



МНОГОПРОХОДНАЯ СВАРКА СТАЛЕЙ БОЛЬШИХ ТОЛЩИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

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

Описана технология многопроходной автоматизированной лазерной и лазерно-дуговой сварки конструкционных сталей толщиной до 20 мм. Производительность гибридного способа сварки выше в несколько раз по сравнению с лазерной сваркой.

Ключевые слова: лазерная сварка, присадочная проволока, дуга, плавящийся электрод, гибридный процесс, углеродистые стали большой толщины, количество проходов, режим, погонная энергия, металлографические исследования, структура, твердость, ударная вязкость

Производственная необходимость повышения качества сварных швов и производительности процесса сварки стимулирует совершенствование существующих и создание новых технологий сварки. Для изготовления стальных конструкций из листов углеродистой стали толщиной 10...50 мм для морских судов, крупногабаритных сосудов, труб газопроводов широкое применение получила дуговая сварка в активных газах, под флюсом и электрошлаковая [1]. Однако, кроме определенных технологических преимуществ, эти способы сварки имеют ряд недостатков: значительные размеры сварочной ванны и протяженность ЗТВ, склонность к возникновению горячих трещин, большой расход присадочной проволоки, необходимость последующей термической обработки (отпуска), наличие существенных остаточных термических деформаций, необходимость предварительной механической разделки кромок под углом 30° и более, низкая производительность процесса.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология многопроходной автоматизированной сварки сталей толщиной до 100 мм дугой с плавящимся электродом в узкий зазор [2]. Она состоит в том, что стыкуемые кромки, скошенные под углом 1,0...1,5°, размещают с зазором 10...18 мм на подкладке, сварочную горелку вводят в зазор, а затем при возвратно-поступательных колебаниях горелки заполняют его расплавленной присадочной проволокой диаметром до 1,6 или 2...3 мм. Процесс осуществляют в смеси защитных газов 80 % Ar + 20 % CO₂ со скоростью 16...22 м/ч. Для предупреждения возникновения продольных горячих трещин в середине шва сварку выполняют углом вперед (угол составляет приблизительно 30...35°). Вылет электрода корректируют автоматически в процессе сварки.

Установлено [2], что применение многопроходной сварки в узкий зазор обеспечивает высокие механические свойства соединений толстолистовых сталей без последующей высокотемпературной об-

работки (нормализации), при этом достигаются не только высокая прочность, но и пластичность металла шва и ЗТВ. Это обусловлено тем, что при многопроходной сварке происходит термическая обработка предыдущих слоев металла последующими и создаются оптимальные условия охлаждения валика. Процесс сварки характеризуется относительно низкой погонной энергией. Наиболее распространенными недостатками электродуговой сварки в узкий зазор являются несплавления кромок, а также наличие пор, трещин и шлаковых включений в металле шва [2]. Устранить несплавления и предупредить образование пор и шлаковых включений довольно сложно. Помимо этого, возникают проблемы, связанные с возникновением холодных трещин при сварке закаливающихся сталей без подогрева. В этом случае авторы рекомендуют использовать двух- и многопроходную дуговую сварку. Для достижения надежности многопроходной дуговой сварки в узкий зазор и качества получаемых швов требуется принятие специальных мер, обеспечивающих стабильное положение дуги относительно кромок изделия. С этой целью разработаны разнообразные конструкции сварочных головок, направляющих контактных трубок, мундштуков, плоских сопел и технологических планок.

Одной из альтернативных технологий, позволяющих устранить указанные недостатки, сохранив при этом преимущества, является многопроходная лазерная сварка с присадочной проволокой [3]. Согласно способу, предложенному в этой работе, стальной лист толщиной 50 мм сваривали встык со ступенчатой разделкой кромок; ширина разделки сверху составляла 6 мм. Сварку выполняли за пять проходов с использованием присадочной проволоки диаметром 1,6...2,0 мм при скорости сварки 21 м/ч и мощности излучения CO₂-лазера 10 кВт. В качестве защитного газа применяли аргон или гелий. Особенность процесса заключалась в том, что лазерное излучение фокусировали на конце присадочной проволоки, которую подавали в зону сварки под углом 45°. В результате плавления проволоки происходил перенос металла каплями, температуру поверхности которых измеряли с помощью пирометра. Указанная технология поз-

