



## КОМБИНИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ (Обзор)

Г. И. ЛАЩЕНКО, канд. техн. наук (НТК «Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Выполнен анализ комбинированных и гибридных технологий сварки с использованием в качестве источников нагрева газового пламени, электрической дуги, лазера, электронного луча и различных способов защиты. Показана целесообразность промышленного использования различных способов двух- и трехдуговой сварки плавящимися электродами диаметром 1...2 мм. Предложено использовать в качестве комбинированных источников нагрева дугу и газовое пламя, лазерный и электронный луч.

*Ключевые слова:* комбинированные и гибридные технологии, источники энергии, электрическая дуга, газовое пламя, лазер, электронный луч, защитная среда

Решение вопросов свариваемости конкретного материала, обеспечение требуемого качества швов и соединений сварных конструкций, при достаточной производительности, является главной задачей технологии сварки [1–4]. При различных технологиях сварки плавлением эту задачу решают за счет выбора типа, мощности и распределения между потребителями источников нагрева, комбинирования электродного и присадочного материала в части формы и химического состава, вида и состава защиты зоны сварки, а также других способов и приемов [1, 2, 5, 6]. В частности, в сварочном производстве получили распространение комбинированные технологические процессы, в которых одновременно используют два и более одно- или разнородных источников энергии [7, 8]. В случае применения разнородных источников энергии, воздействующих на одну зону обработки (например, сварочную ванну), вследствие чего совместный результат превосходит сумму результатов действия каждого из составляющих энергетических источников, процесс называют гибридным. В последние годы возрос интерес к гибридным процессам сварки, в которых используют комбинированную энергию лазерного луча, плазмы, электрической дуги [9].

Целью настоящей работы является анализ существующих и определение новых возможных направлений совершенствования технологии сварки плавлением на основе комбинирования энергии и защитной среды, подаваемых в рабочую зону.

**Комбинирование источников энергии и защитных сред.** При сварке основными источниками энергии являются химические реакции, протекающие с выделением тепла (экзотермические), электрическая дуга, низкотемпературная плазма, электронный луч, лазерное излучение, электроконтактный, электрошлаковый и индукционный

нагрев, нагрев в электроплитах, трением и ультразвуком [1, 3, 5, 6, 10, 11]. При необходимости механическую энергию в зону сварки вводят путем статического, динамического и импульсного нагружения.

В табл. 1 приведены существующие и возможные сочетания способов сварки на основе двойных комбинаций источников энергии и видов механического нагружения применительно к соединению металлических материалов.

Естественно, что количество возможных способов сварки может быть расширено за счет тройных комбинаций источников термической энергии и видов механического нагружения.

Внутри конкретного способа сварки плавлением могут применяться различные способы защиты металла от воздуха (табл. 2) [9, 12].

В случае применения нескольких источников нагрева для каждого из них могут быть использованы как одинаковые, так и различные по составу и конструктивному исполнению способы защиты.

Защитные среды, выполняя свою основную функцию защиты расплавленного металла от воздуха, оказывают огромное влияние на физические, металлургические и технологические характеристики процесса сварки.

Ниже рассмотрены некоторые известные и предлагаемые автором способы сварки с комбинированием источников нагрева и защитных сред.

**Двух- и трехдуговая сварка плавящимися электродами.** Механизированная дуговая сварка плавящимся электродом занимает лидирующие позиции среди других сварочных технологий. Наиболее широко применяют однодуговую сварку. Менее распространены двух-, трех-, четырех- и пятидуговая сварка в общую ванну [9]. Последние две технологии в основном используют при производстве труб большого диаметра. Двух- и трехдуговую сварку под флюсом проволоками диаметром 3...5 мм применяют в судостроении, резервуаростроении, трубном производстве, при изготов-

Таблица 1. Комбинирование источников термической энергии и видов механического нагружения при сварке

