

В. П. Сидоров  
С. А. Хурин

# ДВУХДУГОВАЯ ДВУХСТОРОННЯЯ СВАРКА В АРГОНЕ



«Инфра-Инженерия»

УДК 621.791  
ББК 34.641  
С34

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой информатики и систем управления Волжского университета им. В. Н. Татищева *С. В. Краснов*;  
д-р техн. наук, профессор Тольяттинского государственного университета  
*А. И. Ковтунов*

**Сидоров, В. П.**

**С34** Двухдуговая двухсторонняя сварка в аргоне : монография / В. П. Сидоров, С. А. Хурин. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 196 с. : ил., табл.  
ISBN 978-5-9729-1248-3

Приведены результаты исследований процесса двухдуговой двухсторонней аргонодуговой сварки. Предложена математическая модель формирования швов стыковых соединений без разделки сварочных кромок и подачи присадочной проволоки. Изложена методика расчета оптимальных параметров процесса. Приведено сравнение производительности и энергетической эффективности различных способов сварки без разделки кромок. Показано повышение производительности соединения в исследуемом способе сварки по сравнению с традиционным способом АРДС в несколько раз.

Для научных работников и инженеров производства, а также преподавателей и студентов высших технических учебных заведений.

УДК 621.791  
ББК 34.641

ISBN 978-5-9729-1248-3

© Сидоров В. П., Хурин С. А., 2023  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2023  
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
Глава I. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДУГОВОЙ СВАРКИ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БЕЗ РАЗДЕЛКИ КРОМОК.....	7
1.1. Характеристики эффективности процесса сварки.....	7
1.2. Увеличение мощности дуги.....	15
1.3. Применение активирующих флюсов.....	17
1.4. Сварка заглубленной и проникающей дугой.....	18
1.5. Сварка трехфазной дугой.....	20
1.6. Тандемная сварка.....	21
1.7. Двухсторонняя сварка.....	24
1.8. Анализ методов расчета размеров сварочной ванны .....	26
Глава II. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХДУГОВОЙ СВАРКИ .....	42
2.1. Схема процесса и методика экспериментов.....	42
2.2. Математическая модель ДДС.....	48
2.3. Методика определения параметров математической модели .....	52
2.4. Апробация методики моделирования .....	64
2.4.1. Определение зависимости $\varphi_1$ и $\varphi_0$ от тока и длины дуги .....	65
2.4.2. Адекватность модели двухдуговой двухсторонней сварки без смещения дуг .....	68
2.4.3. Анализ режимов сварки титанового сплава .....	71
2.4.4. Сравнение расчетов с данными других авторов .....	75
Глава III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ДВУХДУГОВОЙ ДВУХСТОРОННЕЙ СВАРКИ .....	85
3.1. Предельные возможности проплавления при аргонодуговой сварке.....	85
3.2. Влияние подогрева пластин на эффективность проплавления металла.....	93
3.3. Односторонняя тандемная сварка.....	97
3.4. Двухсторонняя двухдуговая сварка .....	100
3.4.1. Соосное расположение источников тепла.....	100
3.4.2. Влияние соотношения мощностей на провар .....	101
3.4.3. Влияние поперечного смещения теплоисточников на провар .....	103
3.4.4. Влияние продольного смещения на форму ванны при ДДС .....	105
Глава IV. МЕТОДИКА РАСЧЕТА РЕЖИМОВ И ТРЕБОВАНИЯ К ОБОРУДОВАНИЮ ДЛЯ ДДС.....	134
4.1. Методика проектирования режимов ДДС .....	134
4.2. Сравнение эффективности сварочных процессов .....	140

4.3. Определение предельных возможностей ДДС и ее эффективности .....	152
4.4. Регулирование термических циклов при ДДС .....	155
4.5. Исследование влияния отклонения параметров модели на провар при ДДС .....	161
4.5.1. Влияние отклонений толщины листа .....	161
4.5.2. Отклонения начальной температуры металла .....	166
4.5.3. Отклонения по теплофизическим характеристикам металла .....	168
4.5.4. Методика учета нерегулируемых параметров .....	171
Глава V. РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ДВУХДУГОВЫХ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ .....	173
5.1. Современные системы двухдуговой сварки .....	173
5.2. Электрическая схема двухдуговой сварки .....	174
5.3. Разработка сварочного источника питания .....	175
5.3.1. Требования к характеристикам и конструкции источника питания .....	176
5.3.2. Разработка функциональной и принципиальной электрических схем источника питания .....	177
5.3.3. Выбор интерфейса системы управления источником питания .....	179
5.3.4. Создание программного обеспечения для осуществления работы системы управления источником питания и настройка интерфейсного устройства .....	182
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	184
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	185

# Глава I. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДУГОВОЙ СВАРКИ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БЕЗ РАЗДЕЛКИ КРОМОК

## 1.1. Характеристики эффективности процесса сварки

Анализ технологии получения сварных соединений различных конструкций показывает, что время подготовительных работ в основном уходит на механическую обработку кромок и сборку стыка и зачастую превышает основное время сварки. Выполненная разделка кромок при сварке заполняется присадочным металлом, что дополнительно снижает эффективность сварочного производства.

