



## РАЗВИТИЕ В УКРАИНЕ ТЕХНОЛОГИЙ РЕМОНТА ДУГОВОЙ СВАРКОЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В. С. БУТ, О. И. ОЛЕЙНИК

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Для снижения материально-финансовых и экологических потерь, присущих классическому способу ремонта магистральных трубопроводов, связанного с их остановкой, во всем мире применяются способы, позволяющие ремонтировать магистрали без вывода из эксплуатации. В статье рассмотрены направления развития в ИЭС им. Е.О. Патона технологий восстановления несущей способности дефектных участков магистральных трубопроводов под давлением с применением дуговой сварки. Проведен анализ особенностей применения дуговой сварки на трубопроводах под давлением и определены пути устранения неблагоприятных факторов. Показано влияние сварочного нагрева на прочностные характеристики металла труб и определены безопасные условия заварки коррозионных дефектов в зависимости от теплофизических свойств транспортируемого продукта и величины внутреннего давления. Представлен оригинальный конструктивно-технологический подход к выполнению ремонтных работ с применением дуговой сварки, реализуемый на действующих магистральных трубопроводах Украины. Дана экспериментально-теоретическая оценка преимущества использования нахлесточно-стыковых сварных соединений перед традиционными с угловыми швами. Приведены результаты исследований поляризационно-оптическим способом коэффициентов концентраций напряжений в местах сопряжения наплавленного металла с основным для различных видов нагрузки образцов-имитаторов. Применение нахлесточно-стыковых соединений позволяет: расширить диапазон тепловложений при дуговой сварке; управлять размерами, структурой и свойствами металла зоны термического влияния; снизить концентрацию в местах сопряжения кольцевых швов с трубопроводом и тем самым повысить предел выносливости сварных соединений усиливающих конструкций при повторно-статической нагрузке. Разработаны и внедрены нормативно-технические документы, регламентирующие ремонт магистральных трубопроводов под давлением с применением дуговой сварки, а также показаны примеры практического использования наиболее эффективных конструктивных решений. Библиогр. 23, рис. 10, таблица.

*Ключевые слова:* магистральные трубопроводы, дуговая сварка, нахлесточно-стыковые сварные соединения, давление, безопасные условия сварки, тепловложение, прочностные характеристики, коэффициент концентрации напряжений, усиливающие конструктивные элементы, предел выносливости

Современные магистральные трубопроводы — это дорогие сооружения из низколегированных сталей повышенной прочности, рассчитанные на длительный срок эксплуатации — не менее 30 лет. Поэтому во всем мире к их надежной работе предъявляются высокие требования.

Безопасность эксплуатации магистральных трубопроводов (МТ) обеспечивается соответствующими мерами и средствами как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации. Среди эксплуатационных мер большое значение имеет соответствующая организация периодической технической диагностики состояния элементов МТ и ремонта выявленных недопустимых дефектов.

Классический ремонт трубопровода, включающий его остановку, очистку и замену дефектных участков, требует больших материальных и финансовых затрат, а также сопровождается значительным экологическим ущербом. В связи с этим в конце двадцатого века во всем мире начали развиваться технологии ремонта МТ без вывода из эксплуатации, и в первую очередь, ориентируясь на дуговые способы сварки.

**Особенности применения дуговой сварки на трубопроводах под давлением.** Известно, что наиболее технологичным в исполнении и надежным в эксплуатации является соединение, полученное с помощью дуговой сварки. Однако во время выполнения сварочных работ на действующем трубопроводе существует опасность сквозного проплавления или чрезмерного разогрева стенки трубы сварочной дугой, что может привести к ее разрушению внутренним давлением.

Результаты испытаний, проведенных в лаборатории Британской газовой компании, показали, что благоприятные условия для разрушения стенки трубы внутренним давлением во время сварки низководородными электродами создаются при достаточно высоком тепловложении [1]. Так, при наплавке кольцевых швов на трубе с толщиной стенки 4,7 мм и с действующими в ней окружными напряжениями  $\sigma_\theta$  на уровне  $0,72\sigma_T$ , разрушение происходило при погонной энергии сварки превышающей 2,62 кДж/мм. С уменьшением толщины стенки трубы до 3,2 мм вероятность ее разрушения возрастает даже при незначительном теплов-

ложении (менее 1,51 кДж/мм), а в случае выполнения швов вдоль образующей — менее 0,52 кДж/мм. При этом регистрируется значительный разброс результатов испытаний, особенно при сварке продольных швов. Все это говорит о высокой степени опасности выполнения сварочных работ на трубопроводах под давлением.

Характер изменения прочностных характеристик некоторых трубных сталей в зависимости от температуры нагрева, а также возможность выполнения дуговой сварки на трубопроводе при разных параметрах внутреннего давления и тепловложения достаточно хорошо изучены [2–4]. В указанных работах установлено, что нагрев низколегированных сталей марок 14ХГС, 17Г1С, Х60 до температуры выше 400 °С приводит к резкому снижению прочности, а при температурах, превышающих 720 °С, она приближается к нулю (рис. 1).

Полученные данные свидетельствуют о том, что во время сварки на трубе под давлением необходимо стремиться к минимальному проплавлению ее стенки и к уменьшению зоны разогрева до критической температуры. Определены допустимые размеры зоны термического влияния (ЗТВ) вдоль образующей при дуговой сварке на трубопроводах разного диаметра [5, 6]. Установлено, что с увеличением диаметра трубопровода критические размеры зоны разогрева до предельной температуры повышаются. Однако в целом, эти размеры незначительны (рис. 2), что ограничивает возможности дуговой сварки при наплавке вдоль образующей трубопровода.

