



ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРЕЗНЫХ ТРОЙНИКОВ ПРИ РЕМОНТЕ И РЕКОНСТРУКЦИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

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

Изучено влияние толщины стенок соединительных элементов, внутреннего давления во время установки и расстояния между кольцевыми швами, соединяющими тройник с трубопроводом, на геометрические размеры указанных швов. Построены номограммы для определения допустимого давления при гидравлических испытаниях полученных сварных узлов в зависимости от длины устанавливаемого тройника и жесткости трубопровода. Приведены примеры внедрения конструктивно-технологических решений.

Ключевые слова: магистральные трубопроводы, разрезные тройники, кольцевые сварные швы, внутреннее давление, гидравлические испытания, жесткость оболочек, внедрение технологических разработок

Безопасность эксплуатации магистральных трубопроводов и их надежная бесперебойная работа обеспечивается соответствующими мероприятиями как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации. Среди эксплуатационных мероприятий большое значение в этом направлении имеет соответствующая организация периодической технической диагностики состояния элементов магистрального трубопровода и ремонта обнаруженных недопустимых дефектов. На территории Украины эксплуатируются около 42000 км магистральных трубопроводов. Согласно статистике при периодической диагностике состояния трубопроводов выявляется около 5000–6000 дефектов на каждые 100 км длины. Значительная часть обнаруженных дефектов является недопустимой и требует ремонта. Классический ремонт трубопровода, связанный с его остановкой, очисткой и заменой дефектных участков, требует больших расходов средств и сопровождается значительными экологическими нарушениями, поэтому во всем мире интенсивно развиваются методы ремонта трубопроводов без выведения их из эксплуатации. Для Украины такие методы имеют особенно важное значение, учитывая достаточно высокую концентрацию населения в зоне прокладки магистральных трубопроводов и их протяженность. Данной проблемой занимается целый ряд научных и производственных организаций страны, среди которых следует отметить Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Ивано-Франковский национальный тех-

нический университет нефти и газа, ДК «Укртрансгаз».

Одним из направлений развития ремонтных технологий является разработка конструктивно-технологических решений и оборудования, позволяющих присоединять отводы с целью подключения к основной магистрали новых потребителей или мелких месторождений, а также замены протяженных дефектных участков трубопровода без вывода его из эксплуатации за счет подключения временной магистрали (байпаса) на период выполнения ремонтных работ.

Конструктивно-технологические схемы. При замене дефектных участков (рис. 1) магистральных трубопроводов, как правило, используется байпас и четыре разрезных тройника. В случае подключения байпаса используются переход-

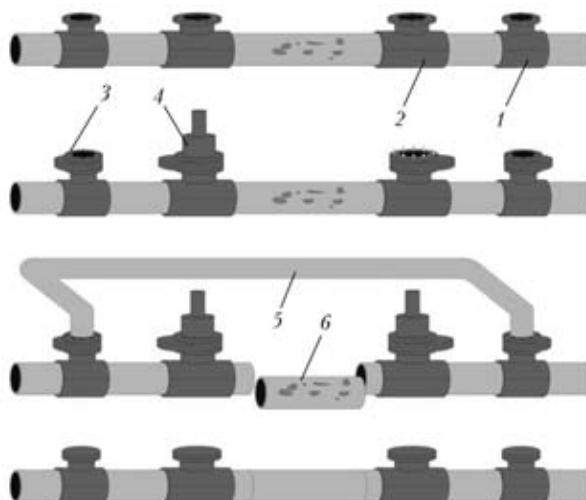


Рис. 1. Схема замены дефектных участков магистральных трубопроводов: 1, 2 — соответственно переходный и равнопроходный тройник; 3 — плоская заслонка; 4 — перекрывающее устройство; 5 — байпас; 6 — дефектный участок

