

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТРУБОПРОВОДА ПРИ РЕМОНТЕ МЕТОДОМ БАНДАЖИРОВАНИЯ

Описано (предложено) устройство для ремонта дефектных участков трубопроводов путем создания обжимающих напряжений в стенке оболочки. Приведены результаты теоретических разработок напряженно-деформированного состояния участков трубопроводов, отремонтированных методом бандажирования.

Применение современных средств диагностики повреждений внутритрубных ультразвуковых и магнитных дефектоскопов, методов акустической эмиссии и др. позволяет выявлять очаги потенциальных аварий и обуславливает проведение своевременного профилактического ремонта во многих случаях даже без остановки транспорта продукта по трубопроводу (ТП).

Наиболее перспективным направлением ремонта ТП является метод бандажирования усиливающими муфтами, создающими разгружающие напряжения сжатия в стенке ремонтируемой конструкции, что предотвращает развитие дефекта или сильно его замедляет. Данный эффект достигается при помощи установки муфты с натягом на ремонтируемый участок ТП. Основная сложность при этом состоит в установке муфты на ТП без зазора и в создании регулируемых сжимающих напряжений по всей окружности ТП.

На рисунке 1 изображены схема и общий вид предлагаемого обжимающего устройства. Устройство содержит корпус из двух одинаковых полуцилиндрических муфт 1, соединенных шпильками 2; в полость корпуса установлена упругая камера 3 со штуцером 4. На оболочку ТП 5 предварительно устанавливают продольные половины усиливающего бандажа 6, затем на них устанавливают части корпуса устройства 1 с упругой камерой 3. Части корпуса устройства центрируют и стягивают шпильками 2, затем в упругую камеру через штуцер 4 подают жидкость под регулируемым давлением от ручного насоса 7. Обжимающую нагрузку на части бандажа фиксируют по показаниям манометра 8. При достижении необходимого давления в упругой камере половины бандажа сваривают продольными швами по всей длине устройства. В случае, когда длина дефектного участка достаточно большая, ремонт проводят пошаговым методом, снимают давление в упругой камере 3, ослабляют шпильки и устройство сдвигают вдоль половин бандажа на следующий участок, где описанную операцию повторяют.

Ремонт трубопроводов проводят как с прекращением, так и без прекращения подачи транспортируемого продукта. В последнем случае давление в упругой камере обжимающего устройства должно быть выше.

При построении численной модели ремонта ТП муфтой принимали оболочки тонкостенными ($R/t_1 > 30$). Распространение «краевого эффекта» от края муфты учитывали на длине $L' = 1,5\sqrt{R_n \cdot t_1}$. Напряжения в оболочке от внешнего обжимающего давления определяли на основе уравнений Лапласа. Условные обозначения, используемые в расчетах, приведены в таблице 1.

Если поставить короткую муфту на ТП, то обжатие стенок его происходит на участке непосредственно под муфтой и на длине воздействия «краевых эффектов» (рисунок 2).