В работе [5] для определения несущей способности трубы под давлением в процессе дуговой сварки вдоль образующей ориентировались на методику расчета труб с поверхностными коррозионными повреждениями [7], поскольку характер разрушения труб в том и другом случае идентичен. Вопрос был лишь в том, какие параметры зоны разогрева сварочной дугой можно принять за размеры условного поверхностного дефекта, ориентированного вдоль образующей трубы. В одном случае можно было принять размер зоны разогрева стенки трубы до температуры плавления (размер сварочной ванны), в другом — до температуры выше 720 °С, при которой прочностные характеристики металла находятся на очень низком уровне. Кроме того, что важно на практике, эту зону легко определить визуально на макрошлифах по ЗТВ. Проведенные испытания показали, что экспериментальные данные (рис. 3) расположены значительно ниже расчетных значений для поверхностного дефекта с параметрами сварочной ванны и несколько выше значений, полученных для дефектов с размерами зоны разогрева до температуры 720 °С. И как было установлено,

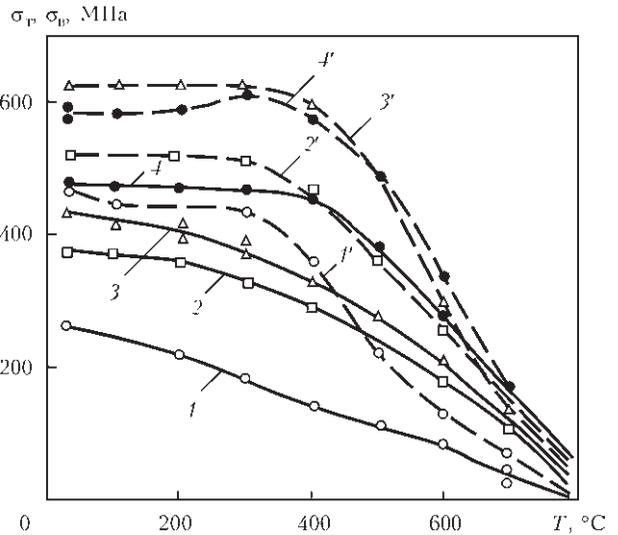


Рис. 1. Влияние температуры нагрева на прочностные характеристики исследуемых сталей: 1, 1' — сталь 20; 2, 2' — 14ХГС; 3, 3' — 17Г1С; 4, 4' — Х60; 1–4 —  $\sigma_t$ ; 1'–4' —  $\sigma_b$

введение соответствующего поправочного коэффициента отклонения продольного сечения зоны разогрева от прямоугольной формы позволяет получить хорошее совмещение экспериментальных данных с расчетными.

Следует также отметить, что стремление выполнять дуговую сварку на небольших токах противоречит требованиям получения металла ЗТВ приемлемой твердости. Как известно из работы [8], существует высокая вероятность образования холодных трещин в сварных соединениях с твердостью металла в ЗТВ выше HV 350. Во многих странах ряд нормативных документов [7, 9, 10] регламентирует выполнение многослойных угловых швов при монтаже муфт и тройников на действующих трубопроводах. При этом максимальная твердость металла ЗТВ формируется у внешних швов на трубе вследствие охлаждающе-

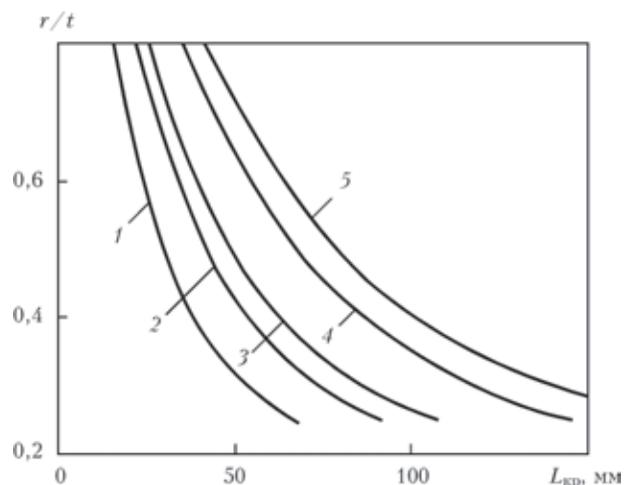


Рис. 2. Допустимые размеры зоны разогрева  $L_{кр}$  до критической температуры при сварке вдоль образующей, размеры трубы, мм: 1 — 325×8; 2 — 530×9; 3 — 720×9; 4 — 1020×12; 5 — 1220×14;  $r$  — максимальная глубина зоны разогрева стенки трубы до 720 °С;  $t$  — толщина стенки трубы

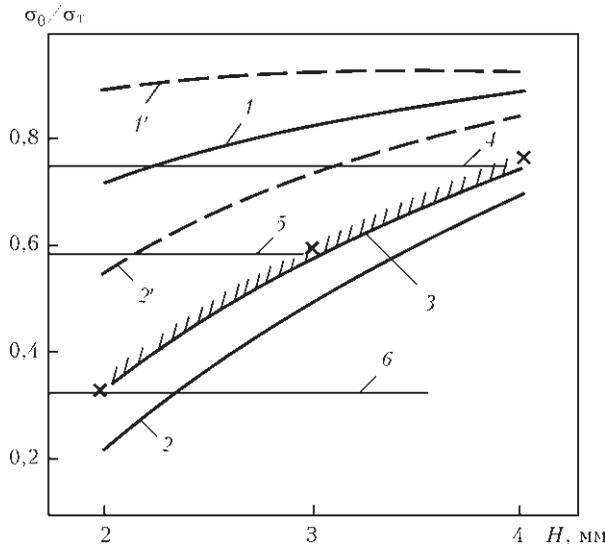


Рис. 3. Относительный уровень разрушающих окружающих напряжений ( $\sigma_{\theta}/\sigma_t$ ) в зависимости от толщины непроплавленной перемычки  $H$ : 1, 1' — условный дефект формы сварочной ванны; 2, 2' — условный дефект с сечением зоны разогрева до  $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3 — экспериментальные данные; 4–6 при  $P = 12; 9,2; 5,3\text{ МПа}$ ; 1–6 — коэффициент формы дефекта  $C = 1,0$ ; 1', 2' —  $C = 2,3$

