



ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ (Обзор)

П. КАХ¹, А. САЛМИНЕН^{1,2}, Дж. МАРТИКАИНЕН¹

(¹ Лаб. технологии сварки и обработки лазером, Технол. ун-т, г. Лаппеенранта, Финляндия),

(² Центр маш. технологий «Турку Лтд.», г. Турку, Финляндия)

Проанализированы особенности применения различных способов гибридной сварки с учетом используемых параметров процесса, типов свариваемого металла и его толщины. Рассмотрены экономические аспекты применения гибридной сварки, особенности контроля качества.

Ключевые слова: лазерная сварка, сварка МИГ/МАГ, гибридная сварка, лазерная сварка + сварка ТИГ, лазерная + плазменная сварка, лазерная + тандем-сварка, лазерная сварка + дуговая сварка металлическим покрытым электродом

Изучение процесса гибридной лазерно-дуговой сварки началось в 1978 г. с выхода в свет первой статьи о сварке ТИГ в сочетании с лазерной сваркой [1]. Сегодня лазеры, используемые в гибридной лазерно-дуговой сварке, включают лазеры старшего поколения (СО₂-лазер, Nd:YAG-лазер, диодный), а также новые типы (дисковый и волоконный). СО₂-лазер был первым и наиболее часто используемым при гибридной сварке [2–6]. Nd:YAG-лазеры успешно применяют при гибридной сварке для соединения алюминия, материалов с высокой отражательной способностью и стали, благодаря его короткой длине световой волны гарантируется большой уровень ее поглощения [7]. Одним из преимуществ Nd:YAG-лазера является применение оптоволоконна для перемещения пучка.

Гибридная сварка объединяет энергию двух различных источников энергии в одной зоне проплавления. Как правило, сфокусированный лазерный пучок направлен в зону соединения перпендикулярно поверхности пластины, а горелка наклонена под определенным углом к точке взаимодействия лазерного пучка и материала. При этом лазерный пучок с высокой плотностью энергии и электрическая дуга с высоким энергетическим КПД взаимодействуют одновременно в одной области процесса (плазма и сварочная ванна), помогая друг другу (рис. 1). При гибридной сварке количество переменных параметров увеличивается вследствие объединения различных процессов, имеющих свои параметры [5–9]. Существует множество гибридных способов сварки, отличающихся лазерным источником (СО₂-лазер, Nd:YAG-лазер, диодный, волоконный или дисковый) и способами дуговой сварки (МИГ/МАГ, ТИГ, плазменная сварка, тандем-сварка, дуговая

сварка металлическим покрытым электродом). При этом можно также использовать специальные головки, в которых лазерный пучок окружен электрической или плазменной дугой [9, 10].

В процессах гибридной сварки потенциал, как правило, определяют с помощью выбора соответствующей настройки оборудования и базовых параметров, режимов, адаптированных к требованиям материала, его структуре и условиям изготовления. Если граничные условия процесса выбраны правильно, то гибридная сварка является стабильной, эффективной и гибкой технологией.

Исследования выявили, что при совмещении различных способов сварки достигается синергетический эффект, при этом недостатки отдельных способов сварки компенсируются. Например, типичный узкий шов лазерной сварки в некоторых случаях способствует появлению металлургических проблем и проблем при сборке, а повышенное количество подводимого тепла при дуговой сварке увеличивает деформацию изделия, что приводит к последующим затратам на повторную обработку. К преимуществам относят возможность заполнения зазора при увеличенном зазоре в стыке вследствие неточной подготовки кромок и допусков по фиксации; повышение проплавления и скорости сварки, что удерживает на минимальном уровне подводимое тепло и тепловую деформацию; повышение равномерности формирования наплавленного валика; расширение сферы применения адаптированных к требованиям материалов конструкций и условиям изготовления; снижение инвестиционных расходов в связи с экономией лазерной энергии. Отмечено также улучшение металлургических свойств при использовании присадочного материала и уменьшение пористости благодаря ускоренному выделению газа из сварочной ванны увеличенного размера, особенно в швах с частичным проплавлением [2, 3, 10–12]. При гибридной сварке дуга находится в стабильном состоянии, поскольку ка-

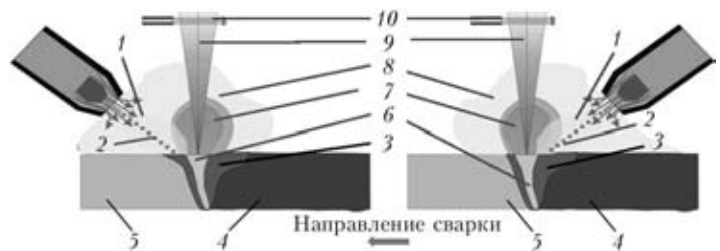


Рис. 1. Схема процесса гибридной сварки с устройствами ведения лазера и дуги: 1 — дуга; 2 — присадочный материал; 3 — сварочная ванна; 4 — металл шва; 5 — обрабатываемое изделие; 6 — парогазовый канал; 7 — испарение металла; 8 — газовая защита; 9 — лазерный пучок; 10 — поперечная струя

тодное пятно дуги расположено в области теплового воздействия благодаря лазерному излучению в парогазовом канале. Следовательно, результаты, полученные с помощью высокоскоростной камеры, показали, что генерируемая лазером плазма оказывает решающее воздействие на стабильность дуги [13, 14].

Гибридную сварку в основном применяют в случае, если толщина пластины позволяет выполнять однопроходную сварку. При этом ограничивающим фактором является мощность лазерного излучения. При использовании высокоомощных лазеров можно сваривать пластины толщиной до 30 мм за один проход. Однако с помощью лазеров средней мощности также возможно соединение стальных листов большей толщины, при этом необходим фиксированный зазор между свариваемыми пластинами и применение многопроходной сварки. Как и при лазерной сварке с присадочной проволокой, при гибридной сварке возможно использование лазеров средней мощности для больших сечений. И хотя лазер не обязательно должен быть очень мощным (что означает сокращение инвестиционных расходов), возможно получение качественных соединений. Кроме подготовки кромок без скоса при выполнении стыкового шва, можно также использовать V- и Y-образную подготовку кромок, которая часто может быть обеспечена непосредственно при вырезке заготовки без дальнейшей механической обработки.

Сфера применения гибридной лазерно-дуговой сварки включает многие отрасли промышленности (например, судостроительную, автомобильную, производство контейнеров) [9–11, 15, 16]. Благодаря значительным преимуществам гибридная сварка является достаточно надежным способом соединения различных материалов.

Как показано в работе [17], расстояние между положением лазерного пучка и дугой, называемое «расстоянием процесса», является важным параметром гибридной лазерно-дуговой сварки. Если оно слишком большое, плазмы дуги и лазера находятся отдельно друг от друга, что приводит к нестабильности дуги, поскольку в этом случае плазма лазера и нагретый материал не направлены на ее генерирование и поддержку [18]. Если же «расстояние процесса» составляет 5 мм или более, указанные процессы действуют независимо

[18, 19]. Это зависит от скорости сварки, мощности дуги и лазера, а также используемого материала.

