



УДК 621.791.1/8:[621.797+621.642.2/3]

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПРИ РЕМОНТЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ*

В. М. ИЛЮШЕНКО, канд. техн. наук, **Н. М. ВОРОПАЙ**, д-р техн. наук, **В. А. ПОЛЯКОВ**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проведен сравнительный анализ процессов автоматизированной дуговой сварки в защитных газах, самозащитной порошковой проволокой и под флюсом применительно к ремонту металлоконструкций крупногабаритных резервуаров. Рассмотрены технологические особенности выполнения разных типов швов, а также принципы разработки специализированных монтажных аппаратов. Отмечен опыт и перспективы использования новых разработок.

Ключевые слова: дуговая автоматизированная сварка, низколегированные стали, стыковые швы, соединения внахлестку, тавровые соединения, защитный газ, самозащитная порошковая проволока, монтажный сварочный аппарат, резервуары

Современные сварные металлоконструкции крупногабаритных резервуаров являются ответственными сооружениями с высокими техническими требованиями к их герметичности, безопасности и срокам эксплуатации. Анализ работоспособности этих конструкций показывает, что в монтажных соединениях с горизонтальными и вертикальными швами наиболее распространенными дефектами являются повреждения типа трещин, коррозионный износ и потеря их геометрической формы. Отдельные участки резервуаров испытывают деформацию вследствие перекосов и неравномерной осадки, что требует их восстановления или полной замены секций [1].

До настоящего времени при текущем и капитальном ремонте резервуаров преимущественно использовали ручную дуговую сварку покрытыми электродами и механизированную в защитных газах. Эти процессы характеризуются невысокими производительностью и качеством сварных соединений. Испарение нефтепродуктов в дефектных местах резервуаров приводит к значительным материальным затратам. В связи с резко возросшей стоимостью сооружения новых резервуаров большое внимание необходимо уделить восстановлению работоспособности существующего парка. Чаще всего необходимо ремонтировать или заменять поврежденные участки днища и прилегающих к нему частей вертикальной стенки.

Для днища вместо традиционной подачи отдельных листов во внутрь резервуара предложено подавать непрерывную полосу, которая уже сварена встык из отдельных листов [2]. Из этой полосы изготовляют отрезки необходимой длины. Таким образом, все соединения поясов получаются стыковыми, а соединения внахлестку располагают в одну линию. В этом случае создаются условия для автоматизации технологии сварки.

В данной статье рассмотрены технологические особенности высокопроизводительных средств автоматизированной дуговой сварки стыковых и угловых швов в разных пространственных положениях при ремонте крупногабаритных резервуаров.

Типы сварных швов и соединений резервуарных конструкций. В отечественной и зарубежной практике для хранения нефти и нефтепродуктов применяют разнообразные емкости. Это в первую очередь вертикальные цилиндрические резервуары вместимостью до 50 тыс. м³. Для секций стенок и днищ резервуаров используют низколегированные стали разных марок в зависимости от объемов и характера продуктов, особенностей эксплуатации и климатических условий. Для нефтерезервуаров вместимостью до 20 тыс. м³ в четырех нижних поясах стенки в качестве основного металла используют сталь 09Г2С [1], а вместимостью 30 и 50 тыс. м³ — сталь марки 16Г2АФ. Диапазон толщин низкоуглеродистых низколегированных сталей составляет 10...40 мм.

На основании всестороннего рассмотрения конструкций и анализа эксплуатации типичных резервуаров можно отметить четыре разновидности сварных швов и соединений: стыковые горизонтальные швы на вертикальной плоскости стенки; стыковые вертикальные швы на вертикальной плоскости стенки; угловые швы в нижнем положении соединения заготовок днища внахлестку; угловые швы, которые соединяют горизонтальное днище с вертикальной стенкой (нижнее положение, тавровое соединение).

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



Механические свойства сварных соединений низколегированной стали 09Г2С толщиной 10...40 мм

Толщина металла, мм	Тип шва	Количество проходов	KCU, Дж/см ² (не менее), при t, °C							
			центр шва				ЗТВ			
			+20	-20	-40	-60	+20	-20	-40	-60
10	Горизонтальный стыковой (односторонний)	2	160	130	120	60	130	100	90	50
15	То же	4	150	120	110	50	120	105	80	45
25	Горизонтальный стыковой (двусторонний)	6 + 6	140	110	105	55	140	105	75	40
40	То же	9 + 9	130	105	90	40	120	95	80	35
40	Вертикальный стыковой	2	130	100	80	35	120	90	70	35

В зависимости от толщины листов основного металла при сварке стыковых горизонтальных и вертикальных швов на стенках резервуара применяют одно- и двустороннее раскрытие кромок. Тавровое соединение угловых швов днища с вертикальной стенкой на металле толщиной до 16 мм сваривают без раскрытия кромок, а металла большей толщины — с двусторонним раскрытием.