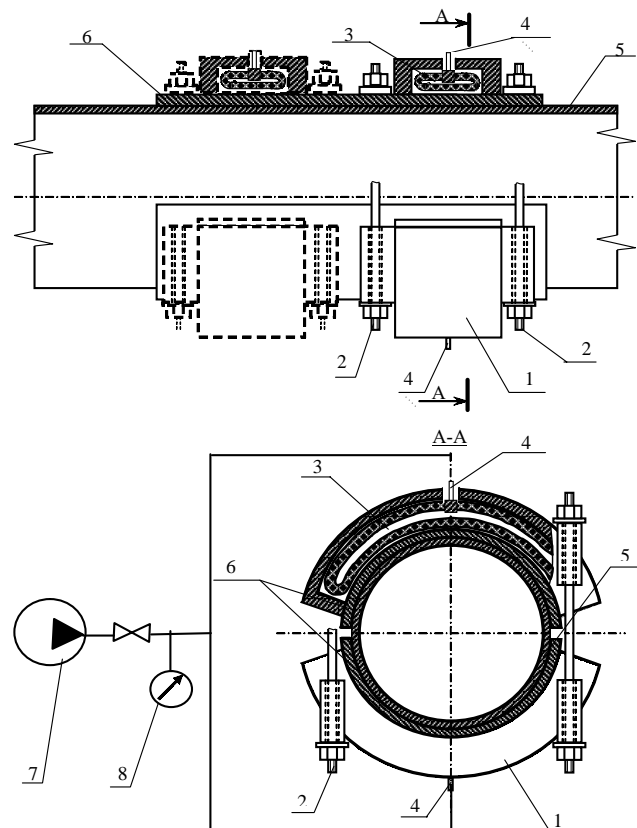


Рисунок 1. Устройство для ремонта цилиндрических оболочек напряженными муфтами.

Таблица 1. Условные обозначения

t_1	Толщина ремонтируемой оболочки
t_2	Толщина бандажа
R	Средний радиус оболочки
R_n	Наружный радиус оболочки
R_n	Внутренний радиус оболочки
E_1	Модуль упругости материала оболочки
E_2	Модуль упругости материала бандажа
$P_{\text{раб}}$	Внутреннее рабочее давление в оболочке
$P_{\text{ост}}$	Внутреннее остаточное давление в оболочке
P	Внешнее давление
$P_{\text{об}}$	Обжимающее давление
μ_1	Коэффициент Пуассона материала оболочки
μ_2	Коэффициент Пуассона материала бандажа
σ_{00}	Предварительное напряжение в оболочке
σ_{06}	Предварительное напряжение в бандаже
σ_{10}	Кольцевые напряжения в оболочке
σ_{16}	Кольцевые напряжения в бандаже
σ_z	Осевые напряжения в оболочке
[σ]	Допускаемые напряжения, устанавливаемые нормативным документом
σ_{T1}	Предел текучести материала оболочки
σ_{T2}	Предел текучести материала бандажа
ϵ_0	Кольцевая деформация оболочки
ϵ_6	Кольцевая деформация бандажа
ϵ_z	Продольная деформация оболочки
L	Длина накладываемого бандажа
L'	Длина распространения зоны «краевого эффекта»
$P_{\text{разр}}$	Разрушающее давление
Δ	Перемещение свариваемого стыка муфты
a	Длина зоны обжатия вдоль оси оболочки
D	Диаметр оболочки
f	Коэффициент трения
$F_{\text{тр}}$	Сила трения

В расчетах рассматриваем кольцо длиной $L + L'$, предполагая, что «краевые эффекты» деформации оболочки на длине $2L'$ складываются и дают полную деформацию «эквивалентной цилиндрической оболочки» кольца длиной L' .

В связи с симметричным нагружением рассматривается только четверть окружности. При обжимающей нагрузке накладываемые полу-муфты скользят по окружности оболочки в сторону свободного края, уменьшая зазор между ними (рисунок 1), происходит перемещение точек бандажа и оболочки в радиальном и окружном направлении.

Рассмотрим условия равновесия элементов оболочки и бандажа. В слоях оболочки и бандажа действуют напряжения, создающие усилия на единицу длины сечения (рисунок 3):

$$N_o = \sigma_{10} \cdot t_1; \quad (1)$$

$$N_6 = \sigma_{16} \cdot t_2. \quad (2)$$

По граням элементов действуют силы N_6 и N_o . В местах соприкосновения элементов возникают силы трения. Составим уравнение проекций сил на ось ξ (рисунок 3):

$$N_6 - (N_6 - dN_6) + dF_{\text{тр},6} = 0; \quad (3)$$

$$dN_6 = dF_{\text{тр},6}.$$

Приращение нагрузки на элемент бандажа равняется приращению силы трения. Приращение силы трения определяется:

$$dF_{\text{тр},6} = f \cdot P \cdot l \cdot d\xi;$$

$$dN_6 = f \cdot P \cdot l \cdot d\xi. \quad (4)$$

Разделяя переменные и интегрируя по j окружности скольжения, найдем:

$$\int_{N_{60}}^{N_{6\pi/2}} dN_6 = \int_0^{\frac{\pi R}{2}} f \cdot P \cdot d\xi; \quad (5)$$

