

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПРИ РЕМОНТЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА ПОД ДАВЛЕНИЕМ*

О.И. ОЛЕЙНИК, С.Ю. МАКСИМОВ, А.П. ПАЛЬЦЕВИЧ, Е.И. ГОНЧАРЕНКО

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

Выполнен комплекс исследований по разработке технологии механизированной дуговой сварки в защитных газах применительно к ремонту магистральных газопроводов усиливающими конструкциями. Определены условия предотвращения образования пор в сварных соединениях вследствие нарушения газовой защиты под влиянием порывов ветра. Проведены испытания металла шва стыковых и нахлесточно-стыковых соединений, сваренных с применением современных порошковых проволок и проволок сплошного сечения Св-08Г2С. Показано влияние техники выполнения сварки стыковых соединений на механические свойства и ударную вязкость металла шва. Изучено влияние факторов, которые определяют риск образования холодных трещин в сварных соединениях низколегированной стали класса прочности Х70. Установлено, что сварочные проволоки Св-08Г2С, Е71Т-1, DW-A55 соответствуют требованиям по обеспечению необходимого уровня механических характеристик, ударной вязкости металла шва, содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и могут быть рекомендованы при дальнейшей апробации технологии в полевых условиях ремонта на действующих трубопроводах. Изложены основные рекомендации по технике сварки стыковых и нахлесточно-стыковых соединений и ориентировочные режимы сварки в различных пространственных положениях. Библиогр. 19, табл. 6, рис. 7.

Ключевые слова: магистральный газопровод, дуговая сварка, сварные соединения, порошковая проволока, холодные трещины, предварительный подогрев, диффузионный водород

Известно, что механизированная дуговая сварка в защитных газах приводит к росту производительности сварочных работ по сравнению с ручной дуговой. Системы механизированной дуговой сварки на трубопроводах, разработанные ведущими мировыми компаниями (ESAB, Lincoln Electric, CRC) используются уже не менее 40 лет. Однако все эти разработки касаются условий сварки при строительстве магистральных газопроводов (МГ). Опыт механизации ремонтных сварочных работ в полевых условиях на магистралях, находящихся под внутренним давлением, крайне ограничен.

В Украине в настоящее время при ремонте МГ под давлением применяются технологии, которые предусматривают использование ручной дуговой сварки. С одной стороны, это связано с простотой сварочного процесса, его доступностью для полевых условий ремонта, широким спектром имеющихся сварочных материалов и оборудования. В то же время ручной метод сварки регламентирован различными нормативно-техническими документами, которыми руководствуются при выполнении работ на МГ, в том числе и под давлением. Главным недостатком является сравнительно низкая скорость сварки, что отражается на продолжительности процесса ремонта. Для примера можно сказать, что сварка только одного кольцевого сты-

ка на трубопроводе диаметром 1420 мм бригадой из двух сварщиков длится более 5 ч. Учитывая, что подобные ремонты требуют снижения давления в магистрали, такая возможность по разным причинам в условиях транзита газа по Украине появляется только в ночные часы, когда снижается объем потребления газа. В связи с этим увеличивается риск получить дефекты в сварных швах при недостаточной видимости.

Таким образом, существует необходимость в интенсификации ремонтно-сварочных работ с одновременным повышением их качества и безопасности. Одним из вариантов выхода из такого положения является применение технологий механизированной дуговой сварки в защитных газах новейшими сварочными материалами.

Выбор сварочных материалов для механизированной дуговой сварки. В настоящее время при строительстве и ремонте МГ для механизированной дуговой сварки в защитных газах регламентированы к применению проволоки сплошного сечения и порошковые проволоки, которые должны соответствовать требованиям [1–5].

Для отработки технологии механизированной дуговой сварки в защитных газах во всех пространственных положениях (потолочное, вертикальное, горизонтальное на вертикальной поверх-

*По материалам работы, выполненной в рамках целевой комплексной программы НАН Украины «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» (2013–2015 рр.).

ности, нижнее), выбраны следующие сварочные материалы: проволока сплошного сечения Св-08Г2С (Украина); порошковые проволоки DW-50, DW-A55 (Kobelco, Япония), E71T-1 (Baoding lanyu welding material, КНР) и ППС-ТМВ7 («ТМ. ВЕЛТЕК», Украина). Такой выбор обосновывается необходимостью сравнить сварочно-технологические характеристики новых, современных высококачественных порошковых проволок с хорошо известной по опыту широкого применения в промышленности более дешевой проволокой Св-08Г2С с целью определения возможности их дальнейшего применения в условиях ремонта МГ под давлением. Все проволоки имели одинаковый диаметр 1,2 мм.

Влияние скорости ветра на качество формирования стыковых сварных швов. При выполнении сварки одним из факторов, влияющим на качество сварного соединения, считают надежность защиты расплавленного дугой металла шва от воздуха. Для механизированной дуговой сварки в полевых условиях этот фактор становится критическим, поскольку следует ожидать вредного воздействия порывов ветра на газовую защиту дуги. Поэтому существует потребность в экспериментальном определении влияния скорости ветра v_B на эффективность защиты зоны сварки и, соответственно, на качество формирования стыковых сварных соединений в зависимости от расхода защитного газа Q_r . Для исследований использовали сварочные проволоки Св-08Г2С и E71T-1, защитный газ CO_2 .

