

УДК 622.691.4

А.А. Филатов; В.И. Кочетов<sup>1</sup>; И.И. Велиулин<sup>2</sup>; Р.Р. Хасанов<sup>2</sup>, e-mail: hasanov@eksikom.ru<sup>1</sup> ПАО «Газпром» (Санкт-Петербург, Россия).<sup>2</sup> ООО «ЭКСИКОМ» (Москва, Россия).

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕФЕКТНЫХ ТРУБ С ПОМОЩЬЮ УПРОЧНЯЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Зарубежный и отечественный опыт упрочнения ослабленных (дефектных) участков трубопроводов показывает, что одним из наиболее действенных способов ремонта является установка муфт.

Анализ показал, что большую роль при выборе типа и конструкции муфт играют стоимость изделий и время их монтажа на трубопроводе. В то же время основным критерием определения целесообразности использования метода армирования поврежденных труб является установление уровня эффективности упрочнения дефектного участка, которое в рамках исследования проводилось расчетным путем и экспериментально на стендах. Для определения разрушающего давления поврежденных труб, армированных стеклопластиком, были проведены испытания образцов, представляющих собой катушки, вырезанные из труб с приваренными по торцам сферическими заглушками и штуцерами для подключения к нагнетательной и измерительным линиям.

В статье представлен алгоритм расчета внутреннего давления, вызывающего разрыв газопровода, поврежденного коррозией, приведена зависимость коэффициента формы дефекта от его размеров. По результатам исследований составлена таблица с максимально допустимыми геометрическими размерами дефектов и давления в газопроводе при монтаже муфт.

Результаты тензометрии при проведении полигонных испытаний показали, что недостатком стальных муфт является наличие на их концах значительных концентраторов напряжений. Кроме того, при установке этих муфт применяются сварочные работы, что также является недостатком данного способа восстановления работоспособности участка трубопровода. Однако недостатков можно избежать, если при проведении ремонтно-восстановительных работ использовать композиционные материалы.

**Ключевые слова:** коррозия, муфта, выборочный ремонт, газопровод, формула Барлоу, концентратор напряжений.

Мировой опыт эксплуатации трубопроводов показывает, что одним из наиболее эффективных методов упрочнения ослабленных (дефектных) участков является установка муфт. При этом используется большое разнообразие конструкций муфт, как сварных, так и стяжных. Большую роль в выборе типа и конструкции муфты играют стоимость этих изделий и время монтажа на трубопроводе, которое

может оказаться определяющим фактором, поскольку проведение выборочного ремонта по данным обследований, являясь согласно действующим правилам капитальным ремонтом, фактически осуществляется в рамках плановых остановок и происходит под давлением газа с учетом его снижения в соответствии с расчетом в зависимости от параметров дефектов. Перспективным направлением для

ремонта трубопроводов является создание упрочняющих оболочек из композиционных материалов, которые значительно дешевле высокопрочных сталей, а по прочностным свойствам могут даже превосходить их.

В России исследования и разработка способа упрочнения ослабленных участков трубопроводов с использованием различных материалов проводились во Все-

союзном научно-исследовательском институте природных газов (ныне ООО «Газпром ВНИИГАЗ») и Всероссийском научно-исследовательском институте по сбору, подготовке и транспортировке нефти и нефтепродуктов (ныне ГУП «Институт проблем транспорта энергоресурсов» Республики Башкортостан) с начала 1980-х гг. Экспериментально на трубах с однотипными искусственными дефектами изучались прочностные свойства различных типов материалов, включая стеклохолсты, стеклоткани, металлические сетки, ровинг, пропитанные клеевыми составами.

Стендовые испытания труб с дефектами, бандажированными стекло-материалами [1], показали что применение бандажей позволяет восстановить несущую способность ослабленных участков на 20–25 %. При этом были использованы клеевые полиэфирные композиции типа «Спрут-МП» и «Адгезив-С», отличающиеся, по данным разработчиков, высокой эластичностью, повышенной адгезионной способностью, достигаемой за счет введения дополнительных поверхностно-активных веществ, и влагостойкостью.

