического давления на армирующий каркас и по допускаемому напряжению на нить. После того, как труба рассчитана и наработаны образцы, можно приступать к оценке длительной прочности армированной многослойной трубы по ИСО 9080 [7]. После получения обобщенной температурно-временной зависимости прочности

для нити, работающей в армирующем каркасе многослойной конструкции, по уравнению (8) можно легко рассчитать оптимальную геометрию трубы и армирующего каркаса как для постоянных режимов эксплуатации, так и для переменных температур с использованием правила Майнера [17].

Для оценки снижения материалоемкости от армирования, рассмотрим однослойную трубу из РЕХ для тех же условий эксплуатации. По уравнению длительной прочности [18] определим минимальное значение прочности РЕХ и рассчитаем геометрию трубы (табл. 3):

Таблица 3. Расчет геометрии однослойной трубы из РЕХ

Срок эксплуатации		Минимальное значение прочности РЕХ, σ, МПа		Рабочее давление, P, МПа	Сечение трубы	Минимальная толщина стенки трубы, e _{min} , мм	
годы	часы	65°C	95°C			65°C	95°C
20	175200	5.71	4.13	1	51	4.9	7.0
		5.71	4.13		113	10.8	15.6

Теперь сравним расход по РЕХ в однослойной трубе и многослойной армированной на 1 метр трубы (табл. 4):

Таблица 4. Расход РЕХ на 1 м однослойной трубы и многослойной армированной

Сечение трубы	Плотность РЕХ, кг/м ³	Мин. толщина стенки однослойной трубы, e _{min} , мм		Мин. толщина стенки многослойной трубы, e _{min} , мм		Масса РЕХ в однослойной трубе, кг		Масса РЕХ в многослойной трубе, кг		Экономия при использовании армирующего слоя, %	
		65°C	95°C	65°C	95°C	65°C	95°C	65°C	95°C	65°C	95°C
51	940	4.9	7.0	2.5		0.808	1.205	0.395		51.1	67.2
113		10.8	15.6	5.5		3.968	5.917	1.925		51.5	67.5

Таким образом, армирование труб высокопрочными нитями Кевлар позволяет снизить материалоемкость по РЕХ более чем на 60%, а, несмотря на дороговизну Кевлара, эконо-

мический эффект от применения многослойных полимерных армированных труб будет высок, т.к. общая масса армирующего каркаса на метр трубы в несколько раз меньше чем РЕХ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Luhrs H. Reinforced thermoplastic pipes // 3R Int. Special Plastics Pipes. 2001. V. 40. P. 46–49.
2. Wolters M., Wessing W., Dalmolen B., Eckert R., Wuest J. Reinforced thermoplastic pipeline (RTP) systems for gas distribution / 23rd World Gas Conference. – Amsterdam, 2006. P. 15.
3. Dalmolen L.G.P., Kruyer Ir. M., Cloos P.J. Offshore applications of «Reinforced Thermoplastic Pipe» // PetroMin Pipeliner. 2009. Jan.-Mar. P. 14–18.
4. Трубы из термопластов для транспортирования жидких и газообразных сред. – ГОСТ ИСО 161, 2004. 8 с.
5. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.И. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М: Наука, 1974. 560 с.
6. Бартенев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. – М.: Химия, 1984. 280 с.

7. Plastics piping and ducting systems – Determination of long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation. – ISO 9080, 2003. 32 p.
8. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1975. 654 с.
9. Лепетов В.А., Юрцев Л.Н. Расчеты и конструирование резинотехнических изделий и технологической оснастки. – М.: Истек, 2006. 418 с.
10. Гориловский М.И., Гвоздев И.В., Швабауэр В.В. К вопросу прочностного расчета армированных полимерных труб // Полимерные трубы. 2005. № 2. С. 22–25.
11. Wootton D.B. The application of textiles in rubber (Handbook). – Rapra Technology Ltd, 2001. 248 p.
12. Reinforced thermoplastic piping systems for gaseous fuels. – ISO/TS 18226, 2006. 46 p.
13. Qualification of spoolable reinforced plastic line pipe. – API 15S, 2006. – 38 p.
14. Иоффе А. Структура и механические свойства волокна KEVLAR фирмы Дюпон // Пластические массы. 2009. № 3. С. 11–17.
15. O’Hear N., van Leeuwen M., Arnhem Ed. Engineering with aramid fibers / Fachkolloquium InnoZug, Chemnitz University of Technology, Chemnitz, 2010. P. 127–137.
16. Fallatah G. M., Dobbs N., Gibson A.G. Long term creep and stress rupture of aramid fibre // Plastics, Rubber and Composites. 2007. V. 36. № 9. P. 403–412.
17. Plastics pipes for conveyance of fluids under pressure – Miner’s rule – Calculation method for cumulative damage. – EN. ISO 13760, 1998. 10 p.
18. Трубы напорные из термопластов и соединительные детали к ним для систем водоснабжения и отопления. Общие технические условия. – ГОСТ Р 52134-2003, 2004. 68 с.