$$N_{6\pi/2} - N_{60} = f \cdot P \cdot \frac{\pi}{2} \cdot R,$$

так как $N_{60} = 0$, максимальная сила действующая на грань элемента бандажа будет:

$$N_{6\pi/2} = f \cdot P \cdot \frac{\pi}{2} \cdot R_n. \quad (6)$$

Для произвольной точки:

$$N_{6\xi} = f \cdot P \cdot \xi. \quad (7)$$

Тогда кольцевые напряжения в бандаже определяются:

$$\sigma_{к,6} = \frac{f \cdot P \cdot \xi}{t_2}. \quad (8)$$

Так как обжимающее давление $P_{об}$ распределяется по всей ширине бандажа (рисунок 2), то:

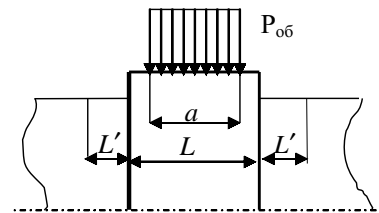


Рисунок 2

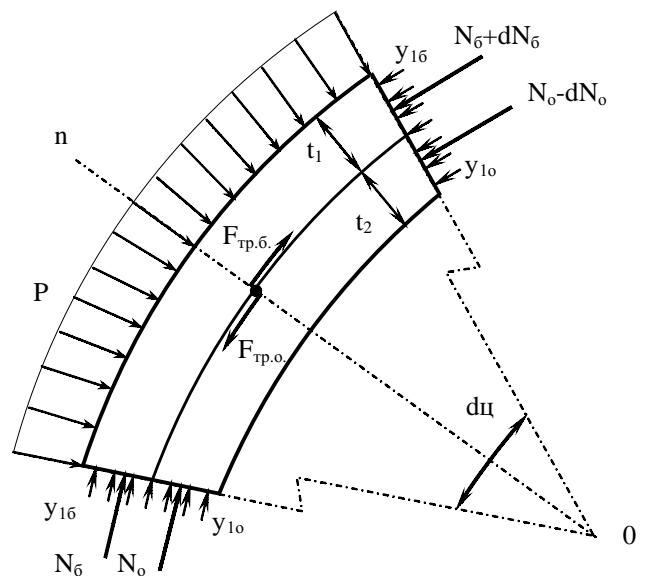


Рисунок 3

$$\sigma_{к.б} = \frac{f \cdot a \cdot P_{об} \cdot \xi}{L \cdot t_2}. \quad (9)$$

Аналогично из условия равновесия элемента оболочки, составляя уравнение проекций на ось Z, имеем:

$$N_o - (N_o + dN_o) - dF_{TP,O} = 0; \quad (10)$$

$$dN_o = -dF_{TP,O}. \quad (11)$$

Рассмотрим условие совместного равновесия элементов оболочки и банджа, составив проекцию сил на направление нормали n (рисунок 3):

$$\begin{aligned} & N_б \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} + (N_б + dN_б) \sin \frac{d\varphi}{2} + \\ & + N_o \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} + (N_o + dN_o) \sin \frac{d\varphi}{2} - P \cdot 1 \cdot d\xi = 0; \\ & 2N_б \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} + 2N_o \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} + \\ & + dN_б \sin \frac{d\varphi}{2} + dN_o \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} - P \cdot d\xi = 0. \quad (12) \end{aligned}$$

Учитывая выражения (3), (11) и (12), имеем:

$$2N_б \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} + 2N_o \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} - P \cdot d\xi = 0. \quad (13)$$

Так как: $\sin \frac{d\varphi}{2} \approx \frac{d\varphi}{2}$ и $\frac{d\varphi}{2} = \frac{d\xi}{2R_H}$,

то из условия (11) находим:

$$\frac{N_б}{R_H} + \frac{N_o}{R_H} = P, \quad (14) \text{ или } N_o = P \cdot R_H - N_б. \quad (15)$$

Учитывая соотношение (1) и (7), получаем из (15) формулу для вычисления напряжений в оболочке при обжатии:

$$\sigma_{oz} = \frac{P \cdot R_H}{t_1} - \frac{f \cdot P \cdot \xi}{t_1}. \quad (16)$$