Выбор способов автоматизированной дуговой сварки. Для выполнения горизонтальных и вертикальных стыковых швов на вертикальной плоскости оценены технологические возможности процессов автоматизированной дуговой сварки в углекислом газе электродной сплошной проволокой Св-08Г2С и процесса сварки самозащитной порошковой проволокой ПП-АН19Н [3]. Наибольшую производительность при удовлетворительном формировании швов обеспечивает автоматизированная сварка самозащитной порошковой проволокой. При этом способе сварки в монтажных условиях для предотвращения пористости металла швов в зону сварочной ванны необходимо подавать дополнительно углекислый газ. Самозащитная порошковая проволока ПП-АН19Н обеспечивает высокую стабильность горения дуги, среднекапельный перенос электродного металла и легкое отделение шлаковой корки.

Ориентировочный режим автоматизированной дуговой сварки самозащитной порошковой проволокой следующий: $d_{пр} = 3,0$ мм; $I_{св} = 320...380$ А; $U_{д} = 24...28$ В; $v_{св} = 16$ (горизонтальные швы), $v_{св} = 3$ м/ч (вертикальные); $Q_{CO_2} = 16...20$ л/мин. Количество проходов горизонтальных швов в зависимости от толщины металла составляло при односторонней сварке 2 (для $\delta = 10$ мм) и 4 ($\delta = 15$ мм). Для металла больших толщин целесообразна двусторонняя сварка, при которой количество проходов соответствует 6-7 при $\delta = 25$ мм и 9-10 при $\delta = 40$ мм. Такие режимы способствуют равномерному формированию многослойных швов без дефектов типа пор, трещин и оксидных включений.

Изучены механические свойства сварных соединений низколегированной стали 09Г2С толщиной 10...40 мм при температурах +20...-60 °C (таблица). Сварные соединения с горизонтальными и вертикальными швами, выполненные самозащитной порошковой проволокой ПП-АН19Н на оптимальных режимах, отвечают существующим техническим требованиям для строительных металлоконструкций аналогичного назначения. Механические свойства сварных соединений с горизонтальными швами, как правило, лучше, чем у сварных соединений с вертикальными швами, выполненными за один проход. Увеличение толщины основного металла от 10 до 40 мм несколько снижает механические свойства соединений при комнатной и минусовых температурах.

Необходимость автоматизации сварки угловых швов в нижнем положении соединений внахлестку актуальна, учитывая, что нередко нужна полная замена полотнища днища. Эти технологические операции, как показали исследования, целесообразно выполнять автоматизированной дуговой сваркой под флюсом АН-60СМ электродной проволокой Св-08ГА диаметром 3,0 мм [4].

Для выбора эффективных способов сварки угловых швов, которые соединяют горизонтальное днище резервуара с вертикальной стенкой, изучены технологические возможности трех процессов автоматизированной дуговой сварки: под флюсом, самозащитной порошковой проволокой и проволокой сплошного сечения в защитных газах. Вследствие того, что самозащитная порошковая проволока в 4...5 раз дороже проволоки сплошного сечения, для дальнейшего испытания были выбраны автоматизированные дуговые процессы сварки под флюсом и в смеси защитных газов.

Опыты по сварке под флюсом низколегированной стали 09Г2С толщиной 10...30 мм выполняли с использованием флюса АН-66 и электродной проволоки Св-08Г2С диаметром 2,5 мм. Режимы сварки следующие: $I_{св} = 380...420$ А; $U_{д} = 28...30$ В; $v_{св} = 30...38$ м/ч; вылет электродной проволоки 25 мм; положение сварки — нижнее.