го действия транспортируемого продукта. И эта твердость тем выше, чем больше скорость перекачивания продукта и выше эквивалент углерода металла труб  $C_{\text{экв}}$ . Так, в работе [11] установлено, что при прокачке газа (170 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ ) по трубопроводу из стали с  $C_{\text{экв}} = 0,4$ , твердость металла в ЗТВ достигала  $HV\ 415$ , в то время как при нулевом отборе —  $HV\ 285$ .

Кроме того, проблема сварки угловых кольцевых швов связана с образованием жесткого напряженного состояния в местах соединения тройника с трубопроводом. При наличии внутреннего давления эти сварные соединения становятся уязвимыми под действием механических деформаций.

Во время сварки кольцевых швов тепло, которое выделяется, быстро отводится транспортируемым продуктом, и это может привести к образованию закалочных структур типа мартенсита в металле ЗТВ. Поэтому в зону сварки необходимо подавать дополнительное тепло в течение длительного времени. Чаще всего на практике применяют ручные пропановые горелки, которые разогревают ограниченные участки трубы до температуры  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Сварку проводят до тех пор, пока температура в зоне нагрева не снизится до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Потом снова — подогрев и следующая сварка.

Экспериментальные исследования Кифнера [12] подтверждают вероятность появления подвальных трещин в угловых сварных соединениях вследствие образования закалочных структур в металле ЗТВ, наличия растягивающих напряжений и диффузионно-подвижного водорода. Для снижения риска образования холодных трещин

Кифнер предлагает применять предварительный и сопутствующий подогрев, а также использовать низководородные электроды.

Учитывая очень небольшой период пребывания разогретых участков трубопровода в интервале приемлемых температур (около  $2 \dots 5$  мин) при использовании газопламенного нагрева [12], в последнее время активно стали внедряться другие источники тепла, такие как электронагреватели и индукторы. Индукционный способ нагрева и электронагреватели опробованы в многочисленных экспериментах и успешно применяются при проведении ремонтных работ на МТ под давлением, позволяя выполнять сварку в условиях беспрепятственного подогрева [13].

С целью повышения безопасности сварочных работ на действующих трубопроводах и получения возможности управлять структурой и свойствами металла ЗТВ, а также повышения надежности и работоспособности сварных соединений усиливающих конструктивных элементов с трубопроводами авторами [6, 14] был предложен новый конструктивно-технологический подход с использованием нахлесточно-стыковых соединений. Обоснование такого подхода будет изложено ниже.

**Обоснование необходимости разработки нормативных документов Украины по ремонту действующих магистральных трубопроводов.** Еще в конце 1980-х гг. академик Б. Е. Патон оценил актуальность и перспективу создания ремонтных технологий на основе применения дуговой сварки для восстановления несущей способности линейной части МТ и обеспечения надежной и бесперебойной работы транспортной системы. Первым шагом в этом направлении были экспериментальные исследования по определению безопасных условий выполнения сварки на трубе с внутренним давлением [5].

Кроме того, в эти годы остро стоял вопрос газификации сел и поселков городского типа, расположенных вблизи ранее построенных транзитных магистральных газопроводов, транспортировку газа по которым нельзя было остановить ни на минуту. Поставленная перед сотрудниками ИЭС им. Е. О. Патона задача была успешно решена за счет разработки и внедрения вначале способа присоединения отводов к МТ на основе применения энергии взрыва и биметаллического переходника [15], а затем более простого и более надежного способа присоединения отвода дуговой сваркой [5].

После распада СССР и получения независимости, Украине досталась в наследство разветвленная сеть трубопроводов для транспортировки газа, нефти и нефтепродуктов. Общая длина только магистральных трубопроводов, которые находятся в сфере управления НАК «Нафтогаз Украины» превы-

шает 42 тыс. км. Их основная составляющая часть — магистральные газопроводы (более 36 тыс. км).

Учитывая значительные сроки эксплуатации трубопроводов, все актуальнее становится проблема обеспечения эффективной и бесперебойной работы трубопроводного транспорта. Для ее решения необходимо, в первую очередь, усовершенствовать существующие и создать новые безопасные и надежные способы выполнения работ при ремонте и техническом обслуживании МТ. Чтобы избежать финансово-материальных и экологических убытков, присущих классическому способу ремонта МТ, во всем мире развиваются способы ремонта без вывода их из эксплуатации. Для Украины такие способы имеют особое значение, учитывая высокую концентрацию населения в зоне расположения магистральных газопроводов, высокую цену на газ и необходимость безусловного выполнения контрактных обязательств поставки газа потребителям как внутри страны, так и за рубеж.

Кроме того, назрела необходимость создания национального нормативного документа, который позволяет систематизировать подход к выполнению ремонтно-восстановительных работ на МТ под давлением с соблюдением условий безопасности и сохранения экологии окружающей среды, а также обеспечения высокого качества, оперативности и культуры производственного цикла в соответствии с современным уровнем технологий.