Т. к. оболочку заменили кольцом с длиной $L + L'$, предполагая, что «краевые эффекты» деформации оболочки на длине $2L'$ складываются и дают полную деформацию «эквивалентной цилиндрической оболочки» для кольца L' , то напряжения в оболочке:

$$\sigma_{oz} = \frac{P_{об} \cdot R_H}{t_1} \cdot \frac{a}{L + L'} - \frac{f \cdot a \cdot P_{об} \cdot \xi}{t_1(L + L')}, \quad (17)$$

где отношение $\frac{a}{L + L'}$ (определяется длинами обжимающего устройства, накладываемого банджа и зоной распространения «краевого эффекта») показывает уровень снижения обжимающего давления, действующего на оболочку по отношению к давлению в упругой камере $P_{об}$.

Перемещение Δ свариваемого стыка муфты по четверти окружности оболочки или уменьшение на 2Δ зазоров между соединяемы-

ми частями банджа (рисунок 1) с учетом сил трения составит:

$$\Delta = \Delta_{O,TP} - \Delta_{б,TP}, \quad (18)$$

где $\Delta_{O,TP}$ – уменьшение длины четверти окружности оболочки с учетом сил трения между оболочкой и муфтой;

$\Delta_{б,TP}$ – уменьшение длины четверти окружности муфты от сил трения.

Применяя формулы для определения деформаций, получаем:

$$\begin{aligned} \Delta_{O,TP} &= \int_0^{\pi R/2} \frac{\sigma_{oz}}{E} dz = \\ &= \int_0^{\pi R/2} \left[\frac{P_{об} \cdot R_H}{E \cdot t_1} \cdot \frac{a}{L + L'} - \frac{f \cdot a \cdot P_{об} \cdot z}{E \cdot t_1(L + L')} \right] d\xi; \quad (19) \end{aligned}$$

$$\Delta_{O,TP} = \frac{P_{об} \cdot \pi \cdot R_H^2}{2E \cdot t_1} \cdot \frac{a}{L + L'} \left[1 - \frac{f \cdot \pi}{4} \right]; \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{б,TP} &= \int_0^{\pi R/2} \frac{\sigma_{сж,с}(\xi)}{E} d\xi = \\ &= \int_0^{\pi R/2} \frac{f \cdot a \cdot P_{об} \cdot \xi}{E \cdot L \cdot t_2} d\xi = \frac{f \cdot a \cdot P_{об} \cdot \pi \cdot R_H^2}{8E \cdot L \cdot t_2}. \quad (21) \end{aligned}$$

Окончательно выражение (18) примет вид:

$$\Delta = \frac{P_{об} \cdot \pi \cdot R_H^2}{2E \cdot t_1} \cdot \frac{a}{L + L'} \left[1 - \frac{f \cdot \pi}{4} \right] - \frac{f \cdot a \cdot P_{об} \cdot \pi^2 \cdot R_H^2}{8E \cdot L \cdot t_2}. \quad (22)$$

При постановке длинного банджа $L \gg a$ (рисунок 5) принимается, что деформации происходят на длине $a + L'$, и выражение (22) запишется:

$$\Delta = \frac{P_{об} \cdot \pi \cdot R_H^2}{2E \cdot t_1} \cdot \frac{a}{a + L'} \left[1 - \frac{f \cdot \pi}{4} \right] - \frac{f \cdot a \cdot P_{об} \cdot \pi^2 \cdot R_H^2}{8E \cdot (a + L') \cdot t_2}. \quad (23)$$

Если $t_1 = t_2$, то выражение преобразуется к виду:

$$\Delta = \frac{P_{об} \cdot \pi \cdot R_H^2}{2E \cdot t_1} \cdot \frac{a}{a + L'} \left[1 - \frac{f \cdot \pi}{2} \right]. \quad (24)$$