волила устранить ограничение глубины проплавления лазерным излучением, связанное с его экранированием плазменным факелом, исходящим из парогазового канала. Это экранирование увеличивается пропорционально мощности излучения [4]. К недостаткам лазерной многопроходной сварки по способу, указанному в работе [3], следует отнести сравнительно малую производительность процесса, сложность подготовки кромок под сварку, необходимость использования лазеров большой (10... 15 кВт) мощности и вероятность несплавления присадочного металла с основным.

Целью настоящей работы являлась технологическая апробация многопроходной лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки сталей толщиной 10... 20 мм для устранения недостатков многопроходных технологий [2, 3]. Эксперименты проводили на оборудовании, схема и описание которого приведены в работе [5]. Образцы для испытаний изготовлены из сталей СтЗпс и Х70 (аналог 10Г2ФБЮ). При сварке использовали присадочную проволоку Св-08Г2С диаметром 0,8 и 1,2 мм. Стыкуемые кромки выполняли либо без разделки, либо с узкой (до 10°) V- и Y-образной разделкой. В последнем случае высота притупления составляла 5 мм. Сварку осуществляли в защитной среде — углекислом газе. Мощность P сфокусированного на образец лазерного излучения составляла 2... 3 кВт. Использовали источник питания электрической дуги типа ВДУ-601 и ПСГ-500. Сварочный ток составлял $I_{св} = 120... 230$ А, напряжение на дуге — $U_{д} = 20... 32$ В, скорость сварки $v_{св}$ изменяли в пределах 12... 56 м/ч, а скорость подачи присадочной проволоки $v_{пр}$ — от 100 до 400 м/ч.

На рис. 1 представлена макроструктура стыка листов стали, выполненного многопроходной лазерной сваркой с присадочной проволокой. Для повышения производительности процесса опробован вариант лазерной сварки корневого шва высотой до 5 мм с последующей гибридной лазерно-дуговой заваркой разделки кромок (рис. 2). Исследовали варианты сварки стыка как с одной, так и с двух сторон. В случае свободного двустороннего доступа к стыку перспективной оказалась двухпроходная лазерно-дуговая сварка в узкий (до 3 мм) зазор без разделки кромок. Для одностороннего доступа к стыку опробован вариант четырехпроходной лазерно-дуговой сварки, являющийся оптимальным в условиях проводимых экспериментов (рис. 3). В первых трех проходах коэффициент формы шва был близок к 1,0, а в четвертом (последнем) — к 1,4.

Достаточно высокое качество получаемых соединений имело место в случае применения многопроходной лазерной сварки с присадкой (см. рис. 1). По сравнению с лазерно-дуговой сваркой этот процесс отличается меньшими остаточными деформациями и протяженностью ЗТВ. Его недостатками являются необходимость выполнения большого количества проходов и незначительная скорость сварки. При сочетании лазерного и гибридного способов сварки в условиях проводимых экспериментов выявлена склонность металла шва

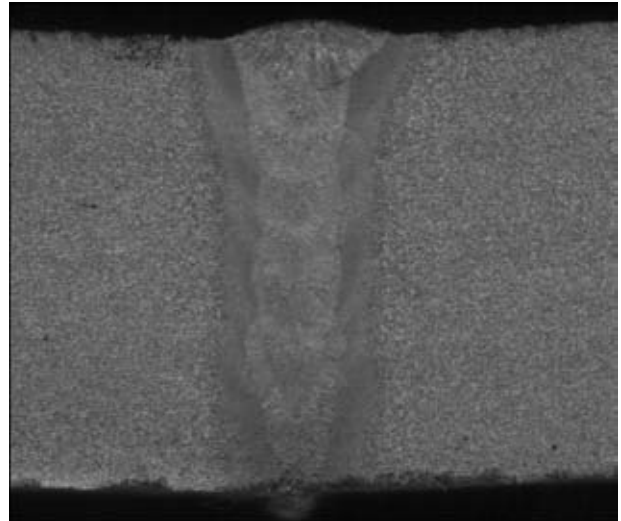


Рис. 1. Макроструктура стыка листов стали СтЗпс толщиной 20 мм, выполненного лазерной сваркой за восемь проходов с использованием присадочной проволоки Св-08Г2С диаметром 0,8 мм ($P = 2,8$ кВт, $v_{св} = 12$ м/ч, $v_{пр} = 120$ м/ч), $\times 3$

