



## ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЙ УСТРАНЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В МАГИСТРАЛЬНОМ ТРУБОПРОВОДЕ БЕЗ ВЫВОДА ЕГО ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО**, канд. физ.-мат. наук,  
**О. И. ОЛЕЙНИК**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Ремонтные технологии для устранения дефектов в магистральных трубопроводах требуют обоснования для характерных типовых случаев соответствия назначению. Для этой цели разрабатываются соответствующие расчетные алгоритмы определения риска отказа отремонтированного дефекта в зависимости от его размеров, метода ремонта и условий эксплуатации. В работе освещается разработанный подход при выборе технологии ремонта трещин.

*Ключевые слова:* магистральные трубопроводы, безопасная эксплуатация, техническая диагностика, обнаруженные дефекты, выбор технологии ремонта, герметичная муфта, бандаж, расчетные алгоритмы, метод Монте-Карло, вероятность отказа, соответствие назначению

Обеспечение стабильной безопасной работы магистральных трубопроводов является одной из главных задач трубопроводного транспорта во всем мире, в том числе и в Украине, где ежегодно с Востока на Запад транспортируется по трубопроводам до 120 млрд м<sup>3</sup> газа и свыше 30 млн т нефти. Стабильность, связанная с безотказностью функционирования трубопроводов, в первую очередь определяется безопасной эксплуатацией трубопровода в результате своевременно проводимых мероприятий по технической диагностике его состояния и соответствующими ремонтами обнаруженных дефектов. Среди большого количества способов ремонта трубопроводов основное внимание привлекают те из них, которые не требуют вывода трубопровода (участка) из эксплуатации. Для решения таких задач известен целый ряд подходов, в том числе и с применением сварочных технологий [1–3]. Американским институтом нефти разработан специальный стандарт [4] по применению сварки при ремонте отдельных локальных дефектов на действующем трубопроводе. Значительный объем работ в этом направлении выполнен в последние годы в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины [1, 2, 5, 6]. Целый ряд таких разработок получил признание соответствующих специалистов и используется на практике [3].

Тем не менее многие вопросы, связанные с применением сварочных технологий, остаются еще недостаточно исследованными. Это в первую очередь относится к вопросам ресурса безопасной эксплуатации отремонтированных в указанных условиях трубопроводов, поскольку специфика ремонтных условий накладывает целый ряд ог-

раничений на параметры сварочных технологий, форму и размеры конструктивных решений. Здесь часто невозможно уложиться в общие рекомендации (стандарты), используемые при ремонте сваркой подобных конструкций в обычных условиях, т. е. выведенных из эксплуатации и прошедших соответствующую подготовку для выполнения сварки. Поэтому большое значение для таких технологий с учетом конкретных условий нагружения отремонтированного узла трубопровода имеют доказательства соответствия назначению.

Цель настоящей работы состоит в разработке расчетной методики, позволяющей с определенной консервативностью оценить соответствие назначению участков трубопровода (по условию безопасной эксплуатации) после характерных методов ремонта [3], связанных с устранением обнаруженных недопустимых дефектов.

Одним из наиболее опасных дефектов являются несплошности материала типа трещин. Такие дефекты могут быть поверхностные (с наружной либо внутренней поверхности трубы), сквозные и подповерхностные (последние при обычных толщинах магистральных трубопроводов встречаются редко). Выбор ремонта таких дефектов начинается, как правило, с оценки возможности путем шлифования перевода дефекта из типа недопустимой трещины в объемный дефект канавочного типа [7], расположенный вдоль образующей (длина дефекта  $s$ ) либо вдоль окружности (длина дефекта  $c$ ) при глубине  $\delta_{\text{изм}}$  (рис. 1).

Допустимость такого типа дефектов оценивается с учетом прогнозируемого уменьшения толщины в результате коррозии по соотношениям из работ [7–9]

$$Y = \delta_{\text{изм}} - \{[\delta]R_j + v_{\text{кор}}t\}, \quad j = s, c > 0, \quad (1)$$

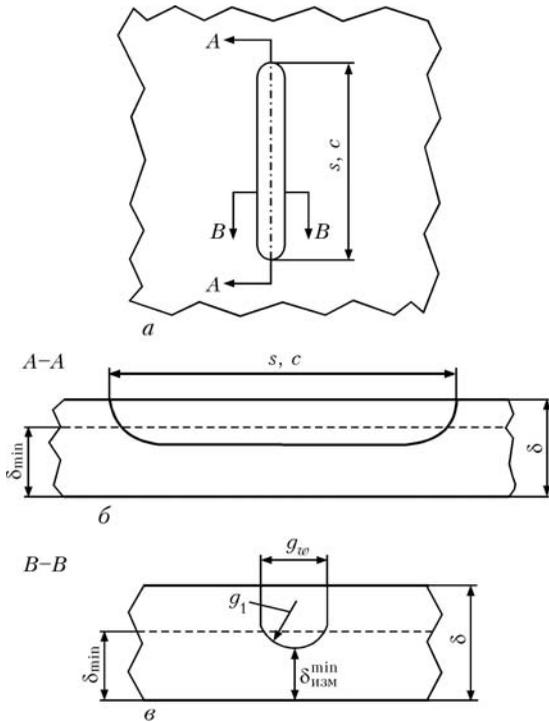


Рис. 1. Схема удлиненных объемных дефектов, имеющих форму канавок (Groove-Like Flaw): а — дефект в виде канавки (вид сверху); б, в — соответственно длина дефекта (сечение А-А) и ширина дефекта в виде канавки (сечение В-В)