Постоянно ведущаяся разработка новых высокопрочных сталей и сплавов с особыми свойствами позволяет получать более жесткие и долговечные конструкции при уменьшении их веса. Однако использование новых материалов может привести к необходимости применения нового способа сварки, так как возрастают требования к однородности химического состава, структуры и механических характеристик шва, зоны термического влияния (ЗТВ) и основного металла. По мнению многих исследователей наиболее гибким является процесс дуговой сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов, так как в этом способе дуговой разряд взаимодействует только с основным металлом, а в результате применения широкого спектра присадочных проволок легко регулировать химический состав шва. Способ имеет достаточно широкие возможности раздельного регулирования мощности, передаваемой к изделию и присадочной проволоке. Однако низкая производительность процесса оставляет ему место преимущественно для сварки дорогостоящих сплавов или ответственных стыков. Поэтому исследования, направленные на повышение производительности процесса сварки неплавящимися и плавящимися электродами в среде инертных газов являются актуальными.

Сварочный ток и скорость сварки обеспечивают необходимое тепловложение и выбираются в зависимости от химического состава сплава и толщины свариваемого металла. Формирование и размеры шва при сварке неплавящимся электродом зависят от теплового и механического воздействия дуги на сварочную ванну. При сварке на токах до 150 А проплавление достигается главным образом за счет теплопроводности от дуги и конвекции расплавленного металла, влияние же давления дуги незначительно [1].

Одинаковую глубину проплавления можно получить при изменении сварочного тока и скорости сварки в широких пределах. При увеличении сварочного тока скорость сварки пластин данной толщины можно увеличивать примерно по линейной зависимости. При увеличении свариваемой толщины ско-

рость сварки приходится снижать. Максимально возможная скорость сварки ограничена в связи с появлением подрезов и других дефектов шва, обусловленных возрастанием тока и, соответственно, давления дуги.

В диапазоне сварочных токов 250–600 А существенную роль в проплавлении и формировании шва играет механическое воздействие дуги.

Зависимости рисунка 1.1 [1] демонстрируют влияние сварочного тока на параметры проплавления и силовое воздействие дуги на сварочную ванну. Зависимости глубины  $H$  и ширины  $B$  проплавления сварочной ванны получены при сварке пластин из высоколегированной стали 1X18H9T толщиной  $\delta = 16$  мм со скоростью сварки  $V_c = 0,278$  см/с.

Допустимая скорость сварки  $V_{max}$  на токах 300, 400, 500, 600 А определялась по характеру формирования сварочной ванны и наличию дефектов в шве, которые выявлялись внешним осмотром, рентгеновским контролем и анализом макрошлифов.

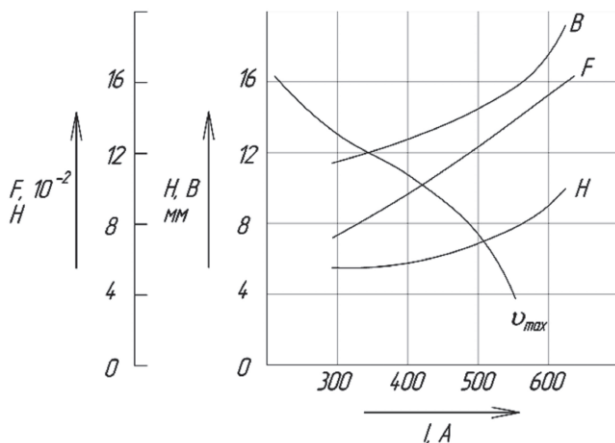


Рис. 1.1. Влияние тока сварки на параметры шва и его формирование [1]

Увеличение сварочного тока с 300 до 600 А приводит к линейному возрастанию силового воздействия дуги с  $6 \cdot 10^2$  Н до  $15 \cdot 10^2$  Н. В связи с этим активное пятно дуги углубляется в расплавленный металл, в результате чего уменьшается жидкая прослойка под дугой и улучшаются условия теплопередачи в основной металл. Глубина проплавления  $H$  увеличивается на 40–80 %, а ширина  $B$  возрастает почти в 2 раза. Более медленный рост проплавляющего действия дуги связан с тем, что с увеличением сварочного тока одновременно растут диаметры столба дуги и пятна нагрева, а плотность теплового потока в изделие меняется незначительно.