Отработана техника сварки тавровых соединений на металле указанной толщины, предусматривающая раскрытие кромок (при толщине металла до 16 мм) и двустороннее несимметричное раскрытие кромок с углом $45 \pm 5^\circ$ (при толщине металла больше 16 мм). В зависимости от толщины основного металла и формы раскрытия кромок выбирали оптимальный угол наклона электродной проволоки к горизонтальной плоскости. Для обеспечения нужного катета шва в пределах 6...12 мм сварку выполняли за 1-4 прохода с каждой стороны таврового соединения. По сравнению с ручной электродуговой сваркой покрытыми электродами разработанная технология автоматизированной дуговой сварки под флюсом позволила повысить производительность процесса в 3...4 раза.

Изучены механические свойства сварных соединений низколегированной стали 09Г2С. Полученные результаты механических испытаний отвечают требованиям СНиП 3.03.01-87 «Несущие и ограждающие конструкции». Результаты механических испытаний ударной вязкости сварных соединений стали 09Г2С толщиной 20 мм при разных температурах следующие: при температуре -20°C — $90...110 \text{ Дж/см}^2$; -40 — $75...90$; -60 — $65...100$. Учитывая возможные трудности использования сварки под флюсом в монтажных условиях, связанные в основном с подачей и уборкой флюса, сейчас отрабатывается технология сварки таких швов проволокой сплошного сечения диаметром 2,0...2,5 мм в смеси газов $\text{Ar} + 20\% \text{CO}_2$.

Исследованы также некоторые приемы управления характеристиками процессов автоматизированной дуговой сварки горизонтальных и вертикальных швов, а именно — путем увеличения вылета электрода, модуляции тока и скорости подачи электродной проволоки. В качестве сварочных материалов применяли самозащитную порошковую проволоку ПП-АН19Н и электродную проволоку марки Св-08Г2С в комбинации с углекислым газом. Для выполнения автоматизированной дуговой сварки с увеличенным вылетом электрода в монтажном аппарате АД-333М модернизированы токоподводящий мундштук и механизм подачи электродной проволоки. В результате он обеспечил регулирование вылета электрода в диапазоне 40...120 мм со скоростью подачи проволоки до 500 м/ч.

Установлено, что в результате увеличения вылета электрода до 80...100 мм коэффициент наплавки повышается на 20...30%, настолько же уменьшается зона термического влияния. Существенного изменения химического состава металла шва, уменьшения надежности защиты сварочной ванны и механических свойств швов не наблюдалось. Следует отметить, что одновременно с отмеченными положительными факторами при уве-

личении вылета электрода немного уменьшается рабочий диапазон тока, при котором сохраняется необходимая стабильность процесса сварки.

При изучении влияния модуляции тока на процесс дуговой сварки использовали следующий прием: при постоянной скорости подачи электродной проволоки сварочный ток кратковременно выключали [5]. Оптимальные значения продолжительности импульсов и пауз ориентировочно равнялись 1,2 и 0,5 с. При меньшей длительности импульсов процесс мало чем отличался от стационарного режима. Во всех случаях в металле швов наблюдались поры и оксидные неметаллические включения. По этой причине использование увеличенного вылета электрода и модуляции тока в монтажных условиях нецелесообразно.

Суть процесса дуговой сварки с управляемым переносом электродного металла заключается в подаче электроду импульса движения в направлении ванны, под действием которого капля расплавленного металла на торце электрода получает значительную кинетическую энергию [6, 7]. Последняя способна при мгновенной остановке электрода вызвать принудительный отрыв капли или обеспечить ее обязательный контакт с металлом сварочной ванны. При этом сила инерции должна превышать равнодействующую силу электромагнитного происхождения и силу поверхностного натяжения. Основными характерными параметрами процесса сварки с импульсной подачей электродной проволоки являются шаг, частота следования и продолжительность импульсов подачи и паузы. В результате проведенных опытов выбраны оптимальные значения шага (0,5...3,0 мм) и частоты импульсов ($10...50 \text{ с}^{-1}$) для выполнения швов в разных пространственных положениях.

Разработка монтажных аппаратов для ремонта резервуарных конструкций. Учитывая специфические требования к монтажной аппаратуре — небольшие масса и габариты, возможность установки непосредственно на сварочном изделии, оптимальный уровень автоматизации, при ремонте металлоконструкций подвергли испытанию разнообразные узлы легких аппаратов, которые используются в специальном оборудовании для автоматизированной дуговой сварки. К таким узлам относятся прежде всего ходовая тележка, механизм подачи электродной проволоки, схема управления процессом и источник питания дуги. Для стыковых горизонтальных швов предложена техника автоматизированной сварки с принудительным подформовыванием металла. Суть этого технологического приема заключается в том, что сварочная дуга горит в зоне, ограниченной с одной стороны основным металлом (или формирующим устройством), а с другой — медным водоохлаждающим ползуном. При этом ванна открыта с двух сторон — сверху и впереди, а угол наклона мун-



Рис. 1. Опытный образец монтажного аппарата для сварки угловых швов

дштука механизма подачи электродной проволоки может изменяться в диапазоне $\pm 30^\circ$.