На первом этапе экспериментально получены предельные значения расхода защитного газа Q_r , которые позволяют избежать возникновения пор для заданных скоростей движения воздуха v_B . Установлено, что в полевых условиях сварки проволокой сплошного сечения Св-08Г2С в CO_2 исключается возникновение пор при скорости ветра до 2 м/с, а также показано, что применение порошковой проволоки повышает допустимую скорость ветра до 2,6 м/с из-за наличия газшлаковой защиты из компонентов сердечника. Такой результат достигается при увеличении расхода газа Q_r с 10...15 л/мин. ($v_B = 0...0,25$ м/с) до 30 л/мин.

Поскольку известно, что в низколегированных сталях азот и кислород являются вредными примесями [6, 7], на втором этапе работ были про-

ведены эксперименты по определению влияния скорости ветра v_B на содержание этих элементов в металле шва. Для проведения газового анализа были изготовлены образцы Ми99 из металла, который был наплавлен при разных величинах v_B . Исследования выполняли с использованием газового анализатора LECO TC 436. Результаты приведены в табл. 1.

Видно, что при расходах защитного газа в количестве, необходимом для максимально допустимых скоростей v_B , содержание азота и кислорода в металле шва увеличивается незначительно. По абсолютной величине полученные значения содержания азота в 3,0...3,5 раза меньше максимально рекомендованного (0,02 %) для механизированной сварки в CO_2 . Общее содержание кислорода в шве, выполненном проволокой сплошного сечения, меньше такого, которое было получено для Св-08Г2С ранее (0,0573 %) в работе [8]. Относительно порошковой проволоки следует отметить, что некоторое увеличение [O] в металле шва связано с его наличием в сердечнике, но в абсолютном измерении содержание кислорода находится на уровне нормативных значений для проволок с рутитовым типом сердечника (0,06...0,085 %) [9].

Механические свойства металла стыковых и нахлесточно-стыковых швов. При ремонте поврежденных участков МГ используют бандаж и муфты различных конструкций. Они обеспечивают усиление стенки трубы, а также сохранение работоспособности магистрали при нарушении целостности стенки в месте дефекта под муфтой. Для соединения отдельных цилиндрических элементов между собой, а также с трубопроводом, применяют продольные стыковые и кольцевые нахлесточно-стыковые сварные швы.

Нормативно-техническая документация [10] требует, чтобы сварочные материалы, которые применяются для МГ с наружным диаметром до 1420 мм, построенных из сталей с классом прочности до К60 включительно, и которые работают с рабочим давлением до 8,3 МПа, отвечали следующим условиям:

временное сопротивление разрушению при испытаниях на статическое растяжение должно быть не ниже нормативного значения временно-го сопротивления разрушения (разрыв) основного металла трубы;

твердость металла шва должна быть не более $HV10 - 280$, зоны термического влияния — не более $HV10 - 300$ для труб с классом прочности до К55 включительно и не более $HV10 - 325$ для труб с классом прочности выше К55 до К60 включительно;

ударная вязкость металла шва должна быть не менее 34 Дж/см² (по Шарпи) при температуре

Таблица 1. Содержание азота [N] и кислорода [O] в наплавленном металле, %

Сварочный материал	Расход защитного газа Q_r , л/мин	[N], %	[O], %	Скорость ветра v_B , м/с
Св-08Г2С	10	0,0065	0,045	0,0
	27	0,0068	0,045	2,0
E71T-1	10	0,0054	0,056	0,0
	30	0,0058	0,062	2,5

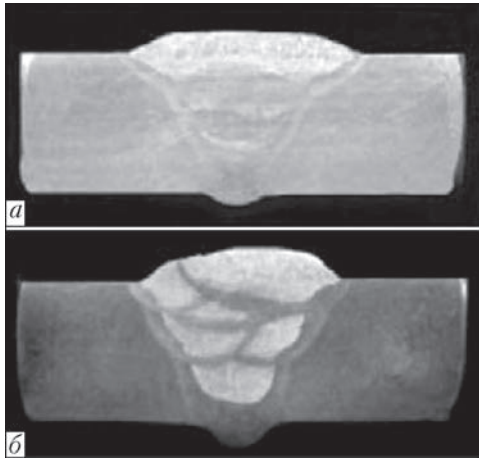


Рис. 1. Макрошлиф стыкового сварного соединения: а — сварка методом «один слой за один проход»; б — сварка ниточными валиками

на 20 °С ниже минимальной температуры стенки трубы газопровода при эксплуатации (при подземной прокладке газопровода в Украине такой температурой следует считать 0 °С).

Для определения механических свойств сварных соединений были сварены стыки толщиной 16,0 мм с разделкой кромок под общим углом 60°. Каждый слой выполнялся за один проход (рис. 1, а). Материалом служила трубная сталь X70 с механическими характеристиками $\sigma_T > 480$ МПа, $\sigma_B > 560$ МПа, $\delta_5 > 18$ %, которая использовалась в Украине в 1980-х годах при строительстве газопровода «Уренгой–Помары–Ужгород».

