



СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

У. ДИЛТАЙ, Л. ШТАЙН, К. ВЁСТЕ, Ф. РАЙХ
(ISE, RWTH, г. Аахен, Германия)

Рассмотрены некоторые достижения последних лет в области создания высокоэффективных сварочных технологий. Отмечены возможности применения усовершенствованных технологий электронно-лучевой и лазерной сварки.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварка МИГ, спаренный электрод, последовательные дуги, переменный ток, ленточный электрод, пайка, плазменная сварка, электронно-лучевая сварка, оборудование, лазерная сварка, гибридная сварка

Начиная с 1960-х гг. сварку МИГ широко используют в промышленном производстве, непрерывно происходит ее усовершенствование. Последние достижения в основном связаны с разработкой источников питания, способов подачи проволоки и использованием новых присадочных материалов и защитных газов. Затрачены большие усилия на то, чтобы повысить скорость наплавки, а на основании этого — производительность и скорость сварки путем расширения сферы действия уже известных процессов и разработки новых.

Сварка МИГ. Современные электроника и компьютерное управление наряду с усовершенствованием систем подачи проволоки привели к возможности использования цифрового управления мощностью с получением высоких коэффициентов соотношения мощности и массы. Цифровые контроллеры позволяют реализовывать различные характеристики источника питания, обеспечивающие комплексную стратегию управления. Стратегия управления импульсно-дуговой сваркой была усовершенствована в целях достижения стабильности процесса (отсутствие коротких замыканий). При этом расширяются функциональные возможности процесса. Использование цифровых контроллеров намного упрощает связь с внешними компьютерами. Таким образом, современные источники питания обеспечивают выполнение многочисленных функций: регулировка характеристик процесса, уточнение и документирование параметров и качества сварки.

Благодаря этим устройствам можно осуществлять различные сварочные процессы — от хорошо известного способа сварки короткой дугой до таких высокопроизводительных способов сварки, как сварка вращающейся дугой и дуговая сварка со струйным переносом металла.

Сварка двумя проволоками. Сварка МИГ одной проволокой с использованием упомянутых видов дуги достигла такого уровня, который, вероятно, уже нельзя существенно повысить путем дальнейшего совершенствования источников питания, присадочных материалов или защитных газов. В ли-

тературе упоминаются сварка короткой дугой с высокой скоростью наплавки (до 2 м/мин), а также сварка вращающейся дугой со скоростью наплавки до 14 кг/ч. Дальнейшему повышению скорости наплавки среди прочих причин препятствует нестабильность вращения дуги.

Все указанное выше, а также необходимость обеспечения высоких показателей скорости наплавки при меньшей погонной энергии привели к созданию технологии сварки МИГ двумя проволоками, в которой используется комбинация двух проволочных электродов в одном общем газовом сопле. Более ранние исследования в этой области, проведенные в 1975 г., потерпели неудачу, поскольку не могли обеспечить стабильность сварочного процесса. Благодаря новому поколению источников питания стало возможным преодолеть испытываемые трудности и внедрить в промышленность способ сварки двумя проволоками, весьма перспективный для производства. Использование сварки МИГ двумя проволоками оказывает значительное влияние на форму сварочной ванны. Расположение электродов один позади другого удлиняет сварочную ванну в направлении линии сварки. Электродная проволока в передней части ванны обеспечивает достаточный уровень проплавления, тогда как форму наплавленного валика определяет проволока, находящаяся в хвостовой части ванны. Удлиненная форма сварочной ванны обеспечивает более эффективную дегазацию, что снижает склонность к образованию пористости, особенно при сварке алюминия и сварке через подслои. При повороте электродов таким образом, чтобы они располагались один за другим, создаются благоприятные условия сварки по зазору при низких значениях тока, что, однако, влияет на скорость сварки. При повороте электродов приблизительно на 20° требуется снижение скорости сварки на 25...30 %.

Существуют две разновидности способа сварки МИГ двумя проволоками: первая — спаренными электродами, при которой предполагается использование общего мундштука; вторая — последовательными дугами; при этом используются отдельные мундштуки с электрической изоляцией для каждой из проволок (рис. 1).