где

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

$$R_s = f(\lambda) \text{ при } 0,3475 < \lambda < 10;$$

$$R_c = \frac{-0,7568 + 10,511(c/D)^2}{1,0 + 13,838(c/D)^2} \text{ при } \frac{c}{D} > 0,348;$$

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

$R_j$  — допустимое снижение величины  $[\delta]$ ;  $D$  — диаметр трубы;  $[\delta]$  — минимально допустимая толщина трубы на основе применения расчетного кода для данного участка целой трубы (без учета коррозии);  $v_{кор}$  — скорость коррозии на прогнозируемый интервал времени  $t$  эксплуатации до следующей диагностики.

Условие  $Y > 0$  по (1) определяет допустимость выявленного дефекта. В случае, если  $Y < 0$ , т.е.

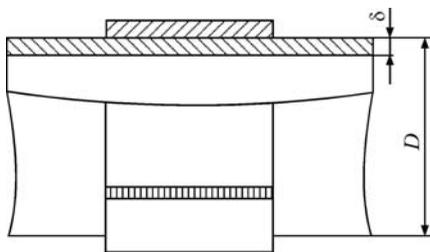


Рис. 2. Схема бандажа для ремонта коррозионно-механических повреждений стенки трубы глубиной до 50 % ее толщины [3]

канавочный дефект полученных размеров недопустим, следует применить соответствующие технологии для его устранения, например, заварку либо постановку бандажа (рис. 2).

В случае, когда бандаж воспринимает значительную часть силовой нагрузки [3], вместо условия (1) можно записать

$$Y = \delta_{изм} - v_{кор} t. \quad (2)$$

Зависимость (2) соответствует условию появления сквозного коррозионного дефекта. Видно, что силовое разгружение зоны дефекта канавочного типа — удаление слагаемого  $[\delta]R_j$  из (1) — формально может резко увеличить время  $t$  до появления течи. Учитывая значительную стохастичность в величинах  $\delta_{изм}$  и  $v_{кор}$ , такие оценки для времени  $t$  более корректно выполнять в вероятностном виде, как предлагается, например, в работе [9].

На рис. 3 с помощью методики расчета вероятности отказа на основе метода Монте-Карло при заданных усеченных нормальных законах распределения измеренных величин  $\delta_{изм}$  и скорости коррозии  $v_{кор}$  построены вероятности отказа  $P$  во времени  $t$ .

В качестве исходных данных относительно  $\delta_{изм}$ ,  $s$ ,  $c$  и  $v_{кор}$ , т. е. средних значений  $\bar{\delta}_{изм}$ ,  $\bar{s}$ ,  $\bar{c}$ ,  $\bar{v}_{кор}$  в усеченном нормальном законе распределения, характеризуемом стандартом отклонения  $\xi$  и нижним пределом отклонения  $A$ , приняты следующие:  $\bar{s} = 40$  мм,  $\bar{c} = 500$  мм,  $\bar{\delta}_{изм} = 11,5$  мм,  $\xi_{\delta} = 0,5$  мм,  $\xi_s = 2$  мм,  $\xi_c = 5$  мм,  $\bar{v}_{кор} = 1,0$  мм/год,  $\xi_v = 0,1$  мм/год,  $A_{\delta} = 10,5$  мм,  $A_v = 0,8$  мм/год. Кривые  $P_s$  и  $P_c$  определяют увеличение вероятности отказа для случаев зашлифованной трещины вдоль образующей (длиной  $\bar{s} = 40$  мм), вдоль окружности (длиной  $\bar{c} =$

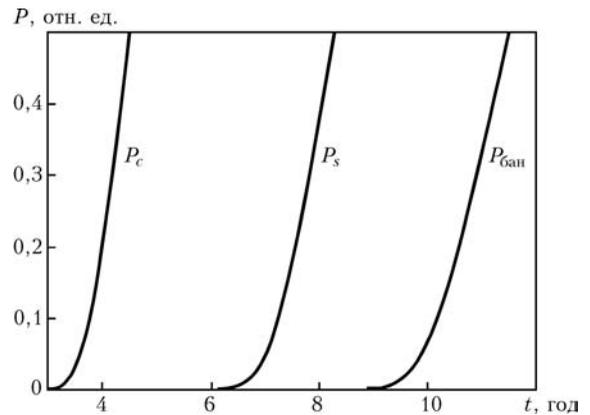


Рис. 3. Расчетная вероятность отказа во времени  $t$  с начала процесса коррозии для дефекта канавочного типа вдоль образующей  $P_s$  и окружности  $P_c$  при отсутствии бандажа и после его установки  $P_{бан}$  в момент  $t = 0$



= 500 мм) на основе критерия (1) при  $D = 1420$  мм,  $[\delta] = 16$  мм.

