



УДК 662.691.4

ДОПУСКАЕМОЕ ДАВЛЕНИЕ ДЛЯ ЗАПОЛНИТЕЛЯ ГЕРМЕТИЧНЫХ МУФТ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ПРИ РЕМОНТЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО**, канд. физ.-мат. наук,
А. С. МИЛЕНИН, канд. техн. наук, **О. И. ОЛЕЙНИК**, **Г. Ф. РОЗЫНКА**, **Н. И. ПИВТОРАК**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены основные варианты усиления ослабленного дефектом утонения стенки трубопровода с помощью постановки герметичной муфты. Показано, что для варианта ремонтной технологии с использованием конструкции муфты с жидким наполнителем промежутка между стенками трубы и муфтой требуются тщательное обоснование, учитывающее свойства наполнителя при его полимеризации, а также соответствующая оценка несущей способности сварных швов.

Ключевые слова: ремонт трубопроводов под давлением, герметичные муфты, щелевые сварные швы, объемные изменения при полимеризации

В последние годы при ремонте обширных коррозионных дефектов стенки магистральных трубопроводов без вывода их из эксплуатации, т. е. под внутренним давлением газа или нефти, в Украине используют герметичные муфты различных конструкций, основная цель которых состоит в частичной разгрузке дефектного участка стенки трубопровода, что в ряде случаев является достаточным для изменения характеристики дефекта из «недопустимого» в «допустимый» [1].

Для линейной части трубопровода, загруженной в основном внутренним давлением, эффективность разгрузки дефектной стенки трубы муфтой зависит от множества конструктивных и технологических факторов, обеспечивающих контактное прилегание муфты к стенке трубы.

На рис. 1 представлены известные механические способы обеспечения прилегания стенок трубы и муфты, из которых видна трудоемкость и сложность выполненного контроля их эффективности. Значительно проще этот вопрос решается, если использовать соответствующий наполнитель зазора между стенками трубы и муфты. Муфты такого типа более привлекательны, поскольку позволяют надежно и просто обеспечить разгрузку дефектной стенки трубы за счет контролируемого давления в жидком наполнителе межстеночного зазора.

Приведенная на рис. 2 схема наглядно демонстрирует принцип работы конструкции, у которой имеются определенные достоинства и особенности. Среди последних следует назвать наличие кольцевых сварных швов *б*, к которым примыкает зазор с наполнителем при давлении в последнем P_n , его максимальное значение регламентируется

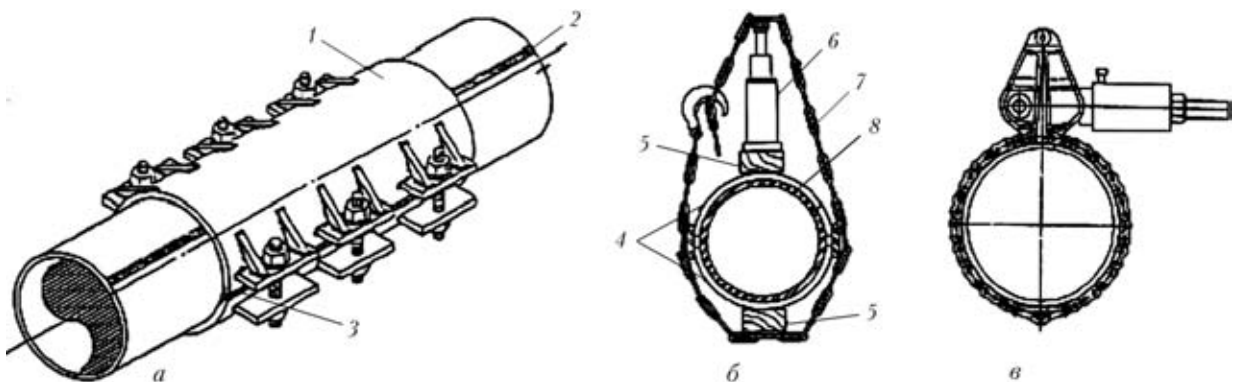


Рис. 1. Схематическое изображение механических способов обеспечения прилегания муфты к стенке трубы [2]: *а* — болтовой; *б* — стандартный; *в* — с защемлением цепи; *1* — ремонтная муфта; *2* — продольный сварной шов; *3* — сварной шов с полным проплавлением и сплавлением с подложкой (наиболее употребимы два симметрично расположенных соединения); *4* — половины муфты с боковыми опорами; *5* — деревянная опорная рама; *6* — гидравлический пресс; *7* — высокопрочная цепь; *8* — ремонтируемый трубопровод

© В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, А. С. Миленин, О. И. Олейник, Г. Ф. Розынка, Н. И. Пивторак, 2011