к образованию пор в месте перехода от одного слоя металла к другому (рис. 2). В связи с этим вариант лазерной заварки корневого шва рекомендован в качестве технологического шва, который впоследствии будет переварен. Следует отметить, что в описанных экспериментах мощность лазерного и дугового источников недостаточна для получения качественного шва при двусторонней двухпроходной сварке. В корневой зоне шва имели место несплавления металла присадочной проволоки с основным.

Установлено, что в случае гибридной сварки лазерное излучение стабилизирует электрическую дугу и заставляет ее опускаться в узкий (до 10°) зазор V-образной разделки на глубину до 20 мм. Этот эффект положен в основу разработанных технологических приемов гибридной сварки сталей большой толщины (см. рис. 3). При этом сварочная ванна имеет сравнительно небольшую (до 20... 30 мм) длину. Жесткий термический цикл, характерный для однопроходной лазерной сварки,

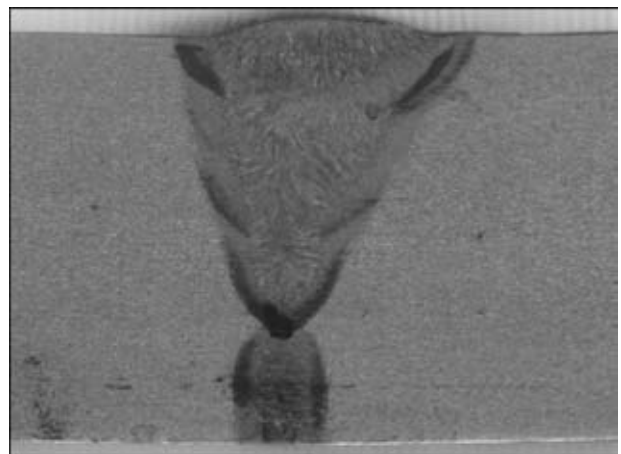


Рис. 2. Макроструктура стыка листов стали Х70 толщиной 18,7 мм, выполненного гибридным способом сварки за три прохода с предварительной лазерной сваркой корневого шва с использованием присадочной проволоки Св-08Г2С диаметром 1,2 мм ($P = 2,8$ кВт, $I_{св} = 150$ А, $U_{д} = 26$ В, $v_{св} = 18$ м/ч, $v_{пр} = 240$ м/ч), $\times 3$

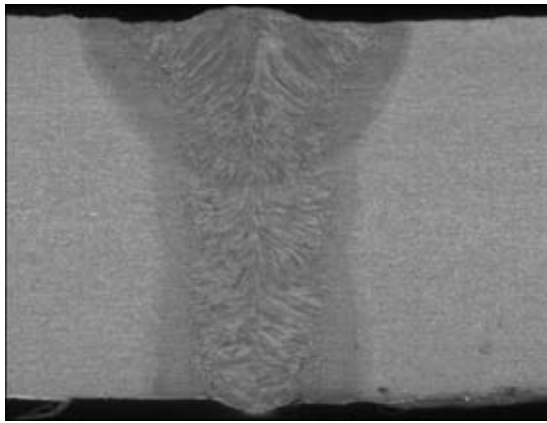


Рис. 3. Макроструктура стыка листов стали X70 толщиной 18,7 мм, выполненного гибридным способом сварки за четыре прохода с использованием присадочной проволоки Св-08Г2С диаметром 1,2 мм ($P = 2,5$ кВт, $I_{св} = 200$ А, $U_d = 26$ В, $v_{св} = 24$ м/ч, $v_{пр} = 400$ м/ч), $\times 3$