Сварка МИГ спаренными электродами. Разработанная технология сварки МИГ спаренными



электродами предполагает, что используется один общий мундштук, подсоединенный к одному источнику питания или двум спаренным (рис. 1, а). При этом к обоим электродным проволокам подается одинаковое напряжение. Поскольку два равнонаправленных токоподводящих проводника притягиваются друг к другу благодаря действию магнитных сил, отделяющиеся при плавлении электродов капли попадают в одну общую сварочную ванну на расстоянии 4...7 мм друг от друга. При небольшом расстоянии между двумя электродами могут образовываться капельные перемычки, что обуславливает нестабильность процесса. При значительном расстоянии между проволоками образуются две отдельные сварочные ванны, а из-за сильного эффекта дутья дуги возникают брызги.

Основным недостатком этого варианта сварки МИГ является то, что при его использовании невозможно выбрать скорость подачи проволоки и ее диаметр индивидуально для каждого электрода. Более того, при коротком замыкании одной дуги гаснет другая, что создает нестабильность процесса.

Сварка МИГ последовательными дугами. С целью оптимизации параметров процесса и осуществления возможности отдельного управления обеими дугами используются горелки с электрически изолированными мундштуками и синхронизированные источники питания с независимым управлением (рис. 1, б). Таким образом, этот способ можно применять при сварке короткой дугой, используя проволоку различных диаметров и различную скорость ее подачи для стабильности сварочного процесса.

Сварка МИГ на переменном токе. Необходимость уменьшения массы конструкций обусловила применение более тонких листовых материалов, что затрудняет выполнение сварки по зазору. При сварке МИГ на токе обратной полярности количество тепла, подводимого к основному материалу, и глубина проплавления снижаются, при этом создаются благоприятные условия для сварки по зазору. К сожалению, при сварке МИГ на токе обратной полярности значительно ухудшается стабильность процесса. В источниках питания, используемых при сварке МИГ на переменном токе, комбинируется стандартный импульсный процесс

с регулируемыми импульсами при обратной полярности. Это позволяет достигнуть стабильности сварочного процесса с регулируемой глубиной проплавления и осуществлять сварку по зазору для соединения тонколистовых материалов в промышленных условиях.

Сварка МИГ ленточным электродом. Недавно появилась новая разновидность процесса МИГ — сварка ленточным электродом. При этом используются специальные механизмы подачи проволоки и контактные наконечники, в которых применяют узкие ленточные электроды размером приблизительно 4,0×0,5 мм. Благодаря геометрии таких электродов, имеющих большую площадь поверхности, чем электродная проволока с круглым сечением с сопоставимой площадью поперечного сечения, для плавления материала требуются меньшие энергия и соответственно сварочный ток. Есть два способа использования этого эффекта: первый — увеличение скорости подачи проволоки с целью повышения скорости наплавки; второй — снижение погонной энергии сварки. В этом случае за счет прямоугольного сечения электрода основание дуги образует эллипс. Изменив его направленность, можно влиять на глубину проплавления. При расположении электрода по направлению линии сварки увеличивается глубина проплавления, что способствует выполнению угловых швов на более толстых листовых материалах; при расположении электрода поперек шва происходит неглубокое проплавление и создаются благоприятные условия для сварки по зазору.

Пайка МИГ. Принципиальная разница между сваркой МИГ и пайкой МИГ находится в области металлургии. При сварке для обеспечения сплавления между основным материалом и стальным присадочным материалом требуется определенная глубина проплавления. При пайке по возможности не должно происходить плавления основного металла. В случае пайки МИГ используется то же оборудование, что и при сварке МИГ, но применяется легкоплавкая (900...1100 °С) бронзовая проволока на основе меди. Используется сварка короткой дугой и импульсно-дуговая.

Пайка МИГ уже получила широкое распространение как способ соединения оцинкованных тонких листов. Поскольку основной металл не должен плавиться, уменьшают количество тепла, подводимого к материалу, что снижает до минимума вероятность повреждения цинкового покрытия. При этом исключается снижение коррозионной стойкости металла (рис. 2). Прочность паяных и сварных швов сопоставима. Кроме того, окончательная обработка паяного шва не требует больших усилий. Благодаря этому пайка МИГ получает все большую популярность не только при изготовлении кузовов автомобилей в автомобильной промышленности, но и во в тех сферах, где преимущества использования низкой погонной энергии, высокой скорости пайки, нали-