Сварку выполняли по комбинированной технологии [10] — корневой шов стыкового соединения выполняли вручную штучным электродом диаметром 3 мм (УОНИ 13/45), разделку заполняли проволоками. Защитными газами служили углекислый газ CO₂ и смесь Ar (82 %) + CO₂ (18 %). Режимы сварки следующие: Св-08Г2С — $I_{св} = 140...150$ А, $U = 20 ... 21$ В; порошковые проволоки — $I_{св} = 200...220$ А, $U = 25...27$ В. Скорость сварки $v_{св} = 0,2...0,25$ м/мин, $Q_r = 15$ л/мин. Образцы для определения механических характе-

ристик металла шва Ми12 тип II и ударной вязкости Ми50 тип 11 вырезали согласно требованиям [3, 5]. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Анализ полученных результатов и их сравнение между собой показали, что с точки зрения выполнения первого условия проволоки E71T-1, DW-50, ППС-ТМВ7 и Св-08Г2С могут применяться при сварке сталей с классом прочности K55, а порошковая проволока DW-A55 — для труб с классом прочности K60 (X70). Измерение твердости металла в центре шва и ЗТВ показало, что все марки проволок соответствуют второму требованию (табл. 3).

Относительно показателей ударной вязкости (KCV) было установлено, что порошковая проволока DW-50 не соответствует третьему требованию при температурах испытания –20 и –40 °С (см. табл. 2). Было выдвинуто предположение, что одна из причин низких показателей ударной вязкости связана с техникой сварки, а именно – процесс заполнения разделки выполнялся с поперечными колебаниями на всю ее ширину с высокими значениями удельного тепловложения [11].

Поэтому было принято решение изменить схему заполнения разделки на такую, в которой сварка стыка выполнялась ниточными валиками без поперечных колебаний (рис. 1, б) с умеренным тепловложением. Результаты испытаний образцов металла шва, сваренного по новой схеме, показали существенное повышение механических характеристик и ударной вязкости ($\sigma_T = 540$ МПа; $\sigma_B = 612$ МПа; $\delta_5 = 27$ %; $\psi = 71,5$ %; $KCV_0 = (217...172)/197$, $KCV_{-20} = (160...101)/125$, $KCV_{-40} = (87...51)/70$ Дж/см²). В качестве защитного газа использовали CO₂.

Сравнение этих результатов с предварительно полученными показывает, что для повышения механических характеристик и ударной вязкости металла сварных соединений необходимо изменить предварительно выбранную технику сварки стыка на такую, которая предусматривает запол-

Таблица 2. Механические характеристики металла швов

Сварочный материал, защитный газ	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %	Ударная вязкость (KCV, Дж/см ²) при температуре, °С		
					0	–20	–40
Св-08Г2С, CO ₂	423	552	27,4	72,1	(168...138)/153	(91...88)/89	(71...62)/67
Св-08Г2С, Ar+CO ₂	430	561	30,9	75,1	(177...154)/165	(98...93)/95	(75...71)/72
E71T-1, Ar+CO ₂	444	557	29,0	71,6	(151...107)/128	(55...53)/53	(63...32)/46
DW-A55, Ar+CO ₂	484	589	27,3	71,0	(176...152)/164	(147...128)/136	(49...45)/46
DW-50, CO ₂	468	567	29,1	72,8	(44...40)/41	(23...22)/22	(14...13)/13
ППС-ТМВ7, CO ₂	476	570	29,0	71,6	(172...170)/170	(125...110)/117	(86...80)/83

Таблица 3. Средняя твердость металла шва и ЗТВ (HV10)

Исследуемый участок	Сварочный материал, защитный газ					
	Св-08Г2С, CO ₂	Св-08Г2С, Ar+CO ₂	E71T-1, Ar+CO ₂	DW-A55, Ar+CO ₂	DW-50, CO ₂	ППС-ТМВ7, CO ₂
Металл шва	149	148	148	153	149	148
ЗТВ	162	160	154	158	165	155

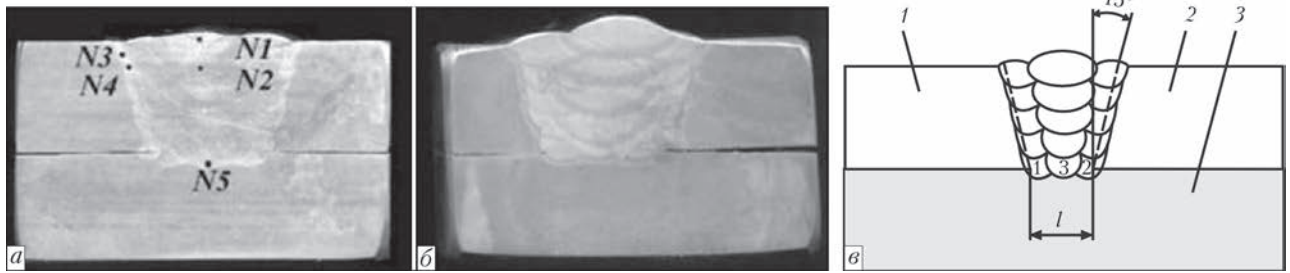


Рис. 2. Налесточно-стыковое сварное соединение: а, б — макрошлиф соединения с использованием соответственно проволоки Св-08Г2С и ППС-ТМВ7; в — схема разделки кромок и сварки (1, 2 — стенка усиливающего элемента: муфты (1) и технологического кольца (2); 3 — стенка газопровода; l — зазор между элементами муфты)