Кроме того, для предотвращения коррозионных процессов на ремонтируемых участках поверхность газопровода после механической очистки, удаления рыхлых продуктов коррозии и обезжиривания обрабатывалась преобразователем ржавчины.

Следует также отметить, что нанесение бандажей вручную малоэффективно, поскольку невозможно добиться натяжения прочных пластиковых витков муфт с обеспечением максимального выдавливания клеевой композиции между слоями и минимального зазора между слоями. Было создано устройство, позволяющее уменьшить влияние этих факторов (рис. 1).

Время отверждения клеевых композиций при 20 °С колеблется



Рис. 1. Нанесение ремонтного материала с помощью намоточного устройства

(в зависимости от добавок) в пределах от 1,5 до 40 ч. Общее время на установку бандаж на трубопровод диаметром 1420 мм и отверждение клея составляет 1–2 сут.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРОЧНЕНИЯ ДЕФЕКТНЫХ УЧАСТКОВ ТРУБ, АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОМ

При определении целесообразности использования метода армирования поврежденных труб основным критерием является установление уровня эффективности упрочнения дефектного участка.

В рамках исследований уровень эффективности определялся расчетным путем и экспериментально на стендах.

В основу выбора расчетной формулы определения прочностных характеристик при совместной работе трубы и нанесенного бандаж положено сопоставление теоретических и экспериментальных данных по разрушающему давлению на поврежденных трубах.

Расчетное внутреннее давление  $P_p$  вызывающее разрыв газопровода,

поврежденного коррозией, определяется формулой Барлоу на основе расчетной величины напряжения разрыва:

$$P_p = 2\sigma_p \frac{h}{D}, \quad (1)$$

где  $D$  – наружный диаметр, мм;  $h$  – толщина стенки трубы, мм.

Напряжение разрыва определяется из выражения

$$\sigma_p = \sigma_{пл} F_0 - \frac{\Delta F}{F_0} - A_m^{-1} \Delta F, \quad (2)$$

где  $\sigma_{пл}$  – напряжения, вызывающие пластическую деформацию, В;  $F_0$  – первоначальная площадь продольного сечения стенки трубы, мм<sup>2</sup>;  $\Delta F$  – площадь, на которую в результате коррозии уменьшается площадь продольного сечения стенки трубы, мм<sup>2</sup>;  $A_m$  – коэффициент Фолиаса, приближенная формула расчета которого выглядит следующим образом:

$$A_m = \sqrt{1 + 0,4 \cdot \frac{l_k^2}{R} \cdot h}, \quad (3)$$

где  $l_k$  – длина участка трубы, поврежденного коррозией, мм;  $R$  – радиус трубы, мм.

Величина  $\Delta F$  может быть принята равной:

$$\Delta F = \frac{2}{3} l_k \cdot h_k. \quad (4)$$

Учитывая, что предел текучести плоского образца составляет в среднем 93 % от предела текучести трубы  $\sigma_{0,2}$ , и с учетом формул 2–4 выражение 1 примет вид:

$$P_p = 1,1 \cdot \sigma_m \cdot B \cdot \frac{h}{R}, \quad (5)$$

где

$$B = 1 - \frac{\left(\frac{2h_k}{3n}\right)}{1} - \left(\frac{2h_k}{3A_{mh}}\right) \text{ при } B \geq 4. \quad (6)$$

С учетом кольцевых и нормальных напряжений, возникающих в трубе после нанесения стеклопластика [2], и принимая во внимание, что каждый слой бандаж можно рассматривать как тонкостенную цилиндрическую трубу, получим

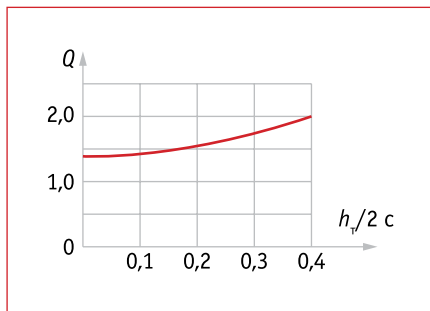


Рис. 2. Зависимость коэффициента  $Q$ , учитывающего форму дефекта, от размеров дефекта

окончательное выражение для определения величины разрушающего давления:

$$P_p = 1,1 \cdot \sigma_m \cdot B \cdot \frac{h}{R} + \left( \sigma_{\text{нат}} \cdot \frac{\delta}{R} \right) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{1} + (n-1) \frac{\delta}{R}, \quad (7)$$

где  $\sigma_{\text{нат}}$  – напряжения, возникающие в трубе после натяжения бандажа;  $B$ ;  $\delta$  – толщина слоя бандажа, мм;  $n$  – число слоев бандажа.