Область хорошего формирования швов ограничена кривой максимально допустимой скорости сварки  $V_{\max}$ . В диапазоне токов до 400 А допустимая скорость сварки снижается плавно, а в диапазоне токов 400–500 А резко падает. При скоростях сварки ниже критической шов формируется равномерно, расплавленный металл заполняет шов по всей ширине. Если скорость сварки превышает допустимую, наблюдается периодическое нависание верхних слоев расплавленного металла над кратером сварочной ванны и захлестывание газов столба дуги с образованием газовых полостей в швах. В корневой части шва иногда образуются непрерывные газовые каналы. Вероятность появления этих дефектов шва снижается при использовании гелия вместо аргона, уменьшении длины дуги или увеличении угла заточки вольфрамового электрода.

Так как увеличение глубины проплавления за счет повышения сварочного тока при аргодуговой сварке (АРДС) сталей связано с ограничением допустимой скорости сварки и необходимостью поддержания параметров режима с высокой точностью, то односторонние стыковые соединения сталей толщиной свыше 4 мм, как правило, выполняются с разделкой кромок. Аналогичный предел толщины для алюминиевых сплавов примерно на 2 мм больше.

Длина дуги является одним из основных параметров, влияющих на формирование шва и проплавляющую способность дуги. Она выбирается в зависимости от типа соединения, марки и толщины свариваемого металла. Для сварки без присадочной проволоки длина дуги устанавливается в пределах 0,5–2,0 мм, а при использовании присадочной проволоки длина дуги может быть увеличена до 3–4 мм. С удлинением дуги линейно растет напряжение дуги, увеличивается ее диаметр и пятно нагрева. Как правило, глубина проплавления несколько уменьшается при увеличении длины дуги, а ширина шва во всех случаях возрастает.

Стабильность проплавления при сварке длинными, свыше 4 мм, дугами снижается из-за увеличения подвижности дуги. Случайные отклонения дуги возникают в результате магнитного дутья у края пластины или вызываются электромагнитными силами, возникающими в результате взаимодействия тока дуги с током в изделии, направление которого зависит от расположения места токоподвода.

Постоянство параметров проплавления при автоматической сварке обеспечивается поддержанием заданной длины дуги с точностью до  $\pm 3\%$ .

В последние годы для оценки энергетической эффективности процесса сварки стали чаще использовать удельную энергию сварки [3].

Удельной энергией сварки называют отношение:

$$E = \frac{q_{II}}{V_C h} = \frac{q_{II}}{J}, \quad (1.1)$$

где  $q_{II}$  – эффективная мощность источника тепла, Вт;

$h$  – провар, см;

$V_C$  – скорость перемещения источника тепла по изделию.

Размерность  $E$  Дж/см<sup>2</sup>, то есть эта величина показывает количество энергии, израсходованной на создание 1 см<sup>2</sup> соединения непосредственно в стыке. Очевидно, что чем меньше  $E$ , тем меньше термическое воздействие на основной металл при сварке и меньше ширина зоны структурных изменений. Поэтому при сварке нужно стремиться к уменьшению  $E$ .

Известно, что различные способы сварки существенно отличаются по средним значениям удельной энергии  $E$  [3,8].

В работе [9] удельную энергию сварки называют удельной погонной энергией сварки. По приведенным в этой работе данным она линейно увеличивается с ростом свариваемой толщины.

В работе [85] авторами предложено использовать в качестве отдельного показателя производительность образования соединения при сварке, которая является знаменателем выражения (1.1):

$$J = h \cdot V_C, \text{ см}^2/\text{с}. \quad (1.2)$$

Показатель  $J$  хорошо отражает сущность сварки – получение площади соединения на требуемой поверхности в единицу времени. В случае если провар достигается на всю толщину пластин, то вместо провара  $h$  должна использоваться толщина пластин  $\delta$ . Представление о достигаемых производительностях соединения можно получить на основе анализа рекомендуемых режимов сварки. Помимо удельной энергии сварки с помощью  $J$  можно определять и другие показатели эффективности процесса: расхода защитного газа, присадочного металла, трудозатрат.

