



ЛАЗЕРНАЯ И ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА СТАЛЕЙ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

В. Д. ШЕЛЯГИН, В. Ю. ХАСКИН, кандидаты техн. наук,
А. В. СИОРА, А. В. БЕРНАЦКИЙ, Е. И. ГОНЧАРЕНКО, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Т. Г. ЧИЖСКАЯ, инж. (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Определено влияние аргона, углекислого газа и их смеси на особенности лазерной и гибридной сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Установлено положительное влияние применения защитной газовой смеси. Показано, что повышение мощности дуговой составляющей при гибридной сварке с лазерным излучением мощностью 1...2 кВт приводит к нивелированию гибридного эффекта. При этом стабилизация дуги и ее привязки лазерным излучением сохраняются, что позволяет повысить скорость сварки или глубину проплавления при сварке с разделкой кромок.

Ключевые слова: лазерная сварка, низкоуглеродистые и низколегированные стали, непрерывное излучение, пониженная мощность, электродная проволока, дуга, гибридный процесс, сталь, металлографическое исследование, структура, твердость

При выборе защитных газов для лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки необходимо учитывать, что газовая среда должна обеспечивать надежную защиту расплавленного и нагретого металла от воздуха для предотвращения образования оксидов и нитридов. При этом желательно, чтобы расход защитного газа и его стоимость были минимальны. Защитная среда и образующаяся в ней лазерная плазма должны быть максимально прозрачными для лазерного излучения. Плазма состоит из ионизированного лазерным излучением защитного газа и паров металла, выходящих из парогазового канала [1]. Недопустимо образование так называемой плазменной линзы, перефокусирующей излучение.

Исходя из этих условий для сварки углеродистых сталей обычно применяют углекислый газ, а в редких случаях — аргон. Однако первый снижает ударную вязкость металла шва при отрицательных температурах, что значительно ограничивает его применение для сварки ответственных металлоконструкций, а аргон способствует возникновению плазмы, перефокусирующей и поглощающей значительную долю (до 2/3 общей мощности) излучения CO₂-лазеров [2]. Для уменьшения этого эффекта используют различные схемы подачи защитного газа, которые в основном базируются на продувке под определенным углом относительно оси излучения [3]. Однако при гибридной сварке аргон способствует струйно-вращательному переносу электродного металла, уве-

личению сварочного тока и образованию подрезов верхнего валика усиления.

Для лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки желательно использовать такие газы или их смеси, которые позволяют устранить указанные недостатки, повысить скорость сварки, увеличить глубину проплавления и снизить склонность металла шва к образованию пор [4, 5]. К таким газам в первую очередь относятся гелий и его смеси с аргоном. Однако существенным недостатком гелия является его значительная стоимость, особенно при сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Положительное влияние оказывает также углекислый газ, который позволяет повысить эффективность плавления электродного и основного металлов.

В настоящей работе рассмотрены особенности лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки тонколистовых низкоуглеродистых и низколегированных сталей в углекислом газе, аргоне и их смеси (80 % Ar + 20 % CO₂) [5]. Одним из примеров практического применения таких способов сварки является крупносерийная сварка бытовых баллонов низкого (до 2,4 МПа) давления. Предположительно она может заменить сварку вращающейся дугой, при которой получают швы со слишком большим (2...3 мм) усилением и внутренним гратом. Основным условием технологии этого способа сварки является использование сравнительно недорогого технологического лазера. В качестве такового выбран быстропроточный CO₂-лазер непрерывного действия с поперечной прокачкой смеси, генерирующий излучение мощностью до 2 кВт с кольцевым распределением интенсивности в поперечном сечении (например, типа «Плутон-2» или УЛГ-2). С учетом потерь мощности при транспортировке и фокусировании из-

Таблица 1. Результаты металлографических исследований образцов, выполненных лазерной сваркой

Защитный газ	Микротвердость структурных составляющих металла сварных соединений низкоуглеродистой стали									Балл зерна	
	Шов			ЗТВ							
				Участок крупного зерна			Участок мелкого зерна				
	Ф	П	Б	Ф	П	Б	Ф	П	Б	Участок крупного зерна	Участок мелкого зерна
Ar	250	—	260...290	Следы	—	260...280	189	200...210	—	7	10
CO ₂	190...220	Следы	—	185...190	Следы	—	195	—	230...240	7	10
80 % Ar + 20 % CO ₂	230...260	260...270	290...300	220...240	» »	Следы	190...210	Следы	—	6	9...10

лучения линзой с фокусным расстоянием $F = 300$ мм на деталь при проведении технологических экспериментов установлена необходимая мощность — 1,5 кВт.