В основу другой методики расчета положен коэффициент интенсивности напряжений.

Критическая величина коэффициента, при которой начинается самопроизвольное разрушение, выражается формулой [3, 4], описывающей напряженное состояние трубы с несквозной трещиной глубиной  $h_m$ , мм:

$$K_{\text{кр}} = \sigma_c \cdot 1,1 \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{\frac{h_m}{Q}} \cdot C_c, \quad (8)$$

где  $\sigma_c$  – кольцевые напряжения в момент начала разрушения;  $B$ ;  $Q$  – коэффициент, учитывающий форму дефекта:

$$Q = \sqrt{E_k^2 - 0,212 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^2}, \quad (9)$$

где  $E_k$  – эллиптический интеграл I рода, модуль которого определяется из выражения:

$$K = \sqrt{1 - 4 \left( \frac{h_m}{2c} \right)^2}, \quad (10)$$

в котором  $c$  – полудлина трещины, мм.

Зависимость коэффициента  $Q$  от размеров дефекта представлена на рис. 2.

Коэффициент  $C_c$  вносит поправку на толщину стенки в формулу для определения коэффициента интенсивности напряжений для поверхностной трещины:

$$C_c = 1 + \left( \frac{h_m}{h} \right) \cdot (A_m - 1), \quad (11)$$

где коэффициент Фолиаса – поправка на напряжение в вершине продольной трещины в цилиндре – рассчитывается как:

$$A_m = \sqrt{1 + \left( \frac{5\pi}{32} \right) \cdot \lambda^2}, \quad (12)$$

где  $\lambda^2$  – параметр цилиндрической оболочки с трещиной, мм:

$$\lambda^2 = \left( \frac{c^2}{R} \cdot h \right) \sqrt{12(1 - \nu^2)}, \quad (13)$$

где  $R$  – наружный радиус трубы, мм;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Таким образом, разрушающее давление можно рассчитать как:

$$P_p = \left( \frac{2h}{D} \right) \cdot \left( \frac{K_{\text{кр}}}{1,1\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\left( \frac{h_m}{Q} \right) C_c} \right). \quad (14)$$

Для определения разрушающего давления поврежденных труб, армированных стеклопластиком, были проведены испытания образцов, представляющих собой катушки, вырезанные из труб, с приваренными по торцам сферическими заглушками и штуцерами для подключения к нагнетательной и измерительным линиям. В центре каждого образца были нанесены поверхностные трещиноподобные несквозные дефекты различной

глубины. Бандажирование образцов осуществлялось вручную путем обмотки вращающегося образца сеткой с нахлестом 30 % по грунтовочному слою клея с последующей промазкой композицией поверх сетки с помощью шпателя.

Сопоставление расчетных и фактических значений разрушающего давления показало, что наибольшая сходимости расчетных данных с экспериментом получается при использовании выражения (7), которым и следует пользоваться при определении разрушающего давления бандажированных труб.

### ПРИМЕНЕНИЕ СТАЛЬНОЙ МУФТЫ ДЛЯ РЕМОНТА УЧАСТКОВ ГАЗОПРОВОДА С ДЕФЕКТАМИ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ТРУБ

Опыт использования стеклопластиковых бандажей показал, что с течением времени их прочностные свойства теряются. При эксплуатации в течение 5–6 лет происходят существенное увлажнение и практическая потеря прочностных возможностей упрочняющей конструкции.