Лазерная сварка + сварка МИГ/МАГ. Основные особенности этого способа сварки (рис. 1) практически одинаковы как для CO_2 -лазера, так и для твердотельных лазеров. Лазерный и дуговой способы сварки имеют одну рабочую зону процесса и сварочную ванну. Процесс сварки можно контролировать таким образом, чтобы составляющая МИГ/МАГ обеспечивала соответствующее количество расплавленного присадочного материала для заполнения зазора и разделки кромок, в то время как лазер будет формировать парогазовый канал в пределах сварочной ванны, чтобы обеспечить желаемую глубину проплавления, которая достигается благодаря высокой скорости сварки. В результате при сочетании лазерного пучка и дуги МИГ/МАГ формируется сварочная ванна большего размера, чем при лазерной сварке [10].

Структуру и механические свойства металла шва можно улучшить путем изменения его химического состава в результате использования соответствующего присадочного материала. Химические элементы, входящие в состав проволоки, должны равномерно распределяться в металле шва для получения однородной структуры. Однако достичь этого в узких швах с глубоким проплавлением нелегко. Еще одной причиной необходимости использования присадочного материала является повышенная склонность к горячему растрескиванию сложных сплавов. Считается, что наиболее перспективным способом гибридной лазерно-дуговой сварки является тот, при котором используют дополнительные присадочные материалы, т. е. сочетающий гибридную лазерную сварку и сварку МИГ/МАГ [3–10]. С помощью этого способа можно заполнить зазоры 0,6 мм (при мощности лазера 2,7 кВт [20]) и 1 мм (при мощности лазера 2,0 [18] и 5,7 кВт [15]).

Как и при других способах сварки, возможности гибридной лазерной сварки + сварки МИГ/МАГ в основном определяются путем соответствующей настройки системы и выбора основных параметров процесса. В этом случае параметры процессов лазерной сварки и сварки МИГ/МАГ можно варьировать в достаточно широком диапазоне с целью получения необходимых рабочих характеристик процесса сварки, таких, как глубина сварки и за-

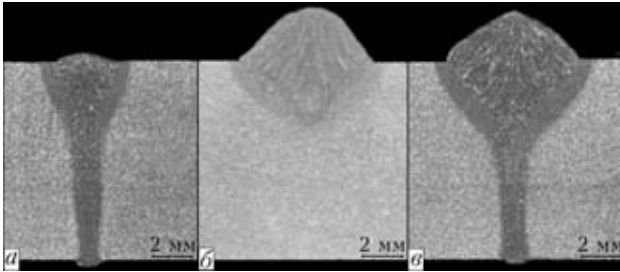


Рис. 2. Макрошлифы проплавлений, выполненных лазерной сваркой (а), сваркой МАГ (б) и гибридной лазерной сваркой + сваркой МАГ (в) [21]

полнение зазора, форма шва и металлургические свойства [5].

Сравнение уровня проплавления шва при лазерной сварке, сварке МИГ/МАГ и гибридной сварке (рис. 2) показывает, что лазерный шов характеризуется вогнутостью валика, тогда как шов МИГ/МАГ имеет максимальное усиление валика, а гибридный отличается предельным усилением и большой шириной при такой же глубине проплавления и скорости, как у лазерной сварки.

Глубина проплавления в основном определяется мощностью лазерного пучка и его фокусировкой, а ширина шва — напряжением. Если воздушный зазор отсутствует, то максимальную скорость сварки, позволяющую получить полное проплавление, можно достичь при гибридной сварке CO_2 -лазером, а при сварке МИГ/МАГ и сварке CO_2 -лазером она ниже. Это объясняется наличием излишнего металла на верхней части изделия, который требует проплавления, а также отклонением фокальной точки от установленного положения. Скорость сварки возрастает с увеличением ширины воздушного зазора. Можно увеличить воздушные зазоры до максимальной ширины (до 1,5 мм), но при этом процесс сварки нестабилен и сопровождается брызгами. Швы, выполненные гибридной сваркой, отличаются, как правило, более низкой прочностью по сравнению со швами, выполненными лазерной сваркой [22].

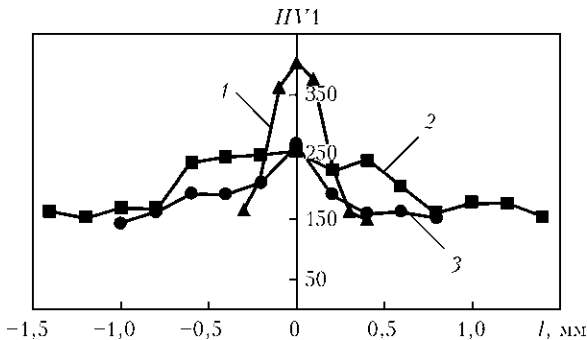


Рис. 3. Твердость HV_1 металла шва, выполненного на сплаве СМп250 толщиной 2,13 мм гибридной сваркой (лазерная сварка + сварка МИГ) без зазора на максимальной скорости (мощность CO_2 -лазера 2250 Вт; сварки МИГ — 79 кВт) [25]: 1 — скорость лазерной сварки 4,4 м/мин; 2 — сварки МИГ 2,2 м/мин; 3 — гибридной сварки 4,5 м/мин; l — расстояние от центра шва

По результатам эксперимента, который проводили с целью исследования стабильности гибридной сварки CO_2 -лазер + сварка МИГ/МАГ, путем анализа влияния некоторых параметров процесса сварки можно заключить, что оптимальное расстояние в гибридном процессе (расстояние между осью луча и осью плавящегося электрода) зависит от режима переноса металла при дуговой сварке в защитном газе и является очень важным фактором для стабильности и повторяемости процесса. Во многих работах указывается на необходимость выбора параметров дуги, обеспечивающих импульсную/струйную дугу, а не короткую/капельную [10, 23]. Излучение Nd:YAG-лазера благодаря меньшему взаимодействию с плазмой дуги позволяет приблизиться к дуге больше, чем излучение CO_2 -лазера. Чтобы достичь максимального проплавления фокальная точка во многих случаях должна находиться ниже поверхности обрабатываемого изделия [10]. При этом желательно, чтобы отклонение дуги было наименьшим. Угол отклонения от 15 до 30° к оси лазера позволяет выполнить работу на приемлемом техническом уровне.

Авторы работы [24] исследовали параметры процесса гибридной лазерной сварки + сварки МАГ с использованием CO_2 -лазера (HSLA-590) мощностью 2,4 кВт. Они определили, что гибридный наплавленный валик, формируемый под воздействием дуги, не такой ровный, как наплавленный валик, формируемый под воздействием лазера. Исходя из его внешнего вида можно заключить, что лучшее формирование валика достигается при лазерном процессе. Определено также, что металл шва, выполненного гибридной сваркой, имеет более высокую вязкость, чем металл шва, выполненного лазерной сваркой даже на более высокой скорости.