Для определения влияния защитного газа, скорости сварки и сварочного тока на изменение глубины проплавления проведен ряд сравнительных экспериментов с использованием лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки в аргоне, углекислом газе и их смеси (80 % Ar + 20 % CO₂). Сварку выполняли встык без разделки кромок. Основным металлом образцов толщиной $\delta = 2$ мм, впоследствии свариваемый лазерной сваркой, имел следующий химический состав, мас. %: 0,1 С; 0,024 Si; 0,8 Mn; 0,003 S; 0,013 P; 0,03 Cr; 0,03 Ni; менее 0,03 Mo; менее 0,02 Cu; менее 0,02 V. Сварку гибридным способом осуществляли на образцах из стали Ст3пс ($\delta = 5$ мм).

Техника лазерной и гибридной сварки описана в работах [6, 7]. Лазерную сварку выполняли на следующем режиме: мощность сфокусированного излучения $P_0 = 1,5$ кВт; скорость сварки $v_{св} = 40$ м/ч; заглупление фокуса $\Delta F = -1$ мм; расход каждого из указанных выше защитных газов 7 л/мин. При гибридной сварке использовали следующий режим: $P_0 = 1,5$ кВт, $v_{св} = 45$ м/ч, $\Delta F = -2...-3$ мм, скорость подачи электродной проволоки Св-08Г2С диаметром 1,2 мм $v_{пр} = 400$ м/ч, расход каждого из защитных газов 15 л/мин. При этом сварочный ток

$I_{св}$ для углекислого газа, газовой смеси и чистого аргона составлял соответственно 200, 250 и 300 А.

Установлено, что при сварке излучением CO₂-лазера использованные защитные газы влияют на глубину проплавления незначительно. Существенное влияние на этот параметр оказывают мощность лазерного излучения и расположение фокуса относительно поверхности образца. При лазерной сварке использование газовой смеси увеличивает ширину проплавления, а при гибридной — глубину. Влияние скорости сварки и сварочного тока на глубину проплавления при гибридной и дуговой сварке плавящимся электродом в углекислом газе и смеси показано на рис. 1 и 2. Для увеличения глубины проплавления при гибридной сварке без повышения лазерной мощности необходимо выполнять V-образную разделку кромок стыкового соединения и заглуплять фокус. С возрастанием мощности дуги при неизменной и сравнительно небольшой мощности излучения проявление гибридного эффекта заметно меньше [8].

Для металлографических исследований структуры сварных швов, выполненных лазерной и гибридной сваркой с различной газовой защитой, образцы травили в 4%-м растворе азотной кислоты в спирте, структуру их металла изучали с помощью оптического микроскопа «Neophot-32» при увеличениях от 25 до 500 крат. Измерение

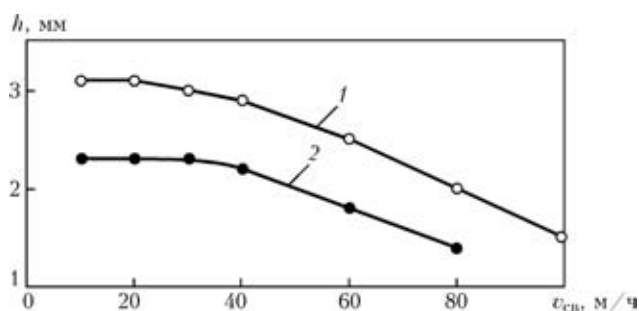


Рис. 1. Зависимости глубины проплавления h от скорости $v_{св}$ гибридной (1) и дуговой (2) сварки при выполнении швов на стали Ст3пс ($\delta = 5$ мм) электродной проволокой диаметром 1,2 мм: 1 — $I_{св} = 200$; 2 — 300 А

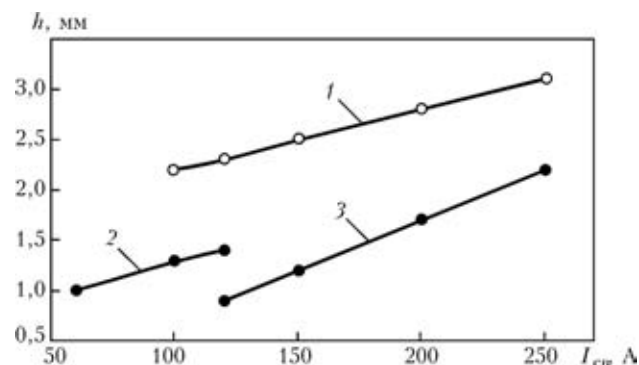


Рис. 2. Зависимости глубины проплавления h от сварочного тока $I_{св}$ при гибридной сварке электродной проволокой диаметром 1,2 мм (1) и дуговой сварке электродной проволокой диаметром 0,8 (2) и 1,2 мм (3) при $P_0 = 1,5$ кВт; $\Delta F = -1...-2$ мм; $v_{св} = 40$ м/ч