Рекомендуемый режим сварки высоколегированной стали 1X18H9T [1] толщиной 2,5 мм: ток дуги 200 А и скорость сварки 0,583 см/с дают значение скорости соединения при сварке  $J = 0,15$  см<sup>2</sup>/с и удельное энергии сварки  $E = 9,6$  кДж/см<sup>2</sup>. Эти данные можно принять за базовые при сравнении эффективности АРДС с другими способами сварки.

В качестве важного показателя дуговой сварки следует использовать вольт-ампер эквивалент эффективной мощности дуги  $U_{\Sigma}$  [10,83] или удельную эффективную мощность  $q_{\Sigma}$  [84]. Эта величина измеряется в Вт/А и позволяет использовать для расчета эффективной мощности не эффективный КПД дуги  $\eta$



и мощность дуги, а непосредственно ее ток. В пользу использования  $q_u$  для расчетов свидетельствует, например, тот факт, что эффективный КПД сжатых дуг примерно равен или даже меньше, чем у свободной дуги, однако удельная эффективная мощность намного выше. Иначе говоря, использование  $q_u$  не требует знания напряжения дуги, которое может иметь существенный разброс, особенно для сжатых дуг. В работе [11] приводится таблица весьма приближенных, по мнению авторов, значений  $q_u$  для электродов и изделий (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Удельная на 1 А тока эффективная мощность  $q_u$  дуги (Вт/А)

Электроды	Постоянный ток		Переменный ток
	Прямая полярность	Обратная полярность	
Вольфрамовый электрод	2	8	5
Свариваемое изделие	8	7	8

Обращает на себя внимание, что для обратной полярности указано меньшее значение  $q_u$ , чем для прямой. Обратная полярность при сварке вольфрамовым электродам используется только на малых токах. Поэтому не ясно, какие значения эта величина имеет на больших токах, которые характерны для сварки плавящимся электродом.

Анализ данных по режимам односторонней автоматической сварки под слоем флюса соединений без разделки кромок на обратной полярности [1; 12] дал следующие результаты: используемые токи значительно превышают токи дуги при сварке вольфрамовым электродом. Так, для сварки толщины 4 мм проволокой 2 мм средний ток 387 А, а для толщины 6 мм – 460 А. Возможность такого значительного повышения тока, по-видимому, связана с особенностями приложения давления дуги при сварке плавящимся электродом по сравнению с вольфрамовым. Возможно, при таких токах значительно повышается и  $q_u$  по сравнению со значением в таблице 1.1. Скорость образования соединения  $J$  на толщине 4 мм достигает  $J = 0,44 \text{ см}^2/\text{с}$ , что в 3 раза больше, чем при сварке вольфрамовым электродом. Удельная энергия сварки составляет примерно  $E = 22,4 \text{ кДж/см}^2$ , что в 2,5 раза больше. Таким образом, сварка плавящимся электродом позволяет повысить эффективную мощность дуги и скорость соединения, но тепловая эффективность процесса существенно снижается. При этом рост скорости соединения несколько опережает рост мощности.

Предельная толщина без разделки кромок, сваренная таким способом, с одной стороны, составляет 10 мм. При этом используется проволока диаметром 5 мм и ток 960 А. Скорость образования соединения достигает порядка 1,0 см<sup>2</sup>/с, а удельная энергия сварки 32,8 кДж/см<sup>2</sup>.

Примерно для таких же условий при сварке дугой переменного тока на толщине 10 мм достигается на токе 725 А скорость образования соединения 0,83 см<sup>2</sup>/с, а удельная энергия сварки 25,9 кДж/см<sup>2</sup>. Однако в этом случае детали должны собираться с достаточно большим зазором и механизм образования проплавления существенно отличается от случая с плотно собранными кромками. Образование шва во многом обусловлено попаданием в зазор большого количества электродного металла. Об этом свидетельствует и тот факт, что подобным способом может быть сварена без разделки кромок толщина 20 мм на токе 975 А. При этом скорость соединения остается на уровне 0,83 см<sup>2</sup>/с, а удельная энергия сварки возрастает до 42,7 кДж/см<sup>2</sup> [12].

Представляет интерес анализ режимов двухсторонней сварки под флюсом. Сварка велась на переменном токе проволокой 5 мм. При анализе использовали предположение, что режим сварки одного прохода обеспечивает провар 50 % толщины пластины. Сварка первого прохода производится на меньшей погонной энергии, чем второго (примерно на 30 %). Поэтому для оценки энергозатрат выбирали полусумму токов и скоростей сварки. В результате получили удельную энергию сварки одного прохода  $E = 43,4$  кДж/см<sup>2</sup> при скорости соединения  $J = 0,48$  см<sup>2</sup>/с. Таким образом, энергозатраты при двухсторонней сварке существенно выше, чем при односторонней. Это объясняется более интенсивным отводом тепла из зоны сварочной ванны в условиях неполного проплавления, так как не используется эффект отражения тепла от обратной плоскости пластин.