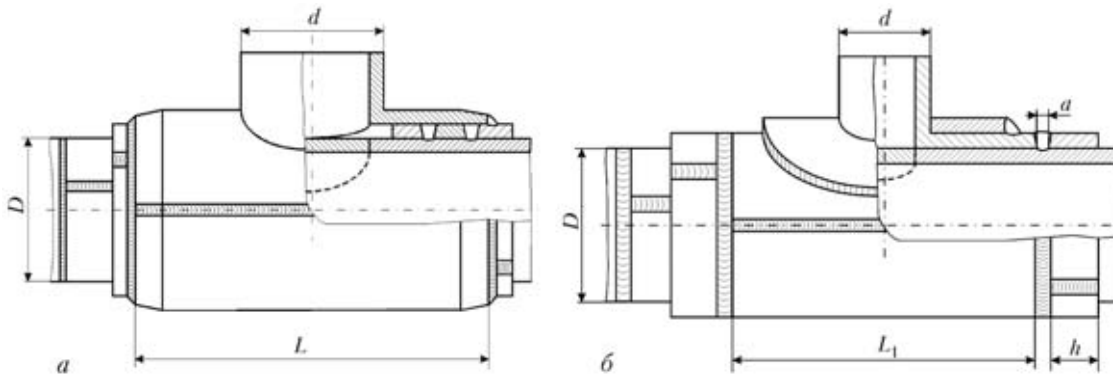


Рис. 2. Схемы разрезных тройников: *a* — равнопроходный; *б* — переходный (*D* и *d* — наружные диаметры соответственно трубы и отвода трубопровода; *a* — ширина зоны сплавления кольцевого шва с трубой; *L* — длина разрезного тройника; *L*₁ — расстояние между кольцевыми швами; *h* — ширина технологического кольца

ные тройники с соотношением диаметров $d/D \leq 0,7$, которые устанавливаются непосредственно на трубопровод с технологическими кольцами. Для установки перекрывающих устройств применяются равнопроходные тройники (соотношение $d/D = 1$), которые собираются на трубопроводе с промежуточными переходными технологическими кольцами. Их количество определяется в зависимости от геометрических параметров трубопровода. Схема установки таких разрезных тройников на трубопроводе с помощью сварки и их конструкции приведены на рис. 2.

В отличие от технологий, предлагаемых компаниями TDW и «British Gas», в данном случае разрезные тройники привариваются к трубопроводу под давлением с использованием нахлесточно-стыковых соединений [1], а не угловых. Это дает ряд преимуществ. Диапазон допустимых тепловложений при сварке нахлесточно-стыковых соединений имеет более широкие пределы, чем просто при наплавке или выполнении угловых швов, что в свою очередь позволяет регулировать параметры и свойства металла ЗТВ. В связи с этим повышается безопасность проведения сварочных работ на трубопроводе под давлением [2] и надежность полученных сварных соединений при эксплуатации. Экспериментально установлено, что для сварных соединений, выполненных по предложенной схеме, напряжения среза и сопротивление изгибу значительно выше, чем для традиционных соединений с угловыми швами.

Кроме того, переход от соединений с угловым швом к нахлесточно-стыковым повышает предел выносливости сварных узлов при повторно-статическом нагружении более чем на 50 %. Это объясняется снижением уровня напряжений в зоне сплавления шва со стенкой трубы за счет локального ограничения изгибных деформаций нагружаемого конструктивного элемента.

В Украине для отводов с соотношением диаметров $d/D \leq 0,5$ применяется схема подключения байпасных линий через сварной узел патрубков-

муфта (рис. 3). Такая схема запатентована в Украине и России. В состав конструкции входит разрезная муфта, в одной из частей которой вырезано отверстие под патрубок, который приваривается к трубопроводу через предварительно наплавленный многослойный валик и соединяется с муфтой угловым швом.

Устанавливать сварной узел патрубков-муфта можно с целью подключения новых потребителей или мелких месторождений углеводородных продуктов к основной магистрали, а также для вырезки трещиноподобных дефектов в стенке трубопровода под давлением. Вырезка отверстия в трубопроводах, как правило, выполняется механическим способом с использованием корончатой фрезы через шаровой кран или плоскую задвижку [3].

Расчет кольцевых сварных швов. Сварные соединения разрезных тройников с трубопроводом в процессе эксплуатации испытывают различные по характеру нагрузки, обусловленные изменением внутреннего давления в трубопроводе, колебаниями температуры окружающей среды, сдвигами грунтов и т. п. При этом возникает потребность в определении необходимых и достаточных размеров несущей части кольцевых сварных швов (ширины зоны сплавления шва, который

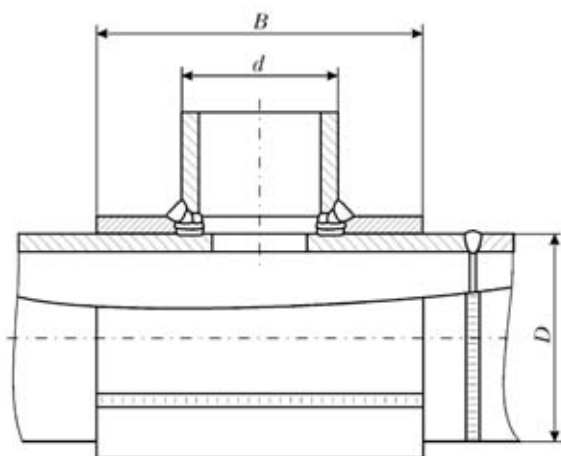


Рис. 3. Схема узла патрубков-муфта: *B* — ширина разрезной муфты



соединяет тройник с трубопроводом) для того, чтобы они имели возможность выдерживать все нагрузки во время эксплуатации трубопровода.

