

Ремонт магистральных трубопроводов сваркой без вывода их из эксплуатации

В. И. Махненко, В. С. Бут, О. И. Олейник

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

Предложен новый подход к ремонту магистральных трубопроводов сваркой без вывода их из эксплуатации. Подход базируется на четырех положениях: ранжирование дефектов по степени риск-отказа; безопасность выполнения сварочных работ на трубопроводе под давлением; применение различных вариантов ремонта сваркой; оценка работоспособности ремонтных сварных конструкций. Применение данного подхода позволяет минимизировать риск-отказ трубопровода и спрогнозировать его работоспособность после ремонта сваркой.

Ключевые слова: трубопровод, сварка, ремонт, прочность, работоспособность.

Современные магистральные трубопроводы Украины – это дорогие сооружения длительного срока эксплуатации, к безотказной работе которых выдвигаются высокие требования.

Большую роль в обеспечении их надежной эксплуатации играют соответствующая организация периодической технической диагностики состояния элементов магистральных трубопроводов (МТ) и ремонт обнаруженных дефектов. Классический ремонт трубопровода, связанный с его остановкой, очисткой и заменой дефектных участков, требует больших материально-технических затрат и сопровождается значительными негативными экологическими последствиями.

В связи с этим ремонтные работы на линейной части МТ стремятся проводить без вывода их из эксплуатации. В Украине, начиная с 90-х годов прошлого столетия, ряд организаций (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, Ивано-Франковский НТУ нефти и газа и др.) совместно с ДК “Укртрансгаз” усиленно работают в этом направлении.

Создана целая система методических мероприятий, обеспечивающих эффективность и безопасность такого ремонта, особенно с применением сварки. С некоторой условностью в этой системе можно выделить четыре основных положения для линейной части МТ, периодически подвергаемых внутритрубной диагностике:

поскольку согласно статистике в результате внутритрубной диагностики МТ Украины обнаруживается около 5000–6000 дефектов на каждые 100 км длины (между компрессорными станциями), важным является их *ранжирование по степени риск-отказа* и на основе этого разработка оптимального графика ремонта;

наиболее эффективным ремонтом недопустимых дефектов сплошности материала является сварка (наплавка) – рис. 1,а. Однако при этом очень важно гарантировать *безопасность выполнения сварочных работ* путем недопущения прожога стенки трубы и образования холодных трещин в материале;

если с применением сварки (наплавки) недопустимый дефект невозможно устранить, следует выбрать *рациональные конструктивно-технологические варианты* (бандаж, герметичная муфта, патрубко-муфта и др.) его устранения без вывода трубопровода из эксплуатации (рис. 1, б-з);

учитывая индивидуальность ремонта, в конкретных случаях должно быть обоснование *работоспособности* трубопровода после ремонта.

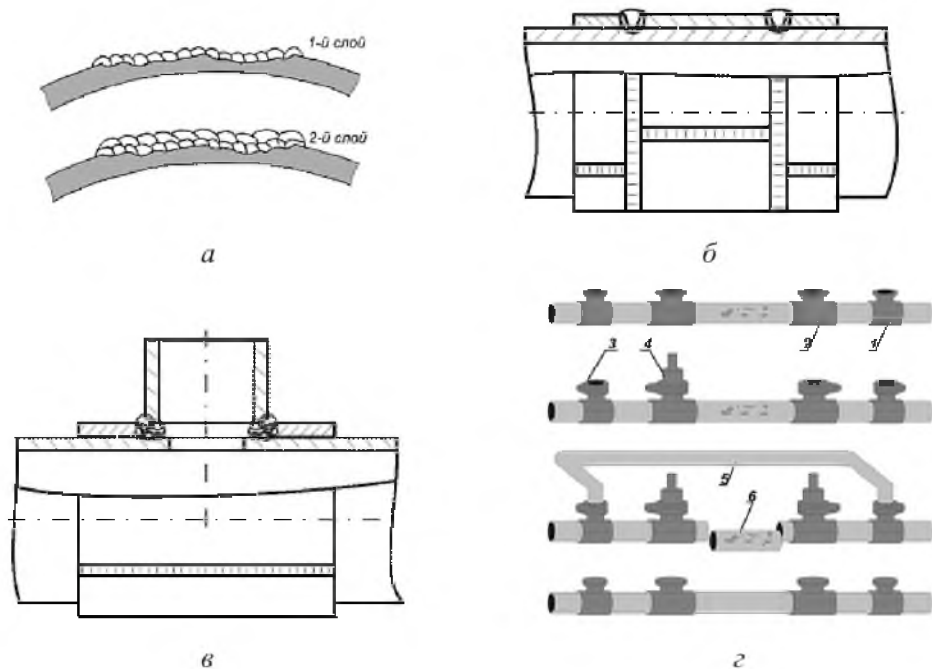


Рис. 1. Конструктивно-технологические варианты устранения дефекта: а – наплавка; б – герметичная муфта; в – патрубко-муфта; г – байпасная линия (TDW): 1 – переходной тройник; 2 – равнопроходной тройник; 3 – запорный кран; 4 – запорное устройство; 5 – байпас; 6 – дефектный участок.

При ранжировании обнаруженных дефектов используются соответствующие модели классификации дефектов по типам, для которых имеются математическое описание и критерии предельных состояний.