смягчается за счет дуговой составляющей. Благодаря повторным проходам снижается склонность металла шва и ЗТВ к образованию закалочных структур. При лазерной сварке образца, макроструктура которого представлена на рис. 1, погонная энергия за один проход равнялась 0,84 МДж/м. В случае гибридной сварки образца (см. рис. 3) погонная энергия за один проход составляла 1,125 МДж/м. При сравнении режимов, на которых получены указанные образцы, можно заключить, что увеличение погонной энергии примерно на одну треть повышает общую производительность процесса многопроходной сварки в 4 раза при условии перехода от лазерного к гибридно-лазерно-дуговому процессу. Следует отметить, что механические характеристики металла соединений трубной стали X80, близкие к полученным нами, достигнуты при пятипроходной сварке дугой с плавящимся электродом и погонной энергией около 2 МДж/м [6]. Таким образом, гибридная сварка характеризуется тепловложением, почти вдвое меньшим по сравнению с дуговой сваркой, а следовательно, и значительно меньшими остаточными деформациями.

Для исследования структуры металла сварного соединения стали X70 контролируемой прокатки (см. рис. 3) использовали оптический микроскоп «Neophot-21» с 50... 600-кратным увеличением после травления шлифа в 4%-м растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Твердость металла сварного соединения определяли с помощью твердомера М-400 фирмы «ЛЕСО» при нагрузке 4,9 Н (500 г). Выявлено, что структура основного металла (сталь X70) достаточно однородна по высоте проката и состоит из ферритно-перлитных зерен № 7–9 по шкале I (ГОСТ 5639–80). Полосчатость структуры стали классифицируется 2...3 баллами (ГОСТ 5640–80). Твердость стали X70 составляет $HV 192... 205$.

Ширина многопроходного шва изменяется от 4,2 (внизу при первом проходе) до 11,2 мм (вверху при последнем четвертом проходе). Протяженность ЗТВ, ограниченная видимыми изменениями структуры стали, колеблется от 1,5 до 3,0 мм, а при первом проходе достигает 3,7 мм. После четырех

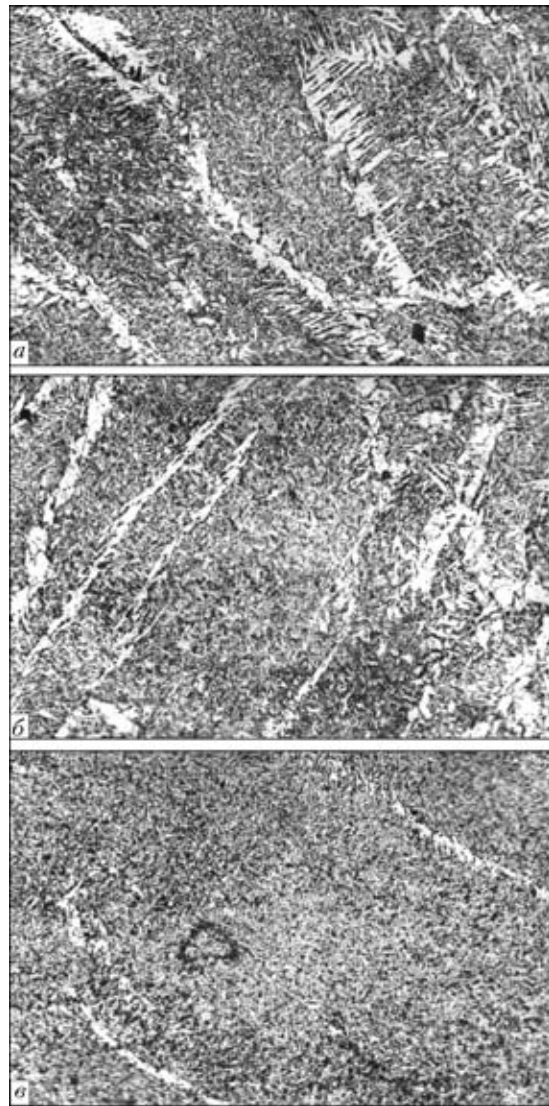


Рис. 4. Микроструктура ($\times 500$) металла шва (см. рис. 3) в четвертом (а), втором (б) и первом (в) проходе