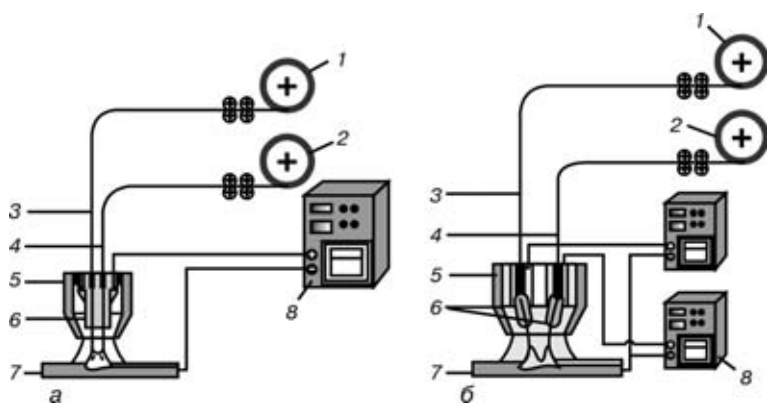


Рис. 1. Схема сварки МИГ двумя проволоками: а — сварка МИГ спаренными электродами; б — последовательными дугами; 1, 2 — механизм подачи проволоки; 3, 4 — соответственно первая и вторая проволока; 5 — газовое сопло; 6 — мундштук; 7 — обрабатываемая деталь; 8 — источник питания

чие незначительных деформаций, снижение уровня повреждений оцинкованных покрытий в совокупности компенсируют высокую стоимость применяемых бронзовых электродов.

Плазменная сварка МИГ. Этот способ сварки считался процессом с высокой производительностью плавления и был в свое время очень распространен. В настоящее время благодаря созданию новых современных горелок и источников питания плазменная сварка МИГ снова приобретает популярность. Это стандартный процесс МИГ, при

котором используется концентрическая плазменная горелка. Управление обоими процессами происходит с помощью отдельных источников питания, поскольку плазменный процесс стабилизирует процесс МИГ и, наоборот, параметры обоих процессов могут изменяться в значительном диапазоне. Таким образом, сфера применения плазменной сварки МИГ довольно широка: сварка алюминия и стали с высокой скоростью наплавки, где используются предварительный нагрев проволоки и необходимо дополнительное тепловложение от плазменного процесса; процессы со средней скоростью наплавки, отличающиеся высокой стабильностью и свойствами, благодаря которым дополнительная плазма очищает поверхность непосредственно перед наплавкой материала, что имеет определенные преимущества при сварке алюминия и плазменной пайки МИГ (низкое тепловложение и возможность контролировать форму шва).

Способы лучевой сварки. Электронно-лучевая сварка. Этот способ применяется для соединения материалов толщиной от 0,1 до 150 мм и более. Свариваемые материалы могут быть одно- или разнородными, но обязательно — электропроводными.

При высокой плотности мощности (до $1 \cdot 10^8$ Вт/см²) на толстолистовых материалах могут быть выполнены швы с отношением глубины к ширине до 50:1, что обуславливает применение этого способа сварки в точном машиностроении.

Сварку обычно выполняют в камерах с высоким или низким вакуумом, но есть возможность вывести электронный луч и в атмосферу. Сварку в высоком вакууме (рис. 3) применяют для соединения толстолистовых материалов, а также в тех случаях, когда по технологии требуется обеспечить максимальную плотность мощности при минимальном диаметре электронного луча. Как правило, сварку более тонкостенных деталей осуществляют в низком вакууме. Сварку же электронным лучом, выведенным в атмосферу, главным образом