Проведенная с помощью интеллектуального снаряда фирмы «Rozen» диагностика технического состояния магистральных газопроводов ПАО «Укртрансгаз» показала, что наибольшее количество выявленных дефектов относится к поверхностным коррозионным повреждениям стенки трубопровода — «вынос металла». 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 % [16]. В кольцевых сварных стыках зафиксированы недопустимые, согласно требованиям ВСН 006-89 и ВСН 012-88 дефекты, которые не были выявлены при строительстве магистральных газопроводов. Количество их составляет более 11 % от всех выявленных дефектов. Обнаружено 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 комплексный подход к разработке технологий восстановления несущей способности линейной части магистральных газопроводов (ЛЧМГ) под давлением с применением дуговой сварки [14, 17]. Спо-

собы ремонта сгруппированы по видам дефектов и целевому назначению. Для каждой группы определяются безопасные условия выполнения дуговой сварки на МТ под давлением с учетом рабочих параметров и теплофизических свойств транспортируемого продукта. Затем определяются условия обеспечения технологической и конструкционной прочности сварных соединений предлагаемых усиливающих конструкций.

**Экспериментально-аналитическая доказательная база преимуществ предложенных конструктивно-технологических решений.** Как указывалось ранее, почти половину выявленных дефектов на ЛЧМГ составляют поверхностные коррозионные повреждения локального характера. И, естественно, для ликвидации таких отдельных дефектов наиболее простой и эффективной является наплавка дуговым способом. С целью математического обоснования безопасных условий выполнения дуговой наплавки на трубопроводах под давлением решалась нестационарная задача теплопроводности [18] с учетом конвективного теплообмена на внутренней поверхности стенки трубы в зависимости от транспортируемой среды (газ, нефть). Результаты расчета критических значений разрушающих давлений для труб из стали 17Г1С разного диаметра представлены в виде графических зависимостей (рис. 4, 5). Из этих данных видно, что для нефтепровода (рис. 4) величина разрушающего давления монотонно растет с ростом толщины металла в месте сварки до определенных пределов, выше которых рассмотренный механизм разрушения (пластическая неустойчивость) не реализуется, поскольку резко снижается средняя температура по толщине указанной перемычки. Уменьшение диаметра завариваемой каверны приводит к снижению допустимой толщины перемычки при одном и том же давлении.

Для газопроводов наблюдается аналогичная картина (рис. 5), однако здесь процесс усложняется из-за высокой интенсивности теплообмена между стенкой и транспортируемой средой при низких давлениях, что приводит к немонотонному изменению критического разрушающего давления в зависимости от толщины перемычки.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что при заварке отдельных коррозионных дефектов на МТ под давлением вероятность разрушения перемычки зависит в первую очередь от толщины металла в месте сварки, а также от скорости транспортируемого продукта и его теплофизических свойств, и величины внутреннего давления.

Для восстановления несущей способности ЛЧМГ с обширными коррозионными повреждениями, трещиноподобными дефектами, недопу-

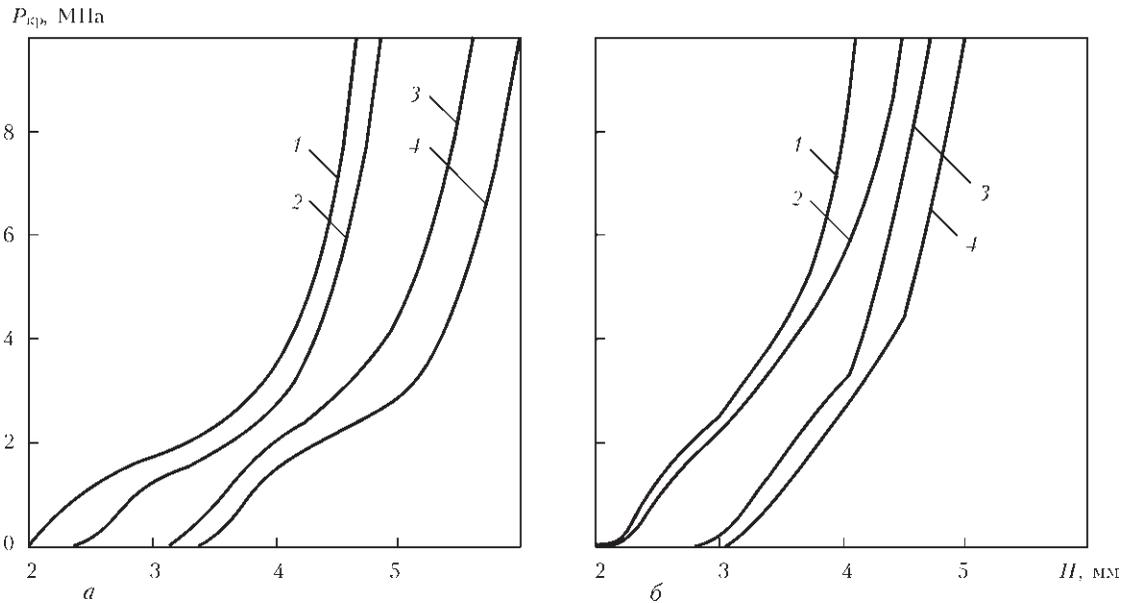


Рис. 4. Зависимость критического давления  $P_{кр}$  от толщины перемычки  $H$  при заварке каверн  $d = 20$  (а) и 12 мм (б) в трубе нефтепровода 1020×11 мм: 1, 2 —  $I_{св} = 90$ ; 3, 4 — 140 А; 1, 3 — скорость транспортировки нефти  $W = 6$ ; 2, 4 — 2 м/с