проходов шов получается плотный, без пор и трещин. Микроструктура металла шва неоднородна по его высоте. В верхней части шва (рис. 4, а) формируется смесь пластинчатого феррита и ферритных зерен неправильной формы с МАК-фазой разной степени упаковки, по вторичным границам образуются прослойки полигонального феррита толщиной до 0,06 мкм с выделениями неупорядоченной МАК-фазы, а также значительные области бокового пластинчатого феррита с удлиненными частицами МАК-фазы. Общее содержание первичного феррита в верхней части шва после последнего прохода составляет 30 об. %. В корневой части шва пластинчатый феррит практически полностью отсутствует (рис. 4, б). Микроструктура металла этой части шва состоит в основном из зерен феррита с плотноупакованной МАК-фазой и бейнитной составляющей, а также выделений толщиной до 0,02 мкм в основном бокового пластинчатого феррита с упорядоченной МАК-фазой. В микроструктуре металла шва после первого прохода преобладают выделения бейнитной составляющей (рис. 4, в). Твердость металла исследуемых швов зависит от особенностей его микрост-

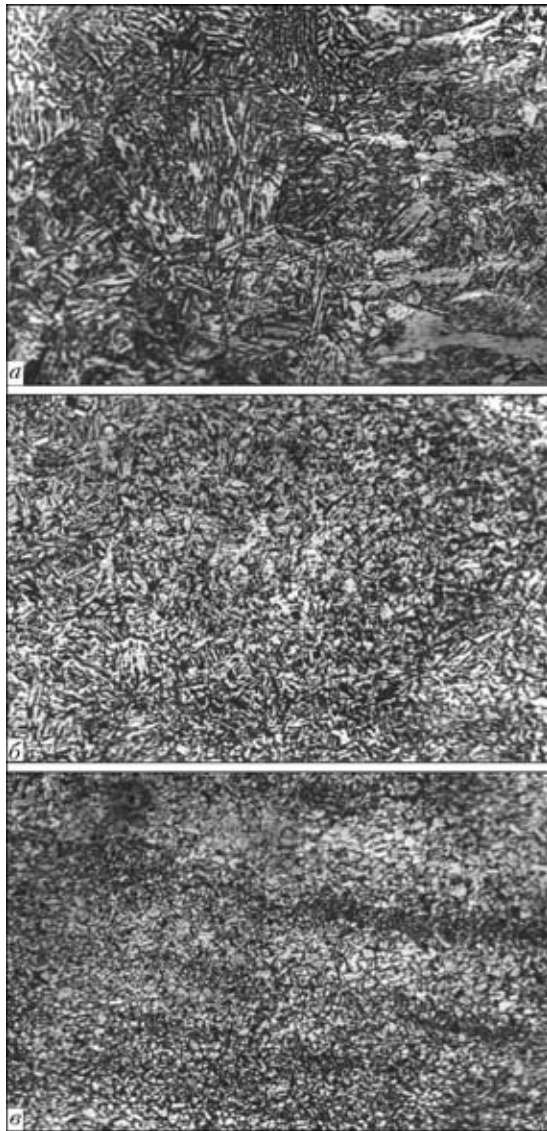


Рис. 5. Микроструктура ($\times 500$) металла различных зон ЗТВ шва (см. рис. 3): *a* — зона крупного зерна; *b* — мелкого зерна; *v* — частичной перекристаллизации

руктуры. Металл шва, полученный после четвертого (последнего) прохода, имеет твердость от HV 220 (в верхней части) до HV 245 (в корневой). Твердость металла шва в третьем и втором проходах не превышает HV 250, в корневой части шва первого прохода она несколько выше (HV 265...270).

Микроструктура металла зоны крупного зерна, непосредственно прилегающей ко шву, представляет собой смесь верхнего и нижнего бейнита с зерном № 4–6 (рис. 5, *a*). Ферритные прослойки по границам зерен не выявлены. Протяженность зоны крупного зерна изменяется в пределах 0,7...1,3 мм. Максимальная твердость металла этой зоны HV 244...249. Структура металла зоны мелкого зерна имеет протяженность 0,8...1,3 мм (рис. 5, *b*). Структура металла зоны частичной перекристаллизации протяженностью 0,7...1,1 мм формируется из разрыхленных сфероидизированных зерен перлита и практически не подвергнутых изменению зерен феррита (рис. 5, *v*).

