



# ГИБРИДНАЯ СВАРКА ИЗЛУЧЕНИЕМ СО<sub>2</sub>-ЛАЗЕРА И ДУГОЙ ПЛАВЯЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРОДА В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ

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

Описаны технологические исследования гибридной сварки лазерным излучением с дугой плавящегося электрода при скоростях процесса 15...300 м/ч. Применение гибридного процесса при фиксированной мощности лазерного излучения целесообразно до определенной толщины свариваемого металла, свыше которой глубина провара не возрастает независимо от снижения скорости сварки.

*Ключевые слова:* гибридная сварка, лазер, электрическая дуга, стабилизация, глубина проплавления, толщина шва, режимы сварки

В последние годы появилось большое количество работ, касающихся совмещения различных тепловых источников для сварки металлов и сплавов. Например, интерес исследователей вызвал эффект совмещения лазерного излучения с плазмой дуги [1] или с ВЧ источником нагрева [2]. Преимуществами гибридной лазерно-дуговой сварки являются возможность частичной замены мощности лазерного излучения мощностью дугового источника при сохранении геометрии швов, близкой к швам, сваренным лазерным излучением; трансформация сварочного термического цикла, снижающая склонность к образованию закалочных структур в металле шва и околошовной зоны и пр. Первое из указанных преимуществ особенно интересно для промышленного внедрения лазерно-дуговой сварки, поскольку может способствовать снижению капитальных затрат на приобретение оборудования (учитывая его сравнительно невысокую стоимость для дуговой сварки).

Были проведены технологические исследования лазерных гибридных процессов. Исследовали совмещение лазерного излучения с ВЧ источником нагрева [2], а также гибридную лазерно-дуговую сварку с использованием дуги неплавящегося вольфрамового электрода. Однако, как показывает практика, для получения оптимальной геометрии сварных швов необходимо использовать присадочные материалы. Использование обычной присадочной проволоки при лазерной сварке требует дополнительных затрат мощности излучения на ее плавление. Дуга плавящегося электрода позволяет избежать этих затрат (проволока становится «активной присадкой»). Эксперименты по исследованию технологических особенностей гибрида лазерной сварки со сваркой дугой плавящегося электрода в углекислом газе проводили по схеме рис. 1, с использованием сварочного манипулятора, обеспечивавшего скорость сварки  $v_{св} = 15...300$  м/ч. В качестве источника излучения использовали технологический СО<sub>2</sub>-лазер ЛТ-104 [3]. Мощность

излучения изменяли в пределах от 0,2 до 2,7 кВт. Излучение фокусировали линзой из монокристалла хлорида калия ( $F = 300$  мм). Образцы представляли собой как цельные пластины, так и стыки из сталей 09Г2С и СтЗкп толщиной  $\delta = 2...10$  мм. В случае  $\delta = 10$  мм стыки выполняли с подготовкой разделки кромок (угол  $15^\circ$ , притупление 4 и 6 мм). Присадочную проволоку Св-08Г2С ( $d = 0,8$  мм) подавали со скоростью  $v_{пр} = 200...450$  м/ч, угол наклона электрода к оси лазерного пучка  $\alpha = 25^\circ$ , длина дуги  $L = 6...8$  мм, ток дуги  $I = 75...200$  А.

В работе исследовали влияние лазерного излучения на стабильность горения дуги; качество формирования верхнего и нижнего валиков сварного шва или дорожки наплавки; геометрические размеры зоны литого металла. При совместном воздействии на металл (рис. 1) лазерное излучение стабилизирует горение электрической дуги. Чем выше скорость сварки, тем большей должна быть мощность лазерного излучения. Например, при

