



## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ (ОБЗОР)

А.И. БУШМА

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе описана краткая ретроспектива развития и современное состояние гибридной лазерно-плазменной сварки. Показано, что к основным задачам гибридной лазерно-плазменной сварки относится не только плазменно-дуговой подогрев металла изделия для повышения его поглощающей способности, но и модификация сварочного термического цикла для снижения скорости охлаждения после сварки. Это позволяет снизить содержание хрупких структур, склонных к разрушению при эксплуатации. Также, наличие плазменно-дуговой составляющей процесса позволяет снизить требования к качеству сборки свариваемых стыков, по сравнению с лазерной сваркой. Перспективы промышленного внедрения гибридной лазерно-плазменной сварки связаны с ее экономическими и технологическими преимуществами. Экономические преимущества заключаются в частичной (до 50 %) замене достаточно дорогой лазерной мощности значительно более дешевой дуговой, а также в снижении энергозатрат процесса за счет возможности замены присадочной проволоки соответствующим порошком или полного отказа от присадочного материала. Технологические преимущества заключаются в уменьшении остаточных термических деформаций, снижении требований к подготовке свариваемых кромок (включая возможность сварки кромок с зазором переменной ширины), получении возможности катодной очистки алюминиевых сплавов непосредственно в процессе сварки, увеличении глубины проплавления и повышении производительности процесса (в несколько раз по сравнению с плазменной сваркой и примерно на 40 % по сравнению с лазерной). Внедрение лазерно-плазменной сварки способно изменить существующие взгляды технологов на сварочный процесс и конструкторов на проектирование сварных конструкций. Промышленное применение лазерно-плазменной сварки, в первую очередь, связано с решением задач соединения титановых и алюминиевых сплавов, а также нержавеющей сталей, в диапазоне толщин 0,3...15,0 мм. Библиогр. 50, рис. 12.

*Ключевые слова:* гибридные технологии, синергетический эффект, лазерно-плазменная сварка, схема процесса, лазерное излучение, длина волны, плазма, катодная очистка, параметры режима, перспективы применения

Гибридная сварка это процесс, в котором используются два тепловых источника, одновременно действующих на свариваемое изделие (в пределах общей зоны нагрева). Основной особенностью такого вида сварки является взаимное дополнение и усиление воздействия каждого из применяемых источников. В случае гибридной лазерно-плазменной сварки максимальный эффект достигается при возникновении так называемого синергетического эффекта [1]. Этот эффект заключается в неаддитивности результатов воздействия каждого из тепловых источников по сравнению с результатом их совместного воздействия. В частности объем металла, расплавленного при гибридной сварке, как правило, превосходит сумму объемов металлов, расплавленных отдельно каждым из составляющих гибридного процесса источников энергии. В противном случае сварку принято считать не гибридной, а комбинированной.

Одной из первых работ по гибридной сварке принято считать вышедшую в 1979 г. статью о совмещении сварки дугой с неплавящимся электродом (TIG) с лазерной сваркой [2]. Вскоре после нее, в 1980 г., вышла более подробная работа профессора В.М. Стинга (Великобритания) [3]. Ему же принадлежит ряд патентов в этой области (напри-

мер, [4]). После публикаций В.М. Стинга гибридные лазерные процессы стали изучать в большинстве промышленно развитых стран мира.

Первыми в гибридных сварочных процессах стали применять CO<sub>2</sub>-лазеры с длиной волны 10,6 мкм, поскольку они обладали большей мощностью и простотой обслуживания. Этот тип лазеров применяется до сих пор [5, 6]. Затем все более широкое применение начали получать Nd:YAG-лазеры [7]. Одним из основных преимуществ этого типа лазеров является более короткая длина волны (1,06 мкм), на которой наблюдается повышение поглощающей способности металлов, а, следовательно, и эффективного КПД процесса сварки. На сегодняшний день в процессах гибридной сварки активно используют недавно появившиеся в серийном производстве дисковые и волоконные лазеры [8, 9]. Эффективность их использования связана с более высоким КПД (25...35 %) этих устройств, что также способствует повышению эффективного КПД сварки [8, 9].

Как правило, при гибридной лазерно-плазменной сварке сфокусированный лазерный пучок направлен по нормали к поверхности свариваемого изделия (рис. 1) [10, 11], либо под небольшим (до 10°) углом (рис. 2) [12]. Конструктивно лазерно-плазменная сварочная головка может со-



стоять из отдельных элементов — лазерной фокусирующей системы и плазмотрона, либо быть интегрированной в общем корпусе (рис. 3) [13]. Плазменная горелка наклонена под определенным (минимально возможным) углом к оси сфокусированного лазерного пучка (рис. 4) [14]. Присаочная проволока может подаваться соосно с плазменной дугой, навстречу ей, либо вообще не подаваться. Лазерный пучок с высокой плотностью мощности и дуговая плазма с высоким энергетическим КПД взаимодействуют одновременно в области сварочной ванны. Для усиления эффекта от такого взаимодействия они могут подводиться к свариваемым деталям через общее сопло (рис. 5) [15]. При этом во всех случаях лазерный пучок относительно плазмы может располагаться сзади или спереди по ходу сварки.

Рассмотрим подробнее достоинства и недостатки схем процесса лазерно-плазменной сварки изображенных на рис. 1–5.

Согласно способу, предложенному в работе [16], обработку материала проводят при помощи действия двух источников тепла, одним из которых является лазерное излучение. Другим источником может быть электрическая дуга или плазма. При этом воздействие каждого из источников тепла на обрабатываемый материал имеет импульсный характер, а воздействие этих импульсов синхронизируется между собой. Ряд технологических операций (в том числе сварку, пайку, резку, гравирование, легирование, закалку и др.) можно проводить таким способом.

Недостатком этого способа является необходимость наличия генераторов импульсов и устройства их синхронизации, в то время как использование непрерывного воздействия обоих источников тепла на обрабатываемый материал не требует столь сложного дополнительного оборудования.