Видно, что через четыре года эксплуатации таких канавочных утонений при наличии коррозии вероятность отказа  $P_c \approx 0,2$ . Однако уже при  $t = 4,5$  года  $P_c \approx 0,5$ , т. е. надежность такого вида ремонта наружных трещин соответствующих размеров является небольшой.

Кривая  $P_{\text{бан}}$  на рис. 3 определяет вероятность отказа тех же дефектов во времени с учетом того, что установлен бандаж, способный взять на себя значительную часть силовой нагрузки, т. е. учитывается только коррозия по критерию (2). Видно, что установка бандажа значительно снижает вероятность отказа во времени. Тем не менее после  $t = 10$  лет с начала коррозионного процесса вероятность отказа выше 0,1, что во многих случаях является нежелательным. С этих позиций более надежным является установка при ремонте герметичной муфты (рис. 4), позволяющей сохранить работоспособность после образования сквозного

дефекта. Вероятность отказа  $P_2$  для такого варианта ремонта определяется в виде произведения

$$P_2 = P_1 P_{1,2}, \quad (3)$$

где  $P_1$  — вероятность получения во времени сквозного дефекта в результате коррозии с учетом зависимости (2);  $P_{1,2}$  — вероятность отказа муфты при условии появления рабочего давления газа в полости между муфтой и трубой.

Критерий отказа в этом случае согласно работе [5] связан с работоспособностью сварных соединений приварки муфты к трубе. Вероятность отрыва углового либо прорезного шва (рис. 4) можно связать с критерием хрупковязкого разрушения по механизму спонтанного распространения прилегающей к сварному шву острой полости при появлении в ней рабочего давления:

$$Y = -K_r + (1 - 0,14L_r^2) [0,3 + 0,7 \exp(-0,65L_r^6)], \quad (4)$$

$$\text{при } L_r \leq L_r^{\max} = \frac{\sigma_T + \sigma_B}{2\sigma_T},$$

$$\text{при } L_r > L_r^{\max} \quad Y = -K_r,$$

где  $K_r$  характеризует чисто хрупкое разрушение сварного шва,  $K_r = K_1/K_{IC}$  ( $K_1$  — коэффициент интенсивности напряжений в металле сварного шва при указанном нагружении;  $K_{IC}$  — вязкость разрушения металла шва);  $L_r = \sigma_{\text{ref}}/\sigma_T$  характеризует чисто вязкое разрушение сварного шва в результате пластической неустойчивости, когда  $\sigma_{\text{ref}}$  определяется, например, по теории Мизеса через компоненты тензора напряжений в металле шва при рассматриваемом нагружении.

В работе [5] описана методика определения величин  $K_1$  и  $\sigma_{\text{ref}}$  через изгибающие моменты  $M$  и перерезывающие силы  $Q_r$ , действующие на единицу длины кольцевого сварного шва (рис. 4). При фиксированном рабочем давлении в полости достаточно стохастическими величинами являются геометрические расчетные размеры сварного шва —  $h$  или  $2a$ , сопротивление металла шва хрупкому разрушению  $K_{IC}$ , а также его механические свойства  $\sigma_T$  и  $\sigma_B$ . Для величин  $X = h, a, \sigma_T$  и  $\sigma_B$  удобно использовать усеченный нормальный закон распределения таких случайных величин, определяемый средним значением  $\bar{X}$ , стандартом отклонения  $\xi_X$  и нижним пределом усечения  $A_X$  [9].

Для значений  $K_{IC}$  более приемлемым является распределение в соответствии с законом Вейбулла, когда вероятность

$$p(K_{IC}) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{K_{IC} - K_0}{K_d - K_0} \right)^\eta \right], \quad (5)$$

где  $K_0, K_d, \eta$  — параметры распределения, определяемые обычно по результатам 12-15 экспе-