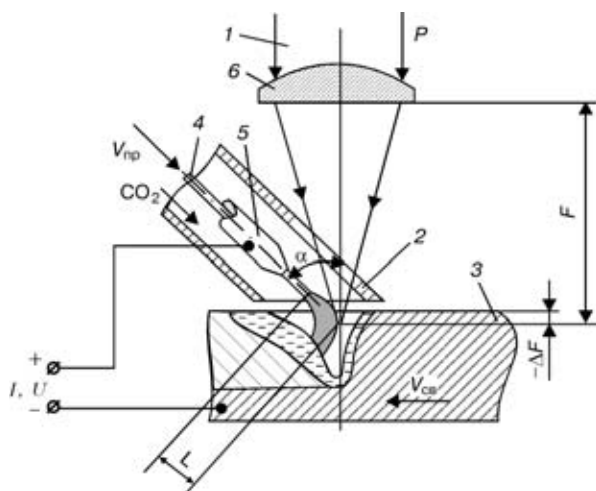


Рис. 1. Схема проведения экспериментов по гибридной лазерно-дуговой сварке: 1 — лазерное излучение мощностью  $P$ , кВт; 2 — защитное сопло; 3 — образец; 4 — присадочная проволока; 5 — медный токоподводящий мундштук; 6 — фокусирующий объектив с фокусным расстоянием  $F$ , мм;  $\Delta F$  — заглубление фокуса, мм;  $\alpha$  — угол наклона электрода к оси лазерного пучка, град;  $L$  — длина дуги, мм

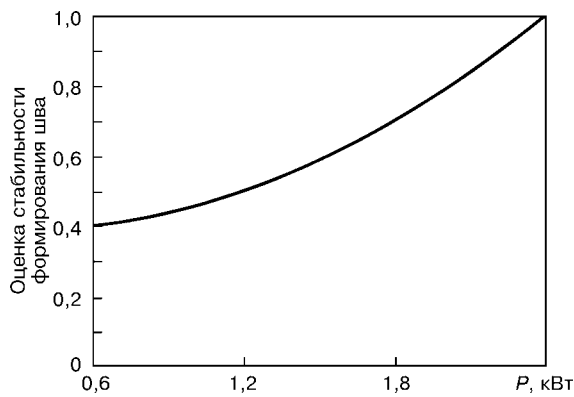


Рис. 2. Изменение стабильности формирования верхнего валика сварного шва в зависимости от мощности лазерного излучения  $P$  при постоянной мощности дуги 2,88 кВт ( $v_{св} = 76$  м/ч)

скорости сварки 15...50 м/ч надежная стабилизация наступает при мощности излучения 0,2...0,3 кВт, а при 120 м/ч и выше — 2,5 кВт и больше. Стабилизация горения дуги сопровождается падением напряжения на дуге в пределах 2...5 В. При этом сама дуга опускается в парогазовый кратер на глубину, соизмеримую с заглублением фокуса  $\Delta F$  (рис. 1).

Исследуемый гибридный процесс заметно влияет на качество формирования верхнего валика как при наплавке, так и при сварке стыков. Для большей наглядности оно оценивалось не по ГОСТ 25616-83, а по балльной шкале, когда единица соответствовала самому высокому качеству, при котором формирование шва носило стабильный и регулярный характер, усиление плавно переходило к основному металлу. Чем выше была степень нарушения указанных свойств, тем меньшим баллом, выраженным в десятых, оценивалось качество. Из рис. 2 следует, что качество формирования верхнего валика растет с увеличением мощности лазерного излучения при постоянной скорости сварки и мощности электрической дуги.

На рис. 3 показаны продольные макрошлифы наплавки, выполненных способами лазерной (а) и гибридной (б) сварки. В случае гибридной сварки линия верхнего валика более ровная, а глубина границы литого металла более стабильная, чем при лазерной сварке. Однако структура в корне шва у гибридной сварки более четкая, чем у лазерной, что указывает на периодический процесс при проплавлении. При лазерной сварке периодичность менее заметна. Измерение микротвердости сварных швов показало, что при твердости основного металла  $HV$  1490...1520 МПа лазерные швы имеют микротвердость  $HV$  3110...3200 МПа, в то время как гибридные —  $HV$  2550...2690 МПа. Это свидетельствует о снижении склонности к образованию закалочных структур в литом металле при гибридной лазерно-дуговой сварке.