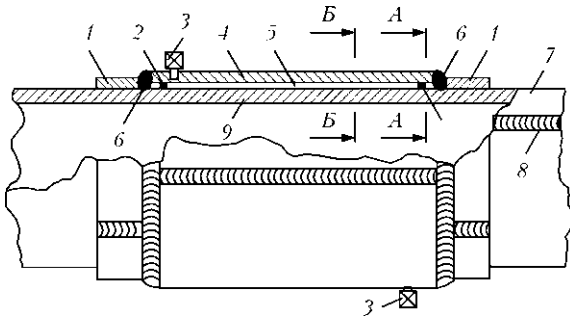


Рис. 2. Схема способа ремонта с помощью герметичной муфты с наполнителем [3]: 1 — технологические кольца; 2 — тонкостенное дополнительное кольцо; 3 — штуцер; 4 — муфта; 5 — наполнитель; 6 — кольцевые сварные швы; 7 — трубопровод; 8 — продольный шов; 9 — дефектный участок

авторами патента [3] вплоть до значения ремонтного давления в трубе $P_{рем}$.

При наличии стального кольца 2 (рис. 2), обеспечивающего необходимый зазор между стенками, в зоне примыкания образуется трещинообразная щель, т. е. кольцевые сварные швы 6 следует относить к так называемым щелевым соединениям, расчет которых выполняется на основе подходов механики разрушения тел с трещинами [4]. Предельное состояние для сварных соединений такого типа обычно формулируется из условия, что примыкающая острая полость-трещина находится в поле напряженного состояния, при котором выполняются условия ее спонтанного роста. Среди таких достаточно апробированных условий заслуживает внимания двухпараметрический критерий вязкохрупкого разрушения [4], связывающий параметр чисто хрупкого разрушения в вершине трещины $K_r = K_I/K_{IC}$ (где K_I — коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины нормального отрыва; K_{IC} — критическое значение этой величины для данного ма-

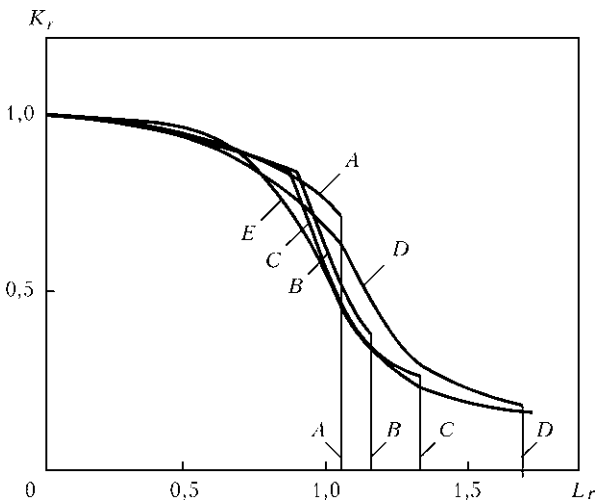


Рис. 3. Диаграммы предельного состояния $K_r = f(L_r)$ для конструкционных сталей разного типа: А — высокопрочная сталь EN408; В — сталь для сосудов давления А533В; С — низкоуглеродистая сталь с марганцем; D — аустенитная; E — расчетная кривая, полученная по зависимости (2)

териала) с параметром чисто вязкого разрушения для данной трещины $L_r = \sigma_{ref}/\sigma_T$ (где σ_{ref} — реферативное напряжение, условно имеющее место в вершине данной трещины при указанном значении нагружения и условии идеальной текучести материала с пределом текучести σ_T). Согласно [4] этот критерий можно представить в виде

$$K_r = f(L_r) \text{ при } L_r < L_r^{max} \approx \frac{\sigma_T + \sigma_B}{2\sigma_T},$$

$$K_r = 0 \text{ при } L_r > L_r^{max}, \quad (1)$$

где $f(L_r)$ — экспериментальная функция для данного материала (рис. 3).

Согласно [4] кривая $f(L_r)$ (рис. 3) для конструкционных сталей при $L_r < L_r^{max}$ достаточно хорошо описывается зависимостью

$$f(L_r) = (1 - 0,14L_r^2)[0,3 + 0,7\exp(-0,65L_r^6)]. \quad (2)$$

Согласно [4] расчетное определение значений K_I и σ_{ref} для сварных соединений щелевого типа (рис. 2) удобно выполнять, предварительно рассчитав изгибающий момент M и перерезывающую силу Q , действующие в зоне сварного соединения на единицу его длины (по окружности), и используя следующие зависимости [4]:

$$K_I = \frac{0,5369}{\sqrt{h}} \left(Q \cos \varphi + \frac{8M}{h} \right), \quad (3)$$

$$\sigma_{ref} = \sqrt{\left(\frac{4M}{h^2} + \frac{Q \cos \varphi}{h} \right)^2 + 3 \left(\frac{Q \sin \varphi}{h} \right)^2}, \quad (4)$$

где h — минимальный размер от вершины острой полости в сварном шве до свободной поверхности (рис. 4); их два — h_1 и h_2 . Очевидно, что более консервативным является размер h_1 :

$$h_1 = \delta_M \cos \varphi; \cos \varphi = (1 + \beta^2)^{-0,5}; \beta = \frac{\delta_M + \Delta - \delta_{Т.К}}{a}. \quad (5)$$

Фактор безопасности $n \geq 1$ определяется по расчетным значениям K_r и L_r точками ηK_r и ηL_r на зависимости (2).