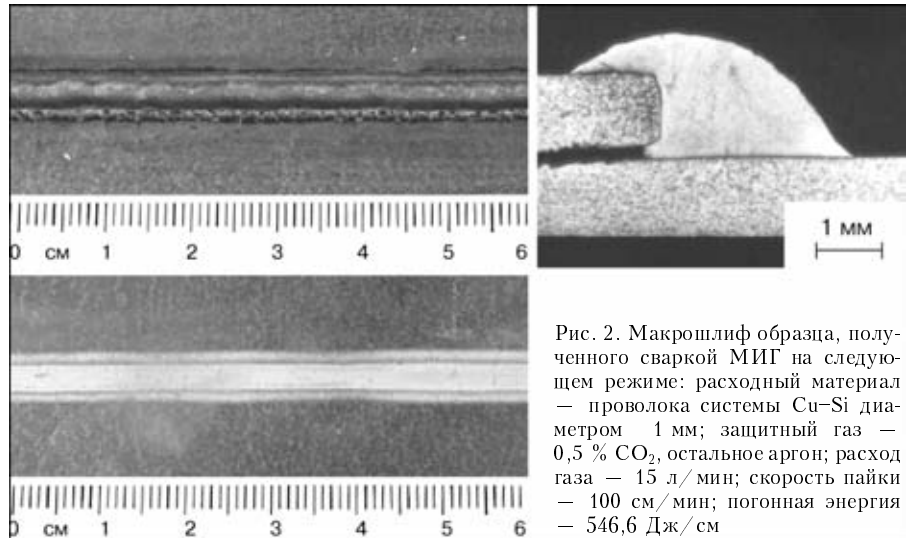


Рис. 2. Макрошлиф образца, полученного сваркой МИГ на следующем режиме: расходный материал — проволока системы Cu-Si диаметром 1 мм; защитный газ — 0,5 % CO₂, остальное аргон; расход газа — 15 л/мин; скорость пайки — 100 см/мин; погонная энергия — 546,6 Дж/см

применяют для соединения металлических плит. При наличии зазоров в этих плитах применяют сварку с присадкой.

Новые технологии электронно-лучевой сварки. Поскольку электронный луч представляет собой пучок первичных ускоренных электронов, обладающих малой массой и отрицательным электрическим зарядом, то имеется возможность при помощи электромагнитного поля, практически безынерционного, сканировать этот луч по выбранной траектории с большей частотой.

Для реализации этих возможностей уже разработано необходимое программное обеспечение, позволяющее как «размножить» зоны облучения (рис. 4), т. е. выполнять одновременно несколько (до пяти и более) сварных швов с целью увеличения производительности или уменьшения деформации свариваемого изделия, так и воздействовать на процессы кристаллизации металла сварочной ванны или структурные превращения в металле шва и околошовной зоне в пределах одной зоны облучения.

Концепции конструкций оборудования. При многократном использовании адаптированных вакуумных камер время откачки может быть уменьшено таким образом, что период неизбежного простоя при сварке не будет являться недостатком, свидетельствующим не в пользу электронно-лучевой технологии. В настоящее время имеются раз-

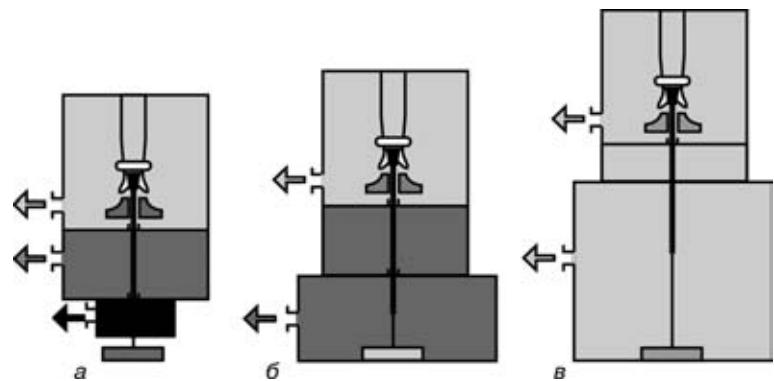


Рис. 3. Схема электронно-лучевой сварки: а — безвакуумная электронно-лучевая сварка; б, в — в условиях соответственно низкого и высокого вакуума

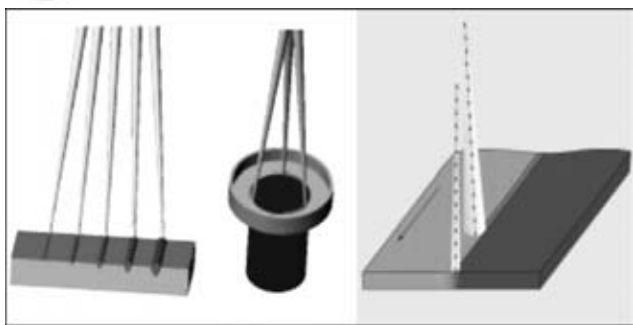


Рис. 4. Электронно-лучевая сварка с параллельными швами

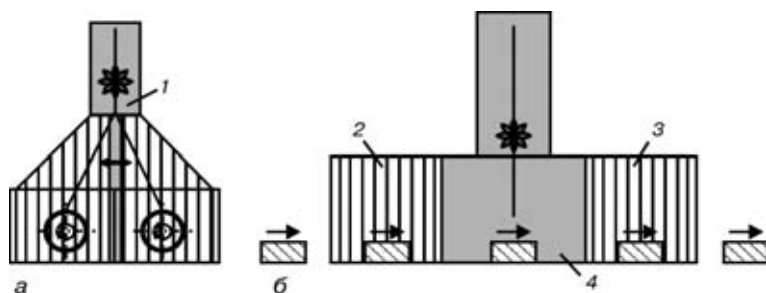


Рис. 5. Схемы вакуумных камер: а — вариант двухкамерной установки; б — шлюзовая сварочная установка; 1 — отклоняемый луч; 2, 3 — вакуумные затворы; 4 — отсек с высоким вакуумом