На рис. 4 показан поперечный макрошлиф стыкового соединения, выполненного гибридной сваркой с высококачественным формированием верхнего и нижнего валиков. При сварке стыков было установлено, что в сравнении с процессом лазерной сварки с присадочной проволокой для сталей с  $\delta > 5$  мм

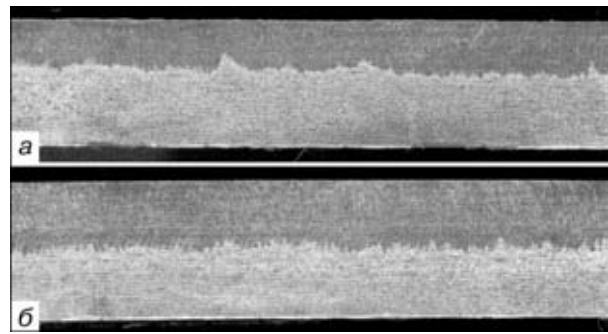


Рис. 3. Макроструктуры осевого продольного сечения наплавки, выполненных в пластине стали 09Г2С ( $\delta = 10$  мм) с защитой углекислым газом лазерным (а) и гибридным (б) способом на режимах: а —  $P = 2,5$  кВт,  $F = 300$  мм,  $\Delta F = -3$  мм;  $v_{св} = 40$  м/ч; б —  $P = 2,5$  кВт;  $F = 300$  мм;  $\Delta F = -3$  мм;  $v_{св} = 40$  м/ч;  $I = 100$  А;  $U = 17$  В;  $v_{пр} = 260$  м/ч

1 кВт мощности электрической дуги способен заменить 0,5 кВт лазерного излучения, для сталей с  $\delta < 4$  мм эта замена составляет один к одному.

На рис. 5 представлены зависимости общей толщины шва [4] и глубины проплавления от скорости сварки (при постоянных мощностях лазерного излучения и электрической дуги) для гибридной и лазерной сварки. Экспериментальные точки получены усреднением 4...6 измерений в отдельных сечениях шва. Разброс экспериментальных результатов лежит в пределах  $\pm(6...8)\%$ .

При лазерной сварке общая толщина шва и глубина проплавления плавно уменьшаются с увеличением скорости сварки (кривая 1, рис. 5). Измеренные экспериментальные зависимости аппроксимированы по методу наименьших квадратов аналитическими соотношениями. Для общей толщины шва они описываются соотношением  $H_{ЛС} = -12,14 + 23,3 v_{св}^{-0,1164}$ , для глубины проплавления  $h_{ЛС} = -7,93 + 18,95 v_{св}^{-0,1565}$ .

При гибридной сварке также зафиксировано уменьшение общей толщины шва и глубины проплавления с увеличением скорости сварки (кривая 2, рис. 5), однако отдельные экспериментальные точки резко выпадают из монотонной зависимости. При аппроксимации они были исключены. Их аналитическое представление следующее: для общей толщины сварного шва  $H_{ГС} = -45,49 + 59,02 v_{св}^{-0,0506}$ ; для глубины проплавления  $h_{ГС} = -5,73 + 18,69 v_{св}^{-0,2153}$ .

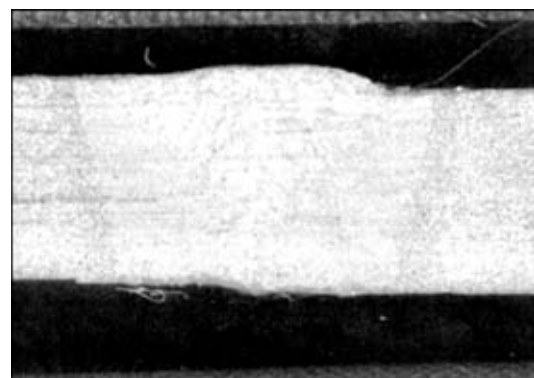


Рис. 4. Макроструктура стыкового соединения листов стали 09Г2С ( $\delta = 6$  мм), выполненного гибридным лазерно-дуговым способом:  $P = 2,5$  кВт;  $F = 300$  мм;  $\Delta F = -2$  мм;  $v_{св} = 40$  м/ч;  $I = 90$  А;  $U = 26$  В;  $v_{пр} = 210$  м/ч