После сварки банджа получается натяг $W_{O,TP(z)}$, который определяется из условия радиального перемещения оболочки с учетом возникающих напряжений в стенке, записывается в виде:

$$W_{O,TP(z)} = \frac{P_{об} \cdot R_H^2}{E_2 \cdot t_1} \cdot \frac{a}{L + L'} - \frac{f \cdot a \cdot P_{об} \cdot R_H \cdot z}{E_2 \cdot t_1(L + L')}. \quad (25)$$

Полученный натяг после снятия обжимающей нагрузки распределяется на деформацию банджа $W_{б(z)}$ и оболочки $W_{т(z)}$. Из условия совместности деформаций имеем:

$$W_{T,TP(z)} = |W_{б(z)}| + |W_{т(z)}|. \quad (26)$$

Обозначим $q(z)$ радиальные силы, возникающие между бандажом и оболочкой. Деформация бандажа определяется:

$$W_{\sigma(z)} = \frac{q(z) \cdot R_H^2}{E_2 \cdot t_2 \cdot L} + \frac{f \cdot a \cdot P_{об} \cdot R_H \cdot z}{E \cdot L \cdot t_2}, \quad (27)$$

где второе слагаемое представляет собой перемещение от напряжений сжатия бандажа – результат сил трения при обжатии.

Деформация оболочки:

$$W_{T(z)} = \frac{q(z) \cdot R_H^2}{E \cdot t_1 (L + L')}. \quad (28)$$

Подставив в выражение (26) полученные ранее (25) и (27), (28), получим:

$$\frac{q(z) \cdot R_H^2}{E \cdot t_2 \cdot L} + \frac{q(z) \cdot R_H^2}{E \cdot t_1 (L + L')} = \frac{P_{об} \cdot R_H^2 \cdot a}{E \cdot t_1 (L + L')} - \frac{f \cdot a \cdot P_{об} \cdot R_H \cdot z}{E \cdot t_1 (L + L')} - \frac{f \cdot a \cdot P_{об} \cdot R_H \cdot z}{E \cdot t_2 \cdot L}. \quad (29)$$

Сделав преобразования, имеем для короткого бандажа:

$$q(z) = \frac{P_{об} \cdot L \cdot a \cdot t_2}{(L + L') t_1 + t_2 \cdot L} - \frac{f \cdot a \cdot P_{об} \cdot z}{R_H}. \quad (30)$$

При постановке длинного бандажа $L \gg a$ (рисунок 4) деформации происходят на длине $a + L'$, и выражение (29) запишется:

$$q(z) = \frac{P_{об} \cdot a \cdot t_2}{(t_1 + t_2)} - \frac{f \cdot a \cdot P_{об} \cdot z}{R_H}. \quad (31)$$

Радиальное усилие и возникающие напряжения резко изменяются по длине четверти окружности. После снятия обжимающей нагрузки произошло бы равномерное распределение радиального усилия при отсутствии трения. При наличии трения будет возникать максимальная сила трения, которая определяется:

$$\Delta_{\sigma.тр} = \int_0^{\pi R/2} \frac{\sigma_{сж.г}(z)}{E} dz = \int_0^{\pi R/2} \frac{f \cdot a \cdot P_{об} \cdot z}{E \cdot L \cdot t_2} dz = \frac{f \cdot a \cdot P_{об} \cdot \pi \cdot R_H^2}{8 E \cdot L \cdot t_2};$$

$$F_{тр.макс} = f \cdot \left[\frac{P_{об} \cdot a \cdot t_2 \cdot \pi \cdot R_H}{2(t_1 + t_2)} - \frac{f \cdot a \cdot P_{об} \cdot \pi^2 \cdot R_H}{8} \right]. \quad (32)$$

Учитывая выражение (32) и принимая линейную зависимость распределения сил трения между бандажом и оболочкой после перераспределения радиальной нагрузки q по четверти окружности, получим зависимость распределения радиального усилия:

$$q(z) = \frac{P_{об} \cdot a \cdot t_2}{(t_1 + t_2)} \left[1 + \frac{f}{2} \right] - \frac{f \cdot a \cdot P_{об} \cdot \pi}{4} \left[1 + \frac{f}{2} \right] - \frac{f \cdot P_{об} \cdot a \cdot t_2 \cdot z}{\pi \cdot R_H (t_1 + t_2) / 2} - \frac{f^2 \cdot a \cdot P_{об} \cdot z}{2 R_H}. \quad (33)$$