В качестве решения этой проблемы может быть рассмотрена стальная муфта с заполнением межтрубного пространства композитным составом, предназначенная для ремонта участков газопровода с дефектами основного металла труб и успешно применяемая в течение ряда лет на объектах нефтяной промышленности (рис. 3).

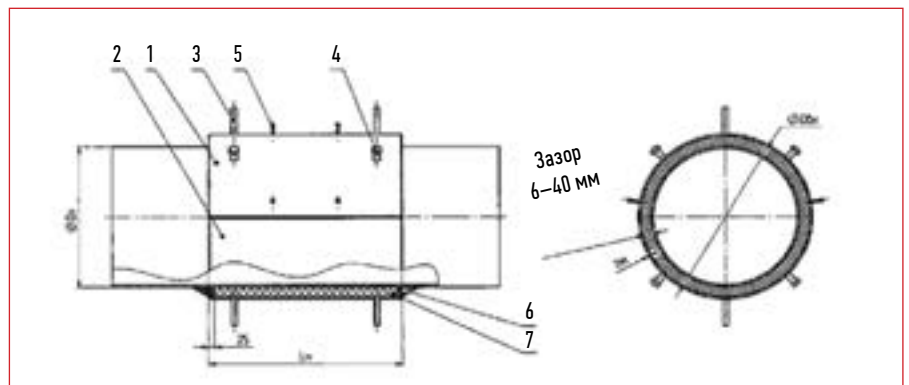


Рис. 3. Композитная муфта:

1 – обечайка (полу муфта) верхняя; 2 – обечайка (полу муфта) нижняя; 3 – входной патрубок; 4 – установочные болты; 5 – контрольные болты; 6 – композитный состав; 7 – герметик

Максимально допустимые геометрические размеры дефектов и давления в газопроводе при монтаже муфт

Тип дефекта	Параметры дефекта	Давление при монтаже муфты, Па
Поверхностные коррозионные и механические дефекты потери металла	Глубина 30–70 % толщины стенки	0
	Глубина до 30 % толщины стенки	Расчетное, но не более $0,7 P_{\text{раб}}$
Трещина основного металла	Глубина до 60 % толщины стенки, или длиной до $5\sqrt{D\delta}$ , мм	0
Несквозной поверхностный дефект кольцевого сварного шва	Глубина до 60 % толщины стенки или длина до 25 % периметра газопроводной трубы	0
Смещение кромок кольцевого сварного шва	Глубина 40–100 % толщины стенки	0
	Глубина – до 40 % толщины стенки	Не более $0,7 P_{\text{раб}}$
Стресс-коррозионный дефект основного металла	Глубина до 40 % толщины стенки или длина до $4\sqrt{D\delta}$ , мм	0

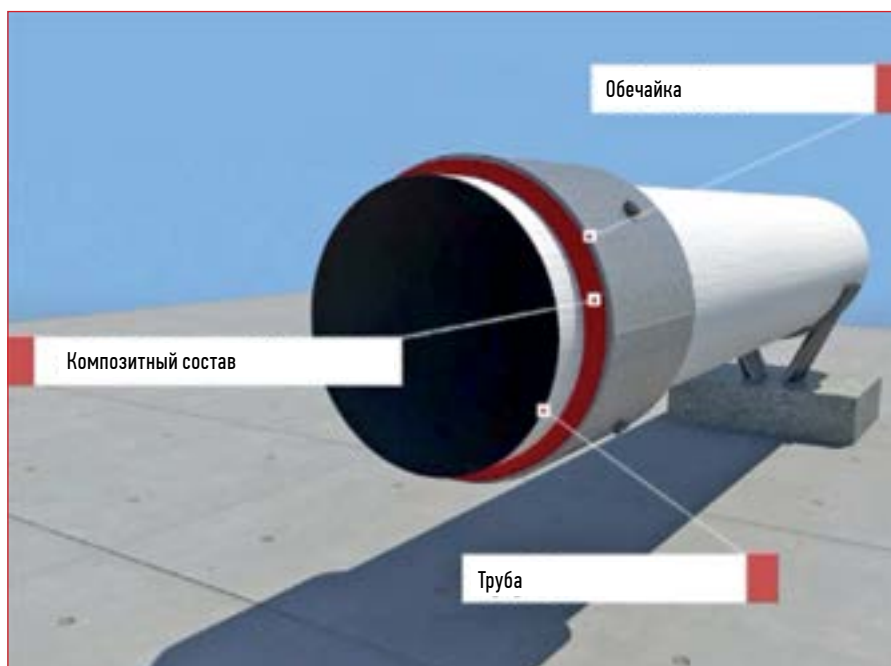


Рис. 4. Стальная муфта с заполненным композитным составом межтрубным пространством