личные рабочие камеры для оснащения установок для электронно-лучевой сварки. Наиболее оптимальным вариантом являются универсальные рабочие камеры, где обрабатываемая деталь перемещается в трех направлениях. Однако при этом имеет место довольно продолжительный простой, в то время как все этапы работы (зажим оснастки, загрузка обрабатываемой детали, вакуумирование, сварка, вентиляция, снятие обрабатываемой детали) должны выполняться один за другим. Для сокращения рабочих циклов создано специальное оборудование — установки циклического действия, двухкамерные, конвейерные машины и шлюзовые камеры. В двухкамерных установках рабочие камеры расположены рядом. Генератор луча либо перемещается от одной к другой, либо за один проход отклоняется только в сторону одной камеры. Таким образом, сварка может выполняться в одной камере в то время, как в другой, будет происходить загрузка, разгрузка или вакуумиро-

вание. Если время сварки превышает время обработки детали или вакуумирования, используется полный объем двух камер. Недостатком указанного оборудования является то, что обе камеры должны быть оснащены отдельными перемещающими устройствами и насосными установками. На рис. 5, а представлена двухкамерная установка.

Шлюзовые сварочные установки являются другим вариантом оборудования (рис. 5, б). В них высокий вакуум постоянно поддерживается в той камере, где выполняется сварка. Перемещающиеся устройства проходят через одну или обе форкамеры. Установки могут работать в режиме загрузки и разгрузки, имеют затвор для вентиляции и деаэрации, а также вакуумный затвор. Наиболее производительным, но, к сожалению, самым «негибким» типом оборудования являются конвейерные машины. Они работают на том же принципе, что и шлюзовые сварочные установки, где обрабатываемые детали непрерывно подаются центрирующими кулачками через пневматические затворы в рабочую камеру и оттуда обратно через пневматический затвор. При этом необходимо постоянно поддерживать высокий вакуум.

Установки циклического действия являются наиболее оптимальными для сварки подобных деталей с идентичными геометриями шва и осесимметричными швами. Под камерой (обычно небольшого объема), оснащенной одной или несколькими установками загрузки деталей с коротким временем вакуумирования, установлено поворотное приспособление с вертикальной, горизонтальной и поворотной осями. Поэтому загрузка, разгрузка и сварка могут выполняться одновременно.

Безвакуумная электронно-лучевая сварка. При электронно-лучевой сварке в свободной атмосфере вакуумная камера не нужна. В этом случае время вакуумирования и ограничения, связанные с размерами детали, значения не имеют. Отсюда следует, что безвакуумная электронно-лучевая сварка обладает бесспорными преимуществами.

Указанный способ был разработан в Германии в 1960-х гг. При его реализации используются те же электронно-лучевые пушки, что и для вакуумной электронно-лучевой сварки (рис. 6).

Половинки полых элементов из алюминия, изображенных на рис. 6, были соединены способом безвакуумной электронно-лучевой сварки. Скорость сварки при этом составляла до 12 м/мин, что обуславливает высокую рентабельность указанного способа. Помимо этого, есть и другие преимущества, позволяющие рекомендовать этот способ сварки для широкого применения.

В отличие от лазерной сварки при безвакуумной электронно-лучевой сварке электронный луч способен проплавливать обрабатываемую деталь независимо от наличия углов или особенностей повер-

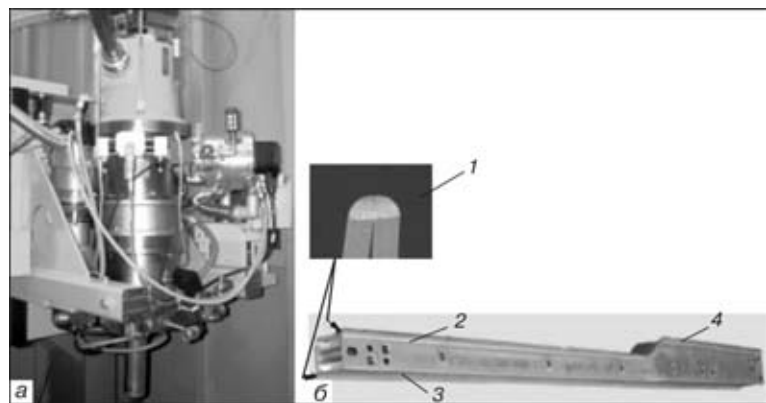


Рис. 6. Электронно-лучевая пушка для безвакуумной сварки (а) и пример использования ее для сварки полых элементов из алюминия (б): 1 — поперечное сечение и расположение сварного соединения на полых элементе из алюминия; 2, 3 — шов; 4 — изделие