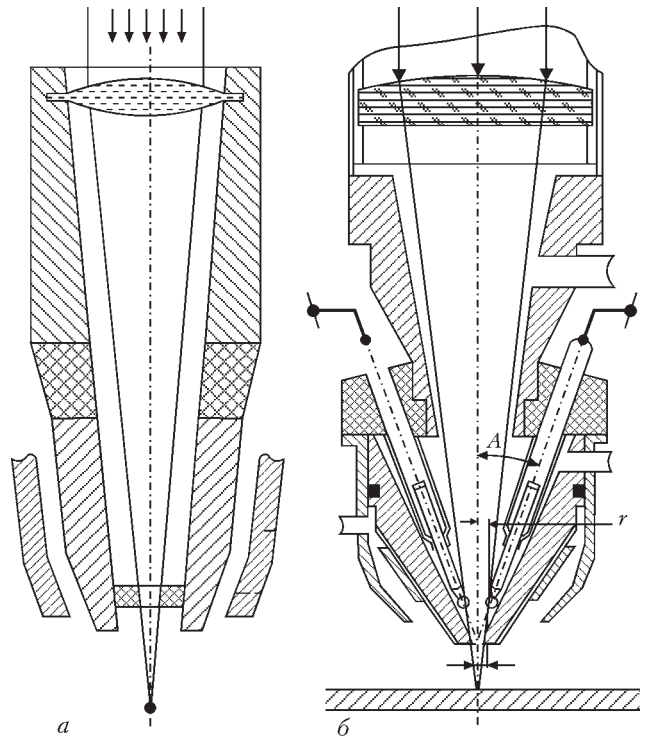


Рис. 1. Конструкции плазмотронов, позволяющих подавать лазерное излучение перпендикулярно поверхности свариваемого изделия: *a* — с полым катодом [10]; *б* — с симметрично расположенными относительно оси лазерного пучка наклонными катодами [11]

Для устранения указанного недостатка в патенте [10] предложена горелка, одновременно сочетающая в себе конструкционные элементы горелок для лазерной и для плазменной сварки. Лазерное излучение направляется на линзу объектива таким образом, что его ось совпадает с осью плазменно-дуговой горелки. Лазерный пучок проходит сквозь плоский (в виде шайбы) или конический электрод (катод) через сделанное в нем продольное коаксиальное отверстие, имеющее диаметр несколько больший диаметра сфокусированного лазерного пучка (рис. 1, *a*). Формирующее плазму сопло располагают под катодом так, чтобы лазер-

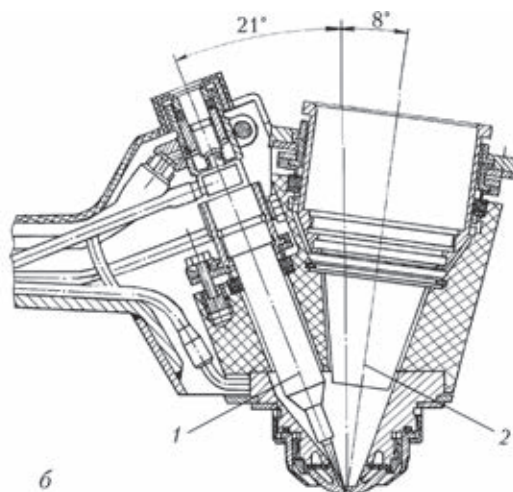
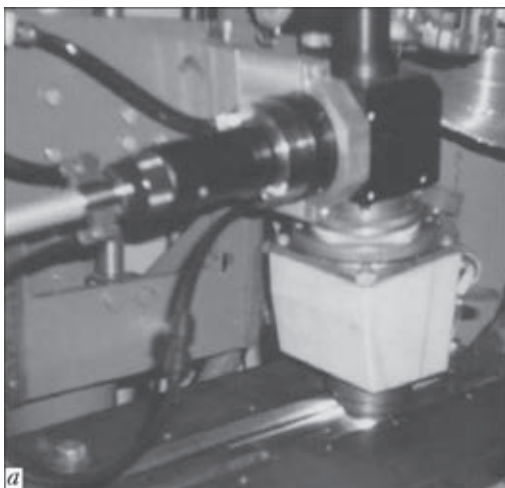


Рис. 2. Внешний вид (*a*) и схема (*б*) интегрированного плазмотрона для гибридной лазерно-плазменной сварки [12]: 1 — ось катода; 2 — ось сфокусированного лазерного пучка

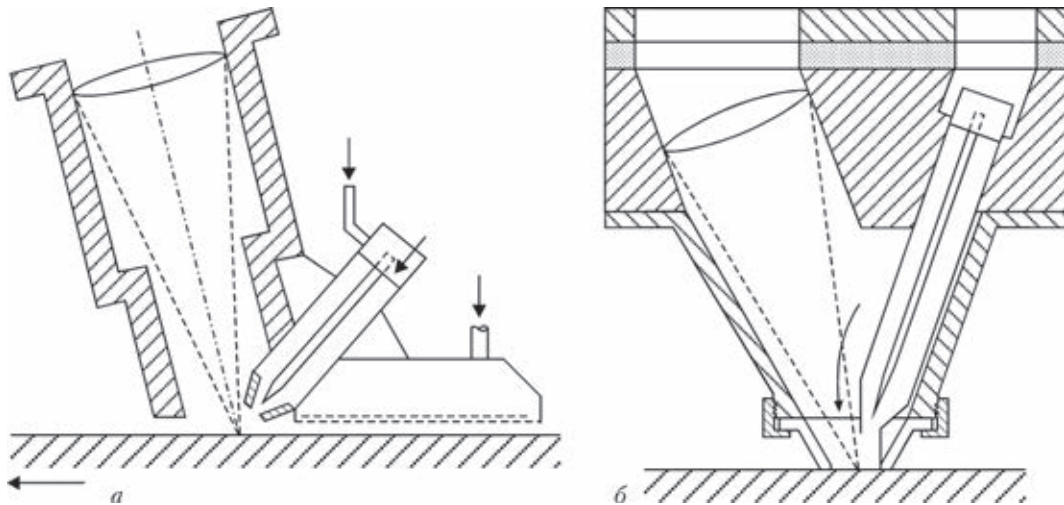


Рис. 3. Конструкции гибридных лазерно-плазменных сварочных головок, в которых лазерная фокусирующая система и плазменная горелка используются раздельно (а) либо интегрируются в общем корпусе (б) [13]