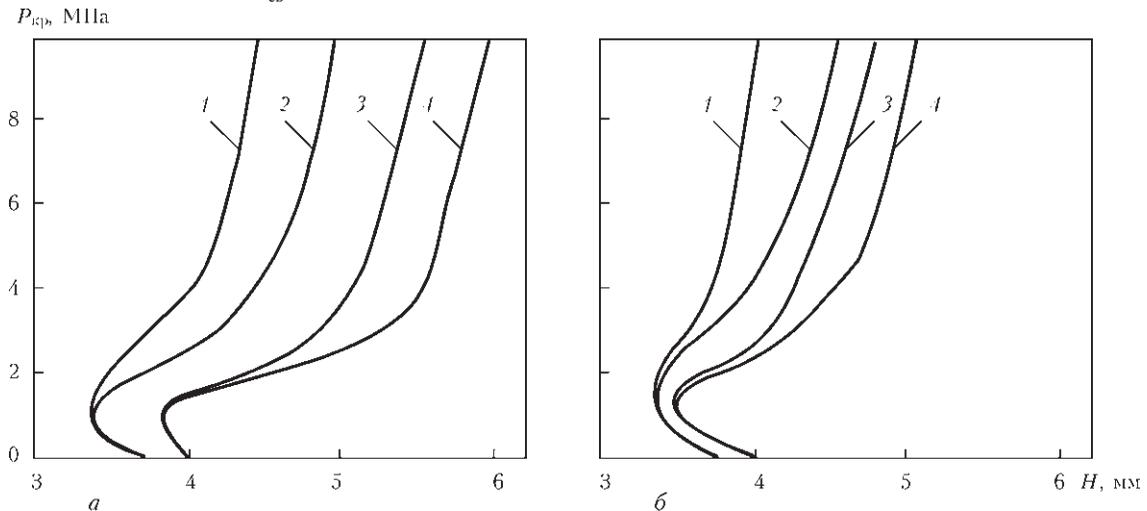


Рис. 5. Зависимость  $P_{кр}$  от  $H$  при заварке каверн  $d = 20$  (а) и 12 мм (б) в трубе газопровода 1420×18 мм (см. обозн. на рис. 4)

стимыми дефектами в сварных швах предложены конструктивные решения, базирующиеся на применении нового типа сварного соединения – нахлесточно-стыкового [6]. Как показали исследования, новый оригинальный конструктивный подход к выполнению ремонтных работ на МТ под давлением позволяет значительно повысить тепловложение при сварке, сохраняя безопасные условия ее проведения. Только сквозной прожог стенки может привести к разгерметизации трубопровода — что на практике маловероятно, поскольку кольцевые швы усиливающих муфт выполняются на участках трубопроводов с толщиной стенки не менее 5 мм [1].

Применение дополнительных технологических колец в нахлесточных соединениях муфты с трубопроводом за счет усиливающего эффекта позволяет оптимизировать напряженно-деформированное состояние сварных соединений как от действия собственных сварочных напряже-

ний, так и от внутреннего давления (рис. 6). А от уровня и характера распределения напряжений в сварных соединениях зависит их несущая способность и работоспособность в целом при повторно-статическом нагружении.

Исследования напряженно-деформированного состояния образцов угловых и нахлесточно-стыковых соединений с использованием поляризационно-оптического способа при различных видах нагрузки [19] показали, что во всех случаях большая концентрация напряжений наблюдается в местах сопряжения наплавленного металла с основным в угловых сварных швах (таблица). Полученные данные хорошо коррелируют с результатами испытаний образцов-имитаторов с различным конструктивным оформлением швов на сопротивление усталости при повторно-статическом внецентровом растяжении [5]. Применение нахлесточно-стыковых сварных соединений позволяет повысить предел выносливости сварных образцов