хности. После выхода из электронно-лучевой пушки луч проходит через область высокого давления и входит в область атмосферного давления. В последовательно соединенных камерах происходит падение давления. С повышением внешнего давления из-за столкновения с молекулами газа электронный луч рассеивается и диаметр его увеличивается. В воздухе луч сохраняет исходную плотность энергии только на очень коротком рабочем расстоянии (приблизительно 25 мм). Поэтому в процессе сварки не следует превышать это расстояние.

Диаметр луча составляет от 1,5 до 2,5 мм в зависимости от рабочего расстояния и ускоряющего напряжения. При безвакуумной электронно-лучевой сварке наличие довольно большого, по сравнению с вакуумной электронно-лучевой и лазерной сваркой, фокусного пятна обеспечивает хорошее качество сварки по зазору, допускает относительно грубую разделку кромок и использование присадочного материала.

Как и в случае с вакуумной, применение электронно-лучевой сварки (безвакуумной электронно-лучевой сварки) позволяет использовать эффект глубокого проплавления для получения сварных швов большой высоты. При этом может быть получен коэффициент формы шва 5:1. Благодаря эффекту глубокого проплавления применение безвакуумной электронно-лучевой сварки не ограничивается только сферой обработки тонколистовых материалов, возможно также выполнение швов с глубиной проплавления до 10 мм. Использование присадочной проволоки позволяет осуществлять сварку по зазору, что характерно для безвакуумной электронно-лучевой сварки. Зависимость глубины проплавления от скорости сварки показана на рис. 7.

Благодаря плотности энергии электронного луча в свободной атмосфере и высокой мощности имеющегося оборудования можно достичь скорости сварки 20 м/мин для стали и 50 м/мин для алюминиевых сплавов.

Лазерная сварка. С одной стороны, этот способ сварки характеризуется большим отношением глубины проплавления к его ширине и высокими скоростями сварки, при этом влияние на свойства материала минимально. С другой стороны, требования к подготовке шва и позиционированию достаточно высоки, а способность сварки по зазору — низкая. Последние разработки в основном касаются оптимизации возможностей сварки по зазору и снижению тре-

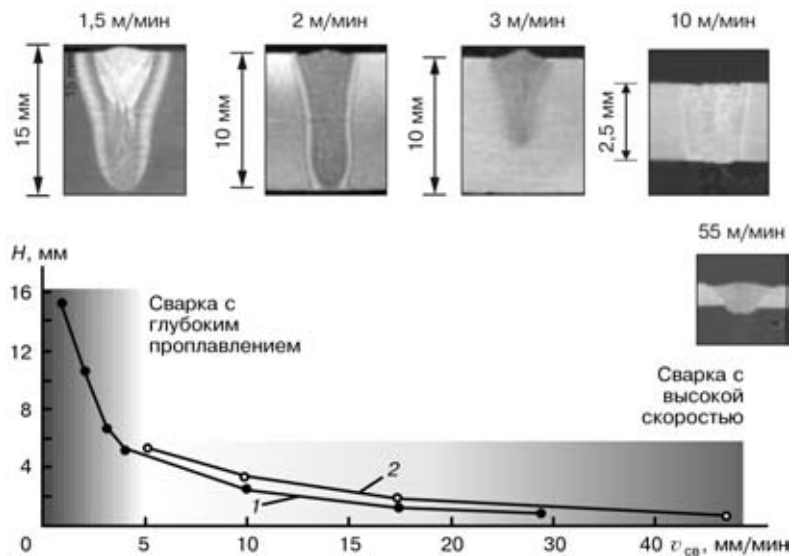


Рис. 7. Зависимость глубины проплавления H от скорости сварки $v_{св}$ при мощности луча 15 кВт стали (1) и алюминия (2)

бований к подготовке шва и позиционированию.

Лазерная сварка с присадочной проволокой. Простейшим усовершенствованием стандартного лазерного процесса является использование устройства для прецизионной подачи присадочной проволоки. Применение присадочной проволоки позволяет заполнять зазоры и тем самым оказывает положительное влияние на металлургические свойства шва. Это обуславливает также пригодность лазерной сварки с присадочной проволокой для выполнения соединений различных материалов с промежуточными слоями, а также для сварки материалов, склонных к образованию трещин.