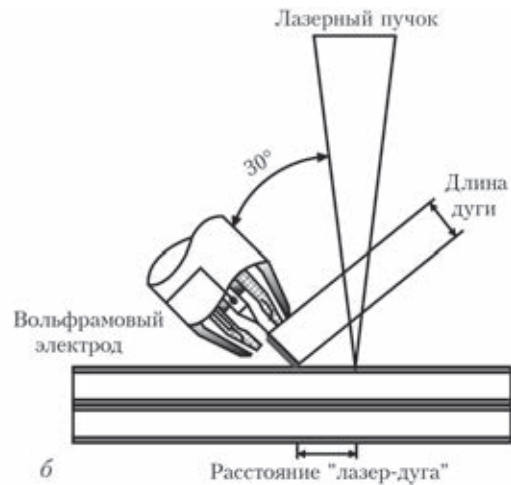
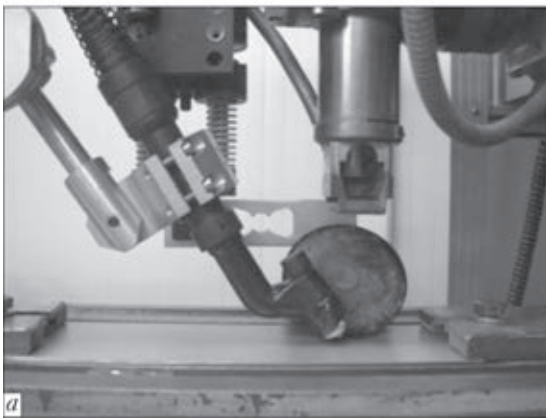


Рис. 4. Процесс гибридной лазерно-плазменной сварки с наклонным расположением плазменной горелки, позволяющей изменять расстояние между плазмой и лазерным пучком [14]: а — внешний вид гибридной лазерно-плазменной сварочной головки; б — технологическая схема процесса

ный пучок проходил через его ось. Как и в стандартной плазменно-дуговой горелке, газ пропускают через камеру с катодом и соплом в нижней части. Лазерный пучок, проходя через такой катод, подогревает его для облегчения эмиссии электронов, действует на свариваемое изделие (анод), а также взаимодействует с дуговой плазмой, тем самым повышая плотность энергии на изделии.

Небольшим конструктивным недостатком предложенной в работе [10] горелки для лазерно-плазменной сварки является наличие трубчатого катода, выводное отверстие которого должно быть таким, чтобы через него выходило сфокусированное лазерное излучение. Это увеличивает поперечный размер плазменной дуги, снижает стойкость самого катода из-за его эрозии, происходящей в процессе эксплуатации. Усложняется его периодическая заточка.

В лазерно-плазменной горелке более удачной конструкции сфокусированное лазерное излучение проходит мимо группы электродов, располо-

женных вокруг его оси под острым углом к центральной оси горелки (рис. 1, б) [11]. Согласно данному способу гибридной сварки ось сфокусированного лазерного излучения совпадает с осью горелки и является нормальной к плоскости свариваемых деталей. Оси электродов находятся на образующей конуса, вершина которого лежит на центральной оси горелки возле среза сопла, формирующего плазму, а сам конус обратный к выходной части горелки. Лазерно-плазменная сварка происходит при формировании электрической дуги между электродом (по меньшей мере, одним) и обрабатываемой деталью. Такой разряд при помощи продувки газа через выходное сопло образует плазму. Плазма, выходя через сопло, создает совместно с лазерным излучением гибридный лазерно-дуговой разряд.

Недостатком описанной конструкции является возможность попадания в оптический тракт, по которому подается лазерный пучок, отраженного от сварочной ванны излучения. При этом суще-

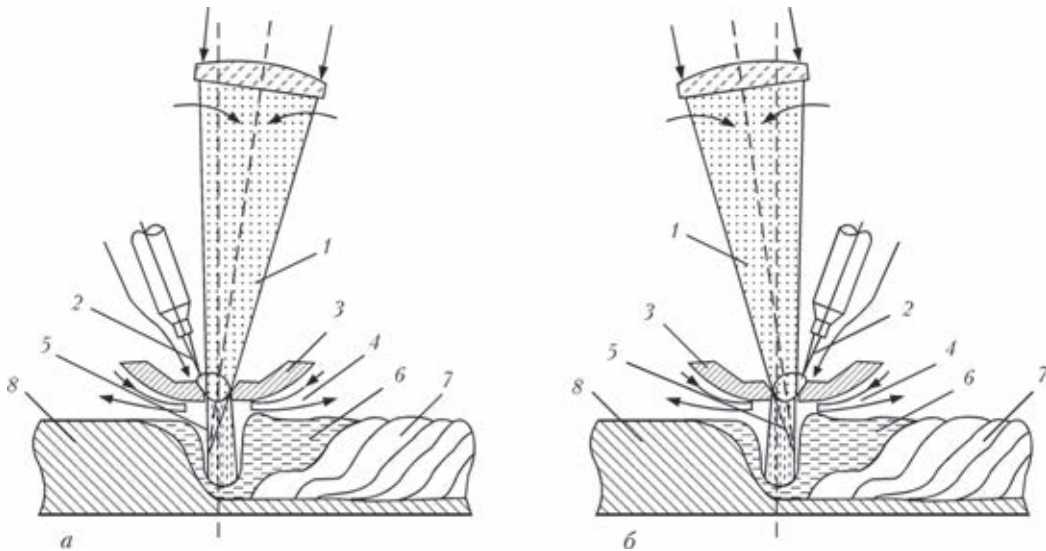


Рис. 5. Схемы процесса гибридной лазерно-плазменной сварки с расположением плазменной горелки перед (а) и за (б) лазерным пучком [15]: 1 — сфокусированное лазерное излучение; 2 — неплавящийся электрод; 3 — плазмообразующее сопло; 4 — защитный газ; 5 — плазменный разряд; 6 — сварочная ванна; 7 — металл шва; 8 — основного металла