Источник термической энергии и вид механического нагружения	ГП	ТР	ЭД	НП	ЭЛ	ЛЛ	ЭКН	ЭШН	НЭ	ИН	Т	УЗ	СН	ДН	ИМН
Газовое пламя (ГП)	+	+	+				+	+		+	+		+	+	
Термитная реакция (ТР)	+	+	+					+		+		+	+	+	
Электрическая дуга (ЭД)	+	+	+	+		+	+	+		+		+	+	+	
Низкотемпературная плазма (НП)			+	+		+			+	+			+	+	
Электронный луч (ЭЛ)			+		+	+				+		+	+	+	
Лазерный луч (ЛЛ)			+	+	+	+	+		+	+		+	+	+	
Электроконтактный нагрев (ЭКН)			+			+	+		+	+	+		+	+	+
Электрошлаковый нагрев (ЭШН)		+	+	+				+		+		+	+		+
Нагрев в электролитах (НЭ)				+		+	+			+		+	+	+	
Индукционный нагрев (ИН)	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+		+	+	
Трение (Т)	+						+			+	+		+	+	
Ультразвук (УЗ)			+	+	+	+		+	+	+	+		+	+	
Статическое нагружение (СН)	+		+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Динамическое нагружение (ДН)	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	
Импульсное нагружение (ИМН)							+	+							+

Примечание. Знак «+» обозначает, что процесс применяется или возможен.

лении балочных и листовых конструкций различного назначения с протяженными швами.

В работе [13] показано, что двух- и трехдуговую сварку в защитных газах и под флюсом электродными проволоками диаметром 1...2 мм, учитывая их технологические возможности, целесообразно применять более широко, взамен однодуговой сварки проволоками диаметром 3...5 мм, в том числе для решения таких важных задач, как повышение производительности труда (в 2...3 раза), снижение тепловложения (в 1,7...2,0 раза), уменьшение остаточных деформаций и обеспечение требуемых служебных характеристик различных металлоконструкций.

Главным недостатком двух- и трехдуговой сварки в защитных газах считается повышенное разбрызгивание металла и нарушение стабильности процесса в результате магнитного взаимодействия дуг. В то же время эта и другие проблемы могут быть успешно решены благодаря возможностям, которыми в настоящее время располагает электротехника, электроника и сварочная металлургия (рациональное питание дуг, специальные источники тока, системы управления, защитные газовые среды, порошковые проволоки и др.).

Одним из направлений дальнейшего совершенствования двухдуговой сварки открытыми дугами может быть использование двухскоростной газовой защиты одной (первой) или обеих дуг (рис. 1).

В первом варианте, приведенном на рис. 1, а, первую по ходу сварки дугу 1, питаемую пос-

Таблица 2. Виды защиты расплавленного металла от воздуха при различных способах сварки плавлением

Способ защиты	Способ сварки					
	Газовая	Дуговая	Плазменная	Лазерная	Электронно-лучевая	Электрошлаковая
Газами:						—
инертными	—	+	+	+	+	—
активными	+	+	+	+	—	—
смесями	+	+	+	+	—	—
парами	—	+	—	—	—	—
сплошная струя	+	+	+	+	+	—
кольцевая струя	—	+	—	+	—	—
двухслойные струи	—	+	+	+	—	—
двухскоростные струи	—	+	+	—	—	—
импульсная струя	—	+	+	+	—	—
в камерах	—	+	+	+	—	—
Газами и шлаками	+	+	+	+	+	—
Шлаками (под флюсом)	—	+	—	—	—	+
Созданием вакуума	—	+	+	+	+	—

Примечание. Знак «+» обозначает возможность применения способа защиты; «—» — способ защиты не используется.

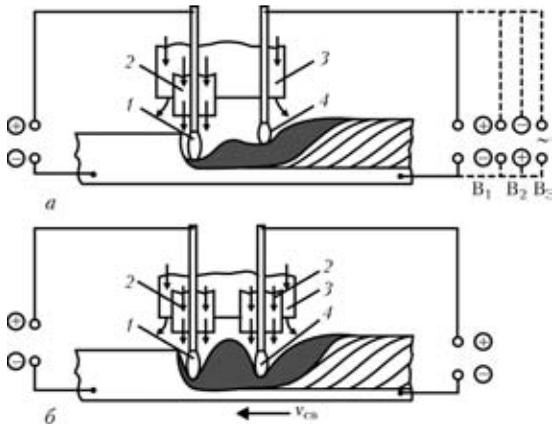


Рис. 1. Схема двухдуговой сварки с двухскоростной газовой защитой одной (а) и двух (б) дуг: 1, 4 — соответственно первая и вторая дуга; 2 — сопло для подачи высокоскоростного потока газа; 3 — сопло для подачи защитного газа с обычной скоростью

тоянным током обратной полярности, дополнительно сжимают потоком защитного газа, подаваемого по соплу 2 со скоростью, значительно превышающей скорость потока основного защитного газа, подаваемого по соплу 3. Основной защитный газ используется для защиты расплавленного металла и второй дуги 4.