В работе [4] рассмотрено несколько сценариев установки разрезных тройников на трубопроводе под давлением и без него, а также разные условия выполнения отверстий в действующем трубопроводе. Кроме того, исследовано влияние конструктивного оформления сварных соединений тройников с трубопроводом (угловое и нахлесточно-стыковое) на предельные значения геометрических параметров сварных швов. Расчетами по определению несущей способности таких соединений было подтверждено преимущество предложенных нахлесточно-стыковых соединений.

В настоящей работе ставилась задача определить предельные геометрические размеры кольцевых швов в нахлесточно-стыковых сварных соединениях тройника с трубопроводом в зависимости от внутреннего давления при установке и последующем снижении давления до нуля.

Для определения необходимых размеров несущей части сварных швов в зависимости от разных исходных параметров и условий сварки использовали математический алгоритм, разработанный на основе критериев механики разру-

шения. Он дает возможность оценить и спрогнозировать работоспособность разных конструктивных схем, используемых для присоединения оболочечных элементов к трубопроводу, с учетом наличия естественного концентратора напряжений в виде межслойного зазора 2ρ (острой полости), которая образуется при установке оболочек на поверхность трубы и их сваривании кольцевыми швами.

Согласно работам [4, 5], предельное состояние сварных соединений при статической нагрузке определялось двухпараметрическим критерием хрупковязкого разрушения материала.

При решении упругопластической задачи по определению минимально допустимых указанных выше размеров сварных швов, согласно методике [4], были приняты следующие допущения: рассматривали осесимметричный случай; пренебрегли влиянием пластических деформаций вблизи вершины острой полости; не учитывали также напряжения, обусловленные термическим циклом сварки.

Для расчетов использовали следующие исходные данные: материал трубопровода — трубная сталь типа 17Г1С; модуль упругости $E =$