ствует большая вероятность разрушения оптических элементов тракта. Особенно опасным в этом плане является случай сварки алюминиевых сплавов из-за больших значений их коэффициентов отражения лазерного излучения.

На рис. 3, а и 4 приведены схемы конструкций гибридных лазерно-плазменных сварочных головок, в которых фокусирующая излучение система и плазменная горелка (плазмотрон) используются раздельно. Основным преимуществом таких конструкций является возможность реализации гибридной сварки с использованием существующего сварочного оборудования, т.е. без необходимости создания специализированного интегрированного гибридного плазмотрона (например, приведенного на рис. 2 и 3, б). К недостатку конструкций с раздельными составляющими гибридного процесса относятся достаточно большие углы наклона оси электрода плазмотрона, что снижает эффективность его использования.

Поэтому актуальной является задача использования такого способа лазерно-плазменной сварки, при котором электрическая дуга, формируемая между электродом (как минимум одним) и обрабатываемой деталью, при помощи продувки газа через выходное сопло создает плазму, а выводимое через это же сопло лазерное излучение способствует созданию лазерно-дугового разряда. При этом угол наклона оси сфокусированного лазерного излучения должен выбираться таким, чтобы устранить опасность попадания отраженного излучения на оптические поверхности, а угол между осями электрода и сфокусированного излучения — минимально возможным. Предварительно подытоживая вышесказанное можно сказать, что наилучшими схемами лазерно-плазменной сварки являются схемы, показанные на рис. 5.

Еще одной сравнительно недавней технологической разработкой является гибридный лазерно-плазменный процесс с порошковым присадочным материалом [17]. Схема реализации такого процесса приведена на рис. 6. Основными его преимуществами являются устранение энергетических потерь, связанных с теплоотводом в присадочную (или электродную) проволоку, и улучшение условий плавления порошковых присадок из-за их низкой теплопроводности. Эти преимущества дают возможность повысить скорость сварки без повышения погонной энергии.

Одной из важнейших особенностей лазерно-плазменной сварки является возможность удаления окисной пленки  $Al_2O_3$  при сварке алюминиевых сплавов за счет так называемой катодной очистки. Процесс катодной очистки заключается в разрушении тугоплавкой окисной пленки в преде-

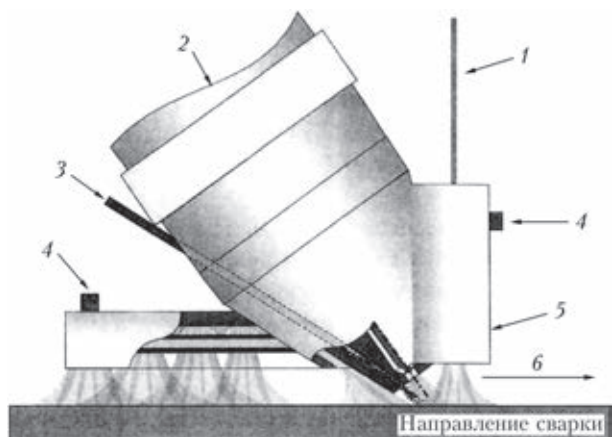


Рис. 6. Схема гибридной лазерно-плазменной сварки с плазменной дугой прямого действия и порошковой присадкой [17]: 1 — лазерное излучение; 2 — плазмообразующий газ; 3 — порошок с транспортирующим газом; 4 — защитный газ; 5 — трубка, через которую подается излучение; 6 — направление сварки



лах зоны катодного пятна, хаотически движущегося по поверхности алюминиевого сплава, которое может происходить даже без оплавления этой поверхности. Согласно работе [18], механизм такой очистки заключается в следующем. При ионной бомбардировке молекулам окисной пленки сообщается кинетическая энергия, которая преобразуется в механическую энергию колебаний. Если эта энергия превышает энергию диссоциации молекулы  $Al_2O_3$ , последняя распадается на атомы, которые покидают поверхность.

На практике использование описанного эффекта получило широкое распространение при сварке алюминиевых сплавов. Так, с использованием катодной очистки при плазменно-дуговой сварке разнополярными импульсами проводилась сварка внешних топливных баков космического корабля Shuttle, различных балочных конструкций и др. [19]. При сварке сплавов на основе алюминия лазерным излучением также делались попытки устранения окисной пленки [20, 21]. Особенно актуальна эта задача при лазерной сварке корпусов автомобилей из алюминиевых сплавов [22]. Однако наибольшую эффективность при сварке этих сплавов с одновременной очисткой соединяемых кромок, по мнению авторов работ [12, 23], имеет гибридная лазерно-плазменная сварка. Она позволяет достигать качественной очистки даже на достаточно высоких (до 300 м/ч) скоростях сварки.