Во втором варианте (рис. 1, б) скоростной поток используют и для сжатия второй дуги 4. В этом случае концентрация нагрева больше, чем в предыдущем случае. Эффективность использования дополнительного скоростного потока газа аргона впервые была исследована при однодуговой сварке алюминия плавящимся электродом [13, 14]. При этом глубина проплавления и полный тепловой КПД процесса сварки на оптимальных режимах увеличились примерно в два раза. По сути речь идет о плазменно-дуговой сварке плавящимся электродом, а улучшение энергетических характеристик связано с дополнительным сжатием дуги и улучшением теплопередачи к основному металлу под воздействием скоростного потока газа.

В работе [15] показано, что повышение скорости дополнительного потока защитного газа до 40 м/с позволяет увеличить глубину проплавления стали в 1,5...2,0 раза по сравнению с глубиной проплавления при обычном способе сварки электродной проволокой диаметром 1...1,2 мм.

При сварке с высокой скоростью истечения дополнительной струи  $CO_2$  образуется узкий шов с коэффициентом проплавления 0,71...0,33, высоким усилением без плавного перехода к основному металлу.

На наш взгляд, формирование швов может быть улучшено за счет использования двух дуг, горящих в общую ванну и питаемых от отдельных источников.

В этом случае для дополнительного сжатия дуги (дуг) и защиты зоны сварки могут быть использованы как одно-, так и разнородные газы (смеси газов). Улучшение формирования швов и уменьшение разбрызгивания также возможно за счет разнополярного горения первой и второй дуги (вариант  $B_2$ ), питание второй дуги переменным током (вариант  $B_3$ ) (рис. 1, а), использования одной или двух порошковых проволок.

Эффект, аналогичный использованию порошковой проволоки, может быть достигнут за счет подачи в зону сварки, в том числе посредством скоростной струи газа, небольшого количества флюса соответствующего состава. Такой процесс может быть использован как при сварке сталей, так и других сплавов, в частности, алюминиевых.

Трехдуговая сварка плавящимися электродами диаметром 1...2 мм в защитных газах в общую ванну пока недостаточно исследована. В случае трехдуговой сварки большую роль играет схема питания дуг, минимизирующая их магнитное взаимодействие. Три возможных варианта подключения дуг к независимым источникам тока представлены на рис. 2. Согласно варианту, представленному на рис. 2, а, первая и третья по ходу сварки дуги питаются постоянным током обратной полярности, а вторая дуга — постоянным током прямой полярности. Поскольку направление тока, протекающего по первой и третьей дуге не совпадает с направлением тока, который протекает по второй дуге, то они будут отталкиваться от нее, а сварка будет протекать более стабильно, чем при питании всех дуг током обратной полярности.

В варианте подключения дуг, представленном на рис. 2, б, первая дуга питается постоянным током обратной полярности, третья — прямой по-

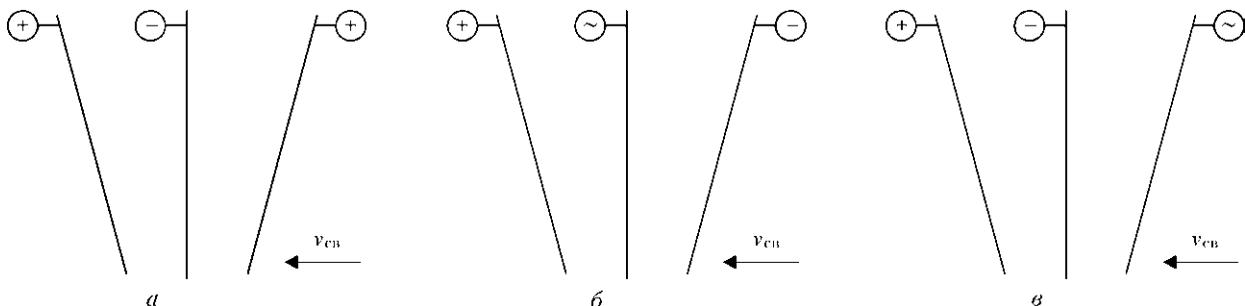


Рис. 2. Схемы подключения электродов при трехдуговой сварке в защитных газах на постоянном токе (а), постоянном и переменном токе (б, в)