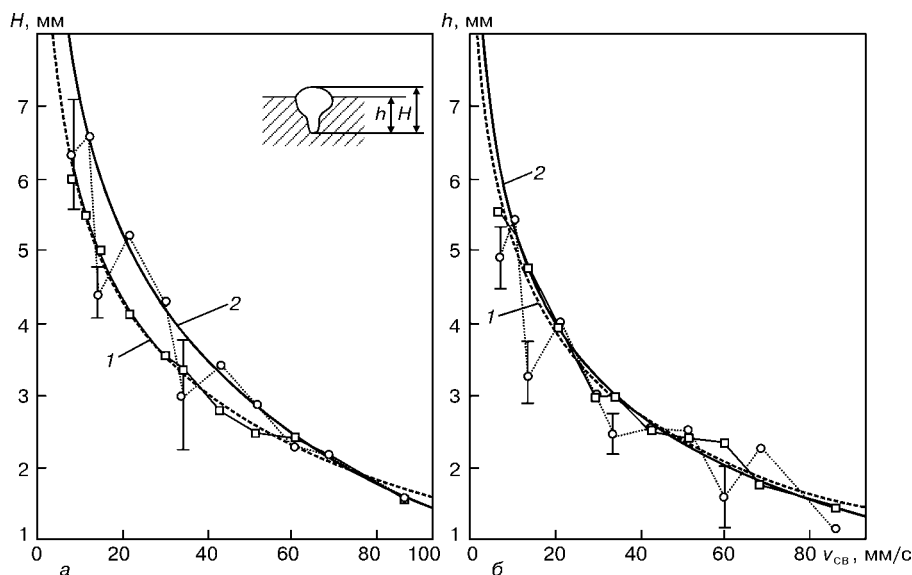


Рис. 5. Зависимость общей толщины шва  $H$  (а) и глубины проплавления  $h$  (б) от скорости сварки  $v_{св}$ : 1 – лазерная; 2 – гибридная сварка

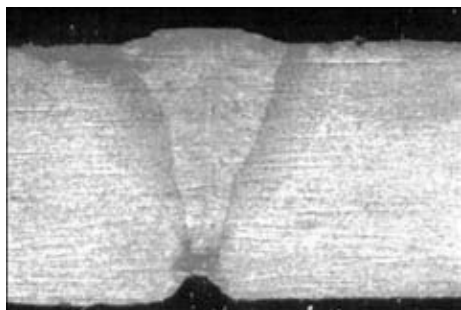


Рис. 6. Макроструктура стыка из стали 09Г2С ( $\delta = 10$  мм), сваренного лазерно-дуговым способом в  $\text{CO}_2$ ;  $P = 2,7$  кВт;  $\Delta F = -6$  мм;  $v_{св} = 30$  м/ч;  $v_{пр} = 340$  м/ч;  $I = 110$  А;  $U = 18$  В; давление защитного газа 0,05...0,10 МПа

И аналитические зависимости, и кривые на рис. 5, б свидетельствуют о том, что отличия между глубинами проплавления при гибридной и лазерной сварке лежат в пределах точности измерений. Следовательно, если не учитывать выпавшие экспериментальные точки при гибридной сварке, проплавляющая способность существенно не увеличивается.

Чтобы определить, насколько достоверны отклонения исключенных при аппроксимации экспериментальных точек, для них были рассчитаны стандартные отклонения с доверительной вероятностью 0,9. Они показаны на графиках (рис. 5), из которых видно, что эти отклонения не случайны и являются следствием физических процессов при гибридной сварке.