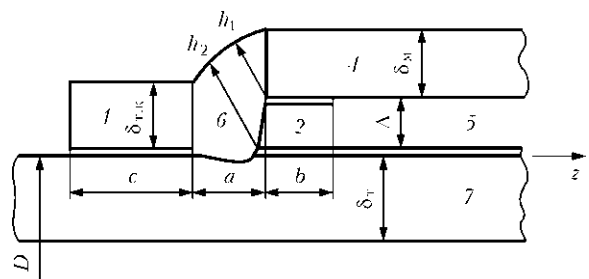


Рис. 4. Схема сечения кольцевого шва 6 с обозначениями элементов рис. 2



Из изложенного следует, что предельное состояние вязкохрупкого разрушения (спонтанный рост трещины — острой полости, примыкающей к кольцевому сварному шву) определяется изгибающим моментом M и перерезывающей силой Q , которые обусловлены внутренним давлением в трубе P_T и наполнителе P_H , а также геометрическими размерами сечения (см. рис. 4), т. е. диаметром трубопровода D , толщинами соответственно трубопровода δ_T , муфты δ_M и технологических колец $\sigma_{Т,К}$, $\delta_{Т,К}$, размерами сварного соединения c, a, b и межстеночным зазором Δ , а также соответствующими характеристиками материала $K_{IC}, \sigma_T, \sigma_B$ сварного соединения в сечениях минимальных размеров h_1 и h_2 .

Для получения соответствующих количественных результатов в ИЭС им. Е. О. Патона с помощью компьютерной системы «Weldpredictions» разработана компьютерная программа для расчета методом конечных элементов напряженного состояния для соответствующих геометрических размеров и нагрузок — P_T и P_H . Момент M и перерезывающая сила Q в вершине острой полости вычисляли по нормальным напряжениям σ_{zz} в сечении $z = z_*$ (рис. 4), соответствующим вершине острой полости для ее роста по направлению h_1 либо h_2 .

Момент M можно представить в виде разности $M = M_1 - M_2$, где

$$M_1 = \int_{-\frac{\delta_M}{2}}^{\frac{\delta_M + \Delta}{2}} \sigma_{zz} \xi d\xi; \quad M_2 = \int_{-\frac{\delta_T}{2}}^{\frac{\delta_T + \Delta}{2}} \sigma_{zz} \xi d\xi, \quad (6)$$

для варианта распространения трещины по направлению h_1 и соответственно

$$M_1 = \int_{-\frac{\delta_M + \Delta}{2}}^{\frac{\delta_M}{2}} \sigma_{zz} \xi d\xi; \quad M_2 = \int_{-\frac{\delta_T}{2}}^{\frac{\delta_T + \Delta}{2}} \sigma_{zz} \xi d\xi \quad (7)$$

для варианта распространения трещины по направлению h_2 .

Соответствующие результаты расчета для трубопровода из стали X70 при $D = 1420$ мм, $\delta_T = 20$ мм и рабочем давлении $P_T = 7,5$ МПа приведены ниже для муфты длиной 1400 мм и толщиной $\delta_M = 14$ мм ($a = 20$ мм при ремонтном давлении $P_{рем}^M = 7,5$ МПа и $a = 14$ мм при $P_{рем}^{PM} = 0,7 P_T^M = 5,25$ МПа).

Размеры технологических колец $\delta_{Т,К}$ и c принимались следующими: $\delta_{Т,К} = \delta_M, c = 140$ мм. Зазор Δ регулировали с помощью дополнительных колец 2 (см. рис. 4), имеющих ширину $b = 30$ мм.