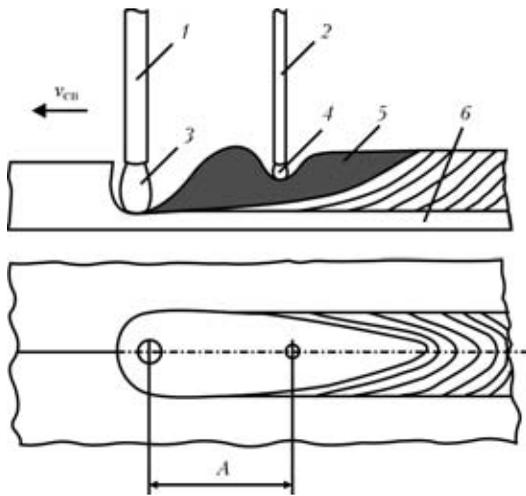


Рис. 3. Схема способа двухдуговой сварки двумя дугами асимметричной мощности: 1, 2 — соответственно первый и второй электрод; 3, 4 — соответственно первая и вторая дуга; 5 — сварочная ванна; 6 — свариваемое изделие; А — расстояние между электродами

лярности, а вторая дуга — переменным током. В этом случае первая и третья дуга поочередно, с частотой переменного тока, притягиваются и отталкиваются относительно второй дуги.

Вариант питания дуг, представленный на рис. 2, в, может иметь некоторые преимущества при сварке ферромагнитных материалов по сравнению с вариантом на рис. 2, б.

Во всех рассмотренных вариантах повышению стабильности процесса способствуют оптимизация параметров режима сварки, выбор соответствующего защитного газа (смеси газов) и использование в качестве одного, двух или трех электродов порошковой проволоки. В случае, представленном на рис. 2, а, рациональной может быть комбинация, при которой в качестве второго электрода используется неплавящийся вольфрамовый электрод, подключенный к источнику постоянного тока или питающийся модулированным током.

Трехдуговая сварка может обеспечить примерно трехкратное повышение производительности и существенно расширить диапазон регулирования тепловложения при соединении различных материалов. В практике сварочного производства часто возникает необходимость более тонкого регулирования тепловложения и локального перераспределения тепла в границах образующейся сварочной ванны. С этой целью при однодуговой сварке в защитных газах и под флюсом используют питание дуги модулированным током или колебания конца электрода по различным траекториям [9].

При двух- и многодуговой сварке появляются дополнительные возможности реализации эффекта модуляции тока и колебания электрода. В качестве такого примера можно привести способ сварки, представленный на рис. 3, где предложено использовать две дуги, которые существенно от-

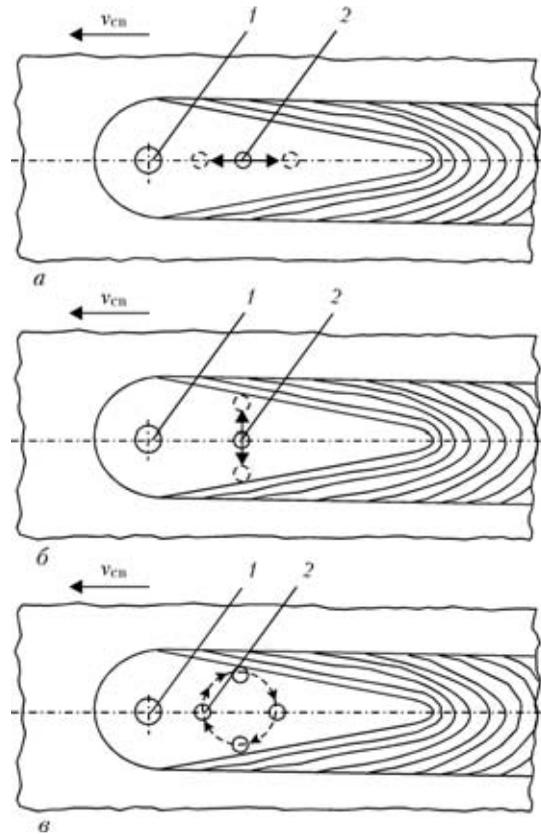


Рис. 4. Схема двухдуговой сварки с колебаниями второго электрода вдоль (а), поперек (б) шва и по кругу (в)

