

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ И ГИБРИДНОЙ ТЕХНОЛОГИЙ СВАРКИ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДОВ

В. Д. ШЕЛЯГИН, В. Ю. ХАСКИН, кандидаты техн. наук, А. В. БЕРНАЦКИЙ, А. В. СИОРА, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описаны эксперименты по разработке приемов многопроходной лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки трубных сталей. Исследованы структура полученных соединений, а также их ударная вязкость и коррозионная стойкость. Показана целесообразность дальнейших разработок соответствующих технологических процессов для применения указанных способов сварки в целях повышения ресурса эксплуатации трубопроводного транспорта.

Ключевые слова: многопроходная лазерная сварка, гибридная лазерно-дуговая сварка, ударная вязкость, коррозионная стойкость

Рост эксплуатационного ресурса магистральных трубопроводов напрямую связан с дальнейшим повышением качества сварных соединений при высокой производительности сварки [1, 2]. Это особенно актуально для крупных трубопроводных систем, в том числе межконтинентальных и транснациональных, высокого давления (приблизительно 10...15 МПа для сухопутных и 20...25 МПа для морских трубопроводов). Необходимость повышения качества сварки обусловлена также использованием для трубопроводов сталей повышенной прочности (X70, X80 и X100).

Одним из путей решения указанных задач является применение лазерного излучения [3]. Благодаря малым размерам сварочной ванны и угла схождения сфокусированного излучения лазерная сварка дает возможность значительно уменьшить угол разделки свариваемых кромок. Вследствие высокой скорости лазерной сварки сравнительно небольшая погонная энергия позволяет минимизировать тепловое воздействие на свариваемые детали, а следовательно, уменьшить размер зоны термического влияния (ЗТВ) и остаточные деформации. Мелкозернистая структура литого металла шва и ЗТВ способствуют повышению коррозионной стойкости сварных соединений.

За последние десятилетия проведен ряд научных исследований, в результате которых появились технические решения, позволяющие использовать лазерную или гибридную лазерно-дуговую сварку для монтажа магистральных трубопроводов. Так, фирма VITS (г. Лангенселд, Германия) совместно с научно-исследовательским институтом BIAS (г. Бремен, Германия) разработала спо-

соб однопроходной лазерной сварки неповоротных стыков магистральных трубопроводов с толщиной стенки $\delta \leq 20$ мм с использованием излучения мощного (около 20 кВт) волоконного лазера. В Институте сварки (г. Галле, Германия) создана и успешно опробована машина для двухпроходной гибридной лазерно-дуговой сварки неповоротных стыков магистральных труб. При этом второй проход выполняли дуговой сваркой, т. е. лазерное излучение использовали только для формирования корневого шва. Фирмой «Фрониус» (Австрия) предложен гибридный тандемный способ сварки сталей, при котором двухдуговой тандем с плавящимися электродами совмещен с расположенным впереди по ходу сварки лазерным излучением [4].

Исследования лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки трубных сталей проводятся и в ИЭС им. Е. О. Патона. Эксперименты по гибридной лазерно-дуговой сварке изначально выполняли по технологической схеме, приведенной на рис. 1 [5], из которой видно, что лазерное излучение расположено впереди по ходу сварки, а дуга плавящегося электрода — сзади. Основной задачей лазерного излучения является достижение требуемой глубины провара, а дуги — формирование верхнего усиления и обеспечение такого термического цикла сварки, при котором не образуются нежелательные бейнитные и мартенситные структуры.

Исследования, проводимые по указанной схеме, показали, что при однопроходной сварке сталей толщиной более 5 мм 1,0 кВт мощности дуги может заменить 0,5 кВт мощности лазерного излучения. Это означает, что гибридная сварка позволяет снизить себестоимость применяемого оборудования и одного погонного метра сварного шва по сравнению с лазерной сваркой. Однако выяснилось, что при фиксированной мощности лазерного излучения максимальная глубина про-