В табл. 1–4 приведены расчетные данные изгибающих моментов M и перерезывающих сил Q для различных вариантов исходных данных и разрушения в направлении h_1 (см. рис. 4). На основе значений M и Q рассчитаны $K_J, \sigma_{греб}$ а также

Таблица 1. Расчетные значения изгибающих моментов M и перерезывающих сил Q при $P_{рем} = P_T, a = 20$ мм, $\sigma_T = 440$ МПа

P_T , МПа	P_H , МПа	n	K_J , МПа·мм ^{1/2}	$\sigma_{греб}$, МПа	M , МПа·мм ²	Q , МПа·мм
$\Delta = 3$ мм, $h_1 = 13,845$ мм						
7,50	2,00	58,35	7,6	1,9	91,6	0
7,50	2,50	8,35	53,4	13,4	640,5	0
7,50	3,00	4,49	99,2	24,8	1189,6	0
7,50	3,50	3,08	145,0	36,3	1738,8	0
7,50	4,00	2,34	190,8	47,7	2288,0	0
7,50	4,50	1,88	236,6	59,2	2837,2	0
7,50	5,00	1,58	282,3	70,7	3386,4	0
7,50	5,50	1,36	328,1	82,1	3935,5	0
7,50	6,00	1,19	373,9	93,6	4484,7	0
7,50	6,50	1,05	422,7	105,0	5033,9	20,9
7,50	7,00	0,94	473,4	116,5	5583,1	54,6
7,50	7,50	0,85	523,4	127,8	6125,6	88,2
0	7,50	0,62	719,0	162,0	7763,2	497,3
$\Delta = 12$ мм, $h_1 = 12$ мм						
7,50	0,50	8,89	50,1	13,5	484,8	0
7,50	1,00	3,72	119,7	32,2	1159,1	0
7,50	1,50	2,78	160,0	43,0	1549,6	0
7,50	2,00	2,22	200,8	54,0	1944,1	0
7,50	2,50	1,84	241,6	64,9	2339,6	0
7,50	3,00	1,58	282,4	75,9	2735,2	0
7,50	3,50	1,38	323,4	86,9	3130,8	0,9
7,50	4,00	1,20	369,8	97,9	3526,4	36,4
7,50	4,50	1,07	416,1	108,9	3922,0	71,8
7,50	5,00	0,96	462,5	119,8	4317,6	107,3
7,50	5,50	0,88	508,8	130,8	4713,2	142,7
7,50	6,00	0,80	555,2	141,8	5108,8	178,1
7,50	6,50	0,74	601,5	152,8	5504,4	213,6
7,50	7,00	0,69	646,8	163,5	5890,6	248,8
7,50	7,50	0,65	690,4	173,8	6260,2	283,6
0	7,50	0,71	632,1	148,3	5342,4	518,9

Примечание. Здесь и в табл. 2–4: $D = 1400$ мм; $\sigma_T = 20$ мм; $\delta_M = 14$ мм; $b = 30$ мм, $c = 140$ мм.



коэффициент безопасности n при $K_{IC} = 1500 \text{ МПа}\cdot\text{мм}^{1/2}$ [4], $\sigma_T = 360$ и 440 МПа . Из этих данных видно, что изменение предела текучести от 440 до 360 МПа (соответственно стали X70 и X60) при $P_{\text{рем}} = P_T = 7,5 \text{ МПа}$ и $P_{\text{рем}} = 0,7P_T$ заметного влияния на допускаемое давление в наполнителе не оказывает [P_H] при коэффициенте безопасности $n \approx 2$.

Существенное влияние оказывает зазор Δ . С его увеличением от 3 до 12 мм [P_H] снижается от $4,3$ до $2,3 \text{ МПа}$ при $P_{\text{рем}} = P_T$ (табл. 1 и 2) и от $3,5$ до $1,7 \text{ МПа}$ (табл. 3 и 4) при $P_{\text{рем}} = 5,25 \text{ МПа}$.

Таблица 2. Расчетные значения изгибающих моментов M и перерезывающих сил Q при $P_{\text{рем}} = P_T$, $a = 20 \text{ мм}$, $\sigma_T = 360 \text{ МПа}$

P_T , МПа	P_H , МПа	n	K_p , МПа·мм ^{1/2}	σ_{ref} , МПа	M , МПа·мм ²	Q , МПа·мм
$\Delta = 3 \text{ мм}, h_1 = 13,845 \text{ мм}$						
7,50	2,00	56,62	7,8	2,0	94,0	0
7,50	2,50	8,28	53,6	13,4	642,9	0
7,50	3,00	4,47	99,4	24,9	1292,0	0
7,50	3,50	3,06	145,2	36,3	1741,2	0
7,50	4,00	2,32	191,0	47,8	1290,4	0
7,50	4,50	1,87	236,7	59,3	2839,6	0
7,50	5,00	1,57	282,7	70,7	3390,2	0
7,50	5,50	1,35	328,6	82,2	3940,8	0
7,50	6,00	1,19	374,5	93,7	4491,4	0
7,50	6,50	1,05	423,4	105,2	5042,1	20,8
7,50	7,00	0,94	472,3	116,2	5570,8	54,0
7,50	7,50	0,85	521,1	127,3	6099,8	87,1
0	7,50	0,64	690,7	155,3	7440,9	487,3
$\Delta = 12 \text{ мм}, h_1 = 12 \text{ мм}$						
7,50	0,50	8,81	50,3	13,5	486,9	0
7,50	1,00	3,69	119,9	32,2	1161,3	0
7,50	1,50	2,76	160,2	43,1	1551,7	0
7,50	2,00	2,20	201,0	54,0	1946,3	0
7,50	2,50	1,83	241,8	65,0	2341,8	0
7,50	2,50	1,57	282,7	76,0	2737,3	0
7,50	3,00	1,37	323,7	87,0	3132,9	1,0
7,50	3,50	1,20	370,0	97,9	3528,5	36,5
7,50	4,00	1,06	416,4	108,9	3924,1	71,9
7,50	4,50	0,96	462,7	119,9	4319,7	107,4
7,50	5,00	0,87	509,2	130,9	4716,7	142,7
7,50	5,50	0,80	555,7	141,9	5113,9	178,1
7,50	6,00	0,74	599,5	152,3	5486,6	212,9
7,50	6,50	0,69	643,5	162,7	5860,5	247,6
7,50	7,00	0,65	685,6	172,6	6217,5	281,3
0	7,50	0,76	585,5	136,3	4911,8	505,4

