

ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАРНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С ПРОДОЛЬНЫМИ МЯГКИМИ ШВАМИ

Д.М. Шахматов, М.В. Шахматов

INCREASING OF THE BEARING CAPACITY OF WELDED CYLINDRICAL SHELLS WITH LONGITUDINAL SOFT SEAMS

D.M. Shakhmatov, M.V. Shakhmatov

Проведен теоретический анализ прочности бандажированных труб с мягкими продольными швами. Полученные расчетные зависимости позволяют произвести оценку предельного внутреннего давления для рассматриваемых конструкций с учетом параметров намотки бандаж (стальной проволоки), диаметра оболочек и толщины стенки. Даны рекомендации по повышению работоспособности сварных цилиндрических оболочек.

Ключевые слова: цилиндрические оболочки, бандаж, сварные соединения, расчетная оценка прочности.

The article provides a theoretical analysis of the strength of banded pipes with soft longitudinal seams. Obtained calculated dependence allows to evaluate the limit internal pressure for the considered structures as a function of parameters of the band winding (steel wire), shell diameter and wall thickness. The article includes recommendations to improve the performance of welded cylindrical shells.

Keywords: cylindrical shells, bandage, welded joints, calculated evaluation of strength.

Одним из резервов повышения несущей способности цилиндрических оболочек и трубопроводов, работающих при высоком внутреннем давлении, является их усиление посредством намотки на наружную поверхность стальной проволоки, ленты или композиционных систем на основе полимерных материалов [1, 2]. Технология нанесения данных материалов (бандажирование) нашла широкое применение при восстановлении работоспособности отдельных участков трубопроводов в процессе их ремонта, для предотвращения протяженных лавинных разрушений в магистральных газопроводах, при ремонте вертикальных стальных резервуаров и т. д. [3, 4]. Эффективность бандажирования в основном определяется величиной предварительного натяжения проволоки или ленты, толщиной обмотки и ее механическими характеристиками, а также характеристиками материала и размерами оболочек [5]. Назначение этих параметров в виде рекомендаций, как правило, определяется исходя из планируемого уровня внутреннего давления в оболочковых конструкциях без учета фактора механической неоднородности их сварных соединений [1, 5–7]. В то же время практика изготовления оболочковых конструкций свидетельствует о том, что их сварным соединениям присуща механическая неоднородность. Например, для сварных оболочковых конструкций, вы-

полненных из высокопрочной стали 12ГН2МФАЮ (среднее значение $\sigma_b^T = 889$ МПа). Металл продольного сварного шва выполнен под флюсом АН 17М сварочной проволокой Св10НМА (среднее значение $\sigma_b^M = 727$ МПа). Степень механической неоднородности K_b (отношение временных сопротивлений основного более твердого металла σ_b^T и мягкого металла шва σ_b^M) $K_b = \sigma_b^T / \sigma_b^M = 1,22$.

Аналогично для оболочковых конструкций из стали 12Г2СМФ, выполненных сваркой под флюсом сварочной проволокой Св10НМА, степень механической неоднородности составляет $K_b = 1,17$ [2, 3]. При изготовлении труб с применением высокопроизводительных гибридных способов сварки (лазерной в сочетании с дуговой), с применением сварки токами высокой частоты, контактной сварки в сочетании с дуговой в зоне термического влияния также появляются участки, металл которых по механическим характеристикам может значительно отличаться от характеристик основного металла. В этом случае расчет силовых параметров бандаж и несущей способности оболочковых конструкций должен базироваться на оценке прочности их сварных соединений с учетом фактора механической неоднородности.