Дефекты трещинообразной формы чаще всего на наружной либо внутренней поверхности схематизируются поверхностной полуэллиптической трещиной. Предельное состояние такого типа дефектов принято выражать при статическом нагружении с помощью критерия хрупковязкого разрушения [1] (рис. 2, а), в который входят измеряемые параметры: a , c – размеры трещины; K_{Ic} ; σ_T , σ_B – механические свойства материала в зоне дефекта; $n \geq 1,0$ – коэффициент безопасности при детерминированном подходе, учитывающий стохастичность величин a , c , K_{Ic} , σ_T , σ_B .

Критерий хрупковязкого разрушения имеет вид

$$Y = f(nL_r) - K_r(D, G)n \geq 0, \quad (1)$$

где

$$K_r(D, G) = \frac{K_I(D, G)}{K_{Ic}}$$

$$f(nL_r) = \begin{cases} (1 - 0,14L_r^2 n^2)[0,3 + 0,7 \exp(-0,65L_r^6 n^6)] & \text{при } L_r \leq L_r^{\max}; \\ 0 & \text{при } L_r > L_r^{\max}; \end{cases} \quad (2)$$

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_T}; \quad \sigma_{ref}^{\max} \leq \frac{\sigma_B + \sigma_T}{2};$$

σ_{ref} – напряжения, соответствующие пластической неустойчивости при данном нагружении.

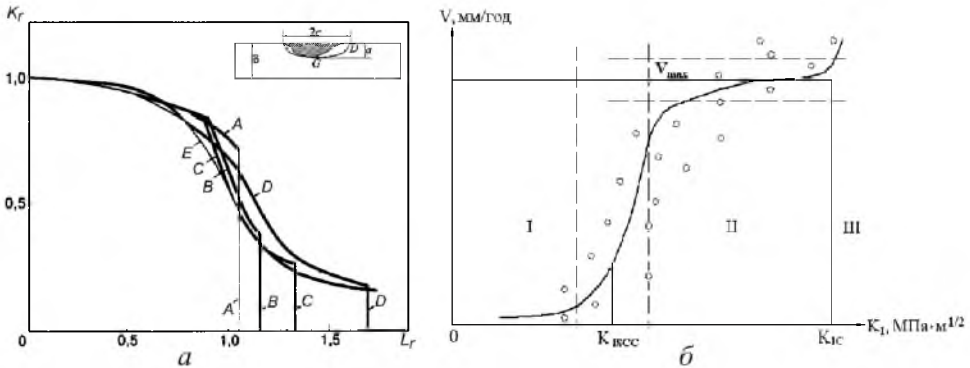


Рис. 2. Оценка состояния дефекта трещинообразной формы по критерию предельного состояния (A, B, C, D – экспериментальные кривые для различных сталей [1, 2], E – расчетная кривая по зависимости (2)) – а и диаграмма статической коррозионной трещиностойкости (K_{Isc} – пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений в статических условиях коррозионной трещиностойкости материала, I, II, III – характерные участки развития трещины) – б.

При прогнозировании допустимости (недопустимости) обнаруженных трещинообразных дефектов на определенный временной период эксплуатации Δt важно учитывать возможность их подрастания, т.е. начальные размеры $a = a_0$ и $2c = 2c_0$ в общем случае за отрезок времени Δt могут увеличиваться:

$$a(\Delta t) = a_0 + V_a \Delta t, \quad c(\Delta t) = c_0 + V_c \Delta t, \quad (3)$$

где V_a и V_c – скорости роста трещины, которые определяются, как правило, в условиях коррозии величинами K_I в соответствующих точках контура трещины.

Зависимость между V и K_I при данных условиях коррозии (температура, среда, материал трубы) устанавливается с помощью экспериментальной диаграммы статической трещиностойкости (рис. 2, б).

Широко распространены дефекты утонения стенки трубы, особенно при наличии коррозионного повреждения. В соответствии с апробированным подходом API [1] (рис. 3) характеристиками такого типа дефектов являются геометрические размеры: минимальная толщина δ_{\min} ; линейные размеры s (вдоль оси трубы) и c (вдоль окружности), а также расчетная допускаемая толщина $[\delta_p]$ стенки трубы в данных условиях эксплуатации.

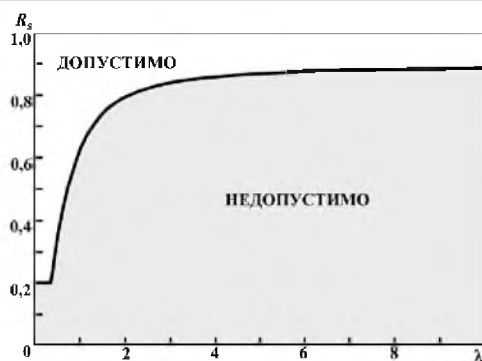


Рис. 3. Критерий предельного состояния для утонения стенки трубы.