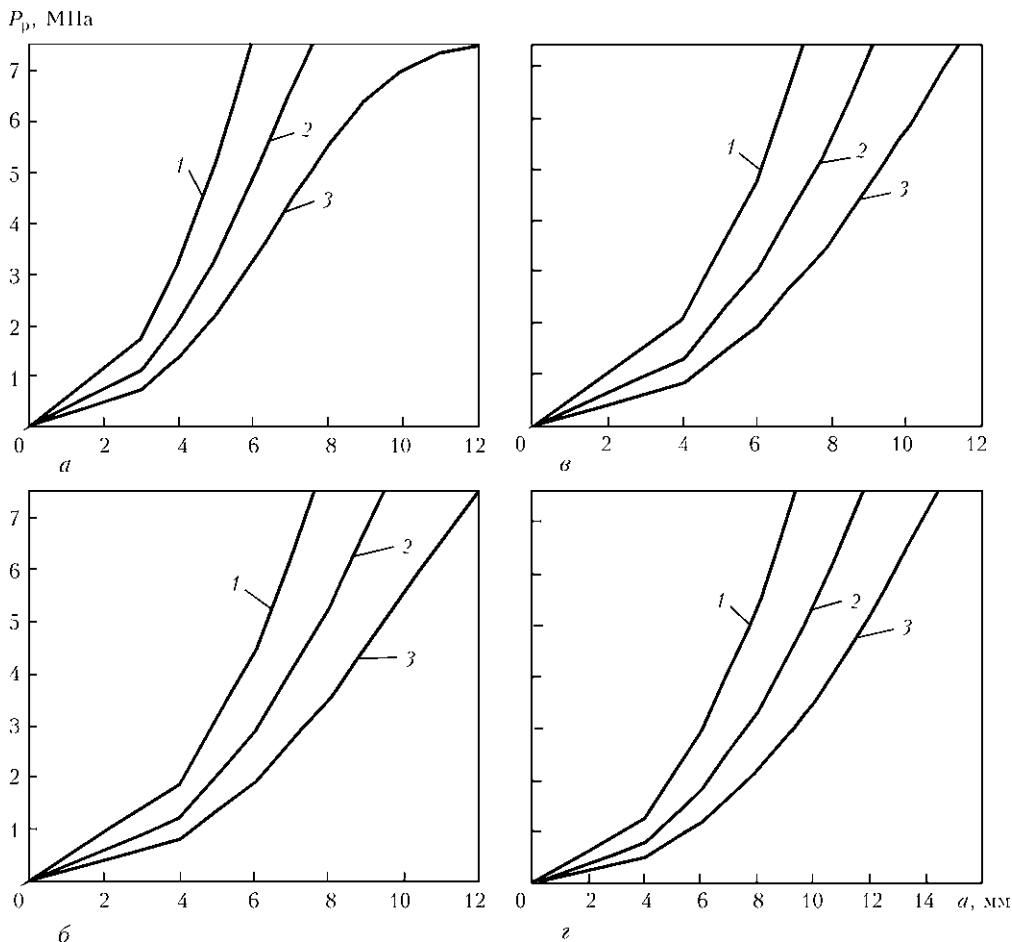


Рис. 4. Зависимость расчетной ширины зоны сплавления a кольцевого шва от внутреннего давления P_p в момент установки тройника: а, в — $t_2/t_1 = 1$; б, г — 2; а, б — $t_1 = 10$; в, г — 16 мм; 1 — Ду 700; 2 — Ду 1000 при $L_1 = 1000$ мм; 3 — Ду 1400 мм

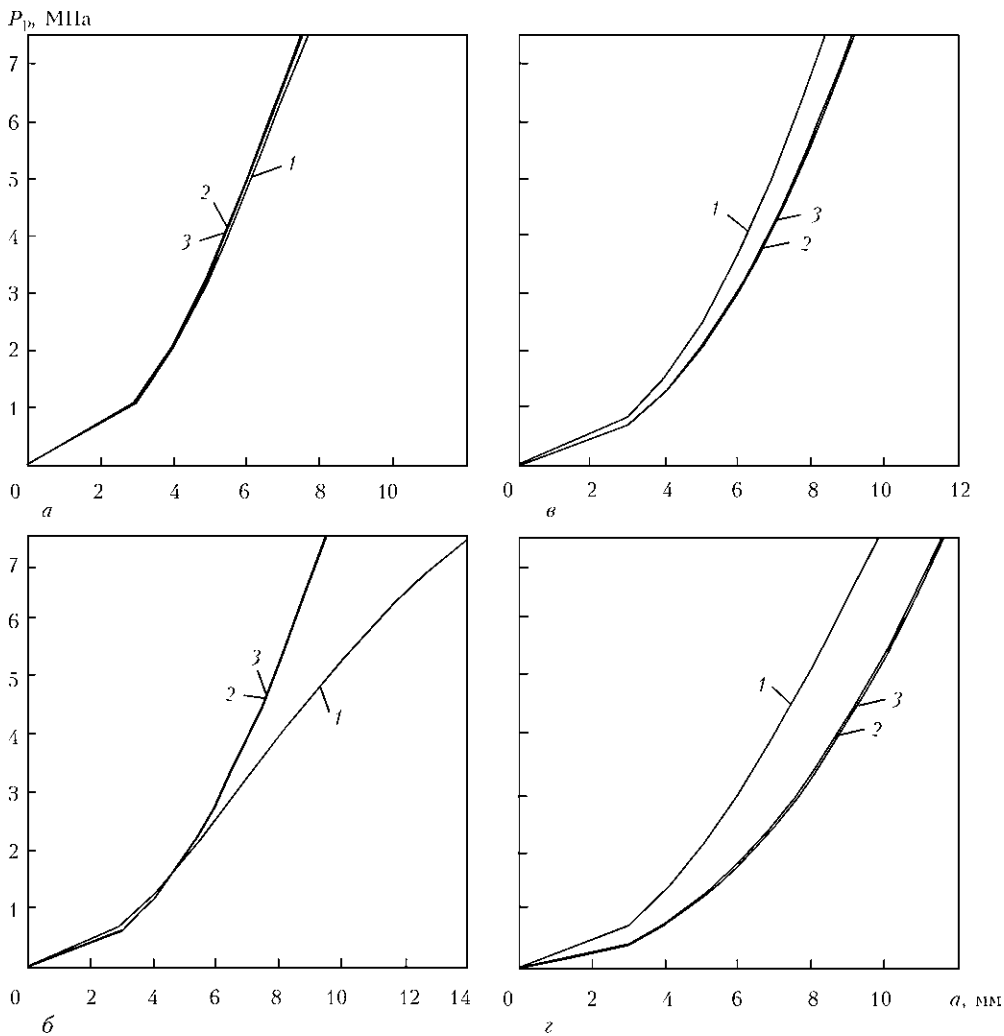


Рис. 5. Зависимость расчетной ширины a зоны сплавления кольцевого шва от внутреннего давления P_p в момент установки тройника для трубы Ду 1000 мм: $a, в$ — $t_2/t_1 = 1$; $б, г$ — 2; $а, б$ — $t_1 = 10$ мм; $в, г$ — 16; 1 — $L_1 = 200$; 2 — 500; 3 — 1000 мм

