



ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

В. С. БУТ, канд. техн. наук, О. И. ОЛЕЙНИК, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложен структурный подход к разработке технологий ремонта магистральных трубопроводов под давлением для разных видов дефектов линейной части с применением дуговой сварки. Представлены конструктивно-технологические схемы ремонта трубопроводов и критерии выбора способов ремонта в зависимости от характера и параметров дефекта.

Ключевые слова: дуговая сварка, магистральные трубопроводы, конструктивно-технологические схемы ремонта, геометрические параметры дефектов

Украина имеет разветвленную сеть трубопроводов для транспортировки природного газа, нефти и нефтепродуктов. Протяженность магистральных трубопроводов, которые находятся под управлением НАК «Нафтогаз Украины», превышает 45 тыс. км. Основой их являются магистральные газопроводы (около 38 тыс. км) и (в меньшем объеме) магистральные нефте- и продуктопроводы,

длина которых составляет соответственно 4,7 и 3,4 тыс. км.

Трубопроводный транспорт — одна из немногих областей народного хозяйства, которая продолжает стабильно работать несмотря на кризисные явления в экономике страны. Стабильность работы трубопроводного транспорта в значительной мере обусловлена тем, что его мощность направлена преимущественно на обеспечение экспорта российских энергоресурсов через территорию Украины в третьи страны: 90 % экспорта россий-



Структурная схема разработки технологий ремонта магистральных трубопроводов под давлением

* Статья подготовлена по результатам выполнения целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» (2004–2006 гг.).

Таблица 1. Выбор способа ремонта в зависимости от характера и параметров дефекта

№ п/п	Характер дефектов и их геометрические параметры	Способ ремонта (условное обозначение)
Коррозионно-механические повреждения		
1	$h_d \leq 20 \% t_n; L_{д.п} \leq L_{кр}$	Шлифовка (П13)
2	Внешние ($20 \% t_n < h_d \leq 50 \% t_n; L_{д.п} \leq L_{кр}$)	Бандаж (П1) Композитный бандаж (П14) Компаундная муфта (П4)
3	Внутренние	Герметичная муфта (П2)
4	$50 \% t_n < h_d \leq 80 \% t_n; L_{д.п} \leq L_{кр}$	Герметичная муфта (П2) Композитный бандаж (П14) Компаундная муфта (П4)
5	$h_d > 20 \% t_n; t_{ост} \geq 5$ мм, одиночные дефекты ($S \leq 80 \times 80$ мм ² на расстоянии $4t_n$)	Заварка (П12) Заплата-муфта (П6) Композитный бандаж (П14) Компаундная муфта (П4)
6	$L \leq 100$ мм или группа расположенных рядом язв $h_d > 40 \% t_n$	Заплата-муфта (П6) Композитный бандаж (П14) Компаундная муфта (П4)
7	Протяженные дефекты в окружном направлении $h_d > 20 \% t_n; L_{д.о} \geq 1/6\pi D_n$	Герметичная муфта (П2) Двухслойная муфта (П3)
8	Коррозионно-механические повреждения в околошовной зоне кольцевого стыка ($h_d > 40 \% t_n$)	Двухслойная муфта (П3)
Расслоения		
9	Без выхода на поверхность	Бандаж (П1) Композитный бандаж (П14) Компаундная муфта (П4)
10	С выходом на поверхность	Герметичная муфта (П2)
11	В околошовной зоне кольцевого шва	Двухслойная муфта (П3) Композитный бандаж (П14)
12	В околошовной зоне продольного (спирального) шва	Композитный бандаж (П14) Герметичная муфта (П2) Компаундная муфта (П4)
13	Выпячивание	Двухслойная муфта (П3) Объемная муфта с наполнителем (П5)
Трещины		
14	$h_d < 20 \% t_n; L_{д.п} \leq 2\sqrt{D_n t_n}; h_d < 20 \% t_n; L_{д.о} < 1/6\pi D_n$	Шлифовка (П13)
15	$L \leq 150$ мм; $h_d > 20 \% t_n$	Патрубок-муфта с вырезкой дефектного участка через задвижку, кран (П9)
16	$L > 150$ мм; $h_d > 20 \% t_n$	Вырезка катушки
Дефекты геометрии трубы		
17	Гофры высотой до $5 \% D_n$	Объемная муфта с наполнителем (П5)
18	Горфы высотой до 20 мм	Двухслойная муфта (П3)
19	Вмятины глубиной до $3,5 \% D_n$	Композитный бандаж (П14) Бандаж с заполнением вмятины (П1) Компаундная муфта (П4)
20	Вмятины глубиной более $3,5 \% D_n$ и недопустимые по расчетам на прочность	Патрубок-муфта с вырезкой дефектного участка через задвижку (П9) Вырезка катушки
21	Вмятины любой глубины в сочетании с царапиной, трещиной, потерей металла	Патрубок-муфта с вырезкой дефектного участка через задвижку (П9) Вырезка катушки
22	Недопустимые по нормативной технической документации дефекты в кольцевых сварных стыках	Двухслойная муфта (П3)