Гибридная сварка (лазер-МИГ). Данный способ является комбинацией процесса лазерной сварки и обычного МИГ процесса в одной общей зоне сварки (рис. 8). При использовании этого способа достигается глубокое проплавление, которое обеспечивает процесс лазерной сварки, и хорошее качество сварки по зазору. Более того, лазерный пучок стабилизирует процесс сварки МИГ. Благодаря применению расплавленного присадочного материала можно достичь высокой скорости сварки при низкой погонной энергии.



Рис. 8. Гибридная сварка (лазер-МИГ)

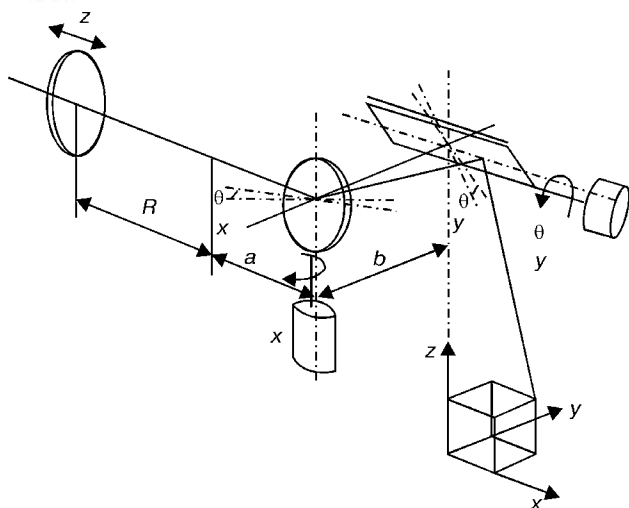


Рис. 9. Схема сварки с дистанционным наведением лазерного луча

Гибридную сварку (лазер-МИГ) применяют для соединения сталей (СО₂-лазеры) и легких сплавов (ИАГ-лазеры). При этом толщина свариваемых пластин может быть различной (от толщины листов, применяемых для кузовов автомобилей, до листов, толщина которых ограничивается мощностью используемого лазера). Согласно эмпирическому правилу, для проплавления 1 мм толщины пластины из стали требуется 1 кВт мощности СО₂-лазера. Первые примеры промышленного применения этого процесса имели место в судостроении и при производстве алюминиевых кузовов автомобилей.

Сварка с дистанционным управлением. В этом случае точечные швы, получаемые лазерной сваркой, обычно заменяют на швы небольшой протяженности. Их выполнение требует продолжительной затраты времени на перемещение от места сварки одного шва к другому (если это производится подвижной лазерной оптикой, управляемой роботом). Чтобы сократить время перемещения, необходимо уменьшить перемещаемую массу. Благодаря отклонению самого луча лазера можно идеально решить эту задачу. На рис. 9 показан принцип сварки с дистанционным наведением. На рисунке видно, что с помощью одного или двух зеркал отклоняется луч лазера, а позиционирование фокуса в вертикальном направлении осуществляется путем перемещения длиннофокусной фокусирующей линзы вдоль оси луча.

Реализация сварки с дистанционным наведением лазерного луча стала возможной только с использованием лазеров нового поколения, имеющих луч оптимального качества, например СО₂-слаб-лазер фирмы «Rofin-Sinar». По данным фирмы «Comau», этот вид сварки открывает широкие возможности благодаря длиннофокусной фокусирующей линзе (например, с длиной фокусного расстояния 1600 мм), а также за счет расположения оптики на трехкоординатном роботе. При сварке с дистанционным наведением время перемещения от места сварки одного шва к другому можно уменьшить до несколько сотых долей секунды, что сокращает время сварки почти на 25 %.