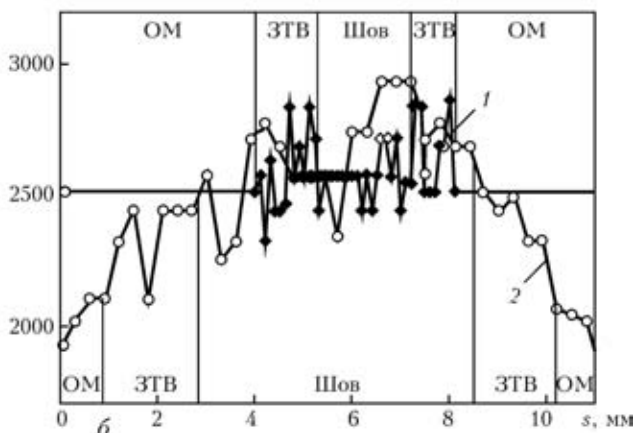
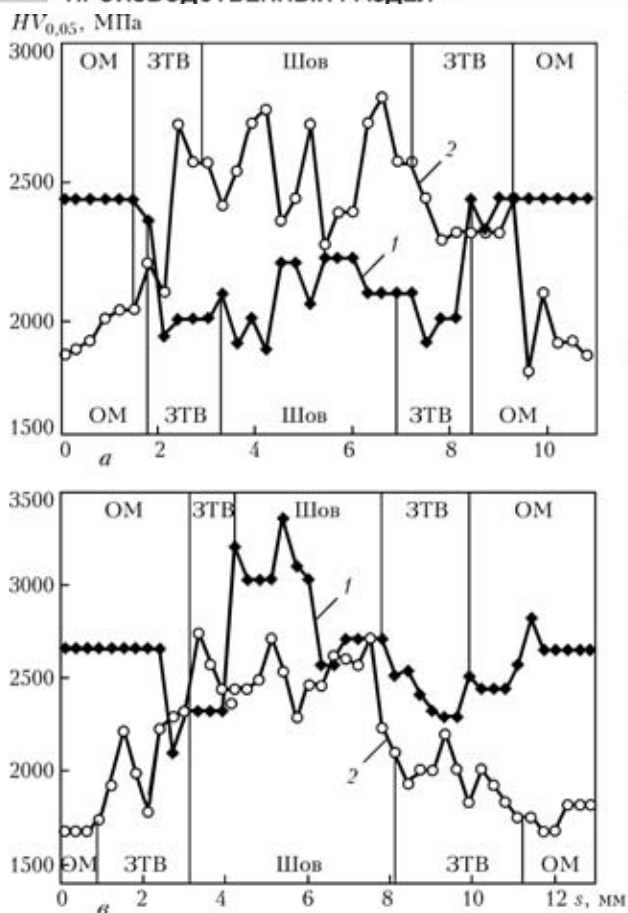


Рис. 3. Распределение микротвердости в поперечном сечении образцов из низколегированной (○ ◆) и низкоуглеродистой (○) стали, выполненных соответственно лазерным (1) и гибридным (2) способами сварки в углекислом газе (а), аргоне (б) и смеси газов 80 % Ar + 20 % CO₂ (в): ОМ — основной металл; ЗТВ — зона термического влияния; шов — зона литого металла; s — поперечное сечение провода

балла зерна проводили согласно ГОСТ 5639–82. Результаты исследований приведены в табл. 1 и 2. Микротвердость измеряли на твердомере М-400 фирмы «Леко» при нагрузке 0,05 МПа. На основании результатов измерений построены графики, приведенные на рис. 3.

В ЗТВ выделяется два основных участка — крупного (участок перегрева) и мелкого зерна (участок перекристаллизации или нормализации). Остальные участки, обычно выделяемые в ЗТВ [9], не рассматривались в связи с отсутствием в них видимых изменений.

Сначала рассмотрим результаты лазерной сварки низколегированной стали ($\delta = 2$ мм) указанного выше химического состава. Основной металл исследованных образцов до сварки подвергали термообработке, вследствие чего он приобрел мелкозернистую структуру с баллом зерна 9–10, состоящую преимущественно из феррита (Ф) с небольшим количеством перлита (П). Твердость основного металла составляла HV 210...260.