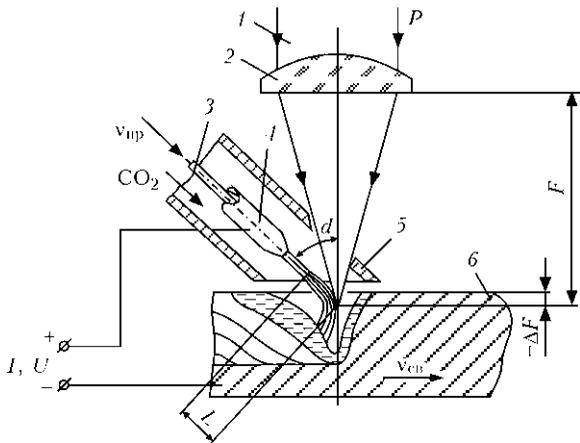


Рис. 1. Схема гибридной сварки лазерным излучением и дугой плавящегося электрода с защитой углекислым газом: 1 — лазерное излучение мощностью P , кВт; 2 — фокусирующий объектив с фокусным расстоянием F , мм; 3 — присадочная проволока; 4 — защитное сопло; 5 — медный токоподводящий мундштук; 6 — образец; $v_{св}$ — скорость сварки, м/ч; $v_{пр}$ — скорость подачи присадочной проволоки, м/ч; ΔF — заглубление горловины каустики излучения относительно поверхности образца, мм; α — угол наклона электрода к оси лазерного пучка, град; L — длина дуги, мм; $I_{св}$ — сварочный ток, А; $U_{д}$ — напряжение на дуге, В

вара также является фиксированным параметром, т. е. при уменьшении скорости сварки в определенный момент значение этого параметра перестает увеличиваться (возрастает ширина шва). В нашем случае при мощности излучения CO_2 -лазера до 3 кВт и близком значении мощности дуги глубина провара достигает 10 мм при скорости сварки 30 м/ч. Следовательно, при сварке трубных сталей большей толщины можно либо повышать мощность лазерного излучения, либо использовать многопроходную сварку. Оба эти подхода имеют недостатки: первый требует значительных экономических затрат и снижает длительность термического цикла сварки, а значит, способствует образованию нежелательных зака-

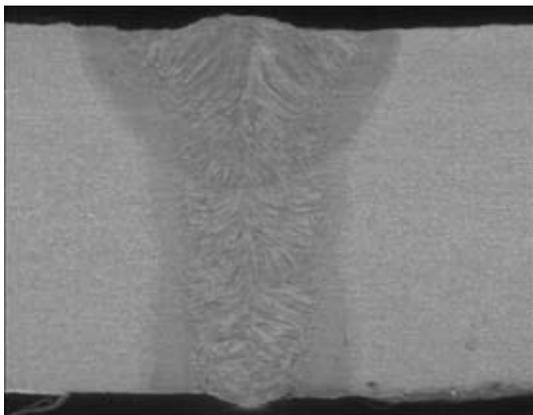


Рис. 2. Макрошлиф стыкового соединения стали 10Г2ФБ ($\delta = 19$ мм), полученного гибридной сваркой за четыре прохода на режиме: $P = 2,7$ кВт; $v_{св} = 25$ м/ч; $v_{пр} = 400$ м/ч (диаметр электродной проволоки 1,2 мм); $I_{св} = 200$ А; $U_{д} = 25$ В; защитный газ CO_2 (его расход $Q = 20$ л/мин)

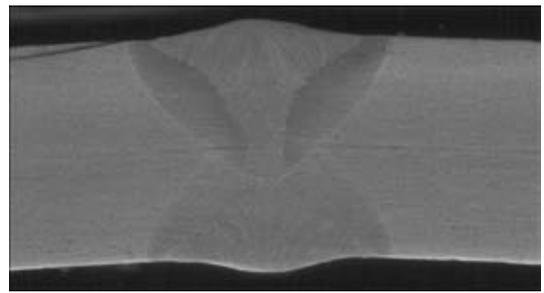


Рис. 3. Макрошлиф стыкового соединения стали 13Г1СУ ($\delta = 14$ мм, разделка кромок X-образная, угол разделки 30° с притуплением 5 мм), полученного за два прохода гибридной сваркой дугой с плавящимся электродом Св-08Г2С диаметром 1,2 мм и излучением Nd:YAG-лазера на режиме: $P = 4,0$ кВт; $I_{св} = 260$ А; $U_{д} = 27$ В; $v_{св} = 30$ м/ч; $v_{пр} = 510$ м/ч; защитная смесь 82 % $Ar + 18$ % CO_2 ($Q = 14$ л/мин)

лочных структур; использование второго привода к понижению производительности.