Таблица 4. Ударная вязкость (КЧУ) металла налесточно-стыковых швов

Сварочный материал, защитный газ	Ударная вязкость (КЧУ, Дж/см ²), при температуре, °С		
	0	-20	-40
Св-08Г2С, CO ₂	(164...148)/155	(171...125)/142	(100...65)/81
ППС-ТМВ7, CO ₂	(160...153)/165	(160...127)/140	(127...105)/118

нение разделки ниточными валиками без колебаний. Данный вывод был подтвержден при оценке ударной вязкости налесточно-стыковых соединений, в которых каждый слой выполнялся отдельными валиками 1, 2 в угол на каждую кромку, после чего внутри накладывался валик 3 (рис. 2). При проведении сварки использовались проволоки ППС-ТМВ7 и Св-08Г2С.

Результаты испытаний образцов Ми50 приведены в табл. 4. Анализ данных показывает, что во всем диапазоне температур испытаний сохраняется высокий уровень ударной вязкости, который значительно превышает минимально необходимый уровень этого показателя — не менее 34 Дж/см².

Для металлографических исследований были выбраны участки: N1 — металл шва последнего слоя; N2 — ЗТВ в металле шва; N3 — зона крупного зерна последнего слоя; N4 — зона крупного зерна со структурными изменениями после выполнения следующего слоя; N5 — зона крупного зерна в корне шва.

Изучение образцов соединений показало, что на участках N1 и N2 структура ферритно-перлитная с преобладанием ферритной фазы. Твердость составляет HV1 — 1650...1750 МПа. На участке N2 структура металла в результате теплового воздействия мелкодисперсная ферритно-перлитная с баллом зерна 10. В металле ЗТВ (участки N3 и N4) структура ферритно-перлитная с твердостью 1970...2130 МПа. На участке N5 вследствие ускоренного охлаждения наблюдается увеличение твердости до 2360...2640 МПа. Установлено, что сварка отдельными валиками позволяет получить мелкозернистую, практически однородную по высоте соединения ферритно-перлитную структуру и это способствует решению задачи получения повышенных значений ударной вязкости в свар-

ных швах по сравнению с минимально необходимыми.

Оценка стойкости сварных соединений против образования холодных трещин. Одним из факторов риска возникновения холодных трещин является напряженно-деформированное состояние сварного соединения [12, 13]. При ремонте труб с локальными коррозионными дефектами применяются конструкции «заплата-муфта» или «заплата-муфта с герметиком» [14]. Особенностью этих конструкций является наличие кольцевого налесточно-стыкового шва, которым заплата диаметром 100...120 мм по контуру сваривается с муфтой и трубой.

При таком техническом решении в многослойном шве наблюдается высокий уровень напряжений в результате усадки металла шва и жесткого закрепления. В сочетании с другими факторами (диффузионный водород, микроструктура) существует риск возникновения холодных трещин.

С целью определения условий, влияющих на устойчивость против образования холодных трещин в налесточно-стыковом соедине-

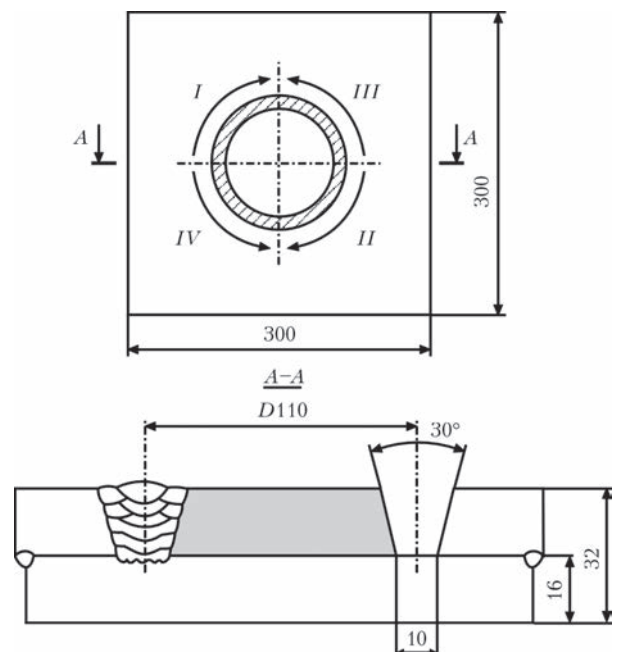


Рис. 3. Схема технологической пробы «Marine» с порядком сварки налесточно-стыкового шва