Повышение давления P_H выше указанного допускаемого [P_H] нежелательно, поскольку при этом заметно снижается значение фактора безопасности n .

Рассматривали также вариант разрушения в направлении h_2 (см. рис. 4). Соответствующие результаты подтверждают высказанное выше предположение о более консервативном варианте разрушения в направлении h_1 .

Таким образом, из полученных результатов расчета (табл. 1–4) следует, что при указанных размерах герметичной муфты [2] и условиях заполнения межстеночного зазора можно рекомендо-

вать создавать давление из условия сохранения целостности кольцевых сварных швов на уровне [P_H] = $4,3...4,5 \text{ МПа}$ при $P_{\text{рем}} = 5,25...7,50 \text{ МПа}$ и $\Delta = 3 \text{ мм}$. Увеличение значения Δ до 12 мм резко снижает допускаемое давление в наполнителе до $1,7...2,3 \text{ МПа}$. Поскольку во многих случаях значение зазора D находится в пределах 3 мм , а создаваемое давление P_H не превышает 4 МПа , то рассмотренная конструкция ремонтной муфты применительно к магистральным трубопроводам $D = 1420 \times 20 \text{ мм}$ из стали типа X60 и X70 вполне может обеспечить высокую разгрузку дефектной зоны в стенке трубопровода, естественно, при условии, что заданное значение давления жидкого наполнителя существенно не изменится после его полимеризации. Однако этот важный вопрос требует специального рассмотрения.

На данном этапе заслуживает внимания получение для конкретных размеров трубопровода и рассматриваемой муфты допускаемого давления P_H , поскольку рекомендации авторов работ [2] относительно верхней границы на уровне $P_{\text{рем}}$ являются недостаточно обоснованными. Рассмотрим, что происходит с давлением в наполнителе при затвердевании последнего. Известно, что переход из жидкого состояния в твердое связан с изменением свободного относительного объема при сохранении массы вещества. При условии несжимаемости жидкой фазы и коэффициенте объемного сжатия наполнителя

$$K_H = (1 - 2\nu_H)/E_H$$

(где E_H — модуль нормальной упругости стали и твердого наполнителя; ν_H — коэффициент Пуассона твердого наполнителя) для твердой фазы получим зависимость относительного изменения объема при переходе из жидкого в твердое состояние единицы массы



Таблица 3. Расчетные значения изгибающих моментов M и перерезывающих сил Q при $P_{рем} = 0,7P_T$, $a = 20$ мм, $\sigma_T = 440$ МПа