Микроструктура металла сварных соединений образцов, выполненных лазерной сваркой, представлена в табл. 1, а распределение микротвердости в поперечном сечении соединений — на рис. 3, кривая 1. Отметим, что в отличие от образцов, полученных лазерной сваркой в аргоне и углекислом газе, структура литой зоны образца, выполненного этим же способом сварки в смеси

80 % Ar + 20 % CO₂, состоит из Ф, П и бейнита (Б), а также содержит участки видманштеттова феррита (ВФ). Балл зерна его структуры небольшой, что свидетельствует о значительном перегреве.

При лазерной сварке низколегированных сталей применение аргона (в большей степени смеси аргона с углекислым газом) приводит к повышению твердости металла швов за счет увеличения объемной доли и твердости бейнитной составляющей. В рассматриваемой стали росту твердости способствует повышенное содержание марганца (до 0,8 %). По-видимому, увеличение твердости отчасти связано с изменением прозрачности плазмы факела, образующегося над парогазовым каналом, а также с условиями теплоотвода при использовании различной газовой среды для защиты. Так, из-за экранирования излучения плазменным факелом при использовании аргона глубина проплавления снижалась более чем в 2 раза. При этом скорость охлаждения жидкого металла повышалась, что способствовало увеличению его твердости. Применение смеси 80 % Ar + 20 % CO₂ приводит к некоторому (10...30 %) увеличению ширины швов, значительному улучшению формирования верхнего усиления и устраняет склонность к образованию подрезов. Глубина проплавления при этом не возрастает. По всей вероятности, применение указанной газовой смеси мо-

Таблица 2. Результаты металлографических исследований образцов, выполненных гибридной сваркой

Защитный газ	Микротвердость структурных составляющих металла сварных соединений низкоуглеродистой стали								
	Шов					ЗТВ			
	Ф	ВФ	П	Б	Ширина ферритной оторочки, мм	Участок крупного зерна			
Ф						ВФ	П	Б	
Ar	230...250	210...220	—	270...290	0,0125...0,0190	205	230	230...245	—
CO ₂	230...250	230...250	Следы	260...270	0,0065...0,0125	190...220	Следы	220...240	—
80 % Ar + 20 % CO ₂	220...230	225...235		245...255	0,0125...0,0170	190...195	—	230	—

Окончание табл. 2

Защитный газ	Микротвердость структурных составляющих металла сварных соединений низкоуглеродистой стали				Ширина ферритной оторочки, мм	Балл зерна	
	ЗТВ					Участок крупного зерна	Участок мелкого зерна
	Участок мелкого зерна						
	Ф	ВФ	П	Б			
Ar	210	—	Следы	—	0,0125...0,0250	4–5	9
CO ₂	170	—	190	—	0,0065...0,0130	6	9
80 % Ar + 20 % CO ₂	180	—	220	—	0,0125...0,0235	4–6	8–9

жет увеличить глубину проплавления лишь при сварке излучением диодного лазера [10].

Рассмотрим теперь результаты сварки гибридным способом образцов из низкоуглеродистой стали СтЗпс ($\delta = 5$ мм). Структура основного металла во всех случаях представляла собой ферритно-перлитную смесь с преобладанием феррита (балл зерна 7...8, твердость Ф HV 140...170, П — 190...250). Микроструктура металла соединений образцов, выполненных этим способом сварки, представлена в табл. 2, а распределение микротвердости в поперечном сечении соединений — на рис. 3, кривая 2. Отметим, что в отличие от лазерной сварки при гибридной в большинстве случаев наблюдается наличие ВФ. Как и следовало ожидать, балл его зерна понизился, т. е. структура стала более крупнозернистой. Во всех случаях металл ЗТВ имеет в основном крупнозернистую структуру, участки мелкого зерна выражены неявно. При гибридной сварке в смеси 80 % Ar + 20 % CO₂ твердость металла шва несколько уменьшается. Важным моментом является сравнительно небольшой размер ферритных оторочек в металле шва и ЗТВ. При этом показатели ударной вязкости достаточно высоки.