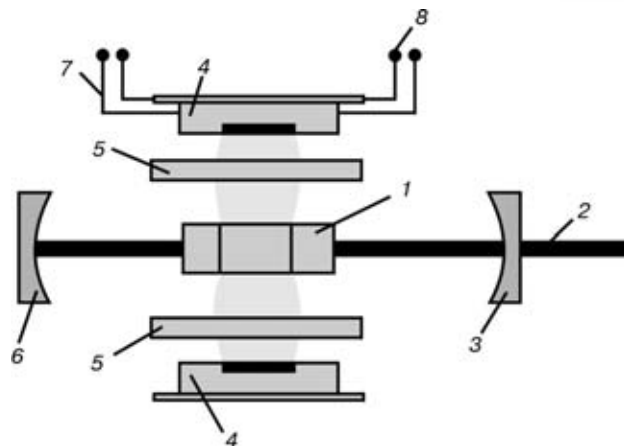


Рис. 10. Схема принципа работы твердотельного лазера с диодной накачкой: 1 — стержень ИАГ-лазера; 2 — лазерный луч; 3 — зеркало для вывода лазерного луча; 4 — диодные решетки; 5 — коллимирующая оптика; 6 — зеркало с высоким отражением; 7 — подвод охлаждения; 8 — подвод питания

ИАГ-лазер с диодной накачкой. В твердотельном лазере обычный цилиндрический стержень служит только для увеличения количества лазерно-активных ионов (в случае ИАГ-лазера — активированного ионами Nd³⁺). Возбуждение обычно происходит с помощью импульсных или дугowych ламп, которые размещают на поверхности двух эллиптических отражателей. При этом стержень лазера находится в их общей фокусной точке. Эффективность процесса составляет менее 4 %.

В настоящее время на рынке появились твердотельные лазеры с диодной накачкой. ИАГ-лазеры с диодной накачкой могут быть использованы в качестве надежного и экономичного инструмента, имеющего широкую сферу промышленного применения. Основными преимуществами этого типа лазеров является длительный срок службы диодов (более 10000 ч), более высокий КПД преобразования электроэнергии в лазерную и высокое качество излучения.

Оптическое возбуждение осуществляется диодными лазерными модулями высокой мощности, расположенным вокруг стержня ИАГ-лазера. Резонатор помещен соосно со стержнем лазера и состоит из зеркала с высоким отражением и устройства вывода с частичным отражением (рис. 10). Если активные элементы с диодной накачкой располагать последовательно по одной оси, то можно достичь выходной мощности в несколько киловатт. Лазерный луч можно выводить по одному или нескольким волоконным световодам.

Сварка волоконными лазерами. Этот тип оборудования является дальнейшим развитием лазеров. Использование активных элементов на основе волоконной оптики с диодной накачкой обеспечивает высокое качество луча, КПД преобразования электроэнергии — до 20 %, возможность разработки надежной и компактной конструкции лазера за счет исключения нуждающихся в юстировке оптических устройств. Изготовители этой аппаратуры, например, IPG Photoic, достаточно быстро увеличивают мощность волоконных лазеров, которая в настоящее время составляет около 6,5 кВт, а ближайшей целью разработчиков



является достижение 25 кВт. Поскольку волоконные лазеры работают на длине волны, сопоставимой с длиной волны лазеров на основе ИАГ, они имеют все преимущества своих прототипов, что особенно проявляется при сварке легких сплавов.

Сварка диодными лазерами. В настоящее время имеются диодные лазеры с выходной мощностью луча до 6 кВт. Для достижения такого уровня мощности несколько диодных лазеров соединяют в диодные линейки, которые, в свою очередь, компонуют в диодные блоки, обеспечивающие мощность лазерного луча до нескольких сотен ватт. Мощность лазера в несколько киловатт достигают путем комбинирования нескольких диодных блоков с оптическими системами.

В отличие от газовых или твердотельных лазеров увеличение мощности диодных лазеров достигается не удлинением резонаторов, а увеличением количества излучающих диодов и их рабочей поверхности, что приводит к снижению качества луча. Фокусное пятно мощных диодных

лазеров обычно представляет собой прямоугольник с длиной стороны приблизительно несколько миллиметров. Эти лазеры обычно используют для поверхностной термической обработки, напыления порошковых материалов и сварки в режиме теплопроводного проплавления. Преимуществами диодных лазеров является высокий КПД преобразования электроэнергии (до 30 %) и компактность конструкции, что позволяет легко встраивать их в автоматизированные промышленные комплексы. Излучение лазеров этого типа на длине волны в ближнем инфракрасном диапазоне позволяет использовать их как для сварки металлов, так и пластмасс.

В заключение следует отметить, что, наряду с существующими, новые варианты дуговых и лучевых технологических процессов существенно расширяют область их применения, благодаря повышению скорости сварки, производительности и качества сварных соединений, обеспечивая таким образом высокие экономические показатели.

Some achievements of the last years in the field of high-efficiency welding technologies are considered. Possible applications of upgraded electron beam and laser welding technologies are given.

Поступила в редакцию 13.06.2003