При сварке таким способом толщины 20 мм удельная энергия сварки достигает  $E = 54,7$  кДж/см<sup>2</sup> при скорости соединения  $J = 0,58$  см<sup>2</sup>/с. Предельная свариваемая таким способом толщина 22 мм.

Был также выполнен анализ режимов тандемной двухдуговой односторонней сварки под флюсом пластин толщиной 8 и 14 мм на переменном токе с использованием флюсомедной подкладки. Было установлено, что существенное увеличение скорости соединения (с 1,78 до 2,66 см<sup>2</sup>/с) на толщине 8 мм приводит к росту удельной энергии сварки на 11 %. При увеличении толщины до 14 мм использование энергии дуг повышается и достигается скорость соединения 4,66 см<sup>2</sup>/с при удельной энергии 28,4 кДж/см<sup>2</sup>. Следует отметить, что такие высокие скорости соединения были получены в условиях сварки с зазором 3–5 мм, то есть сварка происходила по схеме, близкой к схеме линейного источника тепла. По сравнению с односторонней однодуговой сваркой в анало-

гичных условиях скорость соединения выросла в 2,5 раза при росте удельной энергии сварки на 40 %. Таким образом, изменение схемы процесса и использование сварки по зазору двумя дугами позволяют добиться скорости соединения в несколько см<sup>2</sup>/с.

Тандемная двухсторонняя сварка под флюсом дает возможность сваривать без разделки кромок толщины до 30 мм. При таком способе сварки скорость соединения повышается с ростом толщины металла, а удельная энергия сварки мало зависит от свариваемой толщины. По сравнению с односторонней тандемной сваркой малых толщин (8–14 мм) скорость соединения снизилась более чем в 2 раза, а удельная энергия сварки всего стыка увеличилась примерно в 4 раза. Таким образом, не имеет большого смысла сваривать небольшие толщины двухсторонней тандемной сваркой. Это же, по-видимому, относится и к односторонней тандемной сварке небольших толщин.

При двухдуговой сварке со скоростью 140 м/ч шов формируется неудовлетворительно. Поэтому для обеспечения более высоких скоростей сварки при хорошем формировании шва используются 3 дуги. Все дуги горят в одну общую ванну. Трехдуговая сварка толщин 12–17 мм обеспечила скорость соединения в пределах 5–6 см<sup>2</sup>/с. Токи дуг поддерживались порядка 1000–1100 А. Оказалось, что для такого диапазона толщин удельная энергия сварки минимальна и составляет порядка 20 кДж/см<sup>2</sup>. Таким образом, распределение сварочной мощности в направлении сварки является наиболее эффективным способом повышения скорости соединения и снижения удельной энергии сварки.

Данные о возможностях сварки под слоем флюса без разделки кромок сведены в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

Энергетические возможности автоматической сварки под флюсом

Характеристика способа сварки	Максимальная толщина, мм	J, см <sup>2</sup> /с	E, кДж/см <sup>2</sup>
Односторонняя дугой обратной полярности	10	1,0	32,8
Односторонняя дугой переменного тока	10	0,83	25,9
Двухсторонняя	20	0,58	54,7
Тандемная двухдуговая односторонняя	14	4,66	28,4
Тандемная двухдуговая двухсторонняя	30	2,3	113,6
Тандемная трехдуговая односторонняя	17	6,0	200,0

Из таблицы 1.2 следует, что показатели эффективности сварки изменяются в широких пределах в зависимости от способа сварки.

Также представляют интерес энергетические характеристики дуги в защитных газах с плавящимся электродом. Рассмотрим приводимые в литературе режимы.

В качестве предельной толщины свариваемой без разделки двухсторонней автоматической сваркой в  $\text{CO}_2$  приводятся 20–22 мм [1]. Сварочный ток первого шва: 700–750 А при напряжении дуги 36–38 В. При этом достигается скорость сварки 25–30 м/ч. Режимы сварки второго шва аналогичны. Эффективный КПД дуги принимали  $\eta_i = 0,8$ . Взяв средние значения рекомендуемых режимов и провар в половину толщины пластины, получаем  $J = 0,8 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $q_{\text{д}} = 21,46 \text{ кВт}$  и  $E = 26,8 \text{ кДж}/\text{см}^2$ . При сварке таких же толщин под флюсом скорость соединения на 25 % ниже, а удельная энергия сварки больше почти в 2 раза. Такое повышение эффективности при сварке в  $\text{CO}_2$  достигается, по видимому, за счет использования более тонкой проволоки и более высоких плотностей тока на ней. Вследствие этого растет давление дуги и погружение катодного пятна в сварочную ванну.