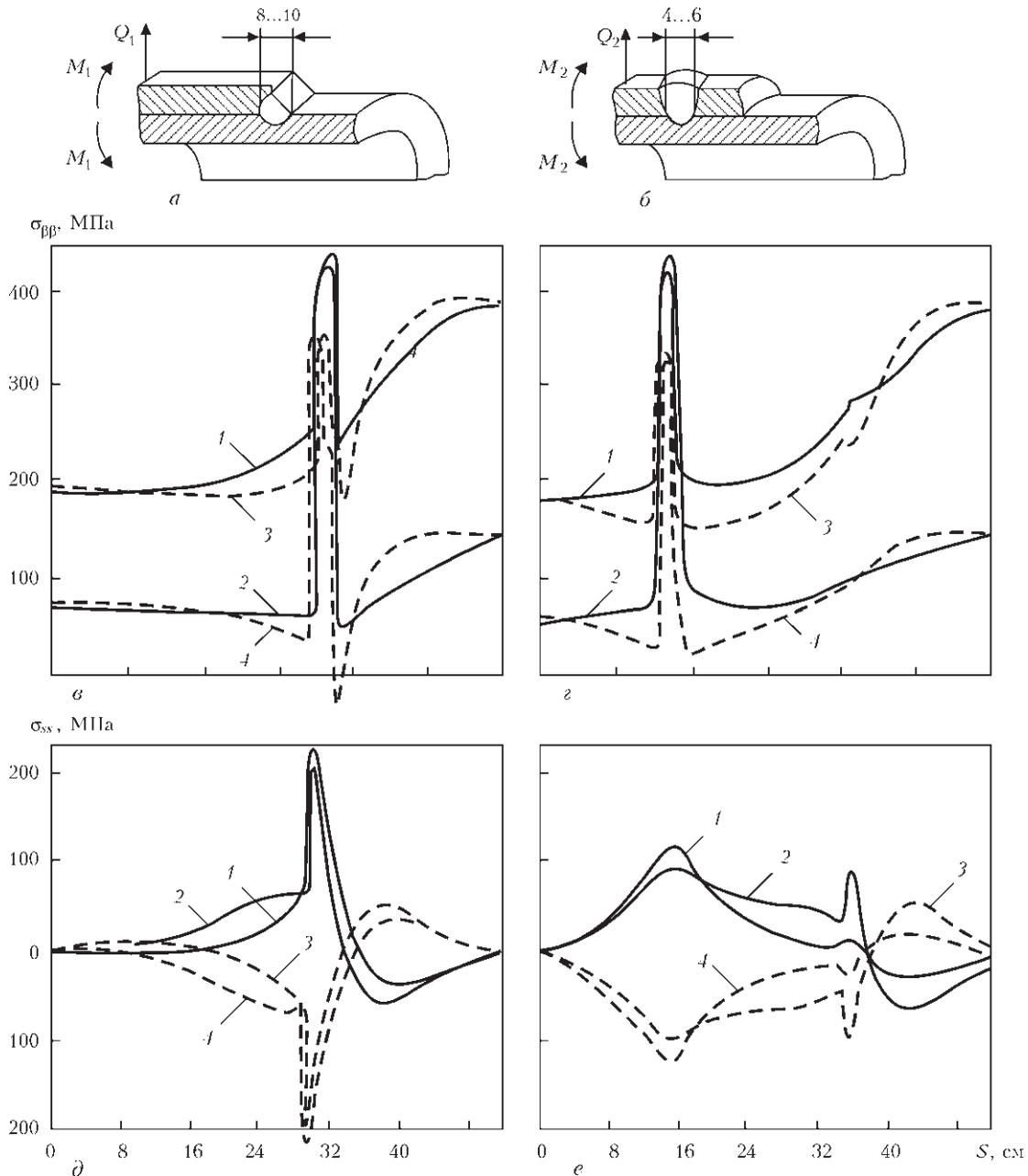


Рис. 6. Влияние конструктивного оформления на напряженно-деформированное состояние сварного соединения: а — соединение с угловым швом; б — нахлесточно-стыковое; в, з — распределение продольных остаточных сварочных напряжений  $\sigma_{вв}$  при внутреннем давлении 2,0 (2, 4) и 5,5 МПа (1, 3); д, е — распределение аналогичных поперечных напряжений  $\sigma_{сс}$ : 1, 2 — наружная поверхность стенки трубы; 3, 4 — внутренняя (S — длина исследуемого участка)

в 1,5 раза по сравнению с соединениями с угловыми швами (рис. 7).

В дополнение к вышеизложенному, выполнение сварочных работ на трубопроводах под давлением с использованием нахлесточно-стыковых соединений позволяет управлять размерами, структурой и свойствами ЗТВ. Это приводит к уменьшению вероятности образования холодных трещин и склонности ме-

**Результаты расчета концентрации напряжений  $\alpha_\sigma$**

Вид нагрузки образца	Угловое соединение	Нахлесточно-стыковое соединение
Растяжение	2,0...2,3	1,8...2,0
Трехточечный изгиб	1,6...1,8	1,2...1,3
Консольный изгиб	2,5...3,0	1,2...1,5

талла ЗТВ к хрупкому разрушению. В этом случае возможна полная автоматизация дуговой сварки при присоединении усиливающих элементов к действующим трубопроводам [17].

В связи с изложенным выше, предложен целый ряд конструктивно-технологических решений для восстановления несущей способности линейной части МТ с обширными коррозионными повреждениями без остановки транспорта продукта [20, 21].

Наиболее характерными примерами использования нахлесточно-стыковых сварных соединений в усиливающих конструкциях являются герметичная и двухслойная муфты (рис. 8). Последние

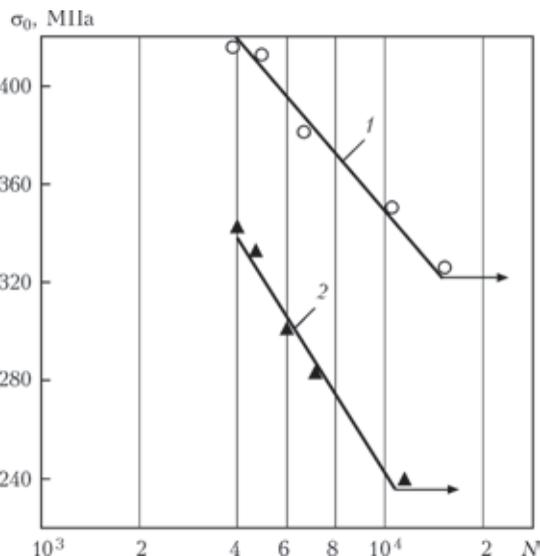


Рис. 7. Результаты испытаний сварных образцов при внеосевом повторно-статическом нагружении: 1 — угловое; 2 — нахлесточно-стыковое соединение;  $\sigma_0$  — предел выносливости образца;  $N$  — циклическая долговечность

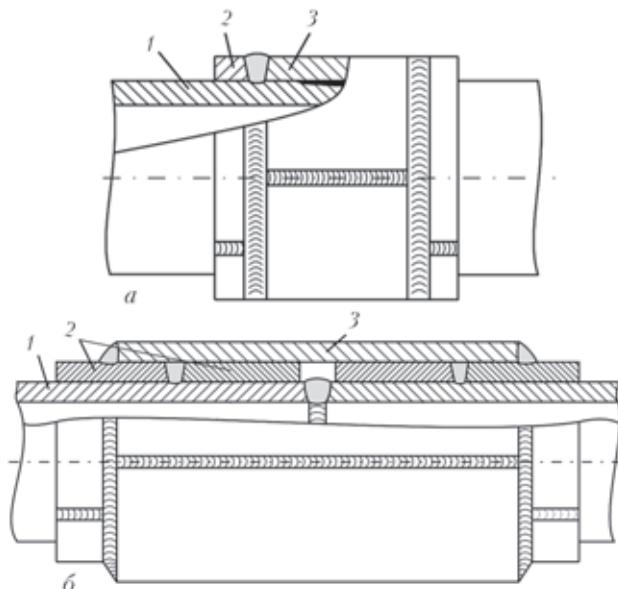


Рис. 8. Конструктивно-технологические схемы ремонта МТ под давлением с использованием нахлесточно-стыковых сварных соединений: а — герметичная; б — двухслойная муфта; 1 — трубопровод; 2 — технологические кольца; 3 — муфта

применяются для усиления дефектных кольцевых стыков трубопроводов, к большей части которых относятся замыкающие стыки-«захлесты» при строительстве.