Критерий предельного состояния, согласно рекомендациям API [1], записывается в виде

$$Y = (\delta_{\min} - v\Delta t) - [\delta_p]R_j \geq 0, \quad (4)$$

где v – скорость уменьшения толщины за счет коррозии; Δt – время; R_j ($j = s, c$) – функция зависимости допускаемой величины δ_{\min} от линейных размеров s и c (s – вдоль образующей, c – по окружности трубы),

$$R_j \geq 0,2 \quad \text{при} \quad \lambda = \frac{1,285s}{\sqrt{D[\delta_p]}} < 0,3475 \quad \text{и} \quad \frac{c}{D} \leq 0,348;$$

$$R_s \geq f(\lambda) \quad \text{при} \quad 0,3475 < \lambda < 10 \quad (\text{рис. 3});$$

$$R_s \geq 0,885 \quad \text{при} \quad \lambda \geq 10;$$

$$R_c \geq \frac{-0,73589 + 10,511(c/D)^2}{1 + 13,838(c/D)^2} \quad \text{при} \quad c/D > 0,348.$$

Здесь также достаточно стохастичными являются величины δ_{\min} , s и c .

По изложенной процедуре можно рассмотреть также дефекты несплошности канавочного типа, в виде питтингов и расслоений (blister). Для каждого из них можно записать уравнение предельного состояния с учетом геометрических размеров, стохастичность которых достаточно очевидна и во многом определяется опытом оператора и разрешающей способностью измерительной аппаратуры.

С учетом вышеизложенного при детерминированных оценках риска нарушения целостности в зоне таких дефектов большое значение имеет правильный выбор коэффициента безопасности n , что не так просто сделать.

Более гибким является подход, основанный на вероятностных методах, поскольку плотность распределения стохастических величин, связанных с линейными измерениями либо определением механических свойств материала, достаточно надежно можно описать хорошо изученными законами распределения типа усеченного нормального или Вейбулла.

Первый вариант. Усеченный нормальный закон ($A_X < X < B_X$):

$$\varphi_X = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \xi_X S_X} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{X - \bar{X}}{\xi_X} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где

$$S_X = \int_{A_X}^{B_X} \frac{dX}{\sqrt{2\pi} \xi_X} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{X - \bar{X}}{\xi_X} \right)^2 \right];$$

\bar{X} – математическое ожидание величины X ; ξ_X – стандартное ее отклонение.

Второй вариант. Описание компонент вектора X с помощью трехпараметрического закона Вейбулла. Согласно последнему получим

$$P(X) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{X - X_0}{X_d - X_0} \right)^{\eta_X} \right], \quad (6)$$

где $P(X)$ – вероятность величины X ; X_0 , X_d , η_X – параметры ее распределения.

На рис. 4 с использованием метода Монте-Карло построены вероятности отказа во времени для каждого из десяти дефектов (пять трещин и пять утонений), характеристики которых приведены в табл. 1, 2.

Т а б л и ц а 1

Характеристики обнаруженных трещинообразных дефектов

№ дефекта j	Трещины (геометрия)						Нагрузка		
	\bar{a} , мм	\bar{c} , мм	ξ_a , мм	A_a , мм	ξ_c , мм	A_c , мм	$\bar{\sigma}_m$, МПа	ξ_σ , МПа	A_σ , МПа
1	1,6	20	1	0,6	2,0	16,0	235	10	225
2	1,6	50	1	0,6	4,0	46,0	235	10	225
3	1,6	200	1	0,6	4,0	196,0	235	10	225
4	1,6	200	1	0,6	4,0	196,0	117,5	10	107,5
5	1,6	600	1	0,6	4,0	596,0	117,5	10	107,5

Предполагается, что обнаруженные дефекты имеют место в агрессивной среде (коррозия с наружной поверхности) в трубе, наружный диаметр которой $D = 1420$ мм, при расчетной минимальной толщине стенки трубы $[\delta_p] = 16$ мм.

При наличии рассмотренных выше десяти дефектов важно оценить вероятность отказа во времени, по крайней мере, одного (любого).

Т а б л и ц а 2

Характеристики обнаруженных дефектов утонения

№ дефекта j	Утонения (геометрия)								
	\bar{s}_j мм	\bar{c}_j мм	$\bar{\delta}_{\text{изм.}}$ мм	ξ_{s^*} мм	A_{s^*} мм	$\xi_{\delta_{\text{изм.}}}$ мм	$A_{\delta_{\text{изм.}}}$ мм	ξ_{c^*} мм	A_{c^*} мм
6	40	500	11,5	2,0	20	0,5	10,5	5,0	250
7	40	500	12,0	2,0	20	0,5	11,0	5,0	250
8	100	500	12,0	2,0	50	0,5	11,0	5,0	250
9	150	500	15,5	2,0	75	0,5	14,5	5,0	250
10	150	500	16,0	2,0	75	0,5	15,0	5,0	250