$= 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; $\sigma_T = 360$ МПа; $\sigma_B = 510$ МПа.

Материал сварных соединений по свойствам близок к основному металлу, за исключением величины K_{IC} . С целью получения консервативных оценок допустимых размеров сварного шва с учетом достаточно широкого разброса экспериментальных данных для металла шва принимали $K_{IC} = 1500 \dots 1000$ МПа·мм^{1/2}.

Результаты расчетов относительно размеров a для конкретных геометрических параметров трубопроводов и разрезных тройников представлены на рис. 4, 5. При этом учитывалось соотношение толщины их стенок и внутреннее давление в трубопроводе во время установки разрезных тройников.

Из рисунков видно, что с увеличением диаметра трубопровода значение a возрастает, причем наиболее интенсивно при давлении, близком к эксплуатационному. Повышение толщины стенки тройника требует больших предельных значений a . Например, при соотношении $t_2/t_1 = 1,0$ (t_2, t_1 — соответственно толщина стенки тройника и

трубы) для трубы Ду 700×10 мм $a = 6$, для трубы Ду 1000×10 мм — 7,5 мм. При соотношении $t_2/t_1 = 2$ критические размеры изменяются: для трубы Ду 700×10 мм $a = 7,5$, для Ду 1000×10 мм — 9,5 мм.

С повышением толщины стенок соединяемых элементов расчетные значения a значительно возрастают (рис. 4, в, г). Из рассмотренного видно, что с повышением жесткости тройника во всех случаях ширина кольцевых швов a (зона сплавления со стенкой трубопровода) имеет значительные размеры, особенно при установке его при рабочем давлении в трубопроводе. Это приводит к большому объему сварочных работ во время монтажа указанной конструкции. Поэтому для оптимизации технологического процесса и обеспечения надежной работоспособности сварных узлов необходимо снижать (по возможности) внутреннее давление в трубопроводе перед установкой разрезных тройников.

Для получения качественной картины влияния жесткости соединяемых элементов на геометрические параметры кольцевых сварных швов

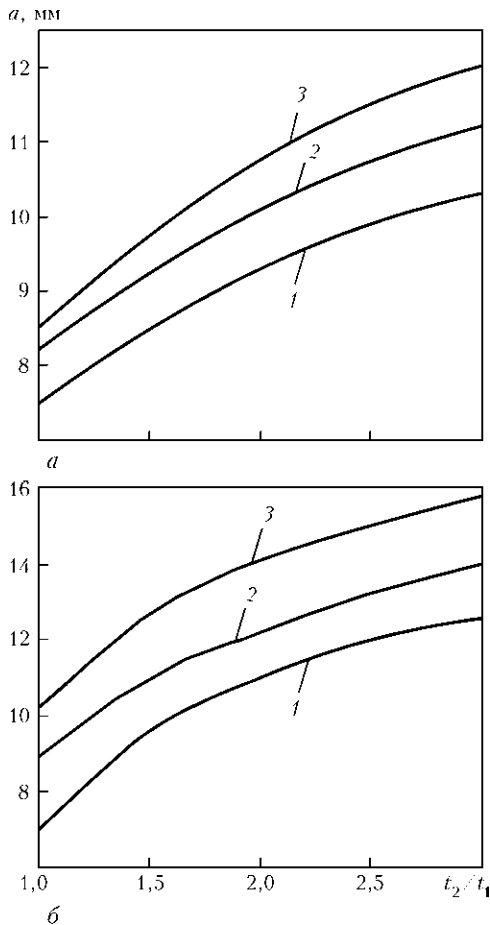


Рис. 6. Влияние толщины стенки тройника t_2 при фиксированной толщине стенки трубы t_1 для трубопровода Ду 700 мм на значения a при $P_p = 5,5$ МПа, $K_{IC} = 1000$ МПа·мм^{1/2}: а — $\sigma_T = 360$; б — 440 МПа; 1 — $t_1 = 10$; 2 — 12; 3 — 14 мм