Стоит отметить ряд работ, посвященных сравнению особенностей лазерной, дуговой (плазменной) и гибридной сварки. Так, в работе [24] исследуются перспективы применения плазмы, дуги с плавящимся и неплавящимся электродом в инертном газе для гибридной лазерной сварки. В работе [25] анализируются отличия гибридных лазер-TIG процессов сварки при использовании в них излучений  $CO_2$ - и Yb:YAG-лазеров, т.е. излучений с длиной волны 10,6 и 1,03 мкм соответственно. Показано, что с уменьшением длины волны поглощение и преломление лазерного излучения в дуговой плазме снижается. В работе [26] сравниваются результаты лазерной (излучением  $CO_2$ -лазера) и гибридной ( $CO_2$ -лазер+TIG) сварки T-образных соединений при изготовлении несущих каркасов из нержавеющей стали. При этом показана перспективность гибридного процесса. А вот при сварке оцинкованных стальных листов для изготовления корпусов автомобилей отдают предпочтение излучению Nd:YAG-лазера [27].

Достаточно большое внимание во многих работах уделялось металлографическим особенностям и прочностным характеристикам сварных соединений, получаемых лазерным, гибридным или другим способом (например, [28–30]). Изучались остаточные напряжения в металле шва, что осо-

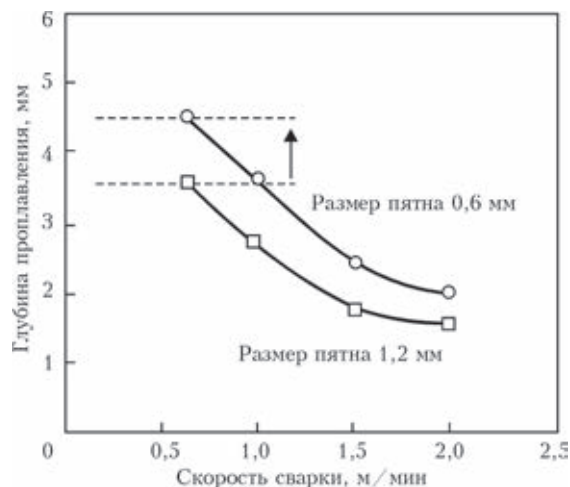


Рис. 7. Влияние размера пятна фокусирования лазерного излучения на глубину проплавления пластины стали SUS304 ( $\delta = 5$  мм) [39]. Мощность 2 кВт, защитный газ — аргон.

бенно актуально при сварке титановых сплавов для задач авиационной промышленности [31]. Исследовались новые механизмы гибридных процессов [32] и их технологические особенности. Среди последних следует отметить изучение: влияния давления защитного газа на лазер-MIG сварку [33]; результатов лазерно-дуговой сварки титановых сплавов [34]; гибридной сварки излучением Nd:YAG-лазера и MIG/MAG-процесса [35]; лазерно-микроплазменной сварки металлических фильтров с использованием нержавеющей присадочной проволоки [36]. Разрабатывались новые технологические приемы. Так, в работе [37] была предложена гибридная лазер-TIG сварка нержавеющей стали 304 с применением вращающегося двойного фокуса лазерного пучка. В работе [38] изучалось влияние относительного положения фокуса лазерного излучения и дуги с плавящимся электродом на формирование шва при гибридной сварке.

Особый интерес представляют различные технологические и конструктивные рекомендации, приводимые в работах по гибридной сварке. Так, например, для повышения глубины проплавления рекомендуется использовать короткофокусную оптику, позволяющую уменьшать размер фокального пятна (рис. 7) [39]. При использовании волоконных лазеров для гибридной сварки увеличение мощности излучения и уменьшение размера пятна фокусирования повышают эффективность процесса, как и при использовании других типов лазеров. В этом случае увеличение мощности излучения снижает сварочный ток, но не влияет на напряжение на дуге [40]. К некоторому увеличению глубины проплавления и уменьшению ширины шва может приводить расположение первой по ходу сварки электрической дуги в гибридном процессе (рис. 8). Также было установлено влияние на глубину проплавления расстояния между сфо-

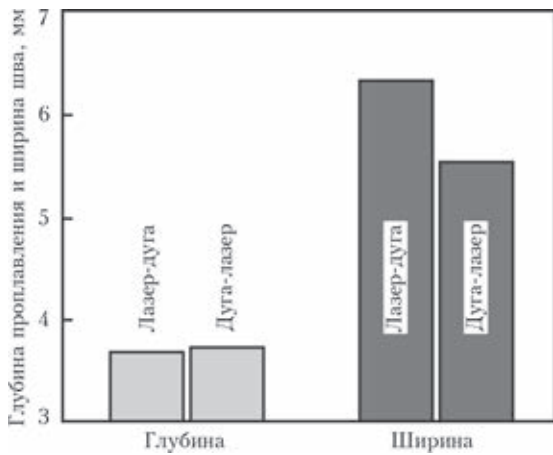


Рис. 8. Влияние на глубину проплавления и ширину шва взаимного расположения пучка CO<sub>2</sub>-лазера или дуги GMA при гибридной сварке стали HSLA-590 [41]

кусированным излучением и дугой [41]. Показано, что, если это расстояние превышает 5...7 мм, то гибридный эффект пропадает (рис. 9) [42].

Важным аспектом гибридной сварки является учет давления жидкого металла и давления дуги на сварочную ванну (рис. 10). Баланс сил этих давлений и сил поверхностного натяжения предотвращает вытекание жидкого металла ванны и позволяет вести гибридную сварку «на весу», т.е. без применения технологических подкладок, усложняющих процессы сварки и последующей обработки. Отметим, что обычно объем переплавленного металла при гибридной сварке больше, чем при лазерной (рис. 11). Это обстоятельство может способствовать увеличению глубины проплавления при сварке стыковых соединений с некоторым зазором (см. рис. 12) между свариваемыми кромками за счет заполнения жидким металлом этого зазора [43].