P_c МПа	P_n МПа	n	K_D МПа·мм ^{0,5}	$\sigma_{от}$ МПа	M МПа·мм ²	Q МПа·мм
$\Delta = 3$ мм, $h_1 = 13,7$ мм						
5.25	1.50	18.90	23.5	5.9	276.9	0
5.25	1.75	9.35	47.7	12.0	562.0	0
5.25	2.00	6.20	71.8	18.1	847.2	0
5.25	2.25	4.64	96.0	24.2	1132.3	0
5.25	2.50	3.71	120.2	30.3	1417.5	0
5.25	2.75	3.09	144.4	36.3	1702.6	0
5.25	3.00	2.64	168.6	42.4	1987.8	0
5.25	3.25	2.31	192.8	48.5	2272.9	0
5.25	3.50	2.05	216.9	54.6	2558.1	0
5.25	3.75	1.85	241.1	60.7	2843.2	0
5.25	4.00	1.68	265.3	66.8	3128.4	0
5.25	4.25	1.53	290.4	72.9	3413.5	6.6
5.25	4.50	1.41	317.1	78.9	3698.7	23.6
5.25	4.75	1.30	343.7	85.0	3983.8	40.7
5.25	5.00	1.20	370.4	91.1	4269.0	57.8
5.25	5.25	1.12	397.1	97.2	4554.1	74.8
5.50	5.25	1.14	390.7	96.1	4502.2	61.3
5.75	5.25	1.17	382.7	94.6	4431.9	47.2
6.00	5.25	1.19	374.6	93.1	4360.6	33.0
6.25	5.25	1.22	366.5	91.6	4289.3	18.8
6.50	5.25	1.24	358.4	90.0	4217.9	4.6
6.75	5.25	1.27	351.6	88.5	4146.6	0
7.00	5.25	1.29	345.6	87.0	4075.3	0
7.25	5.25	1.31	339.5	85.5	4003.9	0
7.50	5.25	1.34	333.5	83.9	3932.6	0
0	5.25	0.82	541.9	123.4	5778.9	357.1
$\Delta = 12$ мм, $h_1 = 10,63$ мм						
5.25	0.25	7.60	58.5	16.7	471.9	0
5.25	0.50	4.37	101.7	29.1	820.7	0
5.25	0.75	3.52	126.2	36.1	1018.4	0
5.25	1.00	2.95	150.8	43.1	1217.1	0
5.25	1.25	2.53	175.5	50.1	1416.1	0
5.25	1.50	2.22	200.2	57.2	1615.1	0
5.25	1.75	1.98	224.8	64.2	1814.2	0
5.25	2.00	1.78	249.5	71.3	2013.3	0
5.25	2.25	1.62	274.2	78.3	2212.3	0
5.25	2.50	1.48	300.0	85.4	2411.4	6.7
5.25	2.75	1.36	327.5	92.4	2610.4	23.8
5.25	3.00	1.25	354.9	99.5	2809.5	40.9
5.25	3.25	1.16	382.4	106.5	3008.6	58.1
5.25	3.50	1.09	409.9	113.6	3207.6	75.2
5.25	3.75	1.02	437.4	120.6	3406.7	92.3
5.25	4.00	0.96	464.9	127.7	3605.8	109.4
5.25	4.25	0.90	492.4	134.7	3804.8	126.6
5.25	4.50	0.86	519.9	141.7	4003.9	143.7
5.25	4.75	0.81	547.4	148.8	4202.9	160.8
5.25	5.00	0.77	574.9	155.8	4402.0	177.9
5.25	5.25	0.74	602.4	162.9	4601.1	195.0
5.50	5.25	0.74	604.3	163.8	4626.9	187.4
5.75	5.25	0.73	605.6	164.6	4648.3	179.2
6.00	5.25	0.73	606.9	165.3	4669.5	170.9
6.25	5.25	0.73	608.2	166.1	4690.7	162.7
6.50	5.25	0.73	609.4	166.8	4711.9	154.5
6.75	5.25	0.73	610.7	167.6	4733.1	146.2
7.00	5.25	0.73	612.0	168.3	4754.3	138.0
7.25	5.25	0.73	613.2	169.1	4775.5	129.8
7.50	5.25	0.72	614.5	169.8	4796.7	121.5
0	5.25	0.81	553.6	141.3	3991.2	357.7

Таблица 4. Расчетные значения изгибающих моментов M и перерезывающих сил Q при $P_{рем} = 0,7P_T$, $a = 20$ мм, $\sigma_T = 360$ МПа