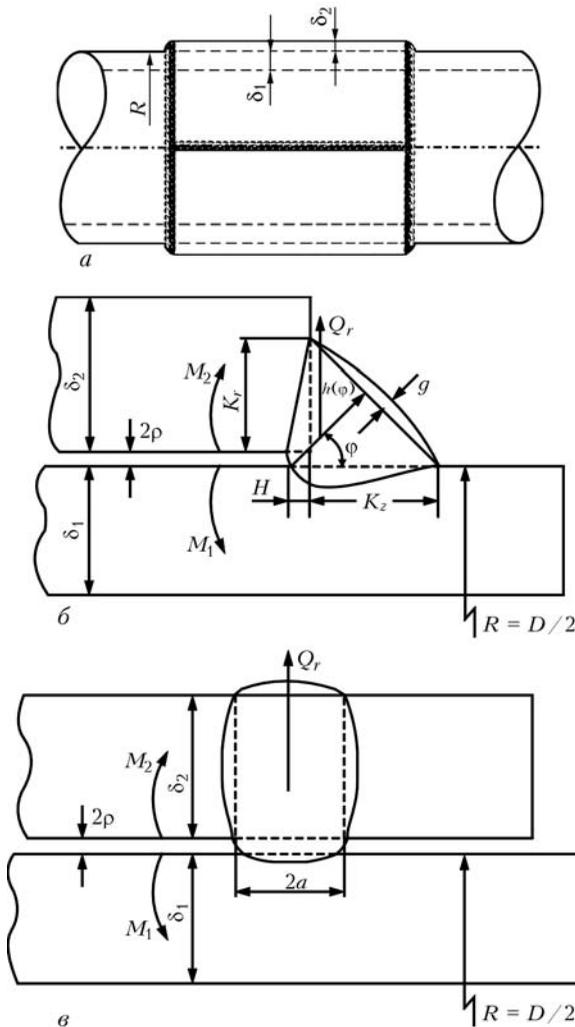


Рис. 4. Схема герметичной муфты (а) и нагружения углового (б) и прорезного кольцевого шва (в) от рабочего давления в щели между муфтой и трубой



риментов [8], из которых вычисляются  $K_{IC}$  при  $p = 0,5; 0,05$  и  $0,95$ . Затем, подставляя в уравнение (4) значения  $K_{IC}$  и  $p$ , получаем систему из трех нелинейных уравнений, из которой находим значения параметров Вейбулла  $K_0, K_d, \eta$ .

Рассмотрим генератор случайных чисел  $Z$  в пределах  $0 \leq Z \leq 1,0$  и условие соответствия исходной величины  $X$  в виде

$$Z = \int_{A_x}^X \bar{\varphi}_X dX = P(X), \quad (6)$$

где  $\bar{\varphi}_X$  — нормированный закон распределения величины  $X$ ;  $P(X)$  — вероятность значения  $X$ .

Используя зависимость (6), получаем возможность генерировать выборку вариантов по  $Y$  для метода Монте-Карло. Представительность выборки проверяется увеличением количества вариантов  $N$  до тех пор, пока среднее значение  $\bar{Y}$ , стандарт отклонения

$\xi_Y = \left[ \frac{1}{N} \sum_n^N (Y - \bar{Y})^2 \right]^{0,5}$  и вероятность отказа  $P_{1,2}$  практически не меняются. Вероятность отказа  $P_{1,2}$  определяется зависимостью

$$P_{1,2} = \int_{-A_Y}^0 \bar{\varphi}_Y dY, \quad (7)$$

где  $\bar{\varphi}_Y$  — нормализованный закон распределения величины  $Y$  для представительной выборки.

Ниже выполнены расчеты вероятности отказа  $P_{1,2}$  для муфты с угловым и прорезным швом в зависимости от толщины стенки муфты  $\delta_m$  при длине  $2L = 1000$  мм для углового шва и  $2L = = 1000 + 2 \cdot 100$  мм для муфты с прорезным швом.

В табл. 1 приведены соответствующие варианты расчета для различных размеров  $\bar{h}$  (углового шва при  $h(\varphi) = \text{const}$ ) и  $2\bar{a}$  (размеров прорезного шва) с указанием возникающего при рабочем давлении  $P_{\text{раб. дав}} = 5,5$  МПа изгибающего момента  $M$  и перерезывающей силы  $Q_r$  в металле шва.

Соответственно для углового шва по [5, 8]

$$K_I = 4,295 \frac{M}{h^{3/2}} + 0,5369 \frac{Q_r}{\sqrt{h}}, \quad \sigma_{\text{ref}} = \frac{4M}{h^2} + \frac{Q_r}{h}. \quad (8)$$

Для прорезного шва

Т а б л и ц а 1. Результаты расчета геометрических параметров для герметичной муфты

| $\delta_m, \text{ мм}$ | Угловые швы           |                                    |                                    |  |  |        | $P_{1,2}$ |        |
|------------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|--|--------|-----------|--------|
|                        | $\bar{h}, \text{ мм}$ | $M, \text{ МПа} \cdot \text{мм}^2$ | $Q_r, \text{ МПа} \cdot \text{мм}$ | $\bar{K}_I, \text{ МПа} \cdot \text{мм}^{1/2}$ | $\bar{\sigma}_{\text{ref}}, \text{ МПа}$ | I      |           |        |
|                        | 20                    | 12                                 | 13780                              | 274  | 46,4                                     |        | 405,6     | 0,3670 |
| 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      | 0,188     |        |
| 28                     | —                     | —                                  | —                                  | —  | —  | —      | —         |        |