Интересен способ многопроходной сварки многослойных швов плавящимся электродом [1], позволяющий выполнять сварку соединений из толстолистового металла с узкой разделкой кромок без погружения в разделку токоподводящего мундштука и газового сопла. В процессе сварки от первого до последнего прохода токоподводящий мундштук и сопло горелки находятся над поверхностью свариваемого изделия на постоянном расстоянии. По мере заполнения разделки сварку выполняют с уменьшающимся вылетом электрода. При этом значение сварочного тока автоматически поддерживается постоянным. Для этого способа сварки разработан автомат АДГ-601.

Если принять, что скорость сварки в режимах указана для одного слоя шва, то общая скорость сварки составит 5–6 м/ч, что дает для толщины 18 мм скорость образования соединения порядка  $J = 0,3 \text{ см}^2/\text{с}$ , а удельную энергию сварки  $E = 22 \text{ кДж}/\text{см}^2$ . Эти значения ниже, чем при сварке плавящимся электродом на форсированных режимах.

Серьезным недостатком сварки плавящимся электродом является низкая технологическая гибкость процесса [57,58], заключающаяся в сложности независимого регулирования производительностей проплавления основного металла и расплавления электродного металла. Увеличивая ток дуги и повышая производительность сварки, одновременно повышают заполнение соединения наплавленным металлом и выпуклость шва может быть избыточной. Регулирование же выпуклости за счет зазора проблематично.

Анализ работ Ерохина А. А., Березовского Б. М., Прохорова В. К., Лапина И. Е., Гладкова Э. А., Денисова В. Н., Нестерова А. Ф., Судника В. А., Рыбакова А. С. и др., посвященных проблемам повышения производительности аргонодуговой сварки показывает, что известны три основных подхода: увеличение мощности дуги, заглупление дуги ниже поверхности деталей, сжатие дуги или комбинация этих способов.

## 1.2. Увеличение мощности дуги

Рост мощности дугового разряда влечет за собой увеличение силового воздействия дуги, что сказывается на гидродинамических процессах, происходящих в сварочной ванне. Во многих работах, обзоры которых приведены в [13; 14], проводились исследования влияния силового воздействия дугового разряда на сварочную ванну, однако пренебрежение пародинамическими и гидродинамическими составляющими введет к недостоверности данных по величине проплавления. Как показывает анализ приведенных работ, исследователи до сих пор не пришли к единому мнению о природе силового воздействия и соотношении сил участвующих в процессе формирования сварного шва, что затрудняет количественную оценку данных сил [14].

Обобщением экспериментальных данных различных авторов по силовому воздействию дуги на расплавленный металл занимался А.А. Ерохин [13], он приводит коэффициент пропорциональности  $k = F_d / I_d^2$  между силовым воздействием дуги и силой сварочного тока, однако сам автор утверждает, что данные разных исследований не всегда согласуются и это приводит к затруднению их обобщения. Следует отметить, что автор полностью исключает зависимость силы дуги от скорости сварки. Значения коэффициента  $k$  для различных способов сварки приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Данные о силе давления для различных дуг

Способ сварки	Полярность, сила тока, А	Электрод		Коэффициент $k \cdot 10^7$ , Н/А <sup>2</sup>
		Материал	Диаметр, мм	
Аргонно-дуговая неплавящимся электродом	Прямая 150–550	Вольфрам	5	2,25
	Прямая 60–200	Вольфрам	2	1,25
Аргонно-дуговая плавящимся электродом	Прямая 250–500	Х18Н9	2	2,95
			1,6	3,35
	Обратная 150–550	Х18Н9	2	3,75
	Обратная 40–140	Х5М	0,5	3,05
Голой проволокой (автоматическая) открытой дугой	Переменный ток 450–950	Св-08	3	1,3
			4	0,87
			5	0,44

Исследователи из Massachusetts University of Technology P. Mendez и др. [15] выявили зависимость силы давления в Ньютонах от тока и длины дуги:

$$P = 5,616 \cdot 10^{-3} \cdot I_D^{1,956} \cdot h^{-0,216},$$

где  $P$  – сила дуги, Н;

$I_D$  – сила сварочного тока, А;

$h$  – длина дуги, мм.

Соответственно,  $k = 5,616 \cdot 10^{-3} \cdot h^{-0,216}$ , есть коэффициент, который приводится в [13] для различных способов дуговой сварки.