№ п/п	Геометрические параметры и характер дефекта	Способ ремонта (условное обозначение)
23	Смещение кромок в кольцевом стыке трубопровода. Косой стык	Двухслойная муфта (П3)
24	Аномалия продольного шва трубопровода	Композитный бандаж (П14) Компаундная муфта (П4) Бандаж (П1)
Сквозные дефекты		
25	Технологические отверстия диаметром более 100 мм	Заплата, усиленная бандажом (П7) Патрубок-муфта (П9) Патрубок с воротником (П8)
26	Сквозные дефекты диаметром менее 50 мм (без давления в трубопроводе)	Чоп-трубопровод-бандаж (П10)
27	Сквозные дефекты диаметром менее 20 мм (под давлением в условиях эксплуатации трубопровода)	Заплата-муфта с герметиком (П11)
28	Дефекты, не подлежащие ремонту, и недопустимые конструктивные элементы или ремонтные конструкции	Вырезка катушки
<p>Примечание. h_d — глубина дефекта; d_d — диаметр дефекта; S — площадь поверхности дефекта; $L_{д.п}$ — длина дефекта в продольном направлении; $L_{д.о}$ — то же в окружном направлении; D_n — наружный диаметр трубы; t_n — номинальная толщина стенки трубы; $t_{ост}$ — остаточная толщина стенки трубы. $L_{кр}$ — критическая длина дефекта (по ANSI/ASME B.31G)</p>		

кого газа (до 120 млрд м³ в год) и ежегодный транзит нефти (свыше 30 млн т) в страны Центральной и Западной Европы и Турцию.

Благодаря постоянной работе газотранспортной и нефтепроводной систем удовлетворяются нужды Украины в энергоносителях и обеспечивается поступление валютных средств. Несмотря на то, что Россия разрабатывает новые маршруты экспорта газа, Украина с ее мощной системой магистральных газопроводов, развитой инфраструктурой и высококвалифицированными кадрами и в дальнейшем будет оставаться основной страной для транзита российского газа.

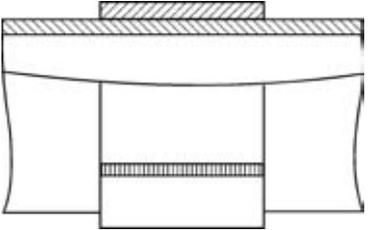
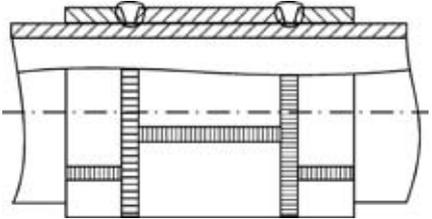
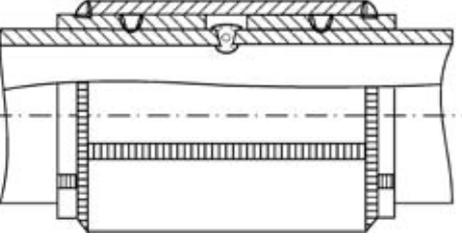
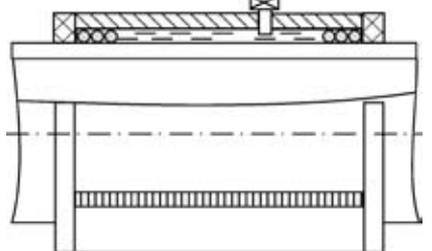
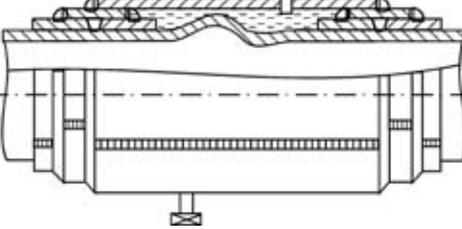
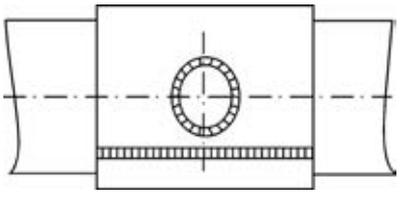
Структура газопроводов ГК «Укртрансгаз» [1] по сроку эксплуатации распределяется следующим образом: до 20 лет — 45, от 20 до 33 — 32, более 33 лет — 23 %. Больше половины всех газопроводов составляют трубопроводы диаметром не менее 720 мм, значительная часть которых относится к транзитным и магистральным газопроводам диаметром 1020...1420 мм (37 % общей протяженности трубопроводов). Что касается магистральных нефтепроводов, находящихся в подчинении АО «Укртрансгаз», то характер распределения трубопроводов по срокам эксплуатации следующий: до 10 лет — 16,7 % (795,7 км), от 10 до 20 — 4,9 % (235,4 км), от 20 до 30 — 18,6 % (885,1 км), от 30 до 40 — 42,9 % (2044 км), более 40 лет — 16,9 % (805,9 км). По диаметрам нефтепроводы распределяются следующим образом: 530, 720, 1020 мм (соответственно 13,7, 52,9 и 19,5 %).