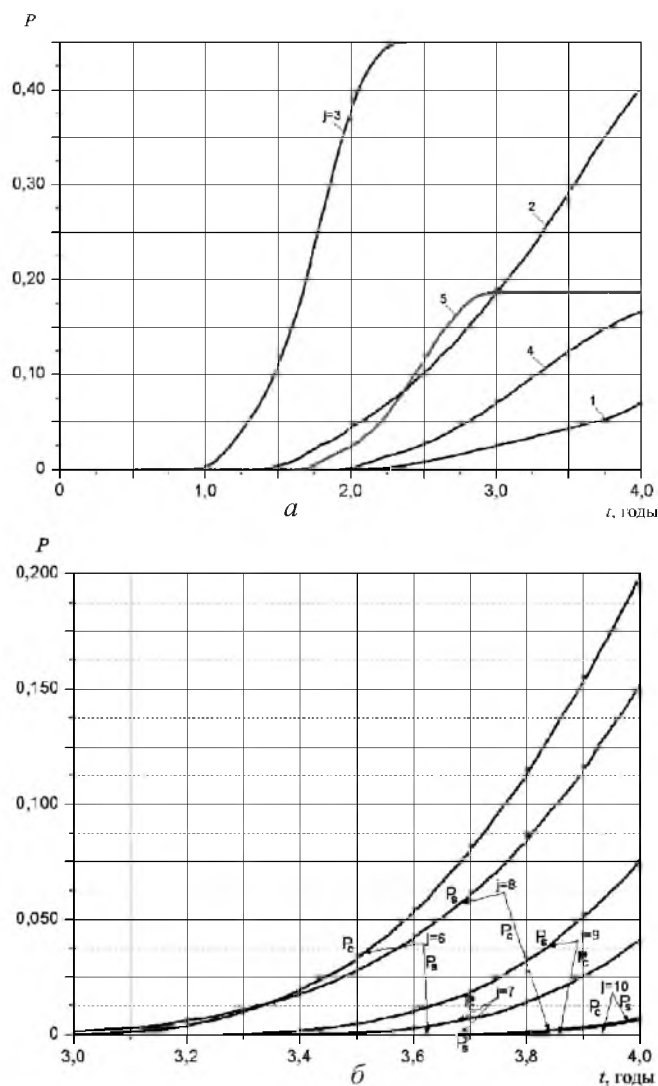


Рис. 4. Вероятность отказа во времени при эксплуатации МТ: a – трещинообразные дефекты, $j = 1-5$ (соответственно $c = 20-600$ мм) при $a = 1,6$ мм; b – дефекты утонения, $j = 6-10$ по направлению $c - (P_c)$ и $s - (P_s)$.

Для этого используем зависимость

$$P_N(\tau) = 1 - \left[\prod_{n=1}^k (1 - P_n) \right] \exp\left(-\sum_{k+1}^N P_n\right), \quad (7)$$

где $\prod_{n=1}^k (1 - P_n)$ – оператор умножения величин $(1 - P_n)$; $n = 1, 2, \dots, k$ при $P_n > 0,1$.

На рис. 5 приведена диаграмма изменения риск-отказа трубопровода в зависимости от количества M отремонтированных наиболее опасных дефектов из общего количества $N = 10$ (табл. 1, 2). Видно, что граница $P_N(M) = 0,1$ достигается в данном случае при ремонте восьми из десяти дефектов, которые и необходимо устранить.

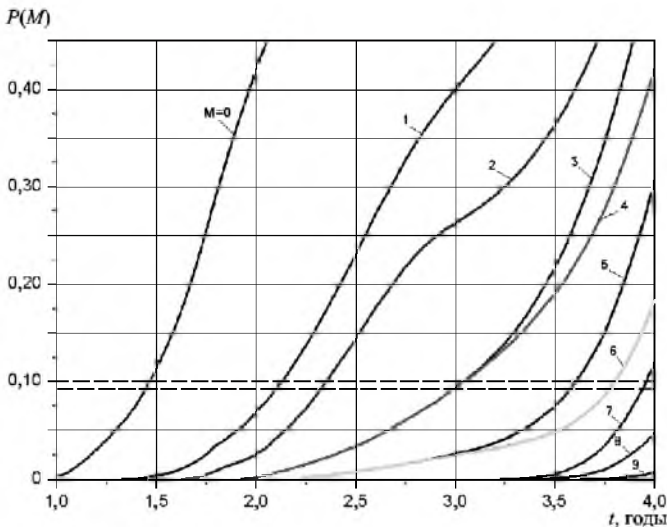


Рис. 5. Диаграмма риск-отказа для обоснования необходимого объема ремонта.

Таким образом, наиболее опасными являются трещинообразные дефекты и их потенциальный рост при наличии коррозии, т.е. определение параметров диаграммы статической коррозионной трещиностойкости для трубных сталей в условиях почвенной коррозии является актуальной задачей. Все это позволяет результаты внутритрубной диагностики использовать не только для минимизации риск-отказа, но и при составлении оптимального графика ремонта.

Учитывая, что по разным оценкам более 50% всех обнаруженных дефектов составляют коррозионно-механические повреждения, их устранение путем восстановления стенки трубы наплавкой представляет интерес как метод ремонта. При наплавке обеспечиваются оперативность устранения дефектов и снижение стоимости самого ремонта, поскольку для его выполнения, кроме сварочных, другие материалы не используются. Особенно актуален такой

метод ремонта на участках трубопроводов с изгибами, прогибами, взаимным смещением труб вдоль продольной оси, а также при изменении проходного диаметра (в таких случаях установка усиливающих конструктивных элементов типа муфт и бандажей затруднена или практически невозможна).

Основными проблемами, с которыми сталкиваются при выполнении наплавки (сварки) на действующем МТ под давлением, являются:

обеспечение условий безопасности и недопущение прожога стенки трубы;

обеспечение требуемых механических свойств наплавленного металла за счет минимизации образования закалочных структур в зоне термического влияния наплавки и недопущения появления трещин.