Также в [15] установили зависимости (рис. 1.2, рис. 1.3) отставания анодного пятна от оси электрода при повышении скорости сварки и влияние давления дуги на формирование сварного шва.

Из приведенных на рисунках 1.2 и 1.3 графиков следует, что повышение скорости сварки или свариваемой толщины ограничено нарушением формирования шва, вызванным повышением давления дуги и отставанием анодного пятна. Устранить эти ограничения в рамках известного способа сварки не представляется возможным.

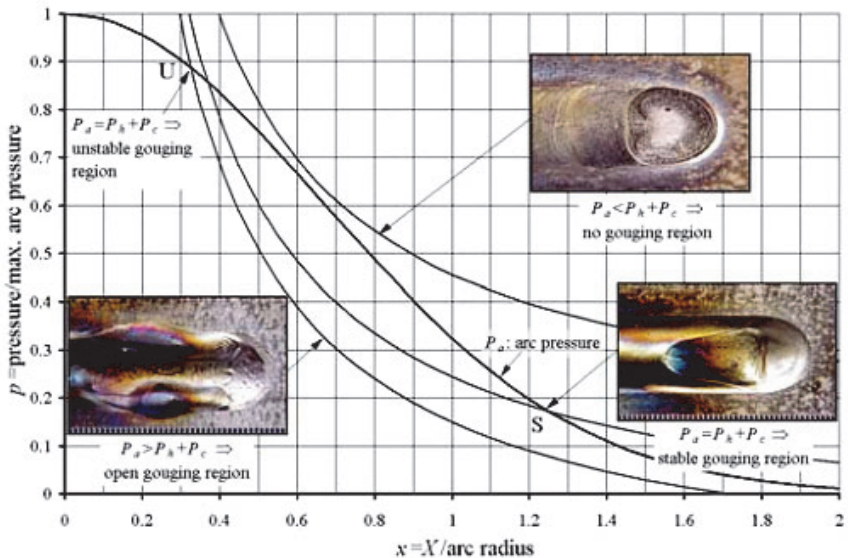


Рис. 1.2. Зависимости отношения давления к относительному смещению анодного пятна [15]

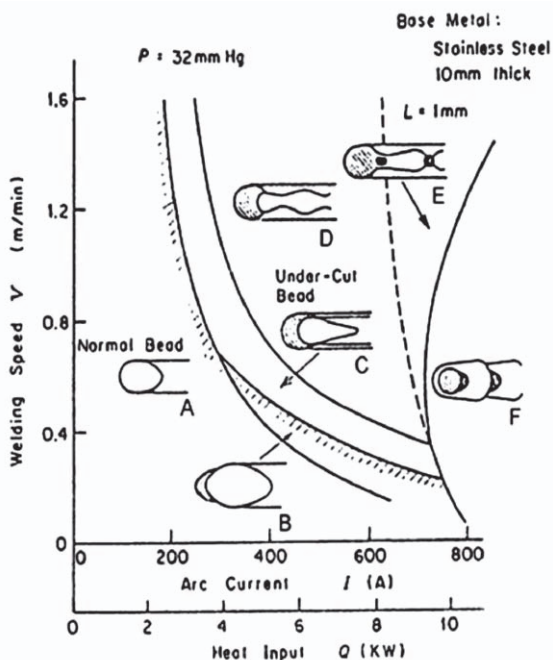


Рис. 1.3. Влияние скорости и тока сварки на формирование шва [15]

### 1.3. Применение активирующих флюсов

Для увеличения проплавляющей способности дуги при аргодуговой сварке сталей применяют активирующие флюсы (АФ) [16]. Одним из механизмов увеличения глубины проплавления при использовании АФ является сжатие столба дуги и уменьшение сечения ее активного пятна. Применение АФ повышает проплавляющую способность дуги в 1,5–2 раза и позволяет избежать разделки кромок при толщинах 8–10 мм. В своей работе Е. А. Демин, В. А. Храмушин [17] установили, что в процессе отработки технологии использования активирующих флюсов при толщинах свариваемых изделий более 8–10 мм эффект увеличения глубины проплавления отсутствует. Также отмечено, что верхний предел области наиболее эффективного применения флюсов по току сварки ограничен величинами 250–280 А.

Вопросы расширения области эффективного применения активирующих флюсов, с целью повышения производительности процесса сварки, рассмотрены в [18]. Расчетом было установлено, что активирующие флюсы при условии, что степень сжатия столба дуги не зависит от величины сварочного тока, могут способ-

ствовать увеличению глубины проплавления до толщины изделия 20–22 мм. Эта величина является теоретической границей применимости активирующих флюсов.