На основе анализа распределения трубопроводов газотранспортной системы, а также магистральных нефтепроводов по срокам эксплуатации и диаметрам можно сделать вывод, что для обес-

печения непрерывной работы и рабочего состояния трубопроводов в ближайшее время понадобится выполнить большой объем восстановительных-ремонтных мероприятий.

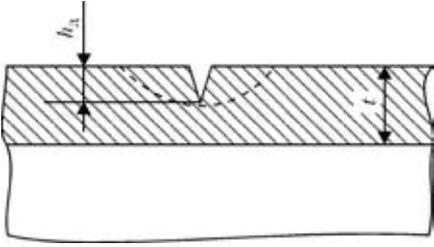
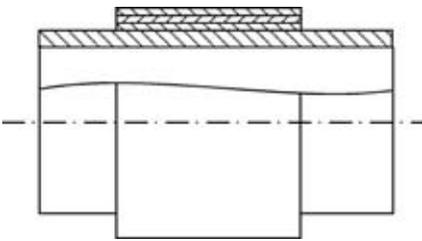
Магистральные трубопроводы зарекомендовали себя как самый безопасный, надежный и экономичный способ транспортировки газа и нефти на большие расстояния. Однако необходимость поддерживать высокий уровень готовности к аварийным ситуациям по-прежнему остается приоритетной задачей, особенно исходя из социальных, экологических и экономических последствий, которые могут возникнуть в результате потери герметичности трубопровода высокого давления. Поскольку риск таких последствий потенциально появляется с момента создания давления в трубопроводе, готовность к аварийным ситуациям актуальна на протяжении всего срока эксплуатации трубопровода. В связи с этим при каждой конкретной аварийной ситуации или выявлении недопустимых дефектов на линейной части трубопроводов необходима разработка стратегии ремонта, которая бы базировалась на ряде критериев: выборе способа ремонта, безопасности и надежности ремонтных конструкций, влиянии на окружающую среду, обеспечении непрерывности транспортировки продукта, продолжительности ремонта и его экономической целесообразности. При этом предпочтение нужно отдавать способам ремонта, осуществляемым без остановки эксплуатации трубопровода, поскольку в таком случае объем транспортировки продукта не уменьшается или уменьшается незначительно на протяжении короткого промежутка времени и не приводит к значительному материальному и экологическому ущербу.