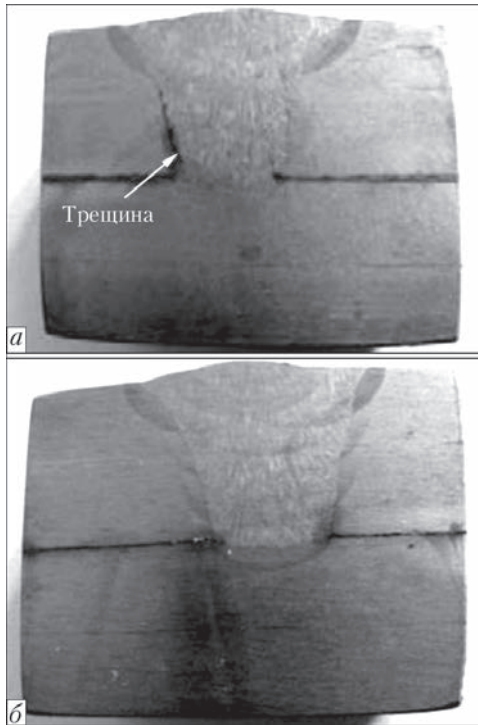


Рис. 4. Шлифы пробы «Magine» при механизированной сварке: *a* — без предварительного подогрева; *b* — с предварительным и сопутствующим подогревом до 160...180 °С

нии «заплата-муфта», проведены испытания с использованием пробы «Magine» [15, 16]. Такая технологическая проба (рис. 3) в полной мере имитирует реальный сварной шов, а при соответствующем соотношении диаметра диска к ширине пластины в сварном соединении можно создать уровень напряжений, близкий к пределу текучести стали.

Детали двух проб были изготовлены из сегментов трубы диаметром 1420 мм. Сварку порошковой проволокой ППС-ТМВ7 в углекислом газе выполняли согласно указанной схеме. Режим сварки: $I_{св} = 190...200$ А, $U_{д} = 26...27$ В, $v_{пр.} = 9,1$ м/мин. Для визуального обнаружения трещины вырезали по два шлифа с каждого квадранта. Ожидалось, что наибольший уровень напряжений будет создан в квадранте IV, где, соответственно, и должна возникнуть трещина [17].

Исследование шлифов пробы, в которой не выполняли предварительный подогрев, показали, что наложение следующего валика после охлаждения предыдущего до 20 °С привело к образованию холодной трещины в квадранте IV (рис. 4, *a*). Проведение предварительного и сопутствующего подогрева до температуры 160...180 °С позволило предотвратить их появление (рис. 4, *b*).

Установлено, что в первом случае трещина возникла в корневой части на границе сплавления с внешней стороны кругового шва. Зарождение трещины начинается у концентратора напряжений — зоны перехода поверхностей накладных

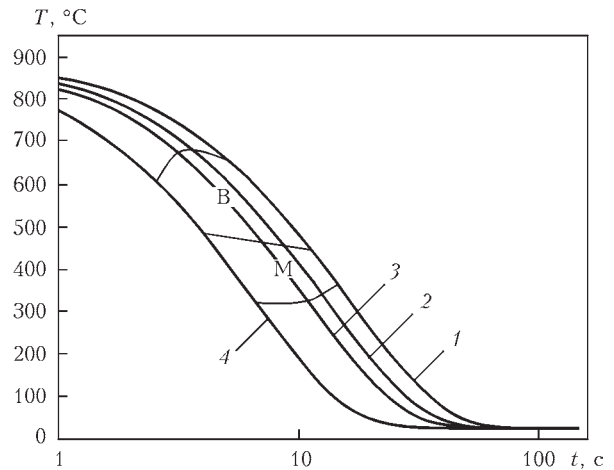


Рис. 5. Диаграмма превращения переохлажденного аустенита в металле ЗТВ стали X70 при различных скоростях охлаждения в диапазоне 800...500 °С: 1 — 40 (8,6 % М); 2 — 50 (20,4 % М); 3 — 60 (23 % М); 4 — 90 (67 % М) °С/с

элементов пробы в металл шва. Причиной возникновения этого дефекта следует считать радиальные напряжения от усадки металла, которые с внешней стороны шва выше напряжений, действующих с внутренней стороны [18]. В связи с этим, для предупреждения образования холодных трещин в многослойных швах целесообразно применить подогрев перед сваркой до 160...180 °С с соблюдением такой температуры перед началом выполнения каждого следующего прохода, а также использовать качественные сварочные материалы с уровнем пластичности $\delta_5 > 20$ % при температуре -20 °С и обеспечивающих содержание диффузионного водорода в наплавленном металле не более 10 см³/100 г. Для уменьшения уровня напряжений дополнительно следует увеличить диаметр заплат до 200 мм.

Другим фактором, существенно влияющим на риск возникновения холодных трещин при выполнении механизированной дуговой сварки на МГ в условиях эксплуатации, является микроструктура металла ЗТВ сварного соединения. Расчетно-экспериментальным путем получена информация относительно времени пребывания металла шва и ЗТВ в интервале температур 800...500 °С при интенсивном теплоотводе. Она показывает, что при сварке без предварительного подогрева скорость охлаждения составляет 45...60 и 30...40 °С/с при применении подогрева 150 °С. В связи с тем, что большинство трубных марок сталей имеют склонность к образованию закалочных структур в указанных условиях, были проведены исследования по изучению влияния скорости охлаждения металла на структуру металла ЗТВ стали X70.

Исследования выполнялись с помощью исследовательского комплекса Gleebel 3800. На специальных образцах имитировался термический цикл сварки на участке перегрева металла ЗТВ, в ко-

тором скорость охлаждения в интервале температур 800...500°C составляла 40, 50, 60 и 90°C/с. Полученная диаграмма превращения переохлажденного аустенита (рис. 5) и ее анализ показал следующее.