Особо следует остановиться на рассмотрении конструкции с применением самотвердеющего компаунда на основе полиуретанового клея (рис. 9). По мнению авторов такое техническое решение носит универсальный характер и имеет значительные преимущества перед герметичными муфтами, устанавливаемыми непосредственно на трубопровод и образующими острый concentra-

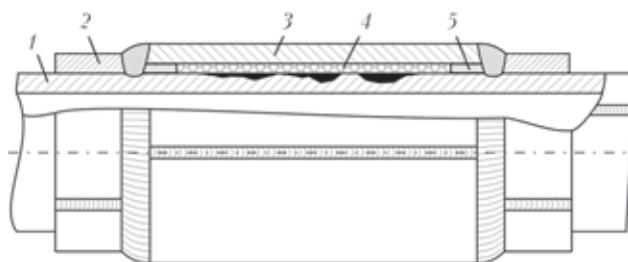


Рис. 9. Универсальная клеесварная муфта на тонких подкладках: 1–3 — см. обозн. на рис. 8; 4 — клеевая композиция; 5 — металлическая лента

тор напряжений в виде межслойного зазора между муфтой и трубой в районе кольцевого шва.

Применение дополнительных тонкостенных колец из порошковой ленты позволяет притупить указанный концентратор напряжений и тем самым снизить уровень напряжений в критической зоне во время формирования сварного кольцевого шва. В результате этого снижается вероятность образования холодных трещин в сварных швах у концентратора. Кроме того, применение тонкостенных колец позволяет отказаться от выполнения проточек на внутренней поверхности муфты под продольные сварные швы трубопровода, что приводит к упрощению процесса ремонта и повышению его качества, а также к снижению вероятности разрушения ремонтной конструкции. Существенным преимуществом рассматриваемой конструкции является возможность заполнить подмуфтовое пространство клеевой самотвердеющей смесью под давлением, соизмеримым с рабочим в трубопроводе. Это позволяет снизить уровень напряжений в дефектной части трубопровода, передавая нагрузку на муфту. К тому же, такой подход позволяет ремонтировать протяженные участки МТ за счет установки многосекционных клеесварных муфт [21] и может быть актуальным при необходимости повышения категории отдельных участков действующего газопровода.

**Практический опыт использования разработанных технологий.** Нарботки в экспериментально-теоретическом обосновании применения конструктивно-технологических решений для ремонта действующих МТ, вначале в меньшем объеме, легли в основу нормативного документа ВБН В.3.1-00013741-07:2007 для нефтепроводов [20]. А затем, более полно, отражены в ГБН В.3.1-00013741-12:2011 (для газопроводов) [21]. С целью унификации подхода в изготовлении усиливающих конструктивных элементов были разработаны ТУ У 27.2-19305558-001:2007 [22].

Для обучения и аттестации персонала, выполняющего ремонтные работы, были разработаны соответствующие программы как для сварщиков, так и для руководителей сварочных работ, а также



Рис. 10. Установка на МТ: герметичной муфты (а), отвода (б), двухслойной муфты (в) и клеесварных муфт (г)

учебное пособие по методам ремонта с применением дуговой сварки на трубопроводах под давлением [23].

За период широкого использования (2001–2012 гг.) разработанных технологий на объектах ПАТ «Укртрансгаз» выполнены следующие работы: установлено 326 двухслойных муфт на дефектные стыки магистральных газопроводов, присоединено 52 отвода к основной магистрали с целью подключения новых потребителей, отремонтировано более 800 участков со значительными коррозионными повреждениями с помощью клеесварных муфт. На рис. 10 приведены примеры практической реализации разработанных технологий. Общий экономический эффект от внедрения превысил 188 млн грн.

Успешное сотрудничество коллективов ПАО «Укртрансгаз» и ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ позволило получить на ряд технических решений более 50 патентов Украины и России. Достижения в области системного подхода при разработке технологий ремонта действующих магистральных трубопроводов отмечены Государственной премией Украины в области науки и техники за 2008 г.

#### Выводы

1. Проведен анализ особенностей применения дуговой сварки на МТ под давлением и определены пути устранения действия негативных факторов.

2. С целью продления ресурса безопасной эксплуатации МТ, а также учитывая высокую плотность населения в зоне прохождения магистралей и необходимость обеспечения бесперебойной поставки энергоносителей потребителям, разработаны отраслевые нормативно-технические документы по ремонту дуговой сваркой МТ в условиях эксплуатации.

3. Показаны преимущества нового конструктивно-технологического подхода при восстановлении несущей способности дефектных участков ЛЧМГ в условиях эксплуатации. Применение нахлесточно-стыковых соединений позволяет: расширить диапазон тепловложений при дуговой сварке; управлять размерами, структурой и свойствами металла ЗТВ; снизить концентрацию напряжений в местах сопряжения кольцевых швов с трубопроводом и тем самым повысить предел выносливости сварных соединений усиливающих конструкций при повторно-статической нагрузке.