Нами проведены исследования многопроходной лазерно-дуговой сварки трубных сталей толщиной до 20 мм в узкую разделку. Примеры макрошлифов стыковых соединений, полученных в ходе экспериментов, представлены на рис. 2–4. Наряду с выбором параметров технологического режима исследовали металлографические особенности образцов стыковых соединений, их коррозионную стойкость и ударную вязкость.

Кроме сварки стыков, исследовали задачу выполнения корневого шва лазерной и гибридной сваркой. Установлено, что для получения качественного валика обратного усиления сварного шва со стороны разделки последняя должна иметь U-образную или прямоугольную форму. В случае Y-образной разделки происходит утяжка металла шва — дефектное формирование соединения. Задача значительно упрощается при сварке со стороны притупления (противоположной разделке). Для получения качественного обратного усиления нами предлагается выполнять лазерную сварку согласно схеме, показанной на рис. 5. По этой схеме притупление 5...7 мм сваривается излучением CO_2 -лазера (или лазера другого типа) мощ-

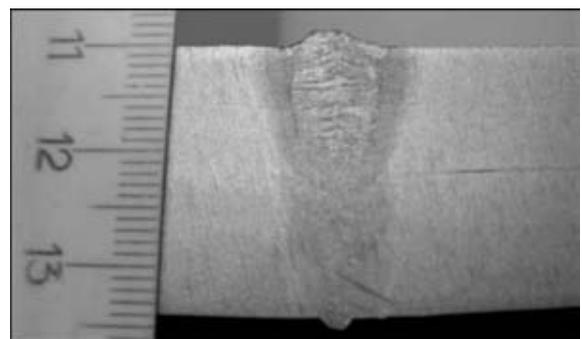


Рис. 4. Макрошлиф стыкового соединения стали 09Г2С ($\delta = 25$ мм), полученного гибридной сваркой в узкую разделку за шесть проходов дугой с плавящимся электродом Св-08Г2С диаметром 1,2 мм и излучением Nd:YAG-лазера на режиме: $P = 4,4$ кВт; $I_{св} = 300$ А; $U_{д} = 30$ В; $v_{св} = 60$ м/ч; $v_{пр} = 700$ м/ч; защитный газ CO_2 ($Q = 30$ л/мин)

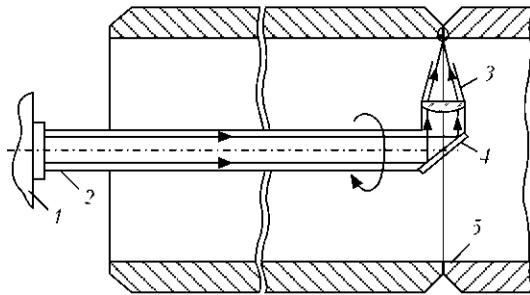


Рис. 5. Схема орбитальной сварки корневого шва для монтажа трубных стыков: 1 — CO₂-лазер; 2 — поворотный лучепровод; 3 — лазерная сварочная головка; 4 — поворотное зеркало; 5 — неповоротный трубный стык

ностью до 5 кВт без использования присадочной проволоки. Такой технологический прием позволяет получать усиление высотой около 0,5...1,0 мм за счет увеличения объема переплавленного металла. При этом структура металла шва и ЗТВ мелкозернистая и отличается повышенной стойкостью к коррозии, что является важным моментом, поскольку такой шов выполняют внутри трубы — в месте контакта с агрессивной средой. При использовании предлагаемого технологического приема допустимый зазор между свариваемыми кромками не должен превышать 0,1...0,3 мм.

Для оценки электрохимической гетерогенности сварных соединений стали 13Г1СУ, выполненных лазерным, гибридным лазерно-дуговым и дуговым способами сварки, проведены измерения распределения потенциала электрохимической коррозии под каплей. В качестве электролита использовали 3%-й раствор хлористого натрия в воде. Результаты этих исследований приведены в таблице. Установлено, что большей гетерогенностью отличается соединение, полученное сваркой дугой с плавящимся электродом. Соединения, полученные лазерной и гибридной сваркой, характеризуются меньшими показателями потенциала электрохимической коррозии, они более электрохимически гомогенны. На основании этого можно заключить, что для одних и тех же сталей при использовании одной и той же присадочной (электродной) проволоки и одинаковой газовой защите сварочной ванны лазерная и гибридная способы сварки способны обеспечить большую