Таблица 2. Конструктивно-технологические схемы ремонта трубопроводов

Условное обозначение	Схема ремонтной конструкции	Метод ремонта с характеристикой дефектов согласно табл. 1
П1		<p>Бандаж:</p> <ul style="list-style-type: none"> • коррозионно-механические повреждения стенки трубы глубиной до 50 % ее толщины (п. 2); • расслоения без выхода на поверхность (п. 9); • вмятины глубиной до 3,5 % D_n (п. 19)
П2		<p>Герметичная муфта с технологическими кольцами:</p> <ul style="list-style-type: none"> • коррозионно-механические повреждения стенки трубы глубиной более 50 % ее толщины (п. 3, 4, 7); • расслоения с выходом на поверхность (п. 10); • расслоения в околошовной зоне (продольные и спиральные швы) (п. 12)
П3		<p>Двухслойная муфта:</p> <ul style="list-style-type: none"> • дефектные кольцевые стыки и прилегающие к ним зоны (п. 7, 8, 11, 22, 23); • расслоения в околошовной зоне кольцевого шва (п. 11); • расслоения с выпячиванием (п. 13); • гофры высотой до 20 мм (п. 18)
П4		<p>Компаундная муфта:</p> <ul style="list-style-type: none"> • большие коррозионные повреждения и комбинированные дефекты трубопровода (п. 2, 4-6); • расслоения (п. 9, 12); • вмятины глубиной до 3,5 % D_n (п. 19); • аномалия продольного шва (п. 24)
П5		<p>Объемная муфта с наполнителем:</p> <ul style="list-style-type: none"> • гофры высотой до 5 % D_n (п. 17) • расслоения с выпячиванием (п. 13)
П6		<p>Заплата-муфта:</p> <ul style="list-style-type: none"> • группы локальных коррозионных повреждений (п. 5, 6); • муфта на имеющейся заплате



Условное обозначение	Схема ремонтной конструкции	Название ремонтной конструкции для видов дефектов согласно табл. 1
П7		Заплата, усиленная бандажом: • технологические отверстия (п. 25)
П8		Патрубок с воротником: • технологические отверстия и врезки (п. 25)
П9		Патрубок-муфта: • ликвидация трещины (п. 15); • ликвидация вмятины (п. 20, 21); • ликвидация технологических отверстий (п. 25); • присоединение отводов; • вырезка участков с трещинами (п. 15)
П10		Чоп-трубопровод-бандаж: • ликвидация отверстий (п. 26)
П11		Заплата-муфта с герметиком: • сквозные дефекты под давлением (п. 27)
П12		Заварка: • коррозионные язвы и механические повреждения (п. 5)

Условное обозначение	Схема ремонтной конструкции	Описание ремонтной конструкции для видов дефектов согласно табл. 1
П13		<p>Шлифовка:</p> <ul style="list-style-type: none"> • коррозионно-механические повреждения (п. 1); • поверхностные трещины глубиной до 20 % толщины стенки (п. 14)
П14		<p>Комбинированный бандаж:</p> <ul style="list-style-type: none"> • продольно-ориентированные механические и коррозионные повреждения труб (п. 2, 4–6); • расслоения (п. 9, 11, 12); • вмятины глубиной до 3,5 % D_n (п.19); • криволинейные поверхности трубопровода (п. 24); • аномалия продольного шва (п. 24)

Большие резервы для повышения эффективности ремонтных работ скрыты в разработке прогрессивных способов ремонта и средств, с помощью которых можно восстанавливать несущую способность труб с разными дефектами, в том числе ликвидировать сквозные дефекты на действующих трубопроводах. К таким работам можно отнести заварку коррозионных язв и раковин; усиление бандажами или герметичными муфтами линейной части трубопровода с коррозионными повреждениями; приварку катодных отводов; локальный ремонт с применением заплат-муфт; присоединение ответвлений с целью подключения новых пользователей или месторождений к основной магистрали, установки перемычек, подключения лупингов или замены протяженных дефектных участков трубопровода в условиях эксплуатации; ликвидацию дефектов в сварных кольцевых стыках трубопровода дуговой сваркой; усиление дефектных кольцевых стыков двухслойными муфтами; установку на участки с коррозионно-механическими повреждениями композитных бандажей и компаундных муфт; ремонт вмятин и гофров герметичными муфтами с заполнением самозатвердевающим раствором межтрубной пустоты; вырезку участков с вмятинами (под давлением), которые мешают прохождению очистительных и диагностирующих внутритрубных устройств; присоединение комбинированной дуговой сваркой патрубков малого диаметра с целью установки контрольно-измерительной аппаратуры.

Важная роль при выполнении ремонтно-восстановительных работ и реконструкции объектов линейной части магистральных трубопроводов отводится дуговым способам сварки. После проведения технической диагностики и выявления дефектов возникает вопрос об их классификации, а затем и о способах ремонта объектов. Поэтому одной из первоочередных задач является обеспечение исполнителей сварочных работ на действующих трубопроводах ведомственной нормативно-технической документацией, разработанной с учетом передового опыта эксплуатации магистральных трубопроводов, достижений научно-технического прогресса в области создания новой техники и технологий, а также международных требований и стандартов. Необходимо также создание программы обучения сварщиков и руководителей сварочных работ, а также их аттестация на допуск к выполнению восстановительного ремонта с применением дуговой сварки на трубопроводах под давлением.