Для реализации описанной техники автоматизированной дуговой сварки стыковых горизонтальных швов разработан специализированный монтажный рельсовый аппарат типа АД-330М. Ходовым механизмом аппарата является компактная трехколесная тележка, которая позволяет выполнять криволинейные швы с минимальным радиусом кривизны (до 1000 мм). Механизм подачи электродной проволоки и электрическая схема аппарата позволяют дистанционно управлять параметрами режимов. Аппарат перемещается по стенке резервуара по рельсовому пути. Технологические возможности испытанных источников питания сварочной дуги (ВДУ-504, ВДУ-506, ВДУ-601 и ВС-600М) практически равноценны при сварке электродной проволокой сплошного сечения и порошковой проволокой.

Для стыковых вертикальных швов, которые выполняются автоматизированной дуговой сваркой самозащитной порошковой проволокой с принудительным формированием, в зависимости от толщины листов могут использоваться как существующие рельсовые аппараты типа А-1381, так и модернизированный нами аппарат типа АД-333М.

Для автоматизации выполнения угловых швов в соединениях внахлестку (днище) и швов, которые соединяют днище с вертикальной стенкой, выполняются исследовательско-конструкторские работы по созданию специализированных аппаратов тракторного типа на базе унифицированных узлов, которые успешно использовались в аппаратах типа АД-330М и АД-333М. Особенностью



Рис. 2. Автоматизированная сварка под флюсом монтажных блоков при ремонте резервуара в ЗАО «ЛИНОС» (г. Лисичанск)

этих аппаратов является их компактность, небольшие размеры и масса, а также возможность перемещаться по поверхности сварочных листов и надежно копировать линию сварного соединения. В частности, в аппарате для сварки соединений внахлестку особое внимание уделено обеспечению надежного соблюдения расположения электродной проволоки относительно линии соединения. В аппарате для сварки угловых швов выбор ходового устройства магнитоэрозионного типа обусловлен необходимостью расположения аппарата непосредственно на вертикальной стенке, поскольку кромка днища, которая выступает извне, не превышает 40...50 мм и не может быть базой для перемещения аппарата.

На рис. 1 показан опытный образец аппарата для сварки угловых швов, который соединяет кромку днища с вертикальной стенкой резервуара.

Практический результат. По технологии, разработанной Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины совместно с фирмой «Экорембуд» (г. Ривне), отремонтирован цилиндрический резервуар вместимостью 20 тыс. м³ в г. Лисичанске Луганской области. Необходимо было заменить вертикальную стенку практически на всю высоту резервуара. По периметру корпуса этот участок составлял почти 25 %. В условиях ремонта резервуара использовали два процесса автоматизированной дуговой сварки: под флюсом — для соединения отдельных листов в монтажные блоки и самозащитной порошковой проволокой — для стыковых горизонтальных швов на вертикальной плоскости при монтаже блоков на вертикальной стенке. При сварке под флюсом в нижнем положении швов для толщины металла 9,0...12 мм применяли электродную проволоку Св-08ГА диаметром 5 мм и флюс АН-60СМ. Сварку выполняли трактором АДФ-1002 с источником питания ВДУ-1201 на режиме: $I_{св} = 720...850$ А, $U_d = 30...38$ В, $v_{св} = 20...28$ м/ч. Качественное формирование обратной стороны швов достигалось с помощью флюсомедной подкладки. Для замены стенки резервуара необходи-



Рис. 3. Автоматизированная сварка горизонтального шва стенки резервуара аппаратом АД-330М

мо было сварить шесть отдельных блоков в специальном кондукторе (рис. 2).

Автоматизированную дуговую сварку стыковых горизонтальных швов самозащитной порошковой проволокой с полупринудительным формированием наплавленного металла проводили или монтажным аппаратом АД-330М, который имел дистанционное управление, или источником питания ВДУ-506. Обратную сторону горизонтальных швов формировали медной подкладкой, которая имела канавку соответствующей геометрии. Режим сварки основных швов следующий: $I_{св} = 360...380$ А, $U_{д} = 24...26$ В, $v_{св} = 12...20$ м/ч. При толщине металла 9 и 12 мм сварку выполняли соответственно за два и три прохода (рис. 3).