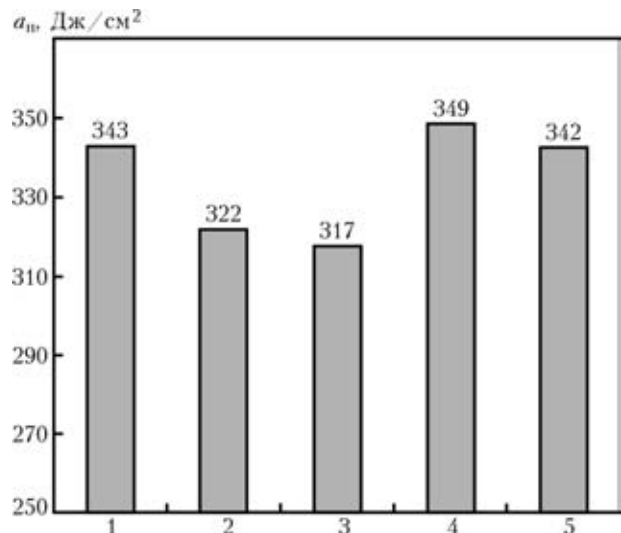


Рис. 6. Ударная вязкость a_n при температуре 20 °С соединений из стали X70, полученная многопроходными лазерным и гибридным способами сварки с использованием присадочной проволоки Св-08Г2С: 1, 2 — металл соответственно шва, выполненного лазерной сваркой, и ЗТВ; 3, 4 — металл соответственно шва, выполненного гибридной сваркой, и ЗТВ; 5 — основной металл

Одним из важных параметров, характеризующих механические свойства сварного соединения, является ударная вязкость a_n (Дж/см²). Последнюю определяли на стандартных образцах с U-образным надрезом при температуре 20 °С. Образцы вырезали из средней части соединений, выполненных лазерным и гибридным способами (по три образца каждого типа). Для сравнения полученных значений a_n с основным металлом из последнего изготовлены и испытаны два аналогичных образца (рис. 6). Снижение ударной вязкости металла шва во всех случаях не превышало 7...8 %, что является удовлетворительным показателем пластичности [7]. При использовании лазерной сварки с использованием присадочной проволоки, как и ожидалось, ударная вязкость металла шва превышает этот показатель для ЗТВ, в случае гибридной сварки наблюдается обратная картина.

Проведенные исследования показали, что благодаря применению гибридного способа сварки значительно увеличивается ширина швов и протяженность ЗТВ. Микроструктура металла шва и ЗТВ приближается к микроструктуре сварных соединений, выполненных дуговой сваркой. Как было установлено ранее, для сварных соединений низко- или легированных трубных сталей, в том числе контролируемой прокатки, полученных с использованием лазерного луча, присуще образование в металле шва и ЗТВ неблагоприятных структур повышенной твердости. Это обуславливает необходимость высокотемпературной термической обработки изделий после сварки. Снижение скорости охлаждения металла за счет применения гибридной сварки существенно уменьшает опасность формирования закалочных структур (в том числе мартенсита) в металле сварных соединений указанных сталей. Такие температурные условия позволяют обеспечить рекомендуемый нормативными документами для дуговых процессов сварки



уровень твердости металла — HV 260. В этом отношении применение многопроходной гибридной сварки целесообразно, поскольку исключается термическая обработка сварных соединений, что особенно важно при сварке труб ответственного назначения из высококачественной стали контролируемой прокатки.

Выводы

1. При лазерно-дуговой сварке сталей толщиной 10...20 мм в узкий зазор столб дуги располагается между торцом сварочной проволоки и местом введения лазерного луча в изделие. В этом случае столб дуги погружается в узкий (2...3 мм) зазор на глубину до 20 мм и электродинамическая устойчивость источника питания отличается стабильностью.