Обнаруженное резкое уменьшение проплавляющей способности при определенных скоростях сварки (см. рис. 5) можно объяснить взаимодействием жидкого металла, который под воздействием лазерного излучения переносится на задний фронт парагазового кратера [5], с жидким металлом присадочной проволоки. По-видимому, при некоторых скоростях сварки металл присадки заливает кратер, образованный лазерным излучением. Для его вытеснения из кратера дополнительно тратится мощность излучения и, вследствие этого, уменьшается глубина проплавления. На практике невозможно было проварить

на всю глубину стыки листов стали 09Г2С толщиной  $\delta = 10$  мм с узкой разделкой ( $30^\circ$ ) и притуплением 6 и 4 мм (рис. 6), в отличие от листов толщиной, равной толщине притупления (рис. 4). Это можно объяснить таким образом: при сварке листов без разделки жидкий металл присадки свободно растекался по поверхности. При сварке в разделку лазерное излучение стабилизирует дугу, благодаря чему жидкий металл присадки поступает на самое дно разделки и заливает место, где должен быть кратер, образованный лазерным излучением. Для вытеснения этого металла тратится дополнительная лазерная мощность. В связи с этим глубина проплавления уменьшается и сквозное проплавление отсутствует.

На рассматриваемое явление влияет комплекс факторов. Можно предположить, что основным из них является соотношение частоты периодического переноса жидкого металла под действием лазерного излучения [5] и частоты капельного переноса при плавлении присадочной проволоки электрической дугой [6]. Дополнительным аргументом в пользу этого предположения является периодическое выпадение экспериментальных точек из монотонной зависимости.

## Заключение

При совместном действии лазерного излучения и дуги плавящегося электрода при сварке сталей в углекислом газе формируется высококачественный верхний валик шва, что позволяет снизить мощность лазерного излучения, частично заменив его мощностью электрической дуги (1 кВт дуги вместо 0,5 кВт лазерного излучения для  $\delta > 5$  мм и один к одному для  $\delta < 4$  мм); уменьшить твердость получаемых сварных швов, сделать их более пластичными.

Излучение  $\text{CO}_2$ -лазера стабилизирует электрическую дугу, «привязывает» столб дуги к действующему на металл сфокусированному пучку и заставляет дугу опускаться в парагазовый канал. Эффект стабилизации дуги тем выше, чем больше мощность лазерного излучения, хотя на скоростях

до 50 м/ч для стабилизации дуги плавящегося электрода достаточно не более 200...300 Вт сфокусированного лазерного излучения.

В случае гибридной сварки при определенных значениях скорости глубина проплавления резко уменьшается, нарушая монотонность зависимости  $h = f(v_{св})$ . По-видимому, это вызвано взаимодействием жидкого металла, отбрасываемого на задний фронт кратера под действием лазерного излучения, с жидким металлом присадочной проволоки, расплавленной электрической дугой.

Применение гибридного процесса при фиксированной мощности лазерного излучения целесообразно до определенной толщины  $\delta$  свариваемого металла, выше которой глубина провара не возрастала независимо от снижения скорости сварки.

Technological studies of hybrid laser + MIG arc welding at a welding speed of 15 to 300 m/h are described. The use of the hybrid process at a fixed power of laser radiation is indicated up to a certain thickness of metal welded, above which the penetration depth does not increase, independently of a decrease in the welding speed.

Поступила в редакцию 15.05.2002

## Русско-украинский и украинско-русский словарь сварочной терминологии

*Вышел из печати двуязычный словарь терминов в области сварки и родственных технологий, подготовленный Институтом электросварки им. Е. О. Патона и Институтом украинского языка Национальной академии наук Украины.*

*СЛОВАРЬ состоит из двух самостоятельных словарных разделов:*

- «Русско-украинский словарь сварочной терминологии»*
- «Українсько-російський словник зварювальної термінології».*

*Каждый из разделов словаря содержит около 5 тысяч простых и составных русских (украинских) слов-терминов, относящихся к сварке и родственным технологиям, а также их перевод, соответственно, на украинский и русский язык.*

*Словарь предназначен для ученых и преподавателей, студентов и учащихся, инженерно-технических работников и специалистов сварочного производства, а также для специалистов других смежных отраслей производства и строительства, которые работают с учебной, научно-технической и нормативной литературой и документацией.*

*Словарь издан в удобном формате и имеет твердый переплет.*

**Заявки на приобретение СЛОВАРЯ направлять по адресу:**

03150, Киев-150 ул. Антоновича (Горького), 62  
Издательский отдел ГВП «ЭТ» Тел.: (380-44) 258-3523, 261-0839  
Тел./факс: (380-44) 227-65-02 E-mail: welder@svitoline.com