Окончание табл. 1

| $\delta_m, \text{ мм}$ | Прорезные швы          |                                    |                                    |  |  |        | $P_{1,2}$ |   |
|------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|--|--------|-----------|---|
|                        | $2\bar{a}, \text{ мм}$ | $M, \text{ МПа} \cdot \text{мм}^2$ | $Q_r, \text{ МПа} \cdot \text{мм}$ | $\bar{K}_I, \text{ МПа} \cdot \text{мм}^{1/2}$ | $\bar{\sigma}_{\text{ref}}, \text{ МПа}$ | I      |           |   |
|                        | 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         |   |

$$K_I = 1,129 \frac{M}{a^{3/2}} + \frac{Q_r}{\sqrt{\pi a}}, \quad \sigma_{\text{ref}} = \frac{M}{a^2} + \frac{Q_r}{2a}. \quad (9)$$

Приведенные в табл. 1 данные относительно изгибающих моментов в сварном шве соответствуют средним значениям  $\bar{h}$  и  $2\bar{a}$ . Там же указаны средние значения  $\bar{K}_I$  и  $\bar{\sigma}_{\text{ref}}$  и приведены результаты расчета  $P_{1,2}$ . Учитывалась стохастичность значений  $h, a, K_{IC}, \sigma_T, \sigma_B$ . Принималось  $\xi_h = 0,5$  мм,  $A_h = \bar{h} - 2\xi_h$ ,  $\xi_a = 0,5$  мм,  $A_a = \bar{a} - 2\xi_a$ ,  $\bar{\sigma}_T = = 270$  МПа,  $\bar{\sigma}_B = 475$  МПа,  $A_{\sigma_T} = 230$  МПа,  $A_{\sigma_B} = 435$  МПа,  $\xi_{\sigma_T} = \xi_{\sigma_B} = 20$  МПа. Для  $K_I$  использовали два варианта значений: I — вариант для основного металла  $K_d = 107,5$  МПа·мм<sup>1/2</sup>,  $K_0 = = 20$  МПа·мм<sup>1/2</sup>,  $\eta = 4,0$ ; вариант II отличается значением  $K_d = 42$  МПа·мм<sup>1/2</sup>.

Из данных табл. 1 видно, что по объему наплавленного металла сварного шва при одинаковых толщинах стенки муфты  $\delta_m$  сварные угловые швы имеют небольшое преимущество. Например, при  $\delta_m = 28$  мм и  $h = 2a = 28$  мм объем наплавленного



металла на единицу длины для углового шва  $V_{уг} \approx \pi h^2/4 = \pi \delta_M^2/4 \approx 0,785 \delta_M^2$ , а для прорезного  $2a \delta_M = \delta_M^2$ . У угловых швов также наблюдается определенное преимущество по надежности, т. е. меньше риск  $P_{1,2}$  при одинаковых  $h = 2a$ .

С учетом полученных  $P_{1,2}$  можно построить вероятность отказа  $P_2 = P_1 P_{1,2}$ . Видно, что по сравнению с банджом (см. рис. 3), применение герметичной муфты может заметно снизить риск  $P_2$ , особенно для тяжелых муфт, у которых риск  $P_{1,2} \rightarrow 0$ . Следует отметить, что по сравнению с работой [5], где использовали детерминированный подход при  $K_1 = 1000 \text{ МПа}\cdot\text{мм}^{1/2} = 31,6 \text{ МПа}\cdot\text{мм}^{1/2}$ , что соответствует  $p(K_{1C}) < 0,05$ , у рассмотренного вероятностного подхода менее жесткие требования относительно размеров сварных швов, при которых  $P_{1,2} \approx 0$ .

Рассмотренные варианты ремонта трещины без вывода трубопровода из эксплуатации неприменимы для трещин на внутренней поверхности трубопровода, поскольку не предусматривают удаления металла в зоне трещины на внутренней поверхности трубы с целью предупреждения распространения трещины во время эксплуатации.

Для таких случаев в работе [3] предлагается вариант ремонта с применением конструкции, характерной для получения отводов без вывода трубопровода из эксплуатации. В ее основе находится приварная муфта 2 с отверстием (рис. 5), к которой заранее приварен патрубок 3 с фланцем 4, на котором крепится механизм для удаления зоны диаметром  $d$ , в пределах которой расположена трещина 5. Если муфта приварена к трубе только наружными кольцевыми швами 6, то ее надежность определяется с учетом рабочего давления газа в полости между муфтой и трубой по описанному выше алгоритму для герметичной муфты. Если имеется возможность качественно выпол-

Таблица 2. Результаты расчета вероятности отказа для внутреннего шва (рис. 5)

| $d = 500 \text{ мм}$  |         | $d = 400 \text{ мм}$  |         | $d = 300 \text{ мм}$  |         |
|-----------------------|---------|-----------------------|---------|-----------------------|---------|
| $\bar{h}, \text{ мм}$ | $p$     | $\bar{h}, \text{ мм}$ | $p$     | $\bar{h}, \text{ мм}$ | $p$     |
| 14,0                  | 0,00054 | 10,0                  | 0       | 6,0                   | 0       |
| 13,0                  | 0,02570 | 9,00                  | 0,00360 | 5,5                   | 0,00334 |
| 12,0                  | 0,20900 | 8,00                  | 0,18900 | 5,0                   | 0,12000 |