Была измерена твердость металла стыковых швов, выполненных гибридной лазерной сваркой + сваркой МИГ с нулевым зазором на максимальной скорости. Дефекты в швах отсутствовали. На рис. 3 видно, что максимальные значения твердости составляют HV_1 400, 258 и 268 соответственно для лазерной сварки, сварки МИГ и гибридной, что в 2,50, 1,70 и 1,75 раза больше твердости основного металла. Несмотря на большее значение твердости металла гибридного шва по сравнению с металлом шва МИГ, его твердость, как правило, на HV_1 20...50 ниже, чем металла шва, выполненного сваркой МИГ. Это сопровождается сокращением на 40 % площади зоны термического влияния (ЗТВ) от 8,6 до 5,2 мм^2 . Эти данные получены путем обработки цифрового изображения. В структуре металла ЗТВ при гибридной лазерной сварке + сварке МИГ бейнит отсутствует, но формируется игольчатый феррит, чем объясняется значительное уменьшение твердости [25].

На рис. 4 показано влияние ширины зазора на максимальную скорость стыковой сварки. При лазерной сварке происходит уменьшение скорости сварки при ширине зазора более 0,1 мм. При сварке МИГ изменение ширины зазора на скорость сварки влияния не оказывает. При гибридной сварке с увеличением ширины зазора скорость сварки уменьшается незначительно. Так, при зазоре шириной 0,6 мм скорость сварки уменьшается всего на 22 % (от 4,5 до 3,5 м/мин) [25].

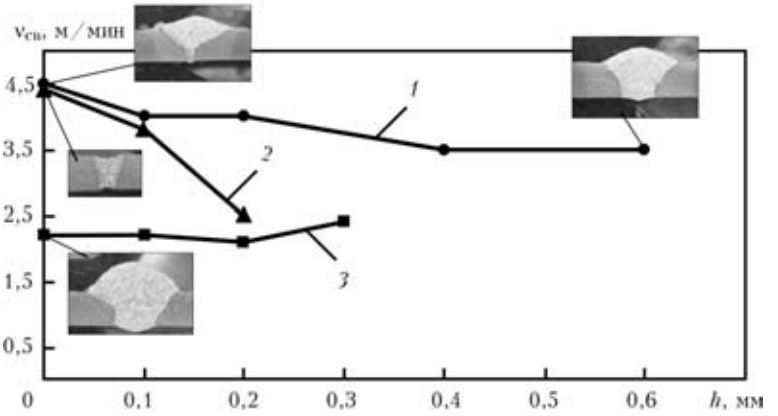


Рис. 4. Влияние ширины h зазора на максимальную скорость $v_{св}$ гибридной сварки (1) (мощность CO_2 -лазера 2250 Вт), лазерной сваркой (2) и сваркой МИГ (3) (мощность 9 кВт) (сплав СМп250 толщиной 2,13 мм) [25]

Приведены результаты исследований соединений различных конфигураций и материалов разной толщины, полученных гибридной лазерной сваркой. На рис. 5 показаны допуски на отклонение при гибридной лазерной сварке трубной стали толщиной 10 мм с V-образной обработкой кромки с углом 10° и притуплением кромки 1 мм (CO_2 -лазер мощностью 10,5 кВт, импульсная дуга МИГ, присадочная проволока (G3Si1) диаметром 1,2 мм, скорость подачи проволоки 5,2 м/мин, использовалась защитная смесь газов аргон+гелий). Установлено, что гибридная сварка по сравнению с лазерной имеет достоинства в части требований к сварке.

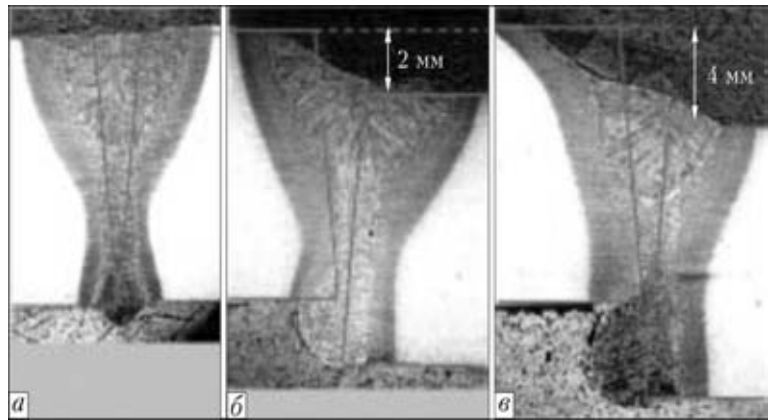


Рис. 5. Макрошлифы соединений трубной стали X25 толщиной 10 мм [15], выполненных гибридной сваркой со скоростью 1,0 (а) и 0,8 м/мин (б, в)

При гибридной сварке также получен хороший переход от усиления шва к основному металлу (рис. 6). При этом использовали Nd:YAG-лазер мощностью 3 кВт с применением оптоволокон диаметром 0,6 мм или CO_2 -лазер мощностью 6 кВт. Выполненные на очень высоких скоростях швы не имели трещин и пор и отличались достаточной прочностью.

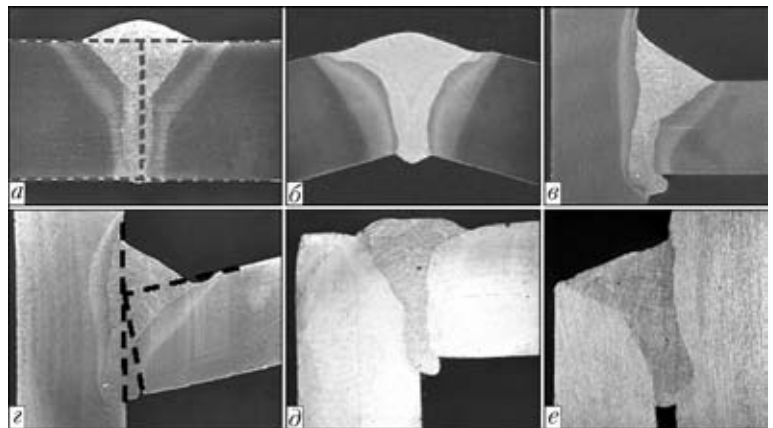


Рис. 6. Макрошлифы соединений различных конфигураций крупносортовой стали толщиной 6...8 мм (а-д) и тонколистовой стали толщиной 2 мм (е), выполненных гибридной сваркой [26]

Недавно в Фраунгоферовском институте лазерных технологий [3] проведено исследование, направленное на расширение технического уровня гибридной сварки (лазерная сварка + сварка МАГ) высокопрочных конструкционных сталей. Большая часть швов выполнена с помощью встроенного сопла для гибридной сварки, изготовленного там же. Полученные результаты показали, что мощность лазерного излучения и скорость сварки должны быть приспособлены под толщину пластины и ширину зазора при получении стыковых соединений в нижнем и боковом положениях. В том же эксперименте определено, что можно сваривать сталь толщиной 25 мм (рис. 7) без образования горячих трещин. Если они возникают, то только при наличии нескольких небольших пор. При этом V- и Y-образная подго-

товка кромок с углом $4...8^\circ$, соответствующая скорость сварки и правильно подобранное количество тепла на единицу длины являются очень важными факторами.