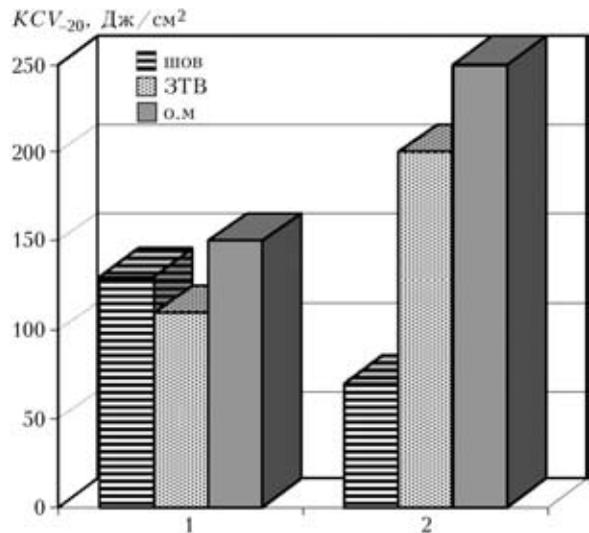


Рис. 6. Результаты измерения ударной вязкости KCV_{20} металла шва и ЗТВ образцов из стали 13Г1СУ ($\delta = 14$ мм), полученных гибридным способом сварки за два прохода (1) и из стали 10Г2ФБ ($\delta = 19$ мм), полученных за четыре прохода (2)

коррозионную стойкость по сравнению с дуговой сваркой.

Проведенные по методу Шарпи на образцах с острым надрезом при -20 °С измерения ударной вязкости KCV дали следующие результаты (рис. 6). При двухпроходной лазерно-дуговой сварке металл шва отличается значительно большей ударной вязкостью по сравнению с основным металлом, чем при четырехпроходной сварке. Металл ЗТВ, напротив, при четырехпроходной сварке имеет несколько большую вязкость, чем при двухпроходной (по сравнению с основным металлом). Это можно объяснить тем, что при четырехпроходной сварке каждый последующий проход воздействует на предыдущий, а при двухпроходной сварке, выполняемой с двух сторон образца, такое воздействие практически исключается. Таким образом, при четырехпроходной сварке происходит перекристаллизация металла шва и нормализация ЗТВ, а при двухпроходной преимущественно сохраняются те структуры, которые образовались изначально. Это подтверждают и результаты металлографических исследований. Так, при четырехпроходной сварке в ме-

Потенциалы электрохимической коррозии стыковых соединений стали 13Г1СУ ($\delta = 14$ мм), полученных различными способами сварки с использованием проволоки Св-08Г2С диаметром 1,2 мм

Способ сварки	Потенциал в основном металле $E_{о.м}$, В	Потенциал в сварном шве $E_{с.ш}$, В		Потенциал в ЗТВ $E_{зТВ}$, В*		Разность потенциалов основного металл-сварной шов ΔE , В
		Верх	Корень	Верх	Корень	
Лазерная	-0,58	-0,51	-0,53	-0,53	-0,58	-0,07
Гибридная лазерно-дуговая	-0,58	-0,52	-0,52	-0,52	-0,54	-0,07
Дуговая	-0,58	-0,48	-0,49	-0,49	-0,54	-0,10

* Значения $E_{зТВ}$ для ЗТВ, расположенных по обе стороны шва, одинаковы.

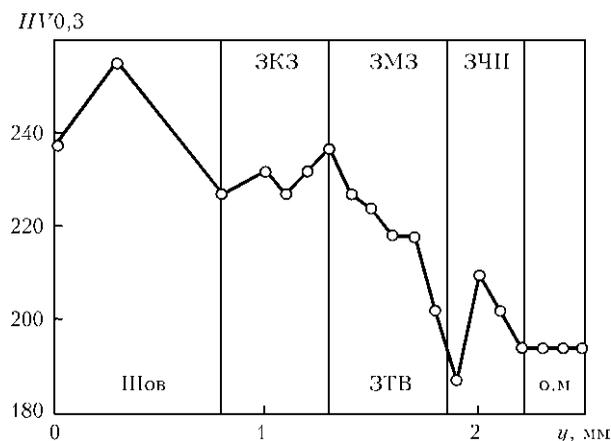


Рис. 7. Распределение твердости $HV_{0,3}$ в поперечном сечении y сварного соединения стали 13Г1СУ ($\delta = 14$ мм), полученном четырехпроходной гибридной сваркой ($v_{св} = 60$ м/ч): ЗКЗ — зона крупного зерна; ЗМЗ — зона мелкого зерна; ЗЧП — зона частичной перекристаллизации

талле шва и ЗТВ преобладают ферритно-перлитные структуры (см. рис. 2). Подобные структуры имеют место и в металле шва, выполненного за два прохода (см. рис. 3). Однако в металле ЗТВ последнего формируются участки верхнего бейнита и мартенсита, что способствует повышению твердости этих участков свыше предельных значений ($HB\ 260\dots280$).