были построены графические зависимости для ряда вариантов установки тройников с разным соотношением толщины стенок на трубопроводах Ду 700 мм и Ду 1000 мм при давлении 5,5 МПа, а также с учетом прочностных характеристик металла соединяемых конструктивных элементов. Из рис. 6 видно, что в целом сохраняется зависимость ширины кольцевого шва a от жесткости тройника для обоих диаметров трубопровода, т. е. увеличение толщины стенки разрезных тройников, которые устанавливаются на действующий трубопровод, приводит к возрастанию расчетной компоненты a . При этом чем больше толщина стенки трубопровода, тем выше значение a . Относительно влияния диаметра трубопровода следует отметить, что для трубы Ду 1000 мм значения a выше, чем для Ду 700 мм, на 20...30 %. Кроме того, повышение прочностных характеристик металла трубопровода приводит к увеличению указанной расчетной ширины зоны сплавления кольцевого шва с трубой.

Таким образом, при разработке технологии сварки разрезных тройников на действующих трубопроводах, когда задаются геометрические параметры кольцевых сварных швов, которые рассчи-

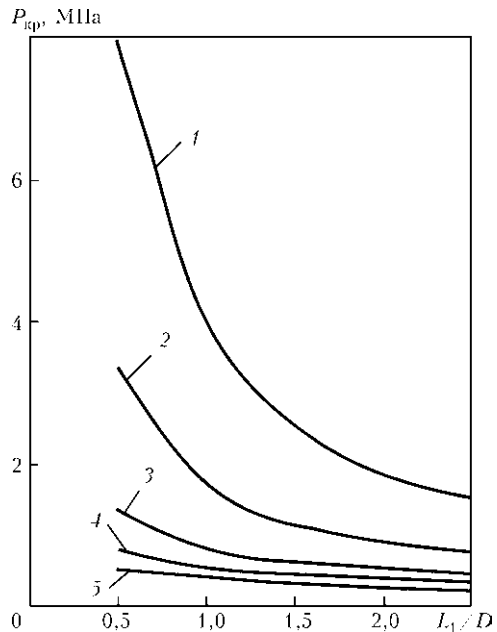


Рис. 7. Зависимость критического давления $P_{кр}$ от соотношений геометрических параметров трубы L_1/D : $\bar{l} = D/t_1 = 40$; 2 — 60; 3 — 80; 4 — 100; 5 — 120

тываются для конкретного случая, необходимо ориентироваться в первую очередь на то, что толщина стенок трубопровода и тройника является исходными данными, а изменять можно только внутреннее давление в трубопроводе в сторону уменьшения на время монтажа конструктивного элемента.

Определение допустимых параметров гидравлических испытаний сварного узла на герметичность и прочность. При выполнении работ по присоединению отводов к магистральным трубопроводам под давлением, кроме физических методов контроля, предусмотрены испытания сварных соединений тройника с трубопроводом на прочность и герметичность, которые выполняются перед вырезкой отверстия. При этом уровень испытательного давления, которое создается водой или инертным газом между стенками трубы и тройника, колеблется в пределах $1,0...1,5 P_p$, где P_p — рабочее давление. В некоторых случаях оговаривают, чтобы испытательное давление равнялось давлению в трубопроводе.

Согласно нормативным документам, трубопровод перед вводом в действие должен быть подвергнут гидравлическим испытаниям при давлении, которое создает напряжение в его стенке около $0,95 \sigma_T$. Как известно, эффективность испытаний с целью оценки прочности и выявления дефектов в узлах трубопровода повышается с увеличением нагрузки. Однако при этом необходимо придерживаться предельных значений давления и деформаций.

При установке уровня испытательного давления для сварных соединений тройника с трубопроводом нужно учитывать возможность потери ус-

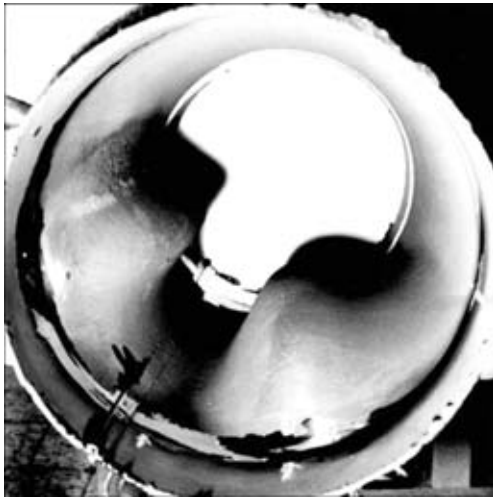


Рис. 8. Потеря устойчивости внутренней оболочки (выпячивание) во время испытания внутренним давлением

стойчивости стенки магистральной трубы, поскольку расчетная толщина стенки тройника значительно превышает толщину стенки основной трубы.