Отметим, что по сравнению с лазерной сваркой гибридная способствует снижению твердости металла сварных соединений и способствует получению более однородной его структуры. В ней появляется ВФ, твердость бейнитной составля-

щей несколько уменьшается. Влияние различной защитной газовой среды на структуру металла шва и ЗТВ при гибридной сварке не выявлено, но обнаружено влияние на формирование швов. Так, наилучшее формирование швов, отсутствие подрезов верхнего валика, снижение разбрызгивания жидкого металла наблюдаются при использовании смеси 80 % Ar + 20 % CO₂, в случае применения углекислого газа формирование швов удовлетворительное, но при этом значительно увеличивается разбрызгивание металла из ванны и имеет место нестабильное горение сварочной дуги. Использование в качестве защитного газа аргона приводит, как и в случае лазерной сварки, к уменьшению до 1 мм глубины проплавления. При этом по бокам верхнего валика образуются значительные подрезы, а в литом металле швов появляются поры и трещины. При гибридной сварке углеродистых сталей в смеси 80 % Ar + 20 % CO₂ глубина проплавления при одинаковом режиме сварки возрастает примерно на 15...25 %. Во всех рассмотренных случаях наличие аргона в защитном газе повышает склонность к образованию трещин в верхней части швов.

Таким образом, по сравнению с углекислым газом применение смеси аргона с углекислым газом в соотношении 4:1 при гибридной лазерно-дуговой сварке позволяет на 15...25 % повысить глубину проплавления. При этом улучшается стабильность горения сварочной дуги, снижается раз-



брызгивание металла, повышается качество формирования швов. Использование той же смеси газов для защиты ванны при лазерной сварке улучшает формирование швов, увеличивая при этом их ширину на 10...30 % по сравнению со швами, выполненными сваркой в углекислом газе; при этом твердость металла шва повышается на 20...25 %. Использование в качестве защитного газа аргона во всех случаях снижает глубину проплавления. При гибридной сварке при этом образуются подрезы в верхнем валике; при лазерной — увеличивается твердость металла ЗТВ на 10...20 % по сравнению с металлом шва.

При сварке в углекислом газе или смеси его с аргоном глубину проплавления определяет мощность лазерного излучения и положение его фокуса относительно поверхности образца. Для повышения глубины проплавления при гибридной сварке стыковых соединений целесообразно выполнять V-образную разделку кромок и опускать фокус ближе к ее дну. Повышение мощности дуговой составляющей при гибридной сварке с лазерным излучением мощностью 1...2 кВт приводит к снижению гибридного эффекта. При этом стабилизация сварочной дуги и ее привязка к лазерному излучению сохраняются, что позволяет существенно повысить скорость сварки или глубину проплавления стыковых соединений с разделкой кромок. При гибридной сварке твердость

и структура металла шва и ЗТВ в смеси аргона с углекислым газом позволяют повысить ударную вязкость металла сварных соединений по сравнению с дуговой сваркой.

1. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н. Лазерная техника и технология / Под ред. А. Г. Григорьянца: В 7 кн. Кн. 5. Лазерная сварка металлов. — М.: Высш. шк., 1988. — 207 с.
2. Грезев А. Н. Плазмообразование при лазерной сварке // Свароч. пр-во. — 2005. — № 5. — С. 20–25.
3. Лазерная сварка с циркулирующей защитного газа / С. Екоя, С. Тагаки, Т. Огата и др. // Quartely J. of JWS. — 2001. — № 19, № 1. — С. 37–43 с.
4. Neue gase erzeugen schiankere Naehete // Produktion. — 2003. — № 30/31. — С. 15.
5. Воропай Н. М., Илюшенко В. М., Хаскин В. Ю. Выбор защитного газа для гибридного процесса лазерно-дуговой сварки // Сварщик. — 2006. — № 4. — С. 19–23.
6. Лазерная сварка тонколистовых сталей с использованием специальных приемов / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, А. В. Сиора и др. // Автомат. сварка. — 2003. — № 1. — С. 41–44.
7. Гибридная сварка излучением CO₂-лазера и дугой плавящегося электрода в углекислом газе / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, В. П. Гарашук и др. // Там же. — 2002. — № 10. — С. 38–41.
8. Кривиун И. В. Модель испарения металла при дуговой, лазерной и лазерно-дуговой сварке // Там же. — 2001. — № 3. — С. 3–10.
9. Грабин В. Ф., Денисенко А. В. Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей. — Киев: Наук. думка, 1978. — 276 с.
10. Danzer W., Haertl J. Diodenlaser zum Tiefschweissen einsetzbar — Mit Aktivgas als Prozessgas // Praktiker. — 2002. — № 2. — S. 34–35.

The effect of argon, carbon dioxide and their mixture on peculiarities of laser and hybrid welding of low-carbon and low-alloy steels was determined. Utilisation of the shielding gas mixture was found to have a positive effect. It is shown that increase of the arc power component in hybrid welding with a laser power of 1...2 kW leads to levelling of the hybrid effect. Stabilisation of the arc and its laser beam fixation persists, which allows increasing the welding speed and penetration depth in groove welding.

Поступила в редакцию 05.06.2006