2. Способы многопроходной лазерной и лазерно-дуговой сварки позволяют получать качественные стыковые соединения листов стали большой (10...20 мм) толщины с твердостью металла до HV 260...280 и ударной вязкостью, близкой к ударной вязкости основного металла при температуре 20 °С. При этом размеры сварочной ванны и ЗТВ уменьшаются в 5...10 раз по сравнению с дуговыми способами сварки сталей аналогичной толщины.

3. В случае гибридной сварки дуговая составляющая позволяет управлять сварочным термическим циклом и значительно снижать его жесткость за счет увеличения пологости заднего фронта при сохранении его крутизны, что предотвращает опасность образования неблагоприятных закалочных структур при сварке низколегированных сталей, а также повысить ударную вязкость металла сварных соединений.

4. При многопроходной лазерной и гибридной сварке за счет последующего прохода осуществляется термическая обработка предыдущего, а также создаются условия для снижения скорости охлаждения свариваемого металла, благодаря чему исключают финишную термообработку крупногабаритных сварных конструкций.

5. Сравнение многопроходной лазерной сварки с присадочной проволокой и гибридной лазерно-дуговой сварки показало, что наличие дуговой составляющей повышает погонную энергию процесса сварки на одну треть. При этом производительность гибридного способа сварки повышается в несколько раз по сравнению с многопроходной лазерной сваркой.

1. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
2. *Назарчук А. Т., Стеренбоген Ю. А.* Сварка в узкий зазор в среде защитных газов и некоторые ее особенности // Автомат. сварка. — 1984. — № 5. — С. 57–62.
3. *CO₂ laser welding of thick plate multipass welding with filler wire* / Y. Arata, H. Maruo, I. Miyamoto, R. Nishio // Electron and laser beam weld.: Proc. Intern. conf., Tokyo, July 14–15, 1986. — Oxford: c. a., 1986. — P. 159–169.
4. *Григорьянц А. Г., Шигапов И. Н.* Лазерная техника и технология: Учеб. пособие для вузов. В 7 кн. Кн. 5: Лазерная сварка металлов / Под ред. А. Г. Григорьянца. — М.: Высш. шк., 1988. — 207 с.
5. *Гибридная* сварка излучением CO₂-лазера и дугой плавящегося электрода в углекислом газе / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, В. П. Гаращук и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 10. — С. 38–41.
6. *Motohashi H., Hagiwara N., Masuda T.* Tensile properties and microstructure of weld metal of X80 steel by MAG welding // Quart. J. of the JWS. — 2004. — 22, № 1. — P. 69–77.
7. *Семенов С. Е., Мандельберг С. Л., Гончаренко Л. В.* Об оптимальном уровне ударной вязкости металла швов газопроводных труб // Автомат. сварка. — 1989. — № 11. — С. 55–57.

Technological peculiarities and efficiency of multi-pass arc welding of heavy steel sections using laser radiation are described.

Поступила в редакцию 04.03.2005

ТЕХНОЛОГИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ АРГОНОДУГОВОЙ ОБРАБОТКИ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Предлагаемая технология аргонодуговой обработки предназначена для регулирования структуры металла кратковременным местным нагревом до различных температур, в том числе с подплавлением. В зависимости от термического цикла происходит кратковременный отпуск или закалка металла, в частности, поверхностная. Обработка может использоваться как отдельная операция или составляющая технологического процесса. Она улучшает качество формирования сварного соединения, структуру и свойства металла (ударную вязкость, стойкость к образованию трещин и разрушению), позволяет заменить промежуточный печной отпуск или снизить его температуру, а в ряде случаев отказаться от окончательной термической обработки сварных узлов и изделий. Расход электроэнергии составляет 0,2...0,6 кВт·ч/м, что на порядок ниже, чем при печном отпуске. Затраты времени на подготовку и выполнение обработки без раскрепления после сварки и замены технологического оборудования и оснастки составляют около 10 мин, при этом исключается деформация металла.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е. О. Патона, отд. № 11
Тел./факс: (38044) 289 17 39
E-mail: savitsky@paton.kiev.ua