Верхнее критическое внешнее давление, при котором происходит выпячивание стенки трубы внутрь, определяется формулой из работы [6]

$$P_{кр} = \frac{D^* R^*}{n^2 - 1} \left\{ \left(\frac{\pi^2}{l^2} + \frac{n^2}{R^2} \right)^2 + \frac{1}{R^4} \left[1 - 2 \left(\mu \frac{\pi^2 R^2}{l^2} + n^2 \right) \right] \right\} + \frac{Et_1}{R} \frac{\pi^4}{l^4} \frac{1}{\left(\frac{\pi^2}{l^2} + \frac{n^2}{R^2} \right)^2 (n^2 - 1)}, \quad (1)$$

где $D^* = D - t_1$ — срединный диаметр трубы; $R^* = 0,5 D^*$; l — длина трубы, в данном случае расстояние между кольцевыми нахлесточно-стыковыми швами L_1 . Коэффициент n рассчитывается по формуле

$$n = \sqrt[4]{6\pi^2 \sqrt{1 - \mu^2}} \frac{R^*}{\sqrt{t_1}} \sqrt[4]{\frac{R^*}{t_1}}. \quad (2)$$

На рис. 7 представлена зависимость критического давления, при котором происходит потеря устойчивости стенки трубы, рассчитанного по формуле (1) с учетом приведенного коэффициента от соотношения геометрических параметров отрезка трубы, ограниченного двумя кольцевыми сварными швами тройника с трубопроводом.

Заметно, что с увеличением диаметра трубопровода при одинаковой толщине стенки значение внешнего давления, которое вызывает потерю устойчивости стенки трубы, уменьшается. Подобное происходит и при увеличении длины тройника.

Экспериментальные исследования, проведенные на стендах, которые имитируют реальную конструкцию соединения тройника с трубопро-



Рис. 9. Присоединение отвода Ду 150 мм к магистральному газопроводу «Союз» Ду 1400 мм, находящемуся под внутренним давлением 4,9 МПа

водом, подтверждают достоверность потери устойчивости внутренней оболочки при давлении, значительно меньшем, чем нужно для опрессовки внешней оболочки. Так, для оболочки диаметром 320 мм с толщиной стенки 3 мм длиной 600 мм потеря устойчивости происходит при внешнем давлении 1,8 МПа, что хорошо согласуется с расчетными данными. Выпячивание внутрь трубы вдоль образующей происходит внезапно при достижении давления $P_{кр}$. Потом происходит пластическая деформация металла в месте выпячивания без последующего увеличения нагрузки. При этом прогиб к центру кривизны увеличивается и возможно возникновение других вмятин (рис. 8).

Нарушение герметичности кольцевых сварных соединений наблюдалось только при значении ширины зоны сплавления шва со стенкой трубы $a < 2$ мм и значительных угловых деформациях.

Таким образом, гидравлическим методом почти невозможно обнаружить дефекты в сварных соединениях тройника с трубопроводом, поскольку испытательное давление $P_{исп}$ в межтрубном пространстве не должно превышать внутреннее $P_{внутр}$ в трубопроводе на значение критического давления $P_{кр}$, которое вызывает потерю устойчивости внутренней оболочки ($P_{исп} - P_{внутр} < P_{кр}$). Как показал анализ расчетов, при выполнении сварочно-монтажных работ на трубопроводе со снижением внутреннего давления до 30 % P_p , испытание на герметичность сварных соединений может выполняться при рабочем давлении ($P_{исп} = P_p$).

Внедрение разработок. На основании результатов научных исследований и экспериментальных работ, выполненных Институтом электросварки им. Е. О. Патона совместно с ДК «Укртрансгаз» и ОАО «Укртранснафта», были разработаны Инструкция по присоединению отводов к магистральным газопроводам и ВБН В.3.1-0001.3741-07-2007 «Магистральні нафтопроводи. Методи ремонту дефектних ділянок». В указанных нормативно-технических документах предусматривается: конструктивно-технологическая схема узла присоединения отвода; подготовка и контроль участка тру-



бопровода; последовательность монтажа конструктивных элементов на трубопроводе; технология выполнения сварных соединений и контроль их качества ультразвуковым методом; техника безопасности проведения ремонтных работ.