Муфта представляет собой две полубечайки, внутренний диаметр которых превышает наружный диаметр ремонтируемого участка трубопровода. Эти части в процессе установки на участок трубопровода свариваются. Полученная цилиндрическая часть трубы центруется относительно поверхности ремонтируемого трубопровода, затем производится герметизация полости между участком трубопровода и корпусом муфты со стороны его торцов. В образовавшееся закрытое пространство закачивается компаунд, для полимеризации которого проводится выдержка в течение 24 ч (рис. 4).

Муфта может применяться для ремонта прямолинейных участков газопроводов I–IV категории с дефектами, снижающими несущую способность газопровода на величину не более чем 40 % от проектного уровня. Максимально допустимые геометрические размеры дефектов и давления в газопроводе при монтаже муфт приведены в таблице.

Результаты испытаний подтверждают высокую эффективность использования стальных муфт с заполнением межтрубного пространства композитным составом при восстановлении работоспо-

собности поврежденных участков трубопроводов.

Следует отметить, что недостатком данного типа муфт является наличие на концах муфт значительных концентраторов напряжений по результатам тензометрии при проведении полигонных испытаний. Кроме того, при установке этих муфт применяются сварочные работы, что также является определенным недостатком данного способа восстановления работоспособности участка трубопровода.

Впрочем, указанных недостатков можно избежать, если при проведении ремонтно-восстановительных работ использовать композиционные материалы.

#### ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛАСТИЧНОЙ МУФТЫ ДЛЯ РЕМОНТА УЧАСТКОВ ГАЗОПРОВОДА С ДЕФЕКТАМИ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ТРУБ

Рассмотрим устройство для восстановления работоспособности участка трубопровода в виде эластичной муфты. Устройство выполняется из композиционного материала, состоящего из полиэтилена высокого давления и ткани из углеродного и арамидного волокна. Монтаж эластичной муфты производится после нанесения на тканево-полиэтиленовую часть эпоксидной композиции в жидкой форме (рис. 5).

При монтаже к концевым торцам муфты прикладываются силы натяжения, создающие нормальное

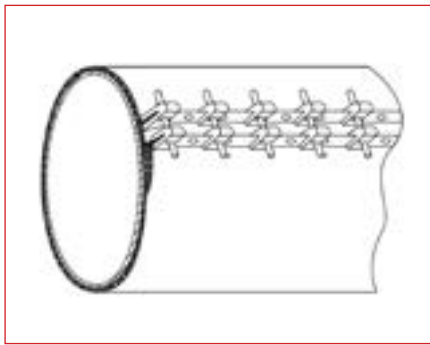


Рис. 5. Установка эластичной муфты

давление по всей внешней поверхности участка трубопровода. Интенсивность внешнего давления должна равняться по величине внутреннему давлению в трубопроводе или его части. Равнодействующая сил, обеспечивающих равномерное обжатие участка трубопровода со стороны муфты, рассчитывается как:

$$N = \int_0^{\pi} 2\Delta p L ds \sin \alpha = 2\Delta p L R \int_0^{\pi} \sin \alpha d\alpha = 2\Delta p L R. \quad (15)$$

Как видно из рис. 6, для обеспечения приложения этой силы к свободным продольным торцам муфты

необходимо приложить растягивающие усилия  $T$ , равные:

$$T = \frac{1}{2} N = \Delta p L R, \quad (16)$$

где  $L$  – ширина элемента муфты, измеряемая вдоль образующей трубопровода, мм;  $R$  – внешний радиус трубопровода, мм.