Экспериментально в [18] было установлено, что с увеличением тока сварки степень сжатия столба и анодного пятна дуги с активирующим флюсом уменьшается быстрее, чем те же параметры для дуги без флюса. Также определено, что пары активирующего флюса транспортируются в столб дуги, околодуговым тороидальным вихрем, вызывая увеличение степени её сжатия. Утверждалось, что заглупление дуги, горящей в парах активирующего флюса, в сварочную ванну, способствует увеличению глубины проплавления в 1,5–2 раза по сравнению с заглупленной дугой без флюса, вследствие ограничения размеров околодугового вихря и увеличения количества паров флюса в дуге.

Влияние АФ на провар изделия является комплексным, включая механизмы сжатия дуги, снижения сил поверхностного натяжения жидкости сварочной ванны, что приводит к повышению погружения анодного пятна дуги в металл. Применение АФ дает возможность выполнения стыковых соединений высокопрочных среднелегированных, высоколегированных аустенитно и мартенситностареющих сталей толщиной до 16 мм без разделки кромок с полным проплавлением за один проход. Однако проблема нанесения стабильного слоя активирующего флюса на стык и ограничения по пространственному положению сварки не способствовали широкому распространению данного способа сварки.

#### **1.4. Сварка заглупленной и проникающей дугой**

Одной из разновидностей сварки вольфрамовым электродом является сварка погруженной дугой [1, 19], которая заключается в том, что конец электрода расположен ниже поверхности свариваемого материала. При увеличении расхода защитного газа уменьшается поперечное сечение дуги, а ее температура повышается. Давление защитного газа и дуги, оттесняя из-под дуги расплавленный металл, способствует заглуплению дуги в основной металл. В результате глубина провара существенно увеличивается. При толщине металла до 10 мм поток плазмы может создавать в сварочной ванне отверстие с выходом струи на обратную сторону соединения. Металл, оплавленный на передней кромке, перемещается в хвостовую часть ванны и, кристаллизуясь, образует шов. Благодаря горению дуги ниже верхней поверхности основного металла шов имеет бочкообразную форму. Утверждается, что этим способом без разделки кромок за один проход можно сваривать металл толщиной до 30 мм при зазоре между кромками 6–10 мм. Для сварки применяются электроды большого диаметра, например, 9,5 мм для сварки при токе 900 А, и расход газа при этом составляет приблизительно 38 л/мин [19].



Однако из-за высокого давления дуги и турбулентности, генерируемой в ванне сварного шва, при работе на высоких токах наблюдаются серьезные дефекты, такие как пористость и растрескивание шва.

В качестве еще одного недостатка стоит отметить то, что для сварки погруженной дугой необходимо применение специальных горелок, так как большинство сварочных горелок для аргодуговой сварки рассчитаны на ток 350–500 А, в то время как сварка погруженной дугой осуществляется на токах 500–1200 А.

При способе сварки проникающей дугой с применением заостренного вольфрамового электрода используется сочетание острой заточки конца вольфрамового электрода и высоких значений сварочного тока [1]. В результате возрастают плотность сварочного тока, скорость и давление плазменных потоков, направленных от катода к аноду, и обеспечиваются условия для образования под дугой сварочного кратера на передней кромке сварочной ванны. Этот процесс применяют для однопроходной сварки стыковых соединений без разделки кромок в нижнем положении из высоколегированных сталей толщиной 3–8 мм и титановых сплавов толщиной до 10 мм.

При сварке на токах до 400 А применяют вольфрамовые электроды диаметром 5–6 мм с углом заточки 30–60°, на токах 400–600 А диаметр электрода должен быть увеличен до 8–10 мм. Диаметр притупления электрода лежит в пределах 0,3–1,0 мм.

В таблице 1.4 приведен анализ режимов сварки высоколегированной стали при допущении, что удельная эффективная мощность составляла  $q_v = 7,0$  Вт/А.

Таблица 1.4

Режимы сварки проникающей дугой и их анализ

Толщина металла, мм	Сварочный ток, А	Скорость сварки, см/с	Скорость соединения, см <sup>2</sup> /с	Удельная энергия сварки, кДж/см <sup>2</sup>
4,0	400–420	0,97–1,11	0,42	6,8
6,0	550–570	1,0	0,6	6,5

С увеличением свариваемой толщины в 1,5 раза вырос сварочный ток и скорость сварки, в то время как и ее удельная энергия почти не изменились. Это обусловлено тем, что при таком способе сварки эффективная мощность почти равномерно вводится по толщине стыка