Успешное выполнение ремонтных работ на резервуаре вместимостью 20 тыс. м³ позволило использовать технологию и оборудование автоматизированной дуговой сварки также и при строительстве новых резервуаров, в частности в г. Смига Ривненской и в г. Надворная Ивано-Франковской области [8]. При этом на первом этапе в основном применяли блочный метод монтажа. Стенка резервуара была разбита на три яруса блоков по высоте и 5...10 блоков по ширине каждого яруса. Сборку листов в блоки и их автоматизированную сварку выполняли в поворотном кондукторе аппаратом АДФ-1002 под флюсом. Для стыковых горизонтальных швов на вертикальной плоскости стенки использовали технологию автоматизированной многослойной дуговой сварки аппаратом АД-330М самозащитной порошковой проволокой ПП-АН19Н с дополнительной защитой ванны CO₂ и принудительным подформованием швов. Для стыковых вертикальных швов рекомендована технология сварки самозащитной проволокой ПП-АН19Н с принудительным формированием металла. В зависимости от

толщины листов и формы обработки кромок сварка выполняется рельсовым аппаратом типа АД-333М или безрельсовым аппаратом типа А-1150.

Преимущества описанных технологий автоматизированной дуговой сварки следующие:

возможность непосредственного обзора зоны горения дуги;

улучшение условий защиты сварочной ванны, что важно на монтаже;

уменьшение количества проходов при сварке металла больших толщин;

обеспечение правильной геометрии формирования швов;

увеличение производительности сварки в 1,5...2 раза по сравнению со сваркой в условиях свободного формирования швов.

Учитывая необходимость строительства нефтерезервуаров большой вместимости (50...70...100 тыс. м³), перспективным является метод листового монтажа таких металлоконструкций. При этом технологии автоматизированной дуговой сварки, безусловно, найдут широкое применение.

1. *Сварные строительные конструкции. Типы конструкций / Под ред. Л. М. Лобанова. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона. — Т. 2. — 1997. — 680 с.*
2. *Барвинко Ю. П., Голюшко В. М., Барвинко А. Ю. Новые технологии восстановления работоспособности вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов // Сварщик. — 1999. — № 4. — С. 6–8.*
3. *Порошковые проволоки для электродуговой сварки: Каталог-справочник / И. К. Походня, А. М. Суптель, В. Н. Шлепаков и др. — Киев: Наук. думка, 1980. — 180 с.*
4. *Опыт применения флюса АН-60СМ при сварке резервуаров / В. А. Поляков, В. С. Токарев, И. А. Гончаров и др. // Сб. мат. науч.-техн. сем. «Прогрессивные технологии сварки в промышленности», 20–22 мая 2003 г. — Киев, 2003. — С. 105–106.*
5. *Воропай Н. М., Илюшенко В. М., Ланкин Ю. Н. Особенности импульсно-дуговой сварки с синергетическим управлением параметрами режимов // Автомат. сварка. — 1999. — № 6. — С. 26–32.*
6. *Воропай Н. М. Параметры режимов и технологические возможности дуговой сварки с импульсной подачей электродной и присадочной проволоки // Там же. — 1996. — № 10. — С. 3–9.*
7. *Воропай Н. М., Илюшенко В. М. Тенденции развития комбинированных и гибридных процессов дуговой и плазменной сварки // Сб. докл. науч.-техн. сем. «Сварка и родственные процессы в промышленности», 12 апр. 2006 г. — Киев: Экотехнология, 2006. — С. 3–6.*
8. *Автоматизированная дуговая сварка стыковых соединений при листовом способе монтажа резервуаров / В. М. Илюшенко, В. А. Поляков, В. Р. Лашкевич и др. // Сб. докл. междунар. конф. «Современные проблемы сварки и ресурса конструкций», 24–27 нояб. 2003 г. — Киев, 2003. — С. 28–29.*

Comparative analysis has been performed of the processes of automated gas-shielded, self-shielded flux-cored wire arc and submerged-arc welding for repair of metal structures of large-sized tanks. Considered are the technological features of performance of various types of welds, as well as principles of development of specialized site apparatuses. Experience of and prospects for application of new developments are described.

Поступила в редакцию 20.03.2006