В интервале скоростей охлаждения 40...60 °C/с в стали X70 количество мартенситной фазы увеличивается с 8,6 до 23 % и это значительно меньше значения 50 %, при котором считается, что сталь подвержена образованию холодных трещин. Повышение скорости охлаждения до значения 90 °C/с, характерного для условий мокрой сварки под водой, увеличивает количество мартенсита в металле ЗТВ до 65...68 %, что опасно для работоспособности сварного соединения.

Металлографические исследования образцов показали, что для скоростей охлаждения 40...60 °C/с интегральная твердость в металле ЗТВ находится в диапазоне HV10 – 270...300 и это не превышает порог в HV10 – 325 для сталей с классом прочности X70, а применение предварительного подогрева до 150 °C положительно отражается на морфологии микроструктуры металла ЗТВ. В связи с высокой достоверностью получаемых с помощью комплекса Gleebel результатов, сделан вывод о целесообразности продолжения исследований длительно эксплуатирующихся трубных марок сталей классов прочности X52, X56, X60, X65 применительно к условиям ремонта МГ.

Как известно, на риск возникновения в сварных соединениях холодных трещин существенно влияет диффузионный водород, одним из источников которого является электродный металл. Нормативно-техническая документация регламентирует применение сварочных материалов, обеспечивающих содержание диффузионного водорода в наплавленном металле не более 10 см³/100 г. В связи с этим для всех сварочных проволок были проведены исследования по определению содержания диффузионного водорода в наплавленном металле [H]_{диф.н.м.} хроматографическим методом [19].

Перед выполнением экспериментальных работ, для удаления влаги порошковые проволоки просушивались в печи при температуре 200...250 °C в течение не менее 3 ч. Наплавки металла на специальные образцы (по три шт. на каждую марку проволоки) выполняли в смеси Ar + CO₂ с применением сварочного трактора ТС-17 на режимах, обеспечивающих погонную энергию на уровне 5,8...6,2 кДж/см. Среднее содержание [H]_{диф.н.м.} в наплавленном металле для каждой марки проволоки следующее: для Св-08Г2С — 3,4...3,6; DW-50 — 12,0...13,2; DW-A55 — 7,6...8,5; E71T-1 — 9,7...10,0; ППС-ТМВ7 — 10,1...11,8 см³/100 г.

Видно, что наименьшее содержание диффузионного водорода в наплавленном металле наблюдается при применении обычной проволоки сплошного сечения Св-08Г2С и это соответствует сварочным материалам, которые обеспечивают его очень низкий уровень — до 5 см³/100 г. Порошковые проволоки DW-A55 и E71T-1 соответствуют сварочным материалам, которые обеспечивают низкий уровень диффузионного водорода — до 10 см³/100 г. Еще две проволоки (DW-50, ППС-ТМВ7) превышают допустимый порог в 10 см³/100 г и не могут быть в настоящее время рекомендованы к применению в условиях ремонта МГ.

Разработка технологии сварки усиливающих конструктивных элементов. При разработке технологии механизированной дуговой сварки в защитных газах усиливающих конструктивных элементов основное внимание было уделено отработке техники сварки стыковых и нахлесточно-стыковых соединений в различных пространственных положениях. При этом пытались определить такие режимы сварки, которые, с одной стороны, обеспечивали качественное формирование многослойных сварных швов, а с другой — не требовали существенной корректировки при изменении пространственного положения.

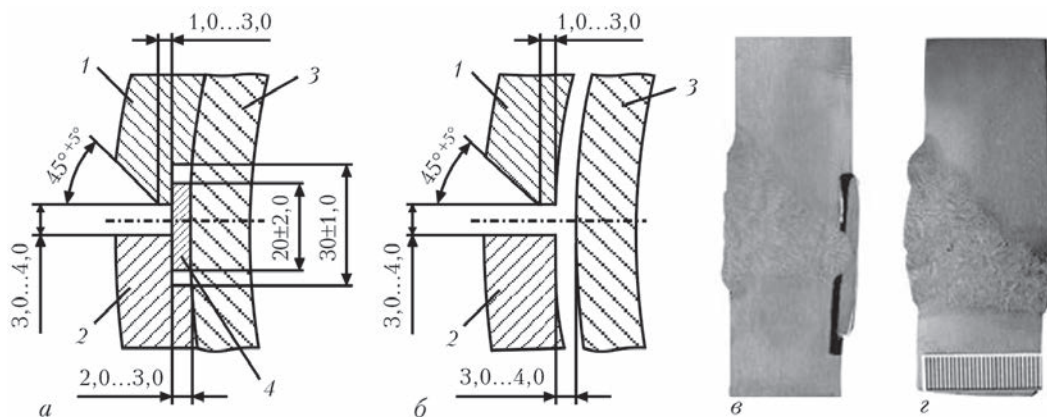


Рис. 6. Продольные стыковые соединения усиливающих конструктивных элементов: а — разделка кромок для сварки с подкладной пластиной; б — разделка кромок для сварки «на весу»; в — макрошлиф соединения с подкладной пластиной (проволока DW-A55); г — макрошлиф соединения, выполненного проволокой Св-08Г2С «на весу» (1, 2 — стенка соответственно верхнего и нижнего усиливающего элемента; 3 — стенка газопровода; 4 — подкладная пластина)