личаются мощностью, а именно — мощность второй по ходу сварки дуги значительно ниже мощности первой дуги. При этом базовые характеристики процесса (тепловложение, производительность) в основном определяются мощностью первой дуги, а вторая, относительно маломощная дуга, служит для более тонкого регулирования термических, гидродинамических и металлургических процессов в сварочной ванне. Такое влияние второй дуги усиливается за счет использования механических колебаний второго электрода (рис. 4) или модуляции тока, которым питается эта дуга.

Тот или иной вид колебаний и его параметры выбирают в зависимости от того, какой технологический эффект хотят достигнуть (улучшить формирование швов, увеличить скорость сварки, уменьшить содержание вредных газов в сварочной ванне, повысить стойкость против образования трещин, пор, снизить количество неметаллических включений, улучшить механические свойства и служебные характеристики сварных соединений).

Вариант двухдугового процесса с питанием второй дуги модулированным током, когда первая дуга горит стационарно, позволяет, не изменяя базовых параметров режима первой дуги, а значит и основных условий образования шва (в частности, глубины провара), активно влиять на его кристаллизацию за счет подачи импульсов тока на вторую дугу,



расположенную в хвостовой, более холодной, части сварочной ванны. При этом создаются более благоприятные условия и расширяются возможности для регулирования процесса формирования и кристаллизации шва в сравнении с однодуговой сваркой модулированным током.

Реализация предлагаемого способа возможна и в варианте совместного использования колебаний второй маломощной дуги и ее питания модулированным током. При этом подача импульсов тока может осуществляться как постоянно на всей траектории движения дуги, так и в отдельных ее точках, в том числе с использованием мгновенных остановок электрода в этих точках. В последнем случае появляются дополнительные возможности для термокинетической обработки различных зон сварного соединения в зависимости от вида и состава свариваемых материалов.

Упомянутый способ может быть реализован как при сварке под флюсом, так и в защитных газах материалов различного назначения не только без снижения производительности, но и с ее увеличением в 1,3...1,5 раза.

**Гибридная сварка (дуга + газовое пламя).** В сварке и родственных процессах для получения тепла широко используют реакцию сгорания углеводородов.

Низшая теплота сгорания основных горючих газов и температура пламени в смеси с кислородом приведены в табл. 3 [16]. Эффективная тепловая мощность пламени может регулироваться в весьма широких пределах.

В серийной огневой аппаратуре (сварочных, линейных закалочных горелках и резаках для кислородной резки) скорость истечения смеси находится в пределах 40...160 м/с, в горелках ракетного типа — 800...1000 м/с, а в установках детонационного напыления — до 3000 м/с [16, 17].

Максимальное давление газовой струи на сварочную ванну при скоростях истечения горючей смеси 120...150 м/с может достигать 1 Па, а глубина проплавления при большой тепловой мощности пламени — 15 мм [17]. Давление дугового потока, как известно, пропорционально квадрату силы тока. При дуговой сварке вольфрамовым электродом в аргоне при силе тока 200 А давление на оси дугового потока составляет  $5 \cdot 10^{-2}$  Па [5]. С возрастанием силы тока до 500 А давление увеличивается примерно в 2 раза, оставаясь на порядок ниже, чем в рассматриваемом выше случае газовой сварки.

Хотя газовое пламя и является менее сосредоточенным источником нагрева ( $10^2 \dots 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>) чем электрическая дуга ( $10^3 \dots 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>), оно характеризуется рядом преимуществ:

возможностью весьма гибко регулировать распределение теплоты по заданным поверхностям

**Таблица 3. Низшая теплота сгорания и температура пламени горючих газов в смеси с кислородом**

Газ	Низшая теплота сгорания, мДж/м <sup>3</sup>	Температура пламени в смеси с кислородом, °С
Ацетилен	100,8	3100...3200
Н-бутан	111,2	2700...2900
Водород	19,2	2400...2600
Метан	32,0	2400...2700
Пропан	83,2	2700...2850
МАПП	83,2	2800...2900

изделия, а также между основным и присадочным металлом при сварке и наплавке;

не подвержено влиянию магнитных полей; газодинамическое воздействие на поверхность расплавленного металла может изменяться в широких пределах и использоваться для регулирования глубины провара, формирования шва и удержания жидкого металла в сварочной ванне, в том числе при различных положениях шва в пространстве.