нить внутренний сварной шов 7 без наружного 6, то в этом случае надежность конструкции будет определяться способностью внутреннего сварного шва 7 выдерживать силу давления в патрубке, т.е. в этом сварном шве будут действовать перерезывающие силы  $Q_z$  на единицу длины внутреннего шва. При этом

$$Q_z = \frac{P_{\text{раб. дав}} (\pi d_{\text{пат}}^2) / 4}{\pi d_{\text{в.ш}}} \eta(\xi), \quad (10)$$

где  $P_{\text{раб. дав}}$  — рабочее давление;  $\eta(\xi)$  — функция распределения  $Q_z$  вдоль сварного шва;  $d_{\text{пат}}$  — диаметр патрубка;  $d_{\text{в.ш}}$  — диаметр внутреннего шва.

Максимальное значение  $\eta(\xi)$  согласно [10] имеет место в поперечном сечении трубы, совпадающем с осью патрубка. При условии  $h/d_{\text{в.ш}} < 0,2$  и  $d_{\text{в.ш}}/d_{\text{пат}} \rightarrow 1,0$  максимальное значение  $\eta(\xi)$  можно представить в следующем виде:

$$\eta_{\text{max}}(\xi) = 0,9 + \frac{10,6 \cdot d_{\text{пат}}}{D} \left( 1 - 0,4 \frac{\delta + \delta_M}{d_{\text{пат}}} \right) + 4,0 \frac{h}{d_{\text{пат}}}. \quad (11)$$

При указанных ограничениях вместо (10) получаем

$$Q_z^{\text{max}} = P_{\text{раб. дав}} \frac{d_{\text{пат}}}{4} \times \left[ 0,9 + \frac{10,6 \cdot d_{\text{пат}}}{D} \left( 1 - 0,4 \frac{\delta + \delta_M}{d_{\text{пат}}} \right) + 4,0 \frac{h}{d_{\text{пат}}} \right]. \quad (12)$$

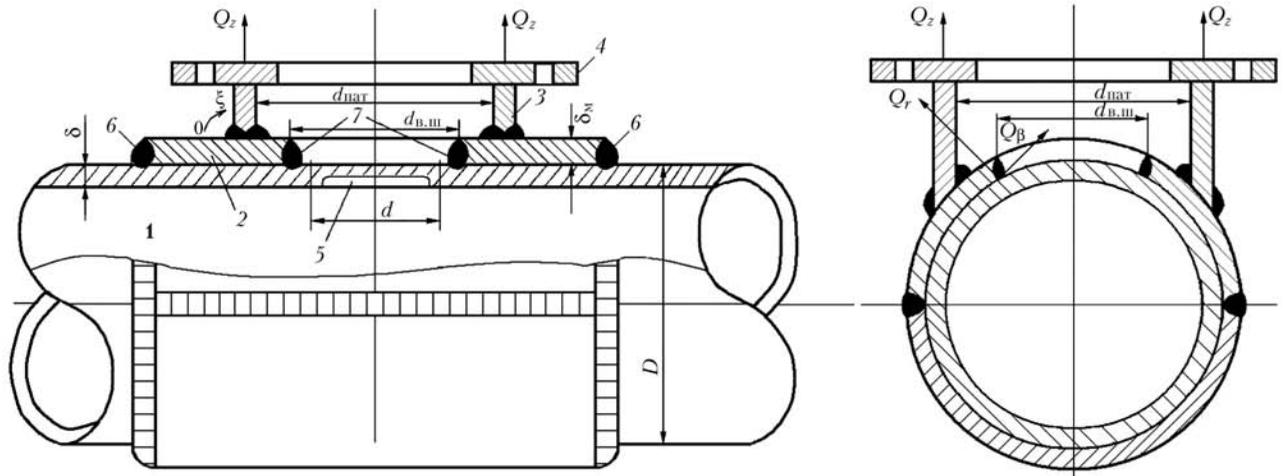


Рис. 5. Схема конструкции для удаления трещин и прочих дефектов на внутренней поверхности трубопровода под давлением: 1 — трубопровод; 2 — муфта; 3 — патрубок; 4 — фланец для крепления механического устройства удаления зоны с трещиной и глушения отвода; 5 — трещина; 6, 7 — соответственно наружные и внутренние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



Раскладывая вектор  $Q_z$  на составляющие вдоль радиуса  $r$  и окружности сварного шва  $\beta$ , получаем

$$Q_r^{\max} = Q_z^{\max} \sqrt{1 - (d/D)^2}, \quad Q_\beta^{\max} = Q_z^{\max} \frac{d}{D}. \quad (13)$$

Соответственно в вершине сварной полости, примыкающей к внутреннему шву, будут действовать моды I и II коэффициента интенсивности напряжений, определяемые величинами  $Q_r^{\max}$  для  $K_I$  и  $Q_\beta^{\max}$  для  $K_{II}$ .