При гибридной лазерно-плазменной сварке лазерный пучок и плазменную дугу стараются расположить как можно ближе к обрабатываемому изделию. Одним из вариантов достижения этого условия является использование трубчатого катода, через который пропускают сфокусированное лазерное излучение (рис. 1, а) [1, 44]. Другим вариантом является использование катода, наклоненного под определенным углом (рис. 4). Обычно этот угол является довольно значительным (например, около 45° [44, 45]), что ослабляет эффект действия плазмы. В работах [46–48] показана актуальность уменьшения угла наклона катода к поверхности изделия и угла между катодом и осью лазерного пучка.

К основным задачам гибридной лазерно-плазменной сварки относится не

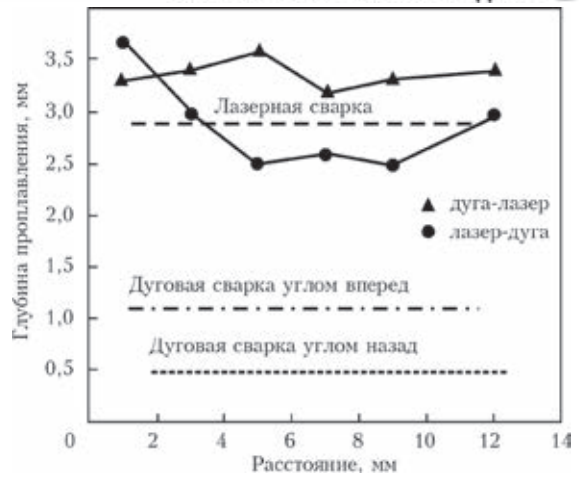


Рис. 9. Влияние расстояния между пучком Nd:YAG-лазера и дугой с неплавящимся электродом, а также их взаимного расположения, на глубину проплавления нержавеющей стали 304 [42]

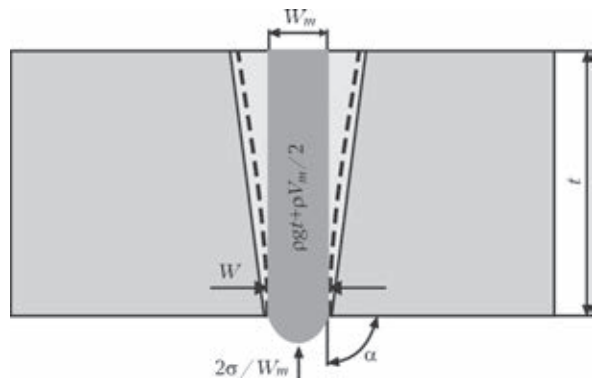


Рис. 10. Баланс давлений в корневой части сварочной ванны [6]

Поперечное сечение		Ток дуги
Лазер	Дуга-лазер	
		100 А
		150 А
		200 А

Рис. 11. Сравнение проваров в аустенитной нержавеющей стали AISI304 ( $\delta = 5$  мм), выполненных Nd:YAG-лазером ( $P = 1,7$  кВт) и гибридным способом в сочетании этого лазера с дугой неплавящегося электрода со скоростью 10 мм/с на различных сварочных токах [42]

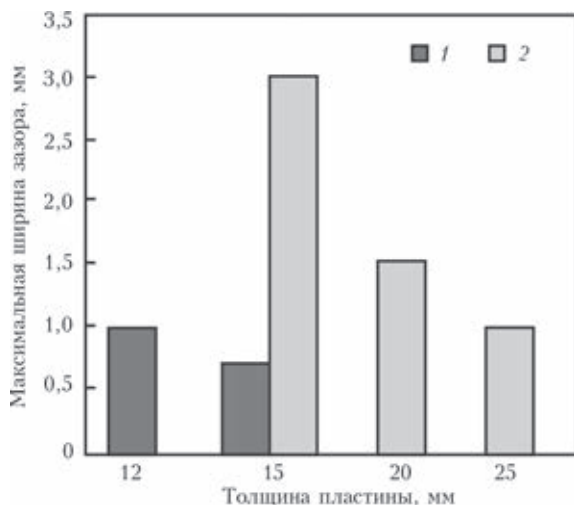


Рис. 12. Зависимость максимальной ширины зазора между кромками свариваемых пластин от их толщины и пространственного положения (1 — сварка в нижнем положении; 2 — сварка горизонтальным швом) [43]

только дуговой подогрев металла изделия для повышения поглощающей способности, но и модификация сварочного термического цикла для снижения скорости охлаждения после сварки [45]. Это позволяет снизить содержание хрупких структур, склонных к разрушению при эксплуатации. Также, наличие плазменной составляющей позволяет снизить требования к качеству сборки свариваемых стыков по сравнению с лазерной сваркой. Однако эти требования являются более высокими по сравнению с лазер-ТIG сваркой [49].

В работе [47] описаны эксперименты по лазерно-плазменной сварке таких материалов, как низкоуглеродистая и нержавеющая сталь, титановые и алюминиевые сплавы толщиной 0,6...2,0 мм. Для этого использовали излучение CO<sub>2</sub>-лазера мощностью до 400 Вт и сварочный ток до 50 А. Установлено, что лазерно-плазменный процесс может предотвратить образование «горок» при высокоскоростной сварке тонких листов. Допуски по зазору между кромками стыка составляют от 0,15 до 0,50 мм при скорости сварки 2 м/мин (~ 33 мм/с).

Согласно прогнозам, сделанным в работе [50], гибридная сварка позволит увеличивать производительность на 300...500 % при снижении себестоимости на 55 %. При этом затраты на расходные материалы снизятся примерно вдвое, что позволит снизить себестоимость процесса сварки примерно на четверть. Еще одним важным аспектом является уменьшение ширины швов, полученных гибридным способом, по сравнению со швами, сваренными дуговыми способами, что снижает металлоемкость сварной конструкции.