Навивка бандаж на наружную поверхность цилиндрических оболочек приводит не только к усилению конструкции, но изменяет соотношение

главных напряжений в стенке рассматриваемых оболочек $n = \sigma_2^T / \sigma_1^T$ от его значений $n = 0,5$ до $n = 1$, (где σ_2^T и σ_1^T – напряжения, направленные вдоль и поперек оси трубы соответственно). В связи с этим необходимо определить взаимосвязь n (показателя двухосности) с параметрами навиваемого бандажа. Учитывая, что на практике используются в основном три вида бандажа (стальная проволока, жгуты из стеклопластика и стекловолоконная намотка на связующем компоненте в виде смолы или клея), ограничимся рассмотрением навивки бандажа в виде стальной проволоки. Данный тип бандажа при решении поставленной задачи является обобщающим и при определенных условиях переходит в решение для остальных типов бандажей.

В качестве начальных условий используются основные допущения, аналогичные допущениям работ [1, 6, 8]. При этом главные оси напряжений и деформаций совпадают с главными осями цилиндрической оболочки (в данном случае рассматривается труба); наматываемый профиль расположен перпендикулярно образующей трубы; главные окружные деформации при нагружении бандажированного участка трубы внутренним давлением p в стенке ϵ_1 и в обмотке $\epsilon_{1,0}$ равны между собой $\epsilon_1 = \epsilon_{1,0}$; модули упругости и коэффициенты Пуассона для материала обмотки (стальная проволока) и материала трубы (сталь) равны между собой ($E_o = E_T$, $\mu_o = \mu_T = \mu$). Пределы текучести и прочности материала бандажа выше соответствующих характеристик материала трубы; кольцевые усилия воспринимаются трубой совместно с бандажом, а продольные – только трубой; рассматриваются витки бандажа, расположенные вплотную друг к другу с эквивалентной толщиной h_o , под которой понимается высота слоя обмотки, площадь поперечного сечения которой равновелика поперечному сечению профиля обмотки (для проволоки диаметром d_o эквивалентная толщина $h_o = (\pi d_o c) / 4$, где c – количество слоев навивки).

Следуя алгоритму решения, изложенному в работе [8], и опуская промежуточные выкладки, можно представить выражение для определения несущей способности (максимального давления) сварных цилиндрических оболочек в следующем виде:

$$p_{\max} = 2n\sigma_{cp}t / R, \quad (1)$$

где σ_{cp} – предельные напряжения в продольном сварном соединении оболочки, ослабленном мягкой прослойкой; t – толщина стенки оболочки; R – внутренний радиус оболочки.

Полученное выражение (1) показывает, что несущая способность цилиндрических оболочек, помимо традиционных параметров, зависит от прочности сварных соединений оболочки и параметра двухосности n . При отсутствии бандажа и при $K_b = 1$ (при равенстве временного сопротивления σ_b металла шва и основного металла, то есть $\sigma_{cp} = \sigma_b$) параметр двухосности для цилиндриче-

ских оболочек $n = 0,5$. В данном случае зависимость (1) преобразуется в известную «котельную» формулу, представленную решением Лапласа для тонкостенных оболочек. В случае наличия в сварном соединении механической неоднородности значения прочности сварного соединения σ_{cp} могут быть определены по методикам, изложенным в работе [9]. Например, в случае, когда продольный сварной шов или разупрочненный участок в зоне термического влияния можно представить в виде прямоугольной мягкой прослойки, прочность металла которой – σ_b^M , формула для определения несущей способности сварного соединения имеет вид:

$$\sigma_{cp} = \beta\sigma_b^M[(1/K_b) + (K_b - 1)K_x/K_b];$$

$$K_x = (1 + \kappa)^2 / 4\kappa; \quad \kappa = b/t; \quad (2)$$

$$\beta = 1,154 / [1 + 0,154(2n - 1)^2]^{0,5}, \quad (3)$$

где K_x – коэффициент контактного упрочнения «мягкой прослойки», κ – ее относительная толщина; b – ширина мягкой прослойки. Формула имеет смысл в диапазоне значений относительных толщин мягкой прослойки $\kappa_T \geq \kappa \leq 1$, где κ_T – относительная толщина прослойки, при которой за счет эффекта контактного упрочнения прочность сварного соединения достигает прочности основного более твердого металла.