Установлено, что остаточная толщина стенки трубы H , при которой гарантируются отсутствие прожога и прорыв стенки внутренним давлением, зависит от ряда факторов: сварочного тока $I_{св}$; давления в трубе p , типа транспортируемого сырья (нефть или газ) и скорости его перемещения W .

На рис. 6 приведены результаты расчета критического давления разрушения p в зависимости от остаточной толщины стенки трубы H из стали 17Г1С при наплавке язвенного коррозионного повреждения для различных значений сварочного тока и скорости транспортировки продукта [2].

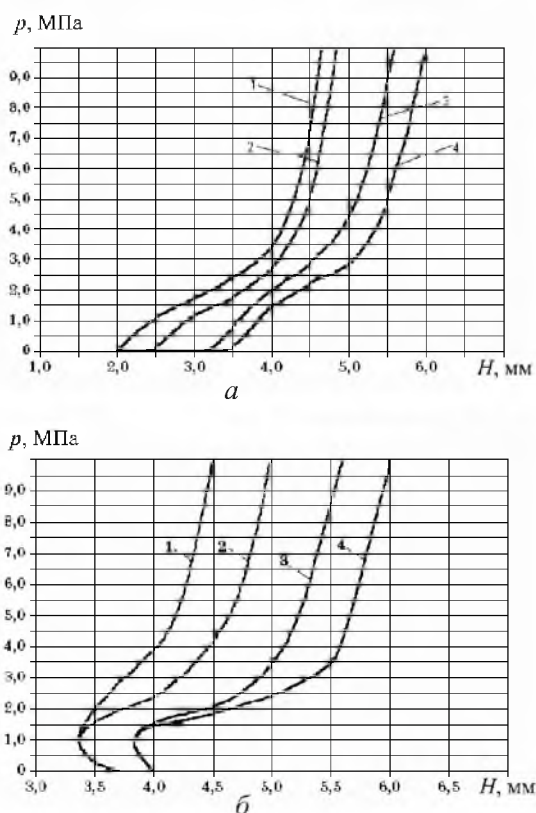


Рис. 6. Зависимость критического давления разрушения p от остаточной толщины стенки трубы H при устранении дефекта $d = 20$ мм для нефтепровода диаметром 1020 мм и толщиной стенки $\delta = 11$ мм при скорости транспортировки нефти 6 (1, 3) и 2 м/с (2, 4) – а и газопровода диаметром 1420 мм и толщиной стенки $\delta = 18$ мм при скорости транспортировки газа 20 (1, 3) и 6 м/с (2, 4) – б: 1, 2 – $I_{св} = 90$ А; 3, 4 – $I_{св} = 120$ А.

Видно, что критическое давление p возрастает с увеличением толщины стенки трубы H до определенных значений, выше которых механизм ее разрушения от теплового воздействия сварочной дуги не реализуется, поскольку резко понижается температура по толщине и повышается предел текучести материала σ_T .

Обеспечение необходимых механических характеристик наплавленного металла и недопущение образования трещин находятся в некотором противоречии с требованием не допустить прожог стенки трубопровода. Это связано с тем, что стремление минимизировать уровень тепловложения при наплавке, т.е. понизить максимальную температуру на внутренней поверхности трубы, приводит к быстрому охлаждению в зоне термического влияния за счет выноса тепла транспортируемым продуктом. В результате этого, особенно на магистральных трубопроводах, которые были построены ранее и имеют высокий эквивалент углерода, могут образовываться неблагоприятные закалочные микроструктуры. В таких микроструктурах с повышенной твердостью (более 350 HV), наличие водорода в наплавленном металле и действующих растягивающих усилий существенно увеличивает риск образования трещин [2].

Риск образования холодных трещин в трубной стали определяется параметром

$$P_{\text{тр}} = 12P_{\text{см}} + \lg H_{\text{д}}, \quad (8)$$

где $H_{\text{д}}$ – содержание диффузионного водорода (см^3) на 100 г металла при 20°C ; $P_{\text{см}}$ – химический состав стали, например для стали 17Г1С имеем $P_{\text{см}} = 0,22 \dots 0,31$, для Х65 – $P_{\text{см}} \leq 0,335$. Соответственно при $H_{\text{д}} \approx 10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ для стали 17Г1С получим $P_{\text{тр}} = 3,65 \dots 4,72$, для Х65 – $P_{\text{тр}} = 5,02$.

Критические значения $P_{\text{тр}}^{\text{кр}}$, при которых полагают сталь не склонной к образованию холодных трещин, при толщине трубы $\delta \approx 20$ мм составляют 3,1...4,0, т.е. для большинства современных трубных сталей следует считаться с таким риском. Обычно подогрев до температуры 150°C перед сваркой в зоне дефекта приводит к резкому снижению риска.

В случаях если по тем или иным причинам применение наплавки при устранении дефектов невозможно на МТ под давлением (рис. 1,а), предлагается использовать ремонтные конструкции, которые усиливают стенку трубы. Наиболее характерными конструкциями, связанными со сваркой, являются герметичные муфты (рис. 1,б) и патрубков-муфта (рис. 1,в) [3].