P_c МПа	P_n МПа	n	K_D МПа·мм ^{0,5}	$\sigma_{от}$ МПа	M МПа·мм ²	Q МПа·мм
$\Delta = 3$ мм, $h_1 = 13,7$ мм						
5.25	1.50	18.90	23.5	5.9	276.9	0.0
5.25	1.75	9.31	47.7	12.0	562.0	0.0
5.25	2.00	6.18	71.8	18.1	847.2	0.0
5.25	2.25	4.62	96.0	24.2	1132.3	0.0
5.25	2.50	3.69	120.2	30.3	1417.5	0.0
5.25	2.75	3.07	144.4	36.3	1702.6	0.0
5.25	3.00	2.63	168.6	42.4	1987.8	0.0
5.25	3.25	2.30	192.8	48.5	2272.9	0.0
5.25	3.50	2.05	216.9	54.6	2558.1	0.0
5.25	3.75	1.84	241.1	60.7	2843.2	0.0
5.25	4.00	1.67	265.3	66.8	3128.4	0.0
5.25	4.25	1.53	290.4	72.9	3413.5	6.6
5.25	4.50	1.40	317.1	78.9	3698.7	23.6
5.25	4.75	1.29	343.7	85.0	3983.8	40.7
5.25	5.00	1.20	370.4	91.1	4269.0	57.8
5.25	5.25	1.12	397.1	97.2	4554.1	74.8
5.50	5.25	1.14	390.7	96.1	4502.2	61.3
5.75	5.25	1.16	382.7	94.6	4431.9	47.2
6.00	5.25	1.19	374.6	93.1	4360.6	33.0
6.25	5.25	1.21	366.5	91.6	4289.3	18.8
6.50	5.25	1.24	358.4	90.1	4218.8	4.5
6.75	5.25	1.26	351.8	88.5	4148.1	0.0
7.00	5.25	1.28	345.7	87.0	4076.8	0.0
7.25	5.25	1.31	339.8	85.5	4006.4	0.0
7.50	5.25	1.33	333.8	84.0	3935.8	0.0
0	5.25	0.83	536.8	122.2	5723.5	354.6
$\Delta = 12$ мм, $h_1 = 10,63$ мм						
5.25	0.25	7.56	58.5	16.7	471.9	0.0
5.25	0.50	4.35	101.7	29.1	820.7	0.0
5.25	0.75	3.50	126.2	36.1	1018.4	0.0
5.25	1.00	2.93	150.8	43.1	1217.1	0.0
5.25	1.25	2.52	175.5	50.1	1416.1	0.0
5.25	1.50	2.21	200.2	57.2	1615.1	0.0
5.25	1.75	1.97	224.8	64.2	1814.2	0.0
5.25	2.00	1.77	249.5	71.3	2013.3	0.0
5.25	2.25	1.61	274.2	78.3	2212.3	0.0
5.25	2.50	1.47	300.0	85.4	2411.4	6.7
5.25	2.75	1.35	327.5	92.4	2610.4	23.8
5.25	3.00	1.25	354.9	99.5	2809.5	40.9
5.25	3.25	1.16	382.4	106.5	3008.6	58.1
5.25	3.50	1.08	409.9	113.6	3207.6	75.2
5.25	3.75	1.01	437.4	120.6	3406.7	92.3
5.25	4.00	0.95	464.9	127.7	3605.8	109.4
5.25	4.25	0.90	492.4	134.7	3804.8	126.6
5.25	4.50	0.85	519.9	141.7	4003.9	143.7
5.25	4.75	0.81	547.4	148.8	4202.9	160.8
5.25	5.00	0.77	574.9	155.8	4402.0	177.9
5.25	5.25	0.74	602.4	162.9	4601.1	195.0
5.50	5.25	0.73	604.3	163.8	4626.9	187.4
5.75	5.25	0.73	605.6	164.6	4648.3	179.2
6.00	5.25	0.73	606.9	165.3	4669.5	170.9
6.25	5.25	0.73	608.2	166.1	4690.7	162.7
6.50	5.25	0.73	609.4	166.8	4711.9	154.5
6.75	5.25	0.72	610.7	167.6	4733.1	146.2
7.00	5.25	0.72	612.1	168.3	4755.1	137.9
7.25	5.25	0.72	613.4	169.1	4777.0	129.6
7.50	5.25	0.72	614.7	169.9	4798.2	121.4
0	5.25	0.83	536.0	136.5	3855.6	353.1

$$\frac{\Delta V}{V} = 3K_n(\sigma_{ТВ} - \sigma_{ж}) + \frac{\gamma_T - \gamma_{ж}}{V}, \quad (8)$$

где $\sigma_{ТВ}$, $\sigma_{ж}$ — давление с обратным знаком в твердой $\sigma_{ТВ}$ и жидкой фазе, т. е. $\sigma_{ж} = -P_n$; γ_T , $\gamma_{ж}$ — объем твердой и жидкой фазы единичной массы.

Значение $(\gamma_T - \gamma_{ж})/V$ является константой данной среды (например, для эпоксидной смолы оно составляет приблизительно $-0,06$ [5 и др.]).

Если затвердевание происходит без нарушения целостности наполнителя и при сохранении связи с трубой и муфтой, то $\Delta V/V = 0$ и



$$\sigma_{\text{ТВ}} = \sigma_{\text{ж}} - \frac{1}{3K_{\text{Н}}} \frac{\gamma_{\text{Т}} - \gamma_{\text{Ж}}}{V}. \quad (9)$$

Поскольку давление сжатия $\sigma_{\text{ж}}$ — величина отрицательная, то при $(\gamma_{\text{Т}} - \gamma_{\text{Ж}})/V < 0$ затвердевание сопровождается снижением сжатия в наполнителе. Чем меньше значение $K_{\text{Н}}$ в твердом наполнителе, тем интенсивнее происходит это снижение.