Еще в 1930 г. Г. Мюнтер предложил способ сварки «аркоген», объединявший нагрев ацетилено-кислородным пламенем и электрической дугой. Из-за сложности существующей тогда техники ручной сварки этот способ не составил конкуренции распространенным в то время более простым способам с одним источником нагрева [18].

Можно привести только один известный пример промышленного использования комбинированной технологии сварки электрической дугой и газовым пламенем — дуговая сварка с предварительным или сопутствующим подогревом газовым пламенем. Правда, в этом случае источник газопламенного нагрева действует за пределами сварочной ванны. Гибридный же способ сварки предполагает, что два разнородных источника нагрева (в данном случае дуга и газовое пламя), воздействуют на одну зону обработки (сварочную ванну). Такое воздействие может осуществляться различным образом (рис. 5).

На рис. 5, а представлен вариант гибридной сварки электрической дугой и газовым пламенем, при котором газовое пламя расположено перед электрической дугой в непосредственной близости от нее. В этом случае газовое пламя может способствовать увеличению глубины провара, скорости плавления электродной проволоки и влиять на перенос жидкого металла через дуговой промежуток.

В варианте гибридной сварки электрическая дуга + газовое пламя, представленном на рис. 5, б, источник газопламенного нагрева расположен за дугой и, изменяя расстояние *A* между источниками нагрева, можно в достаточно широком диапазоне изменять термический цикл сварки, фор-

мирование швов, в том числе при выполнении многослойных и угловых швов.

Гибридная сварка электрическая дуга + газовое пламя может быть реализована в сочетании с газовой и газо-шлаковой защитой в варианте механизированного процесса. Учитывая специфику предлагаемой технологии, ее можно использовать для сварки и ремонта изделий из углеродистых сталей, чугуна, меди и медных сплавов.

**Комбинированные технологии лазерной, электронно-лучевой и дуговой сварки.** В последние годы в мире возрос интерес к лазерной сварке, гибридным и комбинированным способам сварки [19].

Для повышения экономической эффективности лазерной сварки (снижения требований к подготовке кромок, уменьшения опасности образования утонений, пор, подрезов, снижения капитальных и других затрат) используют различные приемы и способы, в том числе сочетание лазерного нагрева с плазменным дуговым или высокочастотным [9, 11, 20–25].

Установлено [20], что при однопроходной гибридной сварке сталей толщиной более 5 мм 1 кВт мощности дуги может заменить 0,5 кВт мощности лазерного излучения. Речь идет об использовании менее мощных (более дешевых) лазеров для сварки толстолистового металла, что в ряде случаев экономически целесообразно. Однако выяснилось, что применение гибридного процесса при фиксированной мощности лазерного излучения имеет смысл только до определенной толщины свариваемого металла, выше которой глубина проплавления не возрастает, независимо от снижения скорости сварки. Для дальнейшей интенсификации процесса проплавления необходимо увеличивать мощность лазерного излучения.

Считают [19], что капитальные затраты на волоконную лазерную установку составляют около 0,1 млн евро на 1 кВт выходной мощности. Поэтому экономическая эффективность лазерно-дуговой сварки в основном будет определяться капитальными затратами на приобретение более мощной лазерной установки.

Если исходить из необходимости увеличения глубины проплавления при лазерной сварке без увеличения мощности лазерной установки, то эта задача может быть решена и за счет использования вакуумной защиты. С одной стороны, это лишает лазерный луч определенных преимуществ перед электронным, а с другой — даже небольшая степень вакуумирования позволяет увеличить проплавление в 3...5 раз [26]. Кроме того, специфика лазерного луча позволяет передавать его через прозрачное ограждение или с помощью волоконной оптики, что может быть использовано при изготовлении ряда изделий в вакуумной камере.