Различия между CO_2 -лазером и Nd:YAG-лазером, используемым при гибридной сварке, состоят в длине волны. CO_2 -лазер является более экономичным и имеет большую скорость сварки, чем Nd:YAG-лазер с более высокой мощностью.

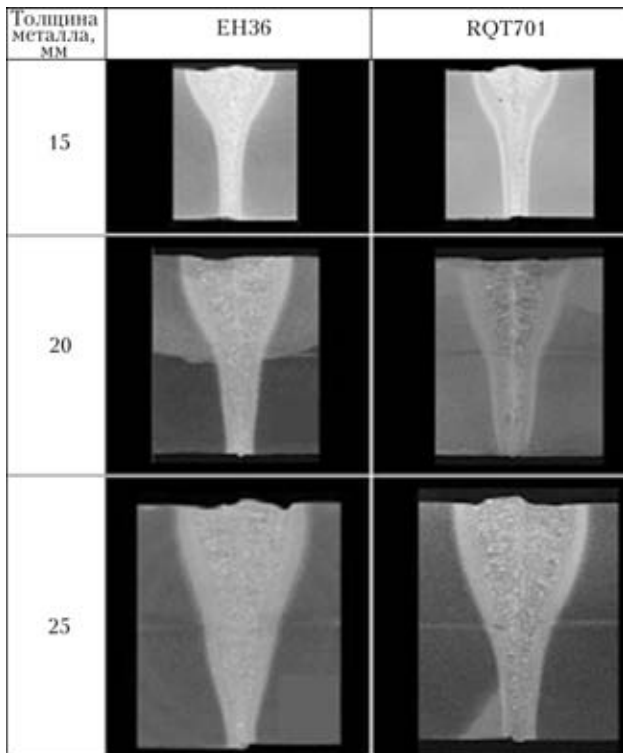


Рис. 7. Макрошлифы поперечных сечений образцов оптимизированных гибридных швов для механических и технологических испытаний [3]

Однако у CO_2 -лазера система подачи пучка сложнее, чем у Nd:YAG-лазера, отличающегося более короткой длиной волны и подачей пучка через оптоволокно, что обеспечивает его лучшую поглощаемость, особенно при сварке алюминия. Тем не менее CO_2 -лазер и Nd:YAG-лазер с ламповой накачкой имеют значительные недостатки, например, относительно низкий КПД штепсельной вилки (менее 10 %). Это означает, что системы не только требуют большой энергии для работы, им также необходимо охлаждающее оборудование [13, 16, 17, 27].

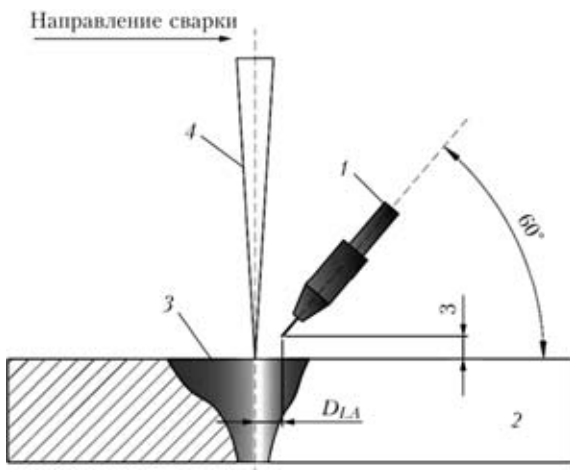


Рис. 8. Схема гибридной лазерно-дуговой сварки (CO_2 -лазер + сварка ТИГ) [29]: 1 — горелка ТИГ; 2 — обрабатываемое изделие; 3 — сварочная ванна; 4 — лазерный пучок

Выбор защитного газа является важным фактором для гибридной сварки. Для Nd:YAG-лазера выбор технологического газа определяется требованиями стабильности дуги и качеством защиты валика; при сварке МИГ/МАГ необходимо также учитывать отрыв капли и перенос металла без разбрызгивания. Аргон является основной составляющей используемой смеси газов. Незначительное добавление кислорода способствует отрыву капли и сокращению разбрызгивания. Смесь с гелием способствует большему напряжению дуги и увеличению мощности, которая приводит к увеличению ширины валика, но дестабилизирует дугу. Несмотря на это при использовании CO_2 -лазера часто применяется смесь с гелием для исключения плазменной защиты. Присутствие лазерного пучка обеспечивает приемлемую стабильность дуги даже при значительном содержании гелия [27].

Компании «Volkswagen» и «Audi» убедились в преимуществах использования гибридной лазерной сварки + сварки МИГ в автомобильной промышленности. В судостроении этот способ сварки постепенно начинают применять для соединения изделий с толщиной стенки 15 мм [6, 9, 15, 28].

Лазерная сварка + сварка ТИГ. При совместном действии дуги ТИГ и лазерного пучка устанавливается такое тепловое условие, при котором улучшается абсорбция лазерной энергии: в нагретой области лучше происходит прохождение лазерной энергии в основной материал [5]. Такое сочетание образует вдоль прохода шва обычную перемещающуюся жидкую ванну. Типичная схема гибридной лазерно-дуговой сварки представлена на рис. 8.

В работе [1] представлены результаты эксперимента с применением CO_2 -лазера и сварки ТИГ. Установлено, что сочетание сварки ТИГ с лазерной имеет существенные преимущества: основание дуги остается стабильным в горячем пятне, которое генерируется лазером, в связи с чем дуга и при малом токе может быть стабильной даже при высокой скорости сварки; при комбинированном процессе основание дуги сужается, что помогает избежать образования подрезов, что, как правило, связано с высокой скоростью дуговой сварки, особенно при сварке алюминиевых сплавов. Поглощаемость металла шва возрастает с повышением температуры при длине волны лазерного пучка 10600 нм [1, 15, 30]. В работе [6] сообщается, что при гибридной сварке CO_2 -лазер + сварка ТИГ очень зависят от вида защитного газа и используемой методики защиты.

В работе [31] исследовали сварное соединение из сплава магния и стали, полученное различными способами сварки. Выявлено, что благодаря высокой энергоемкости и быстрому механизму перемешивания в сварочной ванне существует воз-

возможность соединять сплав магния и сталь с помощью гибридной лазерной сварки + сварки ТИГ, что практически невозможно осуществить традиционными способами сварки плавлением (мощность лазера 400 Вт, скорость сварки 15 мм/с, ток сварки ТИГ 80 А, «расстояние процесса» 1 мм, положение фокуса лазера 1 мм, диаметр вольфрамового электрода 3,2 мм, угол между электродом, обрабатываемым изделием и направлением сварки 50°, расход аргона 0,5 л/с, частота лазерного импульса 39 Гц).