1. Bruce W. A., Mishier H. D., Kiefner J. F. Repair of pipelines by direct deposition of weld metal / A. G. A. Pipeline research committee. – PR-185-9110. – Edison Welding Inst., 1993.
2. Бут В. С., Грецкий Ю. Я. К проблеме присоединения отводов к магистральным трубопроводам в условиях эксплуатации // Автомат. сварка. – 1997. – № 6. – С. 25–33.
3. But V. S., Gretsii Yu. Ya. Repair the main pipelines under pressure using arc welding // Intern. conf. on pipeline repairs, Australia, 5-6 Mar., 2001.
4. Риск разрушения магистрального трубопровода с дефектами утонения стенки при ремонте под давлением / В. И. Махненко, В. С. Бут, С. С. Козлитина и др. // Автомат. сварка. – 2010. – № 1. – С. 11–14.

5. Бут В. С. Присоединение дуговой сваркой отводов к магистральным нефтепроводам под давлением // Нефт. пром-сть. – М.: ВНИИОЭНГ, 1991. – 92 с. – (Сер. «Транспорт. и хранение нефти»).
6. Обґрунтування нового підходу до виконання зварювальних робіт на трубопроводах під тиском / В. С. Бут, В. В. Розгонюк, Ю. Я. Грецький та ін. // Нафт. і газ. пром-сть. – 2001. – № 4. – С. 33–39.
7. ASME B31.8. Gas transmission and distribution piping system. – The American Soc. of Mechanical Engineers, 2007. – (Нац. стандарт США).
8. Гривняк И. Свариваемость сталей. – М.: Машиностроение, 1984. – 215 с.
9. CSA Z662-07. Oil and gas pipeline system. – Canadian Standards Assos., 2007. – (Стандарт CSA).
10. BS EN ISO 16708. Petroleum and natural gas industrial. Pipeline transportation systems. Reliability-based limit state methods. – 2006. – (Стандарт Великобритании).
11. Phelps B., Cossie B. A., Evans N. H. Welding onto live natural gas pipelines // Metal. construction. – 1986. – № 8. – P. 350–354.
12. Kiefner J. F., Maxey W. A. Test validate pipeline sleeve repair technique // Oil and Gas J. – 1989. – Aug. – P. 47–52.
13. Корольков П. М. Термообработка сварных соединений трубопроводов в полевых условиях // Монтаж. и спец. работы в стр-ве. – 1996. – № 11–12. – С. 21–24.
14. Ремонт магистральных трубопроводов под тиском / М. В. Беккер, В. С. Бут, Р. М. Говдяк та ін. – К.: Кий, 2008. – 239 с.
15. Добрушин Л. Д. Разработка и исследование технологии сварки отводов магистральных газопроводов под давлением с использованием энергии взрыва: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1981. – 21 с.
16. Оцінка корозійних пошкоджень та застосування дугового зварювання для ремонту діючих трубопроводів / В. С. Бут, Ю. Я. Грецький, М. М. Дрогомирецький та ін. // Нафт. і газ. пром-сть. – 1998. – № 6. – С. 44–47.
17. Бут В. С., Олейник О. И. Основные направления развития технологий ремонта магистральных трубопроводов в условиях эксплуатации // Автомат. сварка. – 2007. – № 5. – С. 42–48.
18. Математическое моделирование язвенных дефектов в действующих нефте- и газопроводах и разработка численного способа 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.
19. Исследования напряженно-деформированного состояния и прогнозирование работоспособности сварных соединений конструктивных элементов с трубопроводом. Совершенствование систем управления и эксплуатации магистрального транспорта нефти / В. С. Бут, Е. А. Великоиваненко, В. Е. Починков и др. // Сб. научн. тр. – Уфа: ВНИИСПТнефть, 1988. – С. 189–196.
20. ВБН В.3.1-00013741-07:2007. Магістральні нафтопроводи. Методи ремонту дефектних ділянок. – Чинні від 01.01.07. – К.: М-во палива та енерг. України, 2007. – 110 с. – (Відомчі буд. норми України).
21. ГБН В.3.1-00013741-12:2011. Магістральні газопроводи. Ремонт дуговим зварюванням в умовах експлуатації. – Чинні від 06.09.11. – К.: М-во енерг. та вугільної пром. України, 2011. – 152 с. – (Галузеві буд. норми України).
22. ТУ У 27.2-19305558-001:2007. Елементи трубопроводів підсилюючі конструктивні. – Чинні від 03.07.07. – 79 с. – (Техн. умови України).
23. Бут В. С. Строительство и ремонт действующих магистральных газопроводов: Пособие для руководителей сварочных работ на магистральных трубопроводах под давлением. – Киев: МУАЦ ИЭС им. Е. О. Патона, 2003. – 116 с.

Поступила в редакцию 28.01.2014

## ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»

www.patonpublishinghouse.com

**СВАРКА И НАПЛАВКА МЕДИ И СПЛАВОВ НА ЕЕ ОСНОВЕ** / Составители: В. М. Илюшенко, Е. П. Лукьянченко. – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. – 396 с. Мягкий переплет, 165×235 мм.

Сборник включает основные публикации — статьи, доклады, информационные материалы и изобретения в области сварки и наплавки меди и ее сплавов за период с 1953 по 2013 гг., авторами которых являлись в основном сотрудники Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. В представленных материалах освещен широкий круг вопросов разработки прогрессивных технологических процессов сварки и наплавки этих материалов и опыт их промышленного применения в различных отраслях промышленности.

Сборник может быть полезен инженерно-техническим работникам сварочного производства, а также специалистам, развивающим исследования в этой области. ISBN 978-966-96309-1-9.