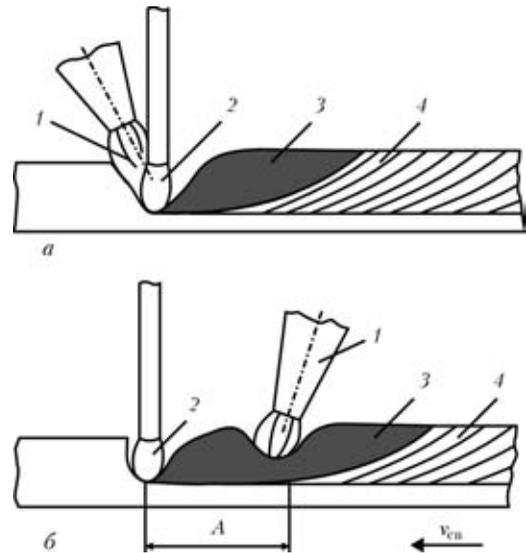


Рис. 5. Схема гибридной сварки дуга + газовое пламя: а — газовое пламя расположено перед дугой; б — за дугой; 1 — газовое пламя; 2 — электрическая дуга; 3 — сварочная ванна; 4 — шов

При лазерной сварке в вакууме лучом мощностью порядка 5 кВт можно прогнозировать увеличение глубины проплавления стали до 20 мм. Такое проплавление в случае обычной лазерной сварки может быть получено при мощности лазера около 20 кВт, т. е. для реализации этой технологии потребуется дополнительно порядка 1,5 млн евро капитальных затрат.

При лазерной сварке в вакууме необходимы дополнительные капитальные затраты на вакуумную камеру и систему вакуумирования. Если эти затраты не выходят за пределы 1...1,3 млн евро, то вариант лазерной сварки в вакууме металла толщиной 20 мм является экономически целесообразным.

Задача лазерной сварки в вакууме может решаться проще тогда, когда на предприятии уже эксплуатируется установка для электронно-лучевой сварки. Вакуумная система этой установки может быть использована для лазерной сварки. Более того, в этом случае появляются экономические предпосылки для реализации гибридной сварки лазерный луч + электронный луч. Технологический эффект и экономическую целесообразность такого процесса сегодня оценить трудно. Электронный луч и лазер имеют различную природу, но их совмещение вполне допустимо, учитывая, что лазерный луч не подвержен воздействию магнитных полей и может применяться с электронным лучом в различных вариантах. Нужны эксперименты. Что касается комбинированной электронно-лучевой и дуговой сварки, то такие эксперименты проводились [27].

Установлено, что при двусторонней комбинированной сварке дуговой разряд расширяет парогазовый канал в корневой части шва. При этом



силы, обусловленные воздействием электронного пучка и дугового разряда на жидкий металл, имеют противоположное направление, в результате чего стабилизируются гидродинамические процессы в канале проплавления, снижается разбрызгивание и повышается устойчивость расплавленного металла против вытекания в широком диапазоне параметров режима.

## Выводы

1. Двух- и трехдуговая сварка плавящимися электродами диаметром 1...2 мм с использованием газовой и газшлаковой защиты расплавленного металла, дополнительного сжатия дуги (дуг) газовым потоком, питания одной из дуг модулированным током и перемещением конца электрода по заданным траекториям позволяет повысить производительность, снизить тепловложение, перераспределить тепловые потоки в сварочной ванне и улучшить формирование швов. Применение этих технологий целесообразно при изготовлении металлоконструкций из углеродистых, низколегированных, нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов, свариваемость которых является недостаточной при использовании традиционной однодуговой сварки.

2. Проведенный анализ показал перспективность использования в сварочных процессах комбинации таких источников энергии, как электрическая дуга и газовое пламя, а также лазерный и электронный луч, поскольку эти сочетания позволяют повышать глубину провара, улучшать формирование швов с одновременным снижением себестоимости процесса сварки (по сравнению с выполнением проваров той же глубины каким-либо одним из указанных источников).

1. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
2. *Сварка* и свариваемые материалы: В 3 т. — Т.1: Свариваемость материалов / Под ред. Э. Л. Макарова. — М.: Металлургия, 1991. — 528 с.
3. *Теория* сварочных процессов / Под ред. В. Ф. Фролова. — М.: Высш. шк., 1988. — 559 с.
4. *Патон Б. Е., Труфяков В. И.* Пути повышения надежности и снижения металлоемкости сварных конструкций // Проблемы сварки и специальной металлургии: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 4–10.
5. *Ерохин А. А.* Основы сварки плавлением. — М.: Машиностроение, 1973. — 448 с.
6. *Сварка* в машиностроении: Справочник в 4 т. / Под ред. Н. А. Ольшанского. — М.: Машиностроение, 1978. — Т. 1. — 504 с.