Герметичные муфты устанавливаются при наличии коррозионно-механических повреждений глубиной не менее 50% толщины δ , которые расположены как в продольном, так и окружном направлении. При этом герметичность обеспечивается за счет наложения кольцевых угловых или прорезных (нахлесточно-стыковых) швов. Патрубок-муфта устанавливается на участок трубы, где выявлены непротяженные трещинообразные дефекты. Для этого после монтажа конструкции к торцу патрубка присоединяется запорный кран с установкой для механической врезки в стенку МТ под давлением. Установка вырезает участок с дефектом, и запорный кран перекрывается.

Таким образом, дефект можно удалить без остановки эксплуатации МТ. В случае невозможности дальнейшей эксплуатации отдельных протяженных участков МТ допустима установка байпасной линии (рис. 1,з), которая позволяет эксплуатировать МТ при одновременном капитальном ремонте дефектной части.

Большой интерес представляет работоспособность конструктивно-технологических рекомендаций. Наиболее высокая работоспособность как при статической, так и циклических нагрузках имеет место после ремонта по варианту, показанному на рис. 1,а. Экспериментальные исследования свидетельствуют, что при качественном выполнении указанного ремонта статическая прочность весьма близка к таковой для основного материала трубы. Циклическая прочность всегда несколько ниже таковой для исходного материала и мало отличается (особенно для многоциклового усталости), для труб из различных материалов. Допускаемые размахи окружных напряжений в зоне ремонта на базе $2 \cdot 10^6$ цикл составляют \sim до 90 МПа, на базе 10^5 цикл – \sim 150 МПа, на базе $(1,5 \dots 2,0) \cdot 10^4$ цикл размахи циклических нагрузок в определенной степени зависят от прочности основного металла и равны 250...300 МПа.

Заметим, что для линейной части подземного магистрального трубопровода такие циклические нагрузки маловероятны.

Представляет интерес работоспособность герметичной муфты и патрубко-муфты. В связи с этим были проведены экспериментальные исследования и разработаны методы расчета геометрических параметров, обеспечивающих статическую прочность таких конструкций в экстремальных условиях.

Для герметичной муфты (рис. 7) в качестве экстремального условия принимается ее работа, когда зона прикрываемого дефекта потеряла герметичность, и газ (либо нефть) заполняет зазор между трубой и муфтой. Для конкретных геометрических размеров численными методами определяются изгибающие моменты M_b и перерезывающие силы Q_r в зоне сварных швов.

Рассчитываются коэффициент интенсивности напряжений K_I и напряжение σ_{ref} (reference stress) в вершине, примыкающей к сварному шву острой полости, по формулам [2]:

для углового шва –

$$K_I = 4,295 \frac{M_b}{h^{3/2}} + 0,5369 \frac{Q_r}{h}, \quad \sigma_{ref} = \frac{4M_b}{h^2} + \frac{Q_r}{h};$$

для прорезного шва –

$$K_I = 1,129 \frac{M_b}{a^{3/2}} + \frac{Q_r}{\sqrt{\pi a}}, \quad \sigma_{ref} = \frac{4M_b}{a^2} + \frac{Q_r}{2a},$$

где M_b – изгибающие моменты; Q_r – перерезывающие силы в шве; h , $2a$ – размеры швов.

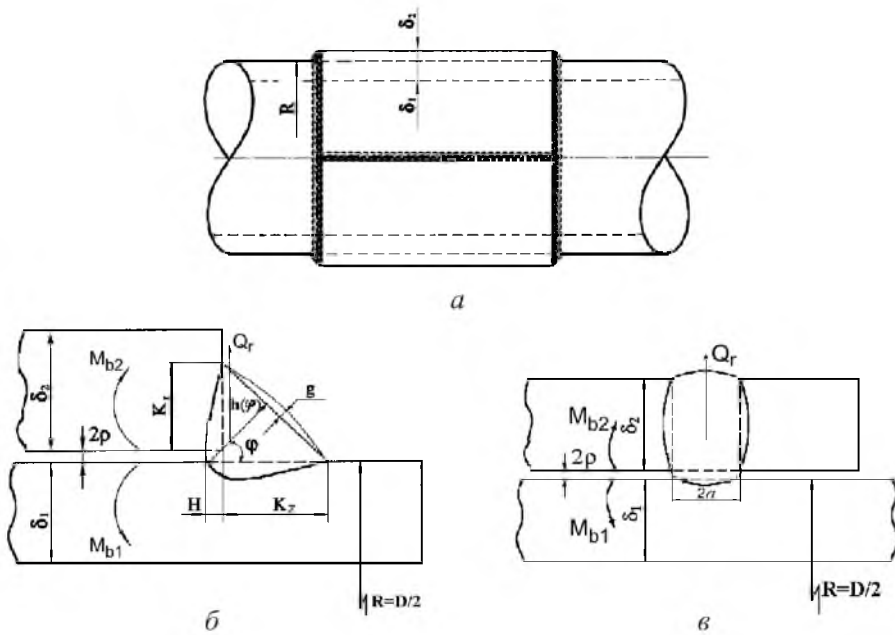


Рис. 7. Схемы герметичной муфты (а) и нагружения от рабочего давления в щели 2ρ между муфтой и трубой в угловом (б) и “прорезном” кольцевом шве (в).