Для небольших отношений  $d_{\text{пат}}/D$ , что характерно для данной процедуры ремонта внутренних трещин относительно небольшой длины, величина  $Q_r^{\max}$  незначительно отличается от  $Q_z^{\max}$  по (13), что позволяет использовать для вычисления  $K_I$  и  $\sigma_{\text{ref}}$  зависимости (8) при  $M = 0$ .

Риск спонтанного возрастания примыкающей к внутреннему шву острой полости можно определить по критерию (4) с учетом стохастичности исходных значений по  $h, K_{IC}, \sigma_T, \sigma_B$ . В табл. 2 приведены результаты такого расчета для  $D = 1420$  мм,  $\delta = 19$  мм,  $\delta_M = 28$  мм при  $d = 500 \dots 300$  мм в зависимости от катета углового шва  $\bar{h}$  при отсутствии наружных швов  $b$ . Из таблицы видно, что ремонтная конструкция для удаления трещин на внутренней поверхности трубопровода отличается достаточно высокой надежностью при соответствующем выборе сечения сварного шва  $\bar{h}$ , соединяющего муфту с трубой (см. рис. 4). Чем больше отношение  $d_{\text{пат}}/D$ , тем более высокие значения  $\bar{h}$  необходимы для требуемой надежности.

Следует отметить, что толщина стенки муфты  $\delta_M$  в пределах  $\delta \leq \delta_M \leq 1,5\delta$  незначительно влияет на вероятность отказа при отсутствии внешнего шва (см. рис. 5). При наличии последнего риск отказа конструкции будет определяться произведением соответствующих вероятностей отказа из табл. 2 с таковыми из табл. 1 при соответствующих  $\delta_M$ , т. е. риск отказа можно еще существенно снизить.

Как уже отмечалось выше, при использовании метода Монте-Карло для вычисления вероятности отказа на основе соответствующего критерия предельного состояния

$$Y = f(X) \quad (14)$$

с помощью случайных чисел  $Z$  формируется выборка комбинаций соответствующих параметров  $X$ , на основе которой строится нормированная плотность распределения  $\varphi_Y = \partial P / \partial Y$ , интегрирование которой по [8] дает значение искомой вероятности.

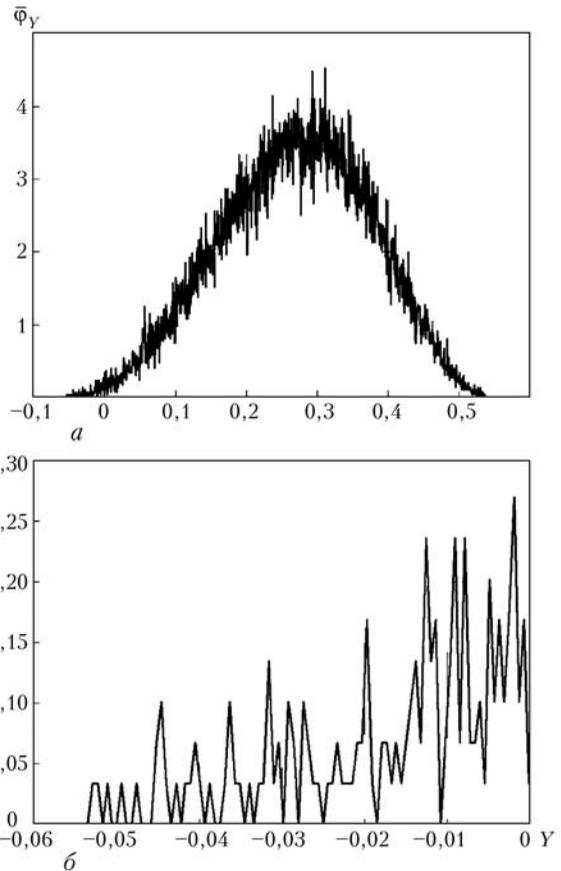


Рис. 6. Плотность распределения  $\bar{\varphi}_Y$  величины  $Y$  по критерию (4) для варианта  $d = 300$  мм,  $\bar{h} = 5,5$  мм (а) и более подробное представление «хвоста» кривой  $\bar{\varphi}_Y$  в зоне  $Y \leq 0$ , по которой определяется вероятность отказа  $\bar{P}$  (б)

В качестве иллюстрации на рис. 6 приведены плотность распределения  $\bar{\varphi}_Y$  величины  $Y$  по критерию (4) для варианта  $d = 300$  мм,  $\bar{h} = 5,5$  мм из табл. 2, полученной на основе выборки из  $N = 10^4$  комбинаций исходных параметров  $X$ , определяемых, как в работе [9], условием (6).