7. *Литвинов А. П.* Направления развития комбинированных и гибридных технологий сварки и наплавки // Автомат. сварка. — 2009. — № 1. — С. 48–52.
8. *Лащенко Г. И.* Применение принципа комбинирования в сварочном производстве // Сварщик. — 2010. — № 1. — С. 16–20.
9. *Лащенко Г. И.* Способы дуговой сварки стали плавящимся электродом. — Киев: ЭкоТехнологія, 2006. — 384 с.
10. *Попилов Л. Я.* Основы электротехнологии и новые ее разновидности. — Л.: Машиностроение, 1971. — 216 с.
11. *Григорьянц А. Г.* Основы лазерной обработки материалов. — М.: Машиностроение, 1989. — 304 с.
12. *Новожилов Н. М.* Основы металлургии дуговой сварки в газах. — М.: Машиностроение, 1979. — 231 с.
13. *Лащенко Г. И.* Технологические возможности одно-, двух- и трехдуговой сварки // Сварщик. — 2011. — № 2. — С. 14–19.
14. *Алов А. А., Шмаков В. М.* Аргодуговая сварка с дополнительным потоком аргона // Свароч. пр-во. — 1962. — № 3. — С. 13–15.
15. *Ковалев И. М., Акулов А. И.* Особенности газодинамического способа управления проплавлением действием дуги при сварке плавящимся электродом в углекислом газе // Там же. — 1967. — № 6. — С. 19–21.
16. *Мидлов С. Г.* Газотермические покрытия в технологии упрочнения и восстановления деталей машин (Обзор) Ч. 1. Газопламенное и детонационное напыление // Там же. — 2007. — № 10. — С. 35–45.
17. *Антонов И. А.* Газопламенная обработка металлов. — М.: Машиностроение, 1976. — 264 с.
18. *Muenter H.* Der einfluss von schweiss und schutzgas flammen auf die vorgänge im schweislichtbogen // Elektroschweissung. — 1933. — № 7. — S. 80–84.
19. *Лащенко Г. И.* Тенденции развития технологий сварочного производства // Сварщик. — 2011. — № 6. — С. 6–11.
20. *Гибридная* сварка излучением CO<sub>2</sub>-лазера и дугой плавящегося электрода в углекислом газе / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, В. П. Гаращук и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 10. — С. 38–41.
21. *Перспективы* применения лазерной и гибридной технологий сварки сталей для повышения эксплуатационного ресурса трубопроводов / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, А. В. Бернацкий и др. // Там же. — 2010. — № 10. — С. 37–40.
22. *Райзен У., Ольмок С.* Гибридная лазерно-дуговая сварка под флюсом // Там же. — 2009. — № 4. — С. 46–51.
23. *Миддельдорф К., Хофе фон Д.* Тенденции развития технологий соединения материалов // Там же. — 2008. — № 11. — С. 39–47.
24. *Состояние* и перспективы применения высокоэффективных сварочных технологий / У. Дилтай, Л. Штайн, К. Вестке и др. // Там же. — 2003. — № 10/11. — С. 151–157.
25. *Ках П., Салминен А., Мартикаинен Дж.* Особенности применения гибридной лазерно-дуговой сварки (Обзор) // Там же. — 2010. — № 6. — С. 38–47.
26. *Назаренко О. К., Морочко В. П.* Применение мощных CO<sub>2</sub>-лазеров в зарубежном сварочном производстве (Обзор) // Там же. — 1988. — № 4. — С. 43–46.
27. *Овечников С. А., Драгунов В. К.* Двусторонняя одновременная сварка электронным лучом и дуговым разрядом // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Восьмая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Москва 28 февр.–1 марта, 2002: Тез. докл. — М.: Изд-во МЭИ, Т. 3. — 2002. — С. 270.

Analysis of the combined and hybrid welding technologies using gas flame, electric arc, laser, and electron beam as the heat sources, and various shielding methods was performed. The rationality of industrial application of various processes of two- and three-arc welding with 1...2 mm dia. consumable electrodes is shown. It is proposed to use the arc and gas flame, laser and electron beam as the combined heat sources.

Поступила в редакцию 03.04.2012