Одним из недостатков лазерной сварки является наличие пор, которые возникают из-за высокой мощности и глубокого проплавления, особенно при частичном проплавлении. Важная задача при сварке алюминия — исключить появление пор или уменьшить их количество в металле шва. Этому препятствует пористость, которая образуется в результате испарения таких легирующих элементов, как магний. При несоответствующих параметрах сварки также могут возникать трещины [6, 14]. Образование пор в металле шва зависит от тока при сварке ТИГ и состава защитного газа при гибридной лазерной сварке + сварке ТИГ.

Способ гибридной сварки лазерная сварка + сварка ТИГ оказался перспективным для получения стыкового соединения сверхтонких (0,4...0,8 мм) листов аустенитной стали. Наличие сварочной ванны, генерируемой лазером, стабилизирует дугу ТИГ, что позволяет достичь скорость сварки до 15 м/мин с лазерным слежением. Сочетание лазера и дуги ТИГ способствует выполнению швов шириной, достаточной для нивелирования небольших дефектов среза кромки или несовпадения между двумя соединяемыми листами. С целью исключения тепловой деформации и излишнего оплавления необходимо ми-

нимизировать ток сварки ТИГ и использовать дополнительный защитный газ [32].

Ученые отмечают, что проплавление при гибридной лазерной сварке зависит не от тока дуги, а от мощности лазерного излучения при гибридной сварке CO₂-лазер + сварка МАГ и гибридной сварке Nd:YAG лазер + сварка ТИГ [26, 33]. Как видно из рис. 9, а, во всех гибридных швах проплавление гибридных швов было глубже чем, у лазерных швов, если значение тока ТИГ было постоянным. При различных значениях тока ТИГ и постоянной мощности лазера, проплавление остается таким же, но ширина шва увеличивается с повышением мощности сварки ТИГ (рис. 9, б) [12].

Лазерно-плазменная сварка. При гибридной лазерно-плазменной сварке обрабатываемых изделий лазерный пучок и плазменная струя соединяются в области, расположенной близко к обрабатываемому изделию (рис. 10) [34]. Во время работы плазменная горелка находится под углом приблизительно 45° к лазерному пучку. Струя плазмы, вызванная свободной микроволновой, генерируется в высокочастотном микроволновом источнике и направляется в полый волновод. Технологический газ вводится в микроволновую прозрачную трубку через впускное отверстие, а плазма генерируется путем зажигания технологического газа без применения электрода [34–36]. Зажигание основной дуги происходит посредством низкоамперной вспомогательной дуги, сформировавшейся между концом электрода и соплом. После зажигания вспомогательная дуга вырабатывает достаточное количество тепла для ионизации воздушного зазора между соплом и обрабатываемым изделием. Преимуществом вольфрамового электрода является то, что он размещен за соплом, которое обеспечивает характерное

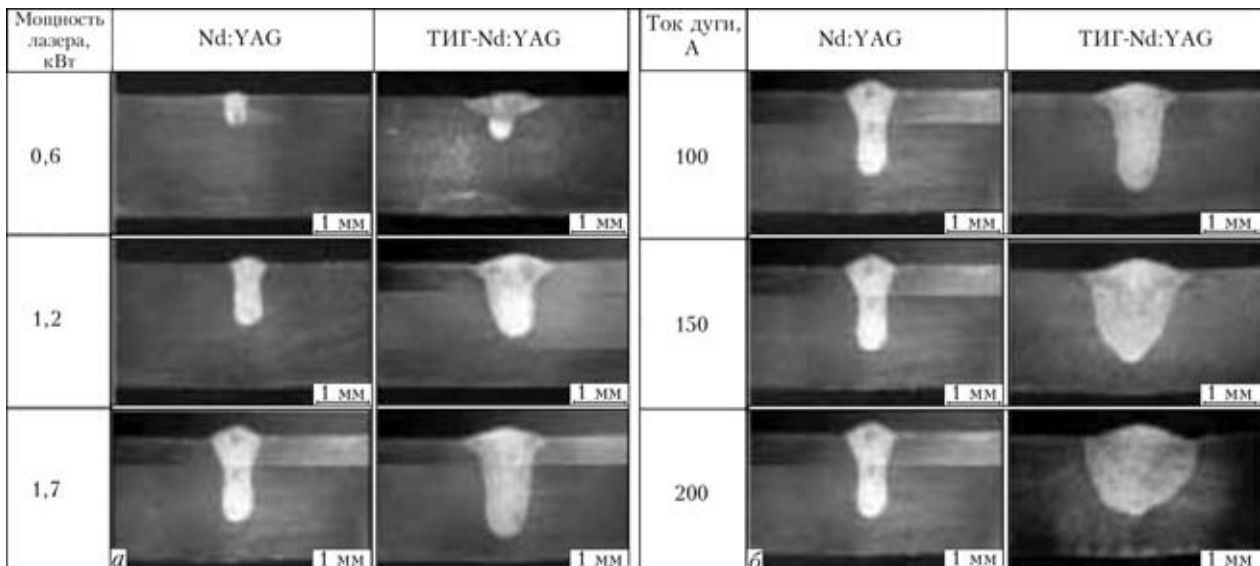


Рис. 9. Макрошлифы поперечных сечений швов, выполненных на нержавеющей стали типа 304 толщиной 5 мм сваркой Nd:YAG-лазером и гибридной сваркой лазером + сварка ТИГ при различных мощности лазера (а) и токе дуги (б) [12]

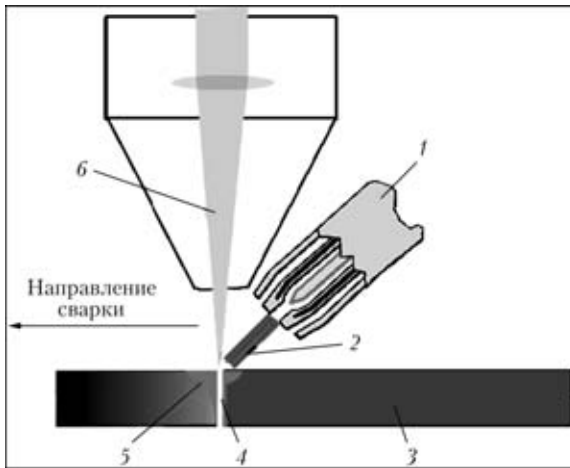


Рис. 10. Схема расположения системы сварки плазменной дугой, дополненной лазером: 1 — плазменная горелка; 2 — плазменная дуга; 3 — обрабатываемое изделие; 4 — парогазовый канал; 5 — сварочная ванна; 6 — лазерный пучок

струйное воздействие плазмообразующего газа. Стабильное функционирование дуги поддерживается без ухудшения характеристик электрода в течение достаточно продолжительного времени, поскольку конец электрода не подвергается воздействию загрязняющих веществ [35].

При гибридной лазерно-плазменной сварке с целью повышения скорости охлаждения после сварки как инструмент термообработки вводится источник дугового нагрева. Таким образом можно уменьшить содержание хрупких микроструктур, склонных к разрушению при эксплуатации. При использовании гибридной лазерно-плазменной дуговой сварки в качестве основного процесса и термообработки можно значительно сократить время изготовления изделия [35].