В качестве примера классификации дефектов и их структурного распределения ниже приведены результаты диагностирования технического состояния магистральных газопроводов ГК «Укртрансгаз» (25 % трубопроводов всего объема) с помощью интеллектуального поршня фирмы «Rozen» [2]. Так, потери металла более 60 % толщины стенки трубы равны 0,9 %; 41...60 % — 5 %; 20...40 % — 45,5 %. Дефекты кольцевых швов составляют 10,8 %, поверхностных — 11 %, продольных — 7 %, спиральных 0,9 %, дефекты



основного металла — 11,1 %, неклассифицированные — 7 %; аномальные виды дефектов — 0,8 %. Видно, что наибольшее количество дефектов приходится на потери (вынос) металла. В кольцевых сварных стыках выявлены недопустимые, согласно нормативным документам ВСН 006-89 и ВСН 012-88, дефекты, а также те, которые заложены во время строительства магистральных газопроводов (около 1 % всех выявленных дефектов). Обнаружено также множество поверхностных дефектов в сварных швах (12 %) и внутренних типа расслоения (11 %) в основном металле.

На основе анализа характера и геометрических параметров выявленных дефектов предложен структурный подход к разработке технологий восстановления несущей способности линейной части магистральных трубопроводов под давлением с применением дуговой сварки (рисунок). Здесь способы ремонта сгруппированы по видам дефектов и целевому назначению. Для каждого вида определены безопасные условия выполнения дуговой сварки на трубопроводе под давлением с учетом их рабочих параметров и физико-химических свойств окружающей среды [3], после чего определены условия обеспечения технологической и конструктивной прочности сварных соединений [4]. Учитывая, что в большинстве технических решений применяется новый тип сварного соединения — нахлесточно-стыковое, необходимо разработать технологию контроля качества таких соединений на базе ультразвуковой дефектоскопии.

Разработанные способы ремонта действующих магистральных трубопроводов следует отнести к ресурсосберегающим технологиям, с помощью которых можно повысить безопасность восстановительных работ и снизить техногенную нагрузку на окружающую среду за счет уменьшения выбросов экологически вредных соединений углерода.

В табл. 1, 2 представлены конструктивно-технологические решения ремонта магистральных трубопроводов и условия их применения в зависимости от характера и геометрических параметров дефектов.

В настоящее время в системе ГК «Укртрансгаз» действуют три технологические инструкции и разработаны ведомственные строительные нормы, которые регламентируют ремонт линейной части магистральных нефтепроводов. Суммарный экономический эффект от применения некоторых способов ремонта (заварка язв, установление герметичных и компаундных муфт, усиление дефектных стыков двухслойными муфтами) на магистральных газо- и нефтепроводах под давлением превысил 16 млн грн.

Разработаны программы обучения и аттестовано 42 руководителя сварочных работ и приблизительно 80 сварщиков ГК «Укртрансгаз» и АО «Укртранснафта» на допуск к выполнению ремонтных работ на магистральных трубопроводах под давлением.

1. *Обґрунтування* нового підходу до виконання зварювальних робіт на трубопроводах під тиском / В. С. Бут, Ю. Я. Грецький, В. В. Розгонюк, В. М. Коломій // Нафт. і газова пром-сть. — 2001. — № 4. — С. 33–39.
2. *Напрямки* розвитку технологій ремонту магистральних трубопроводів в умовах експлуатації / В. С. Бут, В. М. Василюк, Ю. Т. Федоренко, М. Н. Дрогомирецький // Науч.-практ. сем. «Обеспечение эксплуатационной надежности систем трубопроводного транспорта», г. Киев, 11 апр. 2006 г. — Киев, 2006. — С. 31–38.
3. *Математическое* моделирование язвенных дефектов на действующих нефтегазопроводах и разработка многочисленного метода оценки допустимых режимов дуговой заварки таких дефектов / В. И. Махненко, В. С. Бут, Е. А. Великоиваненко и др. // Автомат. сварка. — 2001. — № 11. — С. 3–10.
4. *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. // Там же. — 2003. — № 8. — С. 7–12.

A structural approach to development of repair technologies with application of arc welding of the main pipelines under pressure for different defects of the linear part is proposed. Design-technological schematics of pipeline repair and criteria for repair technique selection, depending on defect nature and parameters, are given.

Поступила в редакцию 19.02.2007