На объектах ДК «Укртрансгаз» выполнено внедрение технологии присоединения отводов к магистральным газопроводам с использованием сварного узла патрубков–муфта. Так, с целью газификации прилегающих населенных пунктов в УМГ «Львовтрансгаз» были выполнены работы по подключению четырех распределительных газопроводов Ду 200 мм к основной магистрали Ду 1400 мм, а в УМГ «Прикарпаттрансгаз» — один газораспределительный трубопровод низкого давления Ду 150 мм к магистральному газопроводу Ду 1400 мм (рис. 9).

Анализ технического состояния магистральных трубопроводов Украины подтверждает необходимость в разработках современных методов их ремонта и реконструкции без вывода из эксплуатации. Значительный объем ремонтных технологий разработан для восстановления несущей способности линейной части трубопроводов с коррозионно-механическими повреждениями и недопустимыми дефектами в кольцевых стыках трубопроводов под давлением. Эти технологии нашли широкое применение на объектах ДК «Укртрансгаз» и ОАО «Укртрансгаз».

Актуальной остается проблема замены протяженных дефектных участков магистральных трубопроводов или присоединение отводов в условиях эксплуатации, для реализации которых применяются разрезные тройники.

С целью обеспечения работоспособности конструкций расчетным методом определены минимально допустимые геометрические размеры кольцевых швов в нахлесточно-стыковых сварных соединениях тройников с трубопроводом в зависимости от внутреннего давления во время установки разрезного тройника с учетом возможной аварийной остановки перекачки продукта и сброса давления до нуля.

Установлено, что с повышением диаметра трубопровода ширина кольцевых швов увеличивается при давлении, близком к эксплуатационному.

Аналогичное влияние оказывает увеличение толщины стенки тройника. На размеры кольцевых швов значительно влияют соотношение толщин соединяемых элементов и в меньшей степени прочностные характеристики металла, из которого изготовлены трубы. Учитывая, что толщина стенки разрезных тройников значительно превышает таковую в трубопроводе, при установке их на трубопроводе с рабочим внутренним давлением расчетная ширина кольцевых швов должна иметь большие значения. Это приводит к большому объему сварочных работ во время монтажа указанной конструкции. Поэтому для оптимизации технологического процесса и обеспечения надежной работоспособности сварных узлов необходимо снижать внутреннее давление в трубопроводе перед установкой разрезных тройников.

Гидравлические испытания на герметичность сварных соединений тройника с трубопроводом показали, что испытательное давление не должно превышать внутреннее на значение критического давления, при котором возможна потеря устойчивости стенки трубы, заключенной между двумя кольцевыми швами.

1. Бут В.С., Грецкий Ю.Я., Розгонюк В.В. Обгрунтування нового підходу до виконання зварювальних робіт на трубопроводах під тиском // Нафт. і газ. пром-сть. — 2001. — № 4. — С. 33–39.
2. Математическое моделирование язвенных дефектов в действующих нефте- и газопроводах и разработка численного метода оценки допустимых режимов дуговой заварки дефектов / В. И. Махненко, В. С. Бут, Е. А. Великоиваненко и др. // Автомат. сварка. — 2001. — № 11. — С. 3–10.
3. Якубек П. Монтаж тройников и фитингов «Г. Д. Вильямсон» на действующий трубопровод // Сварочные и родственные технологии при строительстве, реконструкции и ремонте газонефтепроводов: Материалы междунар. конф., г. Москва, 22–23 нояб. 2007 г. — М., 2007.
4. Определение допустимых размеров сварных швов при установке тройников и муфт на действующих магистральных трубопроводах / В. И. Махненко, В. С. Бут, Великоиваненко и др. // Автомат. сварка. — 2003. — № 8. — С. 7–12.
5. Assessment of integrity of structures containing defects / I. Milne, R. A. Ainsworth, A. R. Dowling, A. T. Stewart // CEBG Report R/H/R6, Revision 3, Apr. 1986.
6. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. — М.: Наука, 1967. — 984 с.

The effect of thickness of walls of the connecting elements, internal pressure during installation, and distance between the circumferential welds that connect a tee-joint with a pipeline on geometric dimensions of the above welds was studied. Nomograms were plotted to determine allowable pressures in hydraulic tests of the resulting welded joints, depending upon the length of an installed tee-joint and rigidity of a pipeline. Examples of application of the design and technological solutions are given.

Поступила в редакцию 21.05.2009