Этот процесс имеет существенные преимущества, если его использовать при лазерно-плазменной сварке, включающей жесткую высокотемпературную колоннообразную дугу с хорошими свойствами ориентирования, которая обеспечивает большой допуск по сравнению с лазерной сваркой для несоответствующих и сравнительно неудовлетворительных условий сборки. Более того, при относительно небольшом увеличении капиталовложений этот процесс имеет экономические преимущества и перспективу для широкого применения лазера в промышленности. В настоящее время существует всего несколько гибридных лазерно-плазменных систем, которые служат для выполнения промышленных задач, но эта ситуация в будущем, скорее всего, изменится благодаря пригодности процесса для промышленного применения. Для широкого использования гибридных лазерно-плазменных систем необходимо всестороннее научное понимание этого процесса и сфер его применения [34].

Предыдущие испытания плазменно-дугового способа сварки дополнены CO_2 -лазером мощ-

ностью 400 Вт и на токе 50 А [34]. В ходе эксперимента протестировано большое количество различных материалов (низкоуглеродистая сталь, нержавеющая сталь, титан и алюминий) толщиной от 0,6 до 2 мм. Выявлено, что комбинированный процесс может предотвратить образование «горок» при высокоскоростной сварке тонких листов. При плазменной лазерно-дуговой сварке имеют место более высокие допуски несоответствия пучок-зазор (от 0,15 до 0,50 мм) при $v_{\text{св}} = 2$ м/мин и токе 50 А.

В работе [37] сообщается, что лазерно-дуговой способ сварки со вспомогательным лазером исключает горячее растрескивание в зоне сплавления алюминиевых сплавов 6061 и 6111, если использовать дугу с постоянной мощностью вместо импульсной. Зоны сплавления как у нержавеющей стали, так и алюминия оказались более широкими, чем при выполнении лазерных швов. Определено, что швы, полученные лазерно-плазменной сваркой, были не такими отполированными, как при импульсной Nd:YAG-лазерной сварке. Способ гибридной лазерно-плазменной сварки показал себя весьма стабильным. Этот эффект наблюдался при лазерно-дуговой сварке металлическим электродом в защитном газе.

Лазерная тандем-сварка + сварка МИГ. Способ сварки лазерная тандем + сварка МИГ является сочетанием лазерного пучка и дуговых процессов только с одной зоной расплава. Схема процесса гибридной лазерной тандем сварки + сварки МИГ представлена на рис. 11 [9]. Лазерный пучок, установленный под углом приблизительно 90° по отношению к обрабатываемому изделию, используется для заварки корня. Обе другие следящие дуги имеют смещенный угол наклона и применяются для увеличения заполнения корня шва и его толщины. В процессе сварки используют три различные выходные мощности, которые можно устанавливать в зависимости от желаемого результата. Посредством соответствующей выходной мощности для тандем-сварки можно выбрать геометрию соединения, желаемое заполнение соединений и скорость. Путем изменения скорости сварки, диаметра фокальной точки и мощности лазерного излучения при подготовке скоса кромки можно также изменять глубину шва. Более того, для получения желаемых металлургических характеристик [10] используют два присадочных материала с различными химическими составами.

При правильном выборе параметров процесса можно целенаправленно воздействовать на геометрию шва и структурные составляющие его металла. Способы дуговой сварки увеличивают заварку зазора путем добавления присадочного металла, что также определяет ширину шва, а следовательно, упрощает подготовку шва. Эффектив-

ность сварки значительно увеличивается в результате взаимодействия процессов.

Как определено в работах [9, 38], преимуществом комбинированных процессов является то, что при расплавлении присадочного металла давление дуги не влияет на обрабатываемое изделие. При гибридной сварке лазерная тандем-сварка + сварка МИГ есть возможность отдельно контролировать мощность лазерного излучения дуги, а также ее длину, что, как утверждается в [10, 37], улучшает отрыв капли, увеличивает стабильность дуги и способствует незначительному разбрызгиванию. Более того, вместе с этим способом сварки можно использовать гибридную лазерную сварку МИГ/МАГ одной дугой. Процесс гибридной лазерной тандем-сварки + сварки МИГ/МАГ исследован в работе [38] при соединении труб из конструкционной стали с толщиной стенки 8 мм и внутренним диаметром 500 мм, что соответствует стандарту EN 10149-2. Установлено, что при Y-образной подготовке кромок можно получать швы с полным проплавлением.

Лазерно-дуговая сварка под флюсом. При гибридной лазерной сварке + сварке МИГ/МАГ необходимо выполнять условия в отношении предупреждения порообразования в корне швов, если сваривается металл толщиной более чем 12 мм. Опасность образования пор связана с недостаточной способностью к дегазации металла глубоких и узких лазерных швов. Чтобы предотвратить это сварочную ванну необходимо удерживать на протяжении длительного времени [39]. Это послужило поводом для проведения экспериментов по оценке возможности удержания сварочной ванны более продолжительное время при использовании гибридной лазерной дуговой сварки под флюсом и созданию более благоприятных условий для дегазации. Здесь оба процесса сварки действуют вместе в одной рабочей зоне [28] на близком расстоянии (13...15 мм).

Объединение двух сварочных процессов — сварки лазерным пучком и дуговой сварки под флюсом в одной рабочей зоне оказалось проблемной, поскольку флюс попадал в парогазовый канал лазерного пучка, а лазерное излучение поглощалось флюсом, а не металлом. Было создано устройство, которое препятствует такому «выпадению» флюса. Ключевым звеном в нем является разделительная пластина (разработана RWTH, Аахенский университет), которая устанавливается между лазерным пучком и устройством подачи флюса (рис. 12).

При проведении исследований замечено наличие пространственного расстояния между двумя процессами и разделение шва на две области — сваренную лазером и дуговой сваркой под флюсом. Расстояние должно быть выбрано достаточно коротким для обеспечения выпадения минималь-

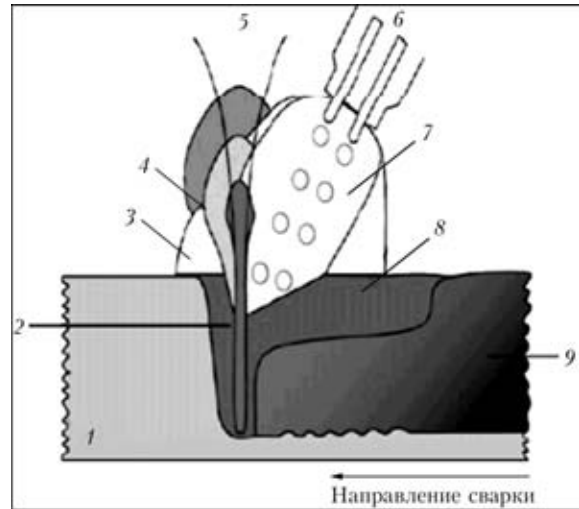


Рис. 11. Схема лазерной тандем-сварки [9]: 1 — обрабатываемое изделие; 2 — парогазовый канал; 3 — облако защитного газа; 4 — индуцированная лазером плазма; 5 — лазерный пучок; 6 — электрод; 7 — дуга; 8 — наплавленный валик; 9 — сварочная ванна

ного количества флюса и настолько большим, чтобы шлак в начале процесса не зажимал свариваемый лист. При этом очень важен угол наклона разделительной пластины. Если он слишком большой, то разделительная пластина может быть захвачена лазерным пучком, а если слишком мал, то дуга может гореть между разделительной пластиной и присадочной проволокой. В этих областях отсутствует перемешивание металла шва. Именно предварительный нагрев за счет лазерного пучка, приводит к синергетическому эффекту, который увеличивает скорость процесса дуговой сварки под флюсом [21, 40].