Современная компьютерная техника позволяет использовать величины таких выборок практически без серьезных ограничений, т. е. достоверность получаемых результатов в основном определяется достоверностью исходных параметров  $X$ , входящих в критерий предельного состояния (14). Это геометрические размеры характерных элементов (утонений, трещин, сварных швов) и механические свойства материала в зоне указанных характерных элементов. Соответствующие рекомендации по этому вопросу технической диагностики можно найти в работе [8], более детально его рассмотреть применительно к трубопроводам планируется в отдельной статье.

### Выводы

1. Ремонтные технологии для обнаруженных дефектов в магистральном трубопроводе без вывода последнего из эксплуатации представляют боль-



шой интерес для практики, но требуют для типовых случаев обоснования соответствия назначению.

2. Разработанные расчетные алгоритмы оценки риска отказа отремонтированных дефектов типа трещин на внешней и внутренней поверхностях трубопровода позволяют выстроить ремонтные технологии в ряд в зависимости от требуемого соответствия назначению.

3. Положенный в основу расчета вероятностный подход позволяет учитывать разброс исходных данных по геометрическим размерам, механическим свойствам и условиям эксплуатации соответствующим увеличением риска отказа, стимулируя получение исходных данных при технической диагностике с максимально возможной точностью.

1. *Направления развития технологий ремонта магистральных трубопроводов в условиях эксплуатации* / В. С. Бут, В. М. Василюк, Ю. Т. Федоренко, М. Н. Дрогомирецкий // Сб. тр. науч. семинара «Обеспечение эксплуатационной надежности систем трубопроводного транспорта». — Киев, 11 апр. 2006 г. — Киев, 2006. — С. 31–38.
2. *Обгрунтування нового підходу до виконання зварювальних робіт на трубопроводах під тиском* / В. С. Бут, Ю. Я.

- Грецький, В. В. Розгонюк, В. М. Коломєєв // Нафт. і газова пром-сть. — 2001. — № 4. — С. 33–39.
3. *Бут В. С., Олійник О. І.* Стратегія розвитку технологій ремонту діючих магістральних трубопроводів // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» / За ред. Б. Є. Патона. — К.: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ, 2006. — С. 491–496.
  4. *API Standart 1104.* Welding of pipelines and related facilities. Appendix II — serves welding. — Pupl. Sept. 1999.
  5. *Определение допустимых размеров сварных швов при установке тройников и муфт на действующих магистральных трубопроводах* / В. И. Махненко, В. С. Бут, Е. А. Великоиваненко и др. // Автомат. сварка. — 2003. — № 8. — С. 7–12.
  6. *Математическое моделирование язвенных дефектов на действующих нефте- и газопроводах и разработка численного метода оценки допустимых режимов дуговой заварки таких дефектов* / В. И. Махненко, В. С. Бут, Е. А. Великоиваненко и др. // Там же. — 2001. — № 11. — С. 3–10.
  7. *Fitness-for-service.* — American Petroleum Institute. Recommended Practice 579. — 2000. — 625 p.
  8. *Махненко В. И.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. — Киев: Наук. думка, 2006. — 618 с.
  9. *Махненко В. И., Великоиваненко Е. А., Олейник О. И.* Риск-анализ как средство формализации принятия решений, связанных с внеплановым ремонтом сварных конструкций // Автомат. сварка. — 2008. — № 5. — С. 5–10.
  10. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86).* — М.: Энергия, 1989. — 525 с.

Repair technologies for elimination of defects in the main pipelines require substantiation for the characteristic fitness-for-purpose cases. Appropriate calculation algorithms are developed for this purpose for determination of the risk of failure of the repaired defect, depending on its dimensions, repair method and operating conditions. The developed approach to selection of the crack repair technology is described in the work.

Поступила в редакцию 15.11.2007

## НОВАЯ КНИГА

**Неорганическое материаловедение:** Энциклопед. изд.: В 2 т. / Под ред. В. В. Скорохода, Г. Г. Гнесина. — Киев: Наук. думка, 2008. — Т.1: Основы науки о материалах / В. В. Скороход, Г. Г. Гнесин, В. М. Ажажа и др. — 1152 с.

Первый том посвящен научным основам неорганического материаловедения, что соответствует общей концепции издания, совмещающего информацию о фундаментальных принципах формирования и исследования материалов со сведениями об их свойствах, технологиях и областях применения. Впервые создан энциклопедический свод современных научных представлений о физико-химической природе твердых тел, поведении неорганических материалов под действием внешних физических полей и химических факторов, рассмотрены методы анализа, исследований и диагностики неорганических материалов.

Для научных работников, инженеров, аспирантов и студентов, специализирующихся в фундаментальных и прикладных областях современного материаловедения (металлургия расплавов, порошковая металлургия, полупроводники и материалы электронной техники, специальная керамика, оптические материалы, материалы ядерной техники, газофазные, плазменные, лазерные и электронно-лучевые технологии, техника высоких давлений, сварка, пайка и пр.).