В металле ЗТВ наибольшая твердость наблюдается в месте перехода зоны крупного зерна к зоне мелкого зерна (рис. 7), наиболее критичной к ударным и циклическим нагрузкам. Именно поэтому образцы для измерения ударной вязкости, значения которой приведены на рис. 6, старались выполнять так, чтобы острый надрез приходился на эту зону. Полученные результаты свидетельствуют о том, что несмотря на достаточно высокие значения ударной вязкости необходимы дальнейшие исследования, направленные на снижение твердости ЗТВ при лазерно-дуговой сварке. Однако следует учитывать, что при данном способе сварки, как и при лазерной сварке, существует опасность образования закалочных структур в металле ЗТВ и в литом металле шва. В настоящее время вопрос о том, допустимы ли такие структуры (в связи с их мелкодисперсностью и пластичностью) или их следует устранять путем последующей термообработки или применения дополнительных технологических приемов, находятся на стадии исследований.

Experiments on development of techniques of multipass laser and laser-arc welding of pipe steels are described. Structure of the produced joints was studied, as well as their impact toughness and corrosion resistance. Rationality of further work on improvement of technological processes with application of the above welding techniques to extend the operating life of pipeline transport is shown.

Таким образом, результаты исследований структуры сварных соединений трубных сталей, полученных многопроходной лазерной и лазерно-дуговой сваркой, а также их ударной вязкости и коррозионной стойкости, позволяют считать указанные способы сварки перспективными для повышения ресурса эксплуатации трубопроводного транспорта. Гибридная лазерно-дуговая сварка трубных сталей ($\delta > 5$ мм) позволяет снизить мощность лазерного излучения и частично заменить ее более дешевой мощностью электрической дуги из расчета мощность 1,0 кВт дуги вместо 0,5 кВт мощности лазерного излучения. При мощности лазерного излучения до 3 кВт применение гибридного процесса сварки сталей целесообразно при толщине листа до 10 мм, свыше этого значения глубина проплавления не возрастает даже при снижении скорости сварки. Для сварки листов большой толщины целесообразно использовать излучение большей мощности. С этой целью рекомендовано применение многопроходной лазерной или гибридной сварки. При гибридной сварке ширина шва и ЗТВ больше по сравнению с лазерной. Повышение скорости сварки и содержания углерода в основном металле приводит к образованию в ЗТВ нежелательных мартенситных структур. Способы устранения этого недостатка требуют дальнейшего изучения.

1. Оценка состояния металла сварных труб длительно эксплуатируемых газопроводов / С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков, Л. В. Гончаренко и др. // Автомат. сварка. — 2003. — № 4. — С. 3–7.
2. Рыбаков А. О., Семенов С. Е., Гончаренко Л. В. Оцінка стану та проявів деформаційного старіння металу газопроводів при використанні сталі контрольованої прокатки // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Зб. наук. ст. за результатами, отриманими в 2004–2006 рр. / Наук. кер. — акад. Б. С. Патон. — Київ: ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України, 2006. — С. 324–327.
3. Разработка технологии двухлучевой лазерной сварки и натурные испытания газонефтепроводных труб / А. Г. Григорьянц, Н. В. Грезев, И. А. Романцов и др. // Свароч. пр-во. — 2006. — № 5. — С. 3–37, 63, 64.
4. Staufer H., Ruehrnoebl M. Fuer große Blechdicken und hohe Schweißgeschwindigkeiten: Laserhybrid- + Tandemschweißen // Praktiker. — 2006. — № 10. — S. 300–302.
5. Гибридная сварка излучением CO_2 -лазера и дугой плавящегося электрода в углекислом газе / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, В. П. Гарашук и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 10. — С. 38–41.

Поступила в редакцию 26.02.2010