Таким образом, гибридная лазерно-дуговая сварка под флюсом является наиболее целесообразной среди способов гибридной лазерно-дуговой сварки. Промышленность проявляет значительный интерес к этому способу сварки, имеющему практическое применение благодаря использованию менее дорогостоящих и гибких источников лазерного излучения. Использование в этом процессе твердотельных лазеров дает возможность для дальнейшего развития этого способа сварки и расширения области его применения. Одним из его преимуществ является уменьшение риска плазменной защиты, поскольку легче объединить более короткую длину волны твердотельного лазера в материале, подлежащем обработке. При более короткой длине волны также может быть улучшена гибкость оборудования, поскольку можно обойтись без сложного наведения лазерного пучка через зеркальную оптику, а направлять его через оптоволокно в обрабатываемую оптическую систему [28].

Для достижения лучшей дегазации и получения шва с минимальным количеством пор или без них можно расширять или стабилизировать

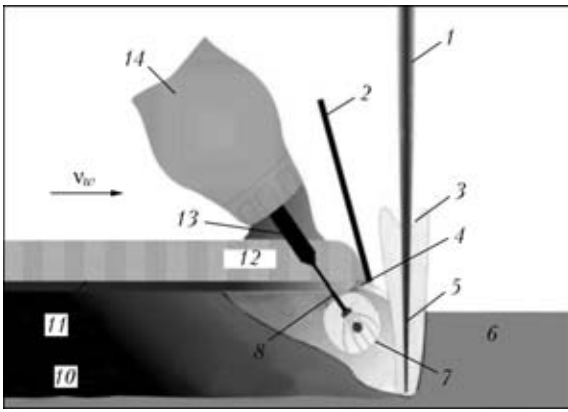


Рис. 12. Схема гибридной лазерно-дуговой сварки под флюсом [28]: 1 — лазерный пучок; 2 — разделительная пластина; 3 — плазмоиспарение металла; 4 — жидкий шлак; 5 — парогазовый канал; 6 — основной металл; 7 — раковина в дуговом шве; 8 — электродная проволока для дуговой сварки под флюсом; 9 — расплавленная ванна; 10 — металл шва; 11 — твердый шлак; 12 — флюс; 13 — мундштук; 14 — бункер для флюса

парогазовый канал. Одним из путей этого могло бы стать применение сварки и контроля с помощью адаптированной оптической колебательной системы.

Введение защитного газа и/или технологического газа является еще одним параметром процесса сварки. При использовании эффективного твердотельного лазера, например волоконного, можно было бы исключить применение защитного газа, а использовать сжатую воздушную струю во избежание необходимости очистки шва, что делает данный способ сварки более экономичным [28].

При процессе гибридной лазерно-дуговой сварки под флюсом достигается лучшая дегазация за счет покрытия расплавленного металла шлаком, хорошего заполнения шва и более высоких возможностей этого способа сварки по сравнению с лазерной сваркой для соединения толстых пластин с использованием проволоки различных диаметров. Большие надежды связаны с применением комбинаций проволока + флюс и новых лазерных технологий [28].

Таким образом, исходя из результатов исследования различных способов гибридной лазерно-дуговой сварки можно заключить, что указанный способ сварки находит широкое промышленное применение благодаря экономическим и техническим преимуществам технологии.

Внедрение этой передовой технологии может изменить способы сооружения конструкций, а также принятые производственные парадигмы. Производители утверждают, что вследствие ее применения они получают большие выгоды, чем их конкуренты.

Гибридная сварка требует соответствующих настройки системы и подбора основных параметров. Если эти граничные условия выбраны пра-

вильно, то эта технология оказывается стабильной, эффективной и гибкой, а если они установлены не надлежащим образом, то в швах будут образовываться дефекты.

Производительность этого способа сварки можно улучшить путем увеличения скорости сварки, которая для листового материала может составлять до 40 % с традиционной лазерной сваркой.

При использовании гибридной сварки инвестиционные расходы на источник лазерного излучения значительно уменьшаются, а затраты на электроэнергию становятся намного выше.

При гибридной МИГ/МАГ сварке высокопрочной конструкционной стали толщиной до 20 мм с зазором до 1 мм в нижнем положении возможно достижение проплавления по всей глубине как без разделки кромок, так и при V- и Y-образной разделке.

Гибридная сварка найдет промышленное применение и для соединений большой толщины с изменяющимся зазором в кромках. При этом желательно разработать технологические условия, позволяющие обеспечить стабильное качество швов.

1. Steen W. M., Eboo M. Arc augmented laser welding // Metal Construction. — 1978. — 21(7). — P. 332–335.
2. Bagger C., Olsen F. O. Review of laser hybrid welding // J. Laser Applications. — 2005. — 17(1). — P. 2–14.
3. Progress in laser-MAG hybrid welding of high strength steels up to 30 mm thickness / D. Petring, C. Fuhrmann, N. Wolf, R. Poprawe // Proc. on Intern. conf. on laser and electro-optics, ICALEO, LIA, Orlando, Florida, USA, 2007. — P. 300–307.
4. Fellman A., Jernstrom P., Kujanpaa V. CO₂-GMA hybrid welding of carbon steel — the effect of shielding gas composition // Proc. of Intern. conf. on laser and electro-optics, ICALEO, LIA, Jacksonville, Oct. 13–16, 2003. — P. 56–65.
5. Diltthey U., Wiesschemann U. Prospectives offered by combining and coupling laser beam and arc welding // Welding Intern. — 2002. — 16(9). — P. 711–719.
6. Graf T., Staufer H. Laser-hybrid welding drivers VW improvements // Welding J. — 2003. — № 17. — P. 42–48.
7. Shibata K., Sakamoto H., Iwasa T. Laser-MIG hybrid welding of aluminium alloys // Welding in the World. — 2006. — 50(1/2). — P. 27–34.
8. Jokinen T., Karhu M., Kujanpaa V. Welding of thick austenitic stainless steel using Nd:YAG-Laser with filler wire and hybrid process // J. Laser Applications. — 2003. — № 15. — P. 220–224.
9. Staufer H. Laser hybrid welding in the automotive industry // Welding J. — 2007. — Oct., 86(10). — P. 36–40.
10. Innovative hybrid welding process in an industrial application / S. Kaierle, K. Bongard, M. Dahmen, R. Poprawe // Proc. of Intern. conf. of applications of lasers and electro-optics, ICALEO, LIA, Dearborn, USA, 2000. — 89. — C. 91–98.
11. Defalco J. Practical applications for hybrid laser welding // Welding J. — 2007. — Oct., 86(10). — P. 47–51.
12. Naito Y., Mizutani M., Katayama S. Observation of keyhole behavior and melt flows during laser-arc hybrid welding // Proc. of Intern. conf. of applications of lasers and electro-optics, ICALEO, LIA, Jacksonville, Florida, USA, LMP Section A, 2003. — P. 159–167.
13. Effects of interaction between the arc and laser plume on metal transfer in Pulsed GMA/CO₂ laser hybrid welding / T. Sugino, S. Tsukamoto, G. Arakane, T. Nakamura. — S.I., [2006]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IV-903–2006).