### Выводы

Таким образом, можно заключить, что перспективы промышленного внедрения гибридной

лазерно-плазменной сварки связаны с ее экономическими и технологическими преимуществами. Экономические заключаются в частичной (до 50 %) замене достаточно дорогой лазерной мощности значительно более дешевой плазменной, а также в снижении энергозатрат процесса за счет возможности замены присадочной проволоки соответствующим порошком или полного отказа от присадочного материала. Технологические преимущества заключаются в уменьшении остаточных термических деформаций, снижении требований к подготовке свариваемых кромок (включая возможность сварки кромок с зазором переменной ширины), получению возможности катодной очистки алюминиевых сплавов непосредственно при их сварке, увеличении глубины проплавления и повышению производительности процесса в несколько раз по сравнению с плазменной сваркой и примерно на 40 % по сравнению с лазерной [45]. Внедрение лазерно-плазменной сварки способно изменить существующие взгляды технологов на сварочный процесс и конструкторов на проектирование сварных конструкций. Промышленное применение лазерно-плазменной сварки, в первую очередь, связано с решением задач соединения титановых и алюминиевых сплавов, а также нержавеющих сталей в диапазоне толщин 0,3...15,0 мм.

1. Кривцун И.В. Комбинированные лазерно-дуговые процессы обработки материалов и устройства для их реализации. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.10 – Электротермические процессы и установки. – Киев: Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, 2002. – 393 с.
2. Steen W.M., Eboo M. Arc augmented laser welding // Metal Construction. – 1979. – 11, № 7. – P. 332–335.
3. Steen W.M. Arc augmented laser processing of materials // J. of Applied Physics. – 1980. – 51, № 11. – P. 5636–5641.
4. Патент 1547172 Великобритания, МКИ В 23 К 26/00, 9/00. Methods and apparatus for cutting, welding, drilling and surface treating / W.M. Steen. – Оpubл. 06.06.79.
5. Bagger C, Olsen F.O. Review of Laser Hybrid Welding // J. of Laser Applications. – 2005. – 17, № 1. – P. 2–14.
6. Progress in Laser-MAG hybrid welding of high strength steels up to 30 mm thickness / D. Petring, C. Fuhrmann, N. Wolf, R. Poprawe // Proc. of Intern. Congress of Applications of Laser and Electro-Optics, ICALEO, 2007, Orlando, Florida (USA) – Orlando: LIA, 2007. – P. 300–307.
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. Лазерная техника фирмы Trumpf // Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.trumpf-laser.com>
9. Продукция ООО НТО «ИРЭ-Полус» // Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.ntoire-polus.ru>
10. Пат. 5700989 США, МКИ В23К 26/00, 10/00. Combined laser and plasma arc welding torch / I.S. Dykhno, I.V. Krivtun, G.N. Ignatchenko. – Оpubл. 23.12.97. Пат. US6388227 В1 США. Combined laser and plasma-arc processing torch and method. / I. Dykhno, G. Ignatchenko, E. Bogachenkov. – Оpubл. 14.05.2002.
11. Пат. US6388227 В1 США. Combined laser and plasma-arc processing torch and method / I. Dykhno, G. Ignatchenko, E. Bogachenkov. – Оpubл. 14.05.2002.
12. Гибридная лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов / И.В. Кривцун, В.Д. Шелягин, В.Ю. Хаскин и др. // Автомат. сварка. – 2007. – № 5. – С. 49–53.