Таблица 5. Рекомендуемые режимы сварки стыкового соединения, сваренного с применением проволок DW-A55 и Св-08Г2С* (защитный газ 82 % Ar + 18 % CO₂)

Параметр	Проход при заполнении разделки		
	Корневой	Заполняющий	Облицовочный
Скорость подачи проволоки, м/мин.	(9,0...9,2)/(3,6...3,8)	(9,0...9,2)/(4,0...4,1)	(7,4...7,7)/(3,6...3,8)
Сварочный ток, А	(200...210)/(125...130)	(205...215)/(145...155)	(180...190)/(125...130)
Напряжение на дуге, В	(26,0...26,3)/(18,0...18,5)	(26,5...27,0)/(19,0...20,0)	(25,0...26,0)/(18,0...18,5)
Вылет проволоки, мм	(20...23)/(18...23)	(16...20)/(16...20)	(10...14)/(10...14)

* Числитель — для проволоки DW-A55, знаменатель — Св-08Г2С.

Таблица 6. Рекомендуемые режимы сварки нахлесточно-стыкового соединения, сваренного с применением проволок DW-A55 и Св-08Г2С* (защитный газ 82 % Ar + 18 % CO₂)

Параметр	Проход при заполнении разделки	
	Заполняющий	Облицовочный
Скорость подачи проволоки, м/мин	(8,0...9,1)/(4,0...4,1)	(7,4...8,0)/(3,7...3,8)
Сварочный ток, А	(190...220)/(135...140)	(180...200)/(125...130)
Напряжение на дуге, В	(26,5...27,0)/(19,5...20,5)	(26,0...26,5)/(18,0...18,5)
Вылет проволоки, мм	(12...23)/(12...23)	(10...16)/(10...16)

* Числитель — для проволоки DW-A55, знаменатель — Св-08Г2С.

Сварку протяженных стыковых соединений в горизонтальном положении на вертикальной плоскости (рис. 6, а, б) выполняли проволоками DW-A55 и Св-08Г2С в смеси Ar + CO₂. Материал — сегменты трубы Х70 диаметром 1420 мм с толщиной стенки 16 мм.

Порошковую проволоку использовали для варианта сварки с подкладной пластиной (рис. 6, в), проволоку Св-08Г2С также и для сварки «на весу» (рис. 6, г). Техника сварки предусматривала наложение отдельных проходов ниточными вали-

ками с небольшими поперечными колебаниями. Корневой проход выполняли с наклоном горелки углом назад. Второй и все последующие заполняющие проходы выполняли без поперечных колебаний узкими валиками с наклоном горелки углом вперед, корректируя количество проходов в каждом слое в зависимости от ширины разделки кромок. Облицовочный слой выполняли отдельными проходами с небольшими поперечными колебаниями для обеспечения плавного перехода к основному металлу.

Режимы сварки приведены в табл. 5.

Технология выполнения многослойных кольцевых нахлесточно-стыковых соединений предусматривает ведение процесса сварки в направлении снизу-вверх по секторам. При ширине разделки кромок $l \geq 15$ мм (см. рис. 2, в) все слои надо выполнять методом «один слой за два прохода». Это позволяет измельчить структуру металла и дополнительно повысить значение ударной вязкости шва. При ширине разделки кромок $l < 15$ мм первый слой выполняют методом «один слой за один проход», а начиная со второго слоя — методом «один слой за два прохода» (рис. 7 а, б). Облицовочный слой нахлесточно-стыкового соединения следует выполнять методом «слой за проход» или «слой за два прохода» в зависимости от величины l . Общее количество слоев в нахлесточно-стыковых соединениях определяется толщиной стенки усиливающих конструктивных элементов.

Для гарантированного сплавления кромок с трубопроводом сварку в потолочном положении следует выполнять в положении электрода «углом назад». Режимы сварки приведены в табл. 6.

Оборудование для механизированной дуговой сварки в защитных газах должно включать профессиональные источники питания, которые предназначены для работы в тяжелых условиях. Аппараты должны иметь степень защиты не менее IP23. В комплектацию должны входить четырехроликовые выносные механизмы подачи проволоки с водяным охлаждением, которые позволяют подавать проволоку в шланги длиной до 6 м. Все требования к оборудованию, материалам,

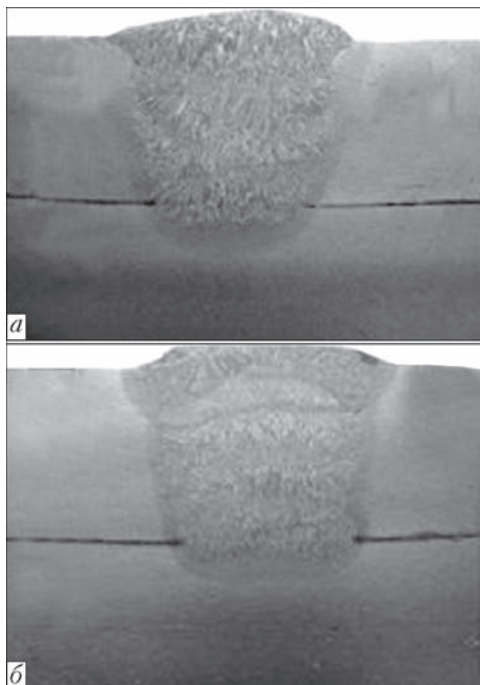


Рис. 7. Нахлесточно-стыковые соединения усиливающих конструктивных элементов: а — макрошлиф соединения, выполненного проволокой DW-A55; б — Св-08Г2С

защитным газам изложены в разработанной технологической документации.