Показатель двухосности n в стенке цилиндрической оболочки, усиленной бандажом в виде стальной проволоки, определяется по следующей формуле:

$$n = \sigma_2^T / \sigma_1^T = \{1 + [(1 - 0,5\mu)h_o / (t + 0,5\mu h_o)]\} / 2[1 - (h_o\sigma_0^n / pR)], \quad (4)$$

где σ_0^n – напряжение от предварительного натяжения стальной проволоки; μ – коэффициент Пуассона; h_o – эквивалентная толщина намотки; p – внутреннее давление в оболочке.

При отсутствии предварительного натяжения проволоки, то есть при $\sigma_0^n = 0$, выражение (4) преобразуется в зависимость, полученную ранее в работе [8]. В этом случае решение уравнения (1) осуществляется простой подстановкой n и σ_{cp} . Если бандаж навивается с предварительным натяжением, то есть в формуле (4) появляется составляющая σ_0^n / p , решение уравнения (1) может осуществляться методом итераций. При этом максимальное значение давления, соответствующее потере пластической устойчивости, достигается при $n = 1$, а разрушение происходит по кольцу.

Если в качестве бандажа обмотки используют жгуты из стеклопластика, материал которых имеет модуль упругости E_o , который отличается от модуля упругости металла оболочки E_T , коэффициенты Пуассона μ по-прежнему одинаковые, а намотка осуществлена без значительного усилия, то можно принять $\sigma_0^n = 0$. Параметр двухосности при этом равен [9]:

$$n = \sigma_2^T / \sigma_1^T = 0,5 + [(1 - 0,5\mu)E_o h_o / (2tE_T + \mu E_o h_o)]. \quad (5)$$

На основе теоретического анализа получена расчетная оценка бандажированных труб для цилиндрических оболочковых конструкций с учетом имеющейся механической неоднородности их сварных соединений. Полученное решение позволяет в зависимости от параметров бандажа прогнозировать изменение соотношения главных напряжений в оболочках и значительно (до двух раз) повышать их предельную несущую способность.

Литература

1. Остсемин, А.А. К расчету предельного состояния бандажированных труб / А.А. Остсемин, В.Ю. Заварухин // Проблемы прочности. – 1990. – № 1. – С. 76–82.
2. Безопасность трубопроводов при длительной эксплуатации / К.М. Гумеров, И.Ф. Гладких, М.В. Шахматов и др. – Челябинск: ЦНТИ, 2003. – 327 с.
3. Шахматов, М.В. Технология изготовления и расчет сварных оболочек / М.В. Шахматов, В.В. Ерофеев, В.В. Коваленко. – Уфа: Полиграфкомбинат, 1999. – 272 с.
4. Правила технической эксплуатации резервуаров и инструкция по их ремонту. Утверждены Госкомнефтепродуктом СССР 26.12.1986. – М.: Недра, 1988. – 120 с.
5. Смирнов, А.И. Об эффективности бандажирования труб и цилиндрических сосудов / А.И. Смирнов // Проблемы прочности. – 1983. – № 12. – С. 77–79.
6. Моношков, А.Н. К оценке прочности бандажированных труб / А.Н. Моношков, В.А. Лупин, В.И. Кутепова // Проблемы прочности. – 1972. – № 2. – С. 111–114.
7. Блейхер, Э.М. Использование бандажированных трубопроводов / Э.М. Блейхер // Транспорт и хранение нефти и газа. – 1977. – № 44. – С. 5–15.
8. Методические указания к выбору конструкции труб большого диаметра для магистральных трубопроводов / Ю.И. Блинов, А.Н. Моношков, В.А. Лупин и др.; Министерство черной металлургии; Союзтрубосталь; УралНИТИ. – Челябинск: УралНИТИ, 1977. – 44 с.
9. Шахматов, М.В. Прочность механически неоднородных сварных соединений / М.В. Шахматов, Д.М. Шахматов. – Челябинск: ООО «ЦПС Сварка и Контроль». – 2010. – 220 с.

Поступила в редакцию 25 июня 2012 г.