Например, для полиуретана, широко используемого в Украине, значение $K_{\text{Н}}$ находится на уровне $0,002 \text{ МПа}^{-1}$, т. е. при $(\gamma_{\text{Т}} - \gamma_{\text{Ж}})/V$ оно ниже $-0,03$. Условие сохранения $\sigma_{\text{ТВ}} < 0$ требует, чтобы исходное давление в наполнителе $P_{\text{Н}} = -\sigma_{\text{ж}}$ было выше $\frac{0,03}{3 \cdot 0,002} = 5 \text{ МПа}$, что, как следует из изложенного выше, находится на пределе конструктивных возможностей кольцевых швов сварных соединений рассматриваемых муфт [3].

Более того, следует учитывать, что получение в затвердевшем наполнителе значения $\sigma_{\text{ТВ}}$ на уровне нуля при низком значении коэффициента объемного сжатия $K_{\text{Н}} = (1 - 2\nu_{\text{Н}})/E_{\text{Н}}$ может привести к недостаточной разгрузке дефектной стенки, т. е. повлиять на эффективность работы муфты, что потребует дополнительного увеличения $P_{\text{Н}}$ на 2...3 МПа.

Получается, что конструкция муфты и ее сварные швы должны выдерживать внутрискладочное давление на уровне рабочего давления газа в трубе, что вполне реально, если по той или иной причине дефект стенки трубы под муфтой становится сквозным.

Оценить степень разгрузки дефектного участка трубопровода за счет постановки герметичной муфты с наполнителем можно, используя приближенную зависимость

$$\Delta P = -\sigma_{\text{рес}}^{\text{H}} + \frac{P - P_{\text{рем}}}{\frac{\delta_{\text{Т}}}{\delta_{\text{М}}} + A_{\text{Н}}}, \quad A_{\text{Н}} = K_{\text{Н}} \frac{E_{\text{Н}} \delta_{\text{Н}}}{(D/2)^2}, \quad (10)$$

где ΔP — часть рабочего давления P , снимаемого за счет герметичной муфты с наполнителем в зазоре между стенками трубы и муфты; $\sigma_{\text{рес}}^{\text{H}}$ — ос-

таточное среднее нормальное напряжение в твердом наполнителе; $K_{\text{Н}} = (1 - 2\nu_{\text{Н}})/E_{\text{Н}}$ — коэффициент объемного сжатия в твердом наполнителе; $\delta_{\text{Н}}$ — толщина наполнителя.

В случае чисто механического контакта трубы и муфты в (10) $\delta_{\text{Н}} = 0$, $A_{\text{Н}} = 0$ и соответственно $\sigma_{\text{рес}}^{\text{H}} = 0$. При этом ΔP из (10) $\Delta P = \frac{P - P_{\text{рем}}}{\delta_{\text{М}} + \delta_{\text{Т}}} \delta_{\text{М}}$ за-

висит от $P - P_{\text{рем}}$ и может быть недостаточной для эффективной разгрузки дефектного участка стенки. Здесь более широкие возможности связаны с использованием наполнителя. Однако при этом геометрические размеры муфты и сварных соединений должны гарантировать получение соответствующего значения $\sigma_{\text{рес}}^{\text{H}}$ в затвердевшем наполнителе.

Выводы

1. Конструкции герметичных муфт с наполнителем, рекомендуемые в современной литературе для ремонта дефектов утонения стенок магистральных трубопроводов без вывода их из эксплуатации, в ряде случаев являются недостаточно обоснованными, поскольку сварные соединения не могут выдержать внутреннее давление жидкого наполнителя на уровне рабочего давления газа в трубе.

2. При разработке таких конструкций следует обратить особое внимание на изменение свойств наполнителя при его затвердевании с позиций обеспечения необходимого давления для эффективной разгрузки дефектного участка стенки трубопровода.

1. *Fitness-for-service Recommended Practice 579*. — American Petroleum Institute, 2000. — 625 p.
2. *Updated pipeline repair manual*. — Revision by Edison Welding Institute, 2006. — 82 p.
3. *Пам. 77931 Україна, МПК F 16 L 55/16, B 23 K 31/02*. Спосіб ремонту дефектної ділянки трубопроводу, що знаходиться під тиском / В. С. Буг, Я. С. Марчук, О. П. Подолян та ін. — Опубл. 15.01.2007.
4. *Махненко В. И.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. — Киев: Наук. думка, 2006. — 618 с.
5. *Zarelli V., Skordos A. A., Partridge I. K.* Investigation of cure induced shrinkage in unreinforced epoxy resin // *Plastics, rubber and composites processing and application*. — 2000. — № 31. — P. 377–384.

Main variants of strengthening of the pipeline wall thinning by installing a sealed sleeve are considered. It is shown that the variant of the repair technology involving a sleeve design with a liquid filler of the gap between the pipe walls and sleeve requires that thorough substantiation allowing for properties of the filler during polymerisation, as well as corresponding evaluation of the load-carrying capacity of the welds be provided.

Поступила в редакцию 30.03.2011