13. Пат. 5866870 США, МКИ В23К 10/00, 26/00. Enhanced laser beam welding / R.P. Walduck. – Опубликовано. 02.02.99.
14. Kim C.H., Ahn Y.H., Kim J.H. CO<sub>2</sub> Laser-micro plasma arc hybrid welding for galvanized steel sheets // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2011. – V.21, Supplement 1. – P. 47–53.
15. Кривцун И.В., Бушма А.И., Хаскин В.Ю. Гибридная лазерно-плазменная сварка нержавеющей сталей // Автомат. сварка. – 2013. – № 3. – С. 48–52.
16. Пат. WO2003089185 А1 США. Laser material machining using hybrid processes. / D. Petring. – Опубликовано. 30.10.2003.
17. Qualification of Nd:YAG and CO<sub>2</sub> laser plasma hybrid welding with filler material powder / K. Stelling, M. Lammers, H. Schobbert et al. // Welding and Cutting. – 2006. – 5, № 6. – P. 330–334.
18. Микроплазменная сварка / Б.Е. Патон, В.С. Гвоздецкий, Д.А. Дудко и др. – Киев: Наук. думка, 1979. – 248 с.
19. Kexuan Ch., Heqi L., Chunxu L. Cathodic cleaning in variable polarity plasma arc welding of aluminum alloys // China Welding. – 2003. – № 2. – P. 168–170.
20. Bingkun Z. Study of processing parameters of CO<sub>2</sub>-laser welding on aluminum alloys / Z. Bingkun // Chinese Journal of Lasers. – 2000. – № 2. – P. 183–186.
21. Joint Performance of CO<sub>2</sub> Laser beam welding 5083-h321 aluminum alloy / Q. Junfeng, Z. Dongyun, X. Rongshi et al. // China Welding. – 2007. – № 2. – P. 40–45.
22. CO<sub>2</sub>-Laser welding of 5a06 aluminum alloy plates with different thicknesses / Y. Shu-rong, F. Ding, X. Jin-hui, C. Jian-hong // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2006. – № 3. – P. 1407–1410.
23. Хаскин В.Ю. Развитие лазерной сварки алюминиевых сплавов в ИЭС им. Е.О. Патона (Обзор) // Автомат. сварка. – 2013. – № 5. – С. 52–57.
24. Bagger C., Olsen F.O. Comparison of plasma, metal inactive gas (MIG) tungsten inactive gas (TIG) processes for laser hybrid welding // 22nd Intern. Congress on Applications of Laser and Electro-Optics, 13–16 Oct. 2003, Jacksonville, Florida, USA. – Jacksonville: LIA, 2003. – P. 11–20.
25. Characteristics comparison of laser-TIG arc interaction using high power CO<sub>2</sub> and Yb:YAG Laser / W. Shikai, X. Rongshi, Y. Wuxiong, C. Kai // Chinese Journal of Lasers. – 2010. – № 10. – P. 2667–2671.
26. Shikai W., Rongshi X., Kai C. CO<sub>2</sub>-laser welding and co<sub>2</sub> laser-tig hybrid welding of thin walled stainless steel butt joint from the base plate side // Electromachining & Mould. – 2009. – № 6. – P. 29–33.
27. Monitoring and phenomena observation during YAG laser lap welding of Zn-coated steel sheets / S. Katayama, M. Mizutani, T. Tarui, K. Mori // J. of Lanzhou University of Technology. – 2004. – № 4. – P. 31–36.
28. Microstructure and mechanical properties of wrought magnesium alloy AZ31B Welded by Laser-TIG Hybrid / L. Liming, S. Gang, W. Jifeng, L. Guoli // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2004. – 14, № 3. – P. 550–555.
29. Microstructures and toughness of weld metal of ultrafine grained ferritic steel by laser welding / X. Zhang, W. Chen, C. Wang et al. // J. of Materials Science & Technology. – 2004. – № 6. – P.755–759.
30. Wenquan W., Daqian S., Chungyun K. Macrostructural and microstructural features of 1000 MPa Grade TRIP Steel Joint by CO<sub>2</sub>-Laser Welding // China Welding. – 2008. – № 2. – P. 1–7.
31. Test of residual stress in laser beam welding and TIG welding joints of aeronautical titanium alloy plate / H. Xiaodong, Z. Jianxun, P. Zuo, G. Shuili // Welding & Joining. – 2003. – № 10. – P. 26–29.
32. New development of mechanisms of laser-TIG arc hybrid welding / X. Yuan, S. Yonglun, H. Kuning, Y. Xiaohong // Welding & Joining. – 2008. – № 12. – P. 21.
33. Influence of shielding gas pressure on welding characteristics in CO<sub>2</sub> laser-mig hybrid welding process / Y. Chen, Z. Lei, L. Li, L. Wu // Chinese Optics of Letters. – 2006. – № 1. – P. 33–35.
34. Laser-Arc hybrid welding of titanium alloy / C. Li, L. Xiaoyan, H. Dingyong, G. Changshi // Welding & Joining. – 2009. – № 7. – P. 60–64.
35. Zhen L., Guoliang Q., Shangyang L. Development of YAG laser-MIG/MAG arc hybrid welding technology // Welding & Joining. – 2005. – № 9. – P. 9–12.
36. Fuzuo W., Jianping H., Feng X. Study on stainless steel wire screen mesh welding using micro-plasma arc welding // Hot Working Technology. – 2010. – № 1. – P. 128–130, 133.
37. Xiaohui L., Su W., Caiyun X. 304 stainless steel rotary-twin-focus laser-TIG hybrid welding // J. of Beijing University of Aeronautics and Astronautics. – 2008. – № 4. – P. 431–434.
38. Gao Zh., Huang J., Li Y. Effect of relative position of laser beam and arc on formation of weld in laser-MIG hybrid welding // Transactions of the China Welding Institution. – 2008. – № 12. – P. 69–73.
39. Ishide T., Tsubota S., Watanabe M. Latest MIG, TIG arc-yag laser hybrid welding systems for various welding products // 1st. International Symposium High-Power Laser Macro. – Osaka: SPIE, 2002. – P. 347–352.
40. Process monitoring and macrostructure examination of low laser power hybrid gas metal arc welding on A36 steel / C. Roepke, S. Liu, S. Kelly, R. Martukanitz // IIW Doc. IV-1030-10, 2010.
41. Liu Z., Kutsuna M. Metallurgical study on laser-MAG hybrid welding of HSLA-590 Steel // Proc. of laser materials processing conference ICALEO, 2005, Miami, Florida, USA. – Miami: LIA, 2005. – P. 127–133.
42. Naito Y., Mizutani M., Katayama S. Observation of keyhole behavior and melt flows during laser-arc hybrid welding // Proc. of intern. congress of applications of laser and electro-optics, ICALEO, 2003, Jacksonville (USA). – Jacksonville: LIA, 2003. – Section A. – P. 159–167.
43. Optimization research on laser-MIG composite welding for rear axle steel plate / Y. Yuan, M. Wouters, J. Powell et al. // Automobile Technology. – 2008. – № 1. – P. 54–57.
44. Кривцун И.В., Чиженко М.И. Основы расчета лазерно-дуговых плазматронов // Автомат. сварка. – 1997. – № 1. – С. 16–23.
45. Ках П., Салминен А., Мартикаинен Дж. Особенности применения гибридной лазерно-дуговой сварки (Обзор) // Автомат. сварка. – 2010. – № 6. – С. 38–47.
46. Кривцун И.В., Бушма А.И., Хаскин В.Ю. Лазерно-плазменная сварка нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов // Доп. НАН України. – 2013. – № 3. – С. 76–82.
47. Сидорец В.Н., Бушма А.И., Хаскин В.Ю. Перспективы применения гибридной лазерно-плазменной сварки нержавеющей сталей в машиностроении // Вісник Донбас. держ. машинобудівної академії. – 2012. – № 3(28). – С. 244–246.
48. Технологические особенности лазерной, микроплазменной и гибридной лазерно-микроплазменной сварки алюминиевых сплавов / В.Д. Шелягин, А.М. Оришч, В.Ю. Хаскин и др. // Автомат. сварка. – 2014. – № 5. – С. 35–41.
49. Walduck R.P., Biffin J. Plasma arc augmented laser welding // Welding and Metal Fabrication. – 1994. – № 4. – P. 172–176.
50. Пауль К., Ридель Ф. Гибридная лазерная сварка – объединения усилия // Фотоника. – 2009. – № 1. – С. 2–5.

Поступила в редакцию 23.03.2015