Максимальное радиальное усилие возникает при $z = 0$ и определяется:

$$q_{max} = \frac{P_{об} \cdot a \cdot t_2}{(t_1 + t_2)} \left[1 + \frac{f}{2} \right] - \frac{f \cdot a \cdot P_{об} \cdot \pi}{4} \left[1 + \frac{f}{2} \right]. \quad (34)$$

В местах сварки бандажа в трубе возникают максимальные сжимающие напряжения, которые разгружают оболочку в процессе эксплуатации и определяются:

$$\sigma_{сж.макс} = \frac{q_{max} \cdot R_H}{(a + L') t_1}. \quad (35)$$

Средние значения сжимающих напряжений в оболочке возникают при $z = \pi R/4$, где радиальное усилие определяется:

$$q_{cp} = \frac{P_{об} \cdot a \cdot t_2}{(t_1 + t_2)} - \frac{f \cdot a \cdot P_{об} \cdot \pi}{4}; \quad (36)$$

$$\sigma_{сж.ср} = \frac{q_{cp} \cdot R_H}{(a + L') t_1}. \quad (37)$$

Эпюра распределения сжимающих напряжений в стенке оболочки в зависимости от сил трения представлена на рисунке 4.

Необходимый уровень результирующих кольцевых напряжений в дефектной стенке

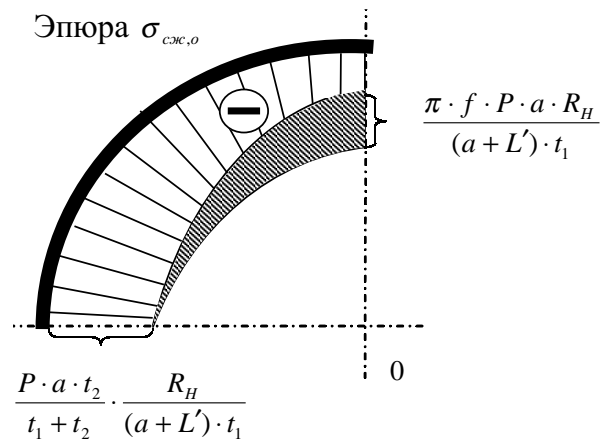


Рисунок 4

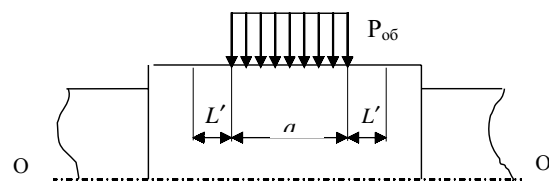


Рисунок 5

оболочки в результате установки муфты определяют исходя из равнопрочности получаемой конструкции:

$$\sigma_{\text{рез}} = \frac{P_{\text{раб}} \cdot R_{\text{в}}}{t_1 + t_2}. \quad (37)$$

Учитывая тепловую деформацию сварных швов $\varepsilon_{\text{св}}$, остаточное давление в ТП, необходимое давление обжатия определяют по формуле:

$$P_{\text{об}} = \frac{(a+L) \cdot t_1}{a \cdot R_{\text{н}}} \left(\frac{R_{\text{в}}}{t_1} (P_{\text{раб}} \cdot t_1 + P_{\text{ост}} \cdot t_2) - \sigma_{\text{рез}} (t_1 + t_2) - \frac{\varepsilon_{\text{св}} \cdot E \cdot t_2}{R_{\text{н}}} \right) \left(t_2 - \frac{f \cdot \pi (t_1 + t_2)}{4} \right). \quad (38)$$

Таким образом, при подаче в упругую камеру обжимающего давления напряжения в стенке трубопровода будут снижены до необходимого уровня, чем и обеспечивается упрочнение дефектного участка ТП.

Выполненный комплекс работ, включающий расчетно-теоретические разработки и экспериментальный анализ напряженно-деформированного состояния отремонтированного участка, показал надежность и эффективность данного способа ремонта трубопроводного транспорта.