В заключение можно отметить, что использование механизированной дуговой сварки в защитных газах с применением традиционных (Св-08Г2С) и современных сварочных материалов (DW-A55, E71T-1) позволяет достичь требований, предъявляемых к эксплуатационным характеристикам отремонтированных участков МГ. Итогом проведенной работы стала разработка нормативной документации по технологии механизированной дуговой сварки в защитных газах при ремонте МГ, согласованной с ПАТ «Укртрансгаз».

По результатам лабораторно-исследовательских испытаний принято решение о промышленной апробации разработанной технологии на предприятиях ПАТ «Укртрансгаз» с целью ее применения в полевых условиях ремонта МГ.

1. *ГОСТ 2246–70*. Проволока стальная сварочная. Технические условия. – Введ. 01.01.1973. – ФГУП «Стандартинформ», 2008. – 19 с.
2. *AWS A5.18*: Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding // American Welding Soc., Miami, 2005.
3. *AWS A5.28*: Specification for Low-Alloy Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding // Ibid.
4. *ГОСТ 26271–84*. Проволока порошковая для дуговой сварки углеродистых и низколегированных сталей. Общие технические условия. – Введ. 01.01.1987. – М.: Госстандарт СССР, 1987. – 19 с.
5. *AWS A5.36*. Specification for carbon and low-alloy steel flux cored electrodes for flux cored arc welding and metal cored electrodes for gas metal arc welding // American Welding Soc., Miami, 2012.
6. *Підгаєцький В.В.* Пори, включення і тріщини в зварних швах. – Київ: Техніка, 1970. – 236 с.

7. *Металлургия дуговой сварки*. Взаимодействие металла с газами / И.К. Походня, И.Р. Явдошин, А.П. Пальцевич и др. – Киев: Наук. думка, 2004. – 442 с.
8. *Новожилов Н.М.* Основы металлургии дуговой сварки в газах. – М.: Машиностроение, 1979. – 230 с.
9. *Походня И.К., Суптель А.М., Шлепаков В.Н.* Сварка порошковой проволокой. – Киев: Наукова думка, 1972. – 223 с.
10. *СТО Газпром 2-2.2-136–2007*. Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промышленных и магистральных газопроводов. Ч. I. Технология сварки при ремонте промышленных и магистральных газопроводов, находящихся в эксплуатации. – Введ. 22.09.2007 – ОАО «Газпром», 2007.
11. *Справочник по сварке*. Всепоозиционные порошковые проволоки для нелегированных и низколегированных сталей – ESAB. – 32 с.
12. *Макаров Э.Л.* Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.
13. *Махненко В.И.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев: Наук. думка, 2006. – 618 с.
14. *ГБН В.3.1-00013741-12:2011*. Магістральні газопроводи. Ремонт дуговим зварюванням в умовах експлуатації. – Чинний з 06.09.2011. – Київ: Мін-во енергетики та вугільної промисловості України, 2011. – 152 с.
15. *Испытание металлов* / Сб. ст. под ред. К. Нитцше. – М.: Металлургия, 1967. – 452 с.
16. *Бут В.С., Максимов С.Ю., Олейник О.И.* Склонность к трещинообразованию сварных соединений ремонтных конструкций на магистральных газопроводах // Автомат. сварка. – 2014. – № 11. – С. 17–26.
17. *Ремонт магистральних трубопроводів під тиском* / М.В. Беккер, В.С. Бут, Р.М. Говдяк та ін. – Київ: Кий, 2008. – 239 с.
18. *Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А.* Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций. – М.: Высш. шк., 1982. – 272 с.
19. *ГОСТ 23338–91*. Сварка металлов. Методы определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и металле шва. – Введ. 01.07.1992. – М.: Госстандарт СССР, 1991. – 20 с.

Поступила в редакцию 02.02.2016

ММС100

7–10 June 2016,
Kyiv, Ukraine

www.medovar100.org



Международный симпозиум

к 100-летию со дня рождения Б.И. Медовара

Дата проведения	7–10 июня 2016 г.
Тематика симпозиума	ЭШП и другие процессы специальной электрометаллургии, их научные основы, технологии и оборудование; электрошлаковое литье; сварка высоколегированных и высокопрочных сталей, а также аустенитных сталей и сплавов; теория кристаллизации сталей и сплавов; управление затвердеванием в металлургии и сварке; крупные кузнечные и листовые слитки; моделирование затвердевания в процессах специальной электрометаллургии и сварки; современные стали для магистральных газопроводов, сосудов давления, крупных поковок, роторов, валков; родственные области металлургии, сварки и металловедения.
Место проведения	Киев, Украина, Президент Отель
Организационный комитет	Тел.: +38(044) 287-52-18, +38(044) 337-30-81. Тел./факс: +38(044) 337-30-82 E-mail: org@medovar100.org , info@medovar100.org Дополнительная информация на сайте симпозиума www.medovar100.org