Время монтажа и набора прочности конструкции составляет 1,5–2,0 сут. Эксплуатационные возможности эластичной муфты характеризует величина противодействия  $\Delta p$ , которое может быть реализовано при приложении растягивающих усилий  $T$  к свободным продольным торцам муфты. Величина растягивающих усилий  $T$  определяется физико-механическими свойствами углеродной ткани, а также числом слоев этой ткани, образующих муфту.

Усиление конструкций углеволокном является одним из оптимальных современных средств восстановления и повышения эксплуатационных характеристик конструкций. Материалы из углеволокна обладают высокой

прочностью на растяжение (до 4800 МПа), коррозионной стойкостью. При проведении ремонтно-восстановительных работ не требуются сложное оборудование и оснастка. Высокие адгезионные свойства эпоксидного компаунда обеспечивают надежное соединение углеродного волокна с поверхностью, на которую оно нанесено. После полимеризации компаунда материал участка трубопровода и слой углеродных волокон работают совместно, образуя многослойную конструкцию.

Применение муфты в значительной степени позволяет сократить затраты на ремонтно-восстановительные работы и в целом снизить эксплуатационные расходы.

## ВЫВОДЫ

1. Технология упрочнения дефектных участков газопроводов с использованием композитных материалов под давлением газа позволяет избежать стравливания большого объема газа в атмосферу и обеспечить работоспособность в течение длительного периода.

2. Методика определения влияния характеристик бандажа на уровень предельного давления в поврежденном трубопроводе с достаточным уровнем приближения позволяет рассчитать допустимый уровень нагрузок или определить размеры дефектов, при которых можно использовать бандаж с определенными характеристиками.

3. Применение металлических муфт в значительной степени позволяет повысить временной диапазон эксплуатации ремонтной муфты и расширить рамки параметров дефектов, которые могут быть подвергнуты упрочнению.

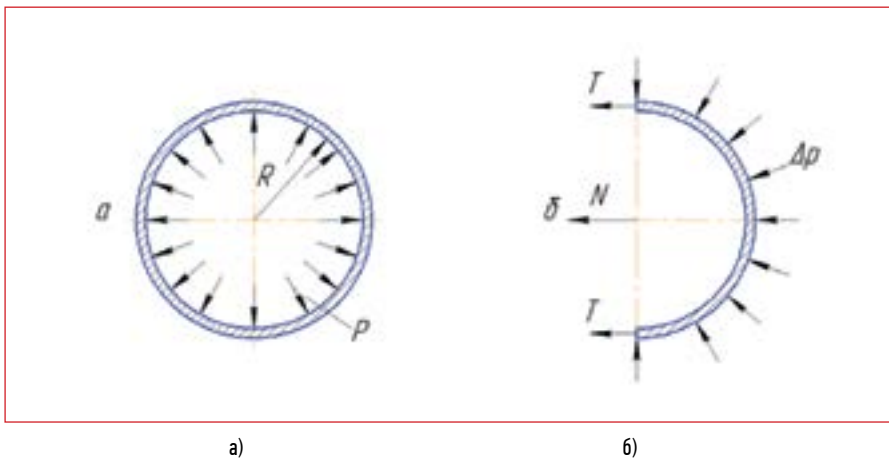


Рис. 6. Схема образования противодействия:

а) сечение трубопровода, нагруженного внутренним давлением  $p$ ; б) схема приложения сил, действующих со стороны композитной муфты на поверхность трубы

## Литература:

1. Ермаков А.А. Анализ полиномиальной статистической модели напряженного состояния в зоне поверхностных дефектов труб. М.: ВНИИГАЗ, 1981. С. 10–18.
2. Нетребский М.А., Сагидаев Г.В., Раевский Г.В. Оптимальные предварительные напряжения в многослойных трубах // Прикладная механика. 1971. Т. 7. Вып. 9. С. 62–78.
3. Махутов Н.А. Соппротивление элементов конструкции хрупкому разрушению. М.: Машиностроение, 1973. 201 с.
4. Новые методы оценки сопротивляемости металла хрупкому разрушению / Под ред. Ю.Н. Работнова. М.: Мир, 1972. 439 с.