14. *Hu B., Den Ouden G.* Laser induced stabilisation of the welding arc // *Sci. and Techn. of Welding and Joining.* — 2005. — 10(1). — P. 76–81.
15. *Investigations and applications of laser-arc hybrid welding from thin sheets up to heavy section components / D. Petring, C. Fuhrmann, N. Wolf, R. Poprawe // Proc. of Intern. conf. of applications of lasers and electro-optics, ICALEO, LIA, Jacksonville, Florida, USA, Section A, 2003.* — P. 1–10.
16. *Mahrle A., Beyer E.* Hybrid laser beam welding-classification, characteristics and applications // *J. Laser Application.* — 2006. — № 18. — P. 169–180.
17. *Kah P., Salminen A., Martikainen J.* The effect of the relative location of laser beam and arc in different hybrid welding processes // *Proc. of Intern. conf. of applications of lasers and electro-optics, ICALEO, LIA, Orlando, Florida, USA, 2009.*
18. *Kutsuna M., Chen L.* Interaction of both plasma in CO₂ laser-MAG hybrid welding of carbon steel. — S. l., [2002]. — 10 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-1708–2002).
19. *Abe N., Hayashi M.* Trends in laser arc combination welding methods // *Welding Intern.* — 2002. — 16(2). — P. 94–98.
20. *Closing the weld gap with laser/MIG hybrid welding process / C. Bagger, B. D. Wiwe, N. A. Paulin, F. O. Olsen // Conf. on laser materials proc. in the nordic countries, 9th NO-LAMP Trondheim, Norway, 2003.* — P. 113–124.
21. *Olschok S., Reisgen U., Diltthey U.* Robot application for laser-GMA hybrid welding in shipbuilding // *Proc. 26th Intern. conf. on laser and electro-optics, ICALEO, LIA, Orlando, Florida, USA, 2007.* — P. 308–315.
22. *Shinn B. W., Farson D. F., Denney P. E.* Laser stabilization of arc cathode spots in titanium welding // *Sci. Techn. Weld. Joining.* — 2005. — № 10. — P. 475–481.
23. *Schubert E., Wedel B., Kohler G.* Influence of the parameters on the welding results of laser-GMA welding // *Proc. of Intern. conf. of applications of Lasers and electro-optics, ICALEO, LIA, Phoenix, Section A, 2002.*
24. *Lui Z., Kutsuna M., Xu G.* Properties of CO₂ laser-GMA hybrid welded high strength steel joints. — S. l., [2006]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IV-907–2006).
25. *Bagger C., Olsen F.* Comparison of plasma, metal inactive gas (MIG) tungsten inactive gas (TIG) processes for laser hybrid welding // *Intern. conf. on laser and electro-optics, ICALEO, LMP, Jacksonville, Florida, USA, Section A, 2003.* — P. 11–20.
26. *Nilsson H., Kaplan A.* Influence of butt- and T-joint preparation in laser arc hybrid welding. — S. l., [2002]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-1732–2002).
27. *Fellman A., Salminen A.* A study of phenomenon of CO₂-laser welding with filler wire and MAG hybrid welding // *Proc. of the 24th Intern. conf. on applications of lasers and electro-optics, ICALEO, Miami, USA, 2005.* — P. 117–126.
28. *Reisgen U., Olschok S.* Laser-submerged arc hybrid welding // *The Paton Welding J.* — 2009. — № 4. — P. 38–42.
29. *Laser-TIG hybrid welding of ultra-fine grained steel / M. Gao, X. Zeng, Q. Hu, J. Yan // J. of Materials Proc. Techn.* — 2009. — № 209. — P. 785–791.
30. *Pore formation during hybrid laser-tungsten inert gas arc welding of magnesium alloy AZ31B-mechanism and remedy materials / L. Liming, S. Gang, G. Liang, W. Jifeng // Sci. and Eng. A.* — 2005. — № 390. — P. 76–80.
31. *Liu L. M., Zhao X.* Study on the weld joint of Mg alloy and steel by laser GTA hybrid welding // *Materials Characterization.* — 2008. — № 59. — P. 1279–1284.
32. *Laser-TIG hybrid welding of very thin austenitic stainless steel sheets / J. L. Arias, P. Romero, A. Vandewynckele, J. Vazquez // Proc. of the 24th Intern. conf. on applications of lasers and electro-optics, ICALEO, Miami, USA, 2005.* — P. 104–107.
33. *Hybrid welding of thick section C/Mn steel and aluminum / S. E. Nielsen, M. M. Andersen, J. K. Kristensen, T. A. Jensen. — S. l., [2002]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-1731).*
34. *Walduck R. P., Biffin J.* Plasma arc augmented laser welding // *Welding and Metal Fabrication.* — 1994. — № 4. — P. 172–176.
35. *Wibowo M. K.* A study of hybrid laser-plasma arc welding // *NIMR cluster 8 rep. (Joining technologies).*
36. *Devermann T., Biffin J., Blundell N.* Plasma augmented laser welding and its applications // *Sci. and Tech. of Welding and Joining.* — 2002. — 7(1). — P. 1–10.
37. *Fuerschbach W. P.* Laser assisted plasma arc welding // *Proc. of Intern. conf. application of laser and electro-optics, ICALEO, section D, 1999.* — P. 102–108.
38. *Staufner H.* High productivity by using laser-GMAW and laser tandem-hybrid processes for thick plates // *Proc. of the IIW Intern. conf., Prague, Czech Republic, 2005.* — P. 66–68.
39. *Diltthey U., Olschok S.* Untersuchungen zur nutzung der synergieeffekte beim Hochleistungs-laser hybridschweissen von dickwandigen Rohrkörpern aus C-Mn Stählen // *Abschlussbericht des AiF-Forschungsvorhabens 13.407N.* — Aachen, 2004.
40. *Combination of laser beam and submerged arc processes for the longitudinal welding of large welded pipes / J. C. Coiffier, J. P. Jansen, G. Peru et al. // Proc. of Intern. symp. on high strength steels, Trondheim, Norway, 1997.*

Peculiarities of application of different hybrid welding methods are analysed allowing for the process parameters used, types and thicknesses of the metal welded. Economic aspects of utilisation of hybrid welding and characteristic features of quality control are considered.

Поступила в редакцию 03.02.2010