Затем с использованием описанного выше двухпараметрического критерия хрупковязкого разрушения и метода Монте-Карло при заданной стохастичности размеров сварных швов h и $2a$ (табл. 3) рассчитываются вероятности отказа для трубы: сталь 17Г1С, $D = 1420$ мм, $\delta_1 = 20$ мм, $P = 5,5$ МПа. Длина муфты $2L = 1000$ мм при угловых швах и $2L = 1000 + 2 \cdot 100 = 1200$ мм в случае прорезных швов. Толщина муфты $\delta_2 = \delta_m$ изменяется в пределах 20...32 мм. Рассмотрены два варианта величины сопротивления металла шва хрупкому разрушению (I вариант – K_{Ic} для основного металла, II вариант – K_{Ic} для охрупченного):

$$P(K_{Ic}) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{K_1 - K_0}{K_d - K_0} \right)^\eta \right] \quad (9)$$

при $K_0 = 20$ МПа · м^{1/2}, $\eta = 4,0$, $K_d = 107,5$ МПа · м^{1/2} для варианта I, $K_d = 42$ МПа · м^{1/2} для варианта II.

Результаты, приведенные в табл. 3, показывают, что для варианта I вероятность разрушения $P_{1,2} \approx 0$ при $\delta_m = 28$ мм и $\bar{h} = 26$ мм для углового шва и $2a = 28$ мм для прорезного шва. Для варианта II (охрупчен материал шва) имеем $P_{1,2} \approx 0,11$ при $\delta_m = 28$ мм и $\bar{h} = 28$ мм для углового шва и $\delta_m = 28$ мм и $2a = 28$ мм для прорезного шва, т.е. эти швы примерно равноценны, однако объем наплавленного металла для углового шва составляет $\sim 0,785$ такого для прорезного шва. Преимущество прорезного шва состоит в том, что при необходимости сечение $2a$ можно выполнить больше h .

Т а б л и ц а 3

Результаты расчета M , Q_z , \bar{K}_I , $\bar{\sigma}_{ref}$, $P_{1,2}$ для герметичной муфты

Угловые швы							
δ_m , мм	\bar{h} , мм	M_b , МПа·мм ²	Q_z , МПа·мм	\bar{K}_I , МПа·м ^{1/2}	$\bar{\sigma}_{ref}$, МПа	$P_{1,2}$	
						I	II
20	12	13780	274	46,4	405,6	0,3670	1,000
20	20	23435	319	36,8	250	0,0837	0,867
28	20	25174	345	39,5	269	0,2300	0,969
28	22	27160	352	37,0	240	0,0450	0,839
28	24	29000	358	34,7	216	0,0030	0,577
28	26	30656	362	32,6	195	0	0,295
28	28	32120	370	30,6	177	0	0,118
Прорезные швы							
δ_m , мм	$2a$, мм	M_b , МПа·мм ²	Q_z , МПа·мм	\bar{K}_I , МПа·м ^{1/2}	$\bar{\sigma}_{ref}$, МПа	$P_{1,2}$	
						I	II
20	–	–	–	–	–	–	–
20	–	–	–	–	–	–	–
28	22	36915	447	38,5	327	0,7100	1,0000
28	24	37160	425	34,1	277	0,1730	0,9370
28	26	37351	405	30,4	238	0,0048	0,5310
28	28	37492	388	27,4	206	0	0,1090
28	30	37590	374	24,8	181	0	0,0045
28	32	37661	361	22,6	159	0	0

На рис. 8 приведена схема патрубка-муфты, который используется для устранения трещин на внутренней поверхности трубопровода. После удаления дефектного участка трубы в патрубке создается усилие, соответствующее давлению p в трубопроводе. Соответственно на внутренний сварной шов вдоль окружности патрубка будет действовать перерезывающая сила на единицу длины:

$$Q_z = p \frac{\pi d_{пат}^2}{\pi d_{в.ш}} \eta(\xi), \quad (10)$$

где p – рабочее давление; $d_{пат}$ – внутренний диаметр патрубка; $d_{в.ш}$ – диаметр внутреннего шва; $\eta(\xi)$ – функция распределения Q_z вдоль окружности сварного шва.

Согласно [4], максимальную величину $\eta(\xi)$ можно представить в виде для поперечного сечения, совпадающего с осью патрубка:

$$\eta(\xi) = 0,9 + \frac{10,6 d_{\text{пат}}}{D} \left(1 - 0,4 \frac{\delta + \delta_{\text{пат}}}{d_{\text{пат}}} \right) + 4,0 \frac{h}{d_{\text{пат}}}$$

Соответственно получим

$$Q_z^{\text{max}} = p \frac{d_{\text{пат}}}{4} \left[0,9 + \frac{10,6 d_{\text{пат}}}{D} \left(1 - 0,4 \frac{\delta + \delta_{\text{пат}}}{d_{\text{пат}}} \right) + 4,0 \frac{h}{d_{\text{пат}}} \right]$$

Величины K_I и σ_{ref} рассчитываются с использованием Q_z^{max} и далее как для герметичной муфты.

В табл. 4 приведены результаты расчета вероятности отказа для внутреннего сварного шва в зависимости от диаметра патрубка $d_{\text{пат}} = d$ и средних размеров для трубы диаметром $D = 1420$ мм, $\delta = 19$ мм, $\delta_M = 28$ мм. Видно, что чем больше диаметр патрубка, тем больше должна быть толщина сварного шва. Для $d = 500$ мм имеем $\bar{h} \approx 14$ мм, для $d = 400$ мм – $\bar{h} = 10$ мм, для $d = 300$ мм – $\bar{h} = 6$ мм.

Т а б л и ц а 4

Результаты расчета вероятности отказа P для внутреннего сварного шва

d , мм	\bar{h} , мм	P
500	14,0	0,00054
	13,0	0,02570
	12,0	0,20900
400	10,0	0
	9,0	0,00360
	8,0	0,18900
300	6,0	0
	5,5	0,00334
	5,0	0,12000

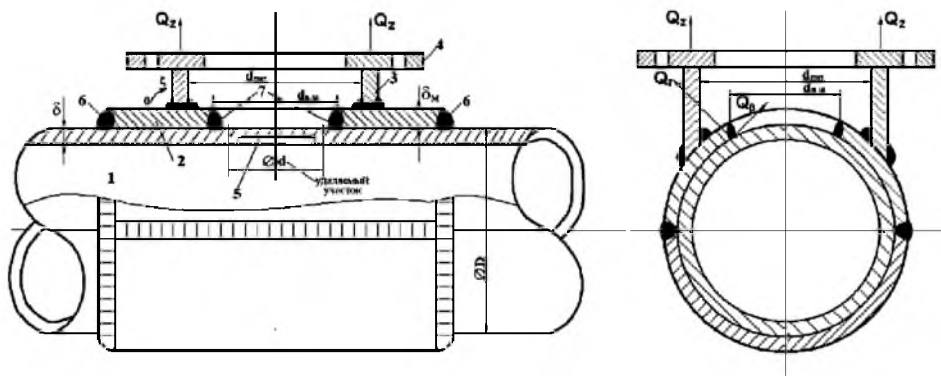


Рис. 8. Конструкция для удаления трещин и других дефектов на внутренней поверхности трубопровода под давлением: 1 – трубопровод; 2 – муфта; 3 – патрубок; 4 – фланец для крепления механического устройства удаления зоны с трещиной 5 и глушения отвода; 6, 7 – соответственно наружные и внутренние сварные швы приварки муфты.

Выводы

1. Разработана система технологий ремонта дефектов МТ без выведения их из эксплуатации, которая включает:

методику ранжирования обнаруженных дефектов по степени их недопустимости и соответственно очередности устранения при разработке оптимального графика ремонта;

мероприятия, которые гарантируют безопасность ремонта, особенно с применением сварочных технологий;

конструктивно-технологические варианты ремонта в зависимости от типа дефекта, его геометрических размеров, нагрузки участка трубопровода, свойств материала трубы и т.п.;

методы оценки работоспособности МТ после ремонта.

2. Для устранения дефектов несплошности материала в стенке трубопровода самыми эффективными являются сварочные технологии по восстановлению толщины стенки трубы наплавкой. Однако при глубоких поражениях стенки применение таких технологий связано с повышенной опасностью прожога, что следует учитывать при разработке оптимального графика ремонта при наличии прогноза относительно кинетики роста дефектов во времени.

3. Если по тем или иным причинам устранение дефекта несплошности материала стенки трубопровода путем наплавки невозможно, предлагаются ремонтные технологии, связанные с установкой соответствующих усиливающих бандажей или герметичных муфт разной конструкции. Детально изучены вопросы взаимодействия таких конструкций со стенкой трубопровода при наличии дефекта.

4. Самым сложным является ремонт под давлением недопустимых трещинообразных дефектов на внутренней поверхности МТ, поскольку для предупреждения распространения трещины дефектный участок необходимо удалить. Для таких дефектов разработана технология ремонта, основанная на монтаже в зоне дефекта патрубков-муфт с запорной арматурой, через которую механической установкой удаляется дефектный участок.

5. В случае технической или экономической нецелесообразности использования локальных методов ремонта для конкретного участка трубопровода предусмотрен ремонт без выведения МТ из эксплуатации путем перекрытия дефектного участка с помощью установки соответствующих запорных устройств, отводов и байпасного трубопровода, после чего осуществляется замена дефектного участка сваркой соответствующей катушки.

6. На основе современных подходов механики разрушения разработаны методы оценки работоспособности отремонтированных участков трубопроводов при конкретных условиях эксплуатации.

Резюме

Запропоновано новий підхід до ремонту магистральних трубопроводів зварюванням без виводу їх з експлуатації. Підхід базується на чотирьох положеннях: ранжування дефектів за ступенем ризик-відмови; безпека виконання зварювальних робіт на трубопроводі під тиском; використання різних варіан-

тів ремонту зварюванням; оцінка працездатності ремонтних зварних конструкцій. Використання такого підходу дає можливість мінімізувати ризик відмову трубопроводу і спрогнозувати його працездатність після ремонту зварюванням.

1. *Fitness-for-Service*. American Petroleum Institute. Recommended Practice 579 (First ed.). – 2000. – 625 p.
2. *Махненко В. І.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев: Наук. думка, 2006. – 618 с.
3. *Бут В. С., Олійник О. І.* Стратегія розвитку технологій ремонту діючих магістральних трубопроводів. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин // Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2004–2006 рр. – Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 491 – 496.
4. *ПНАЭ Г-7-002-86.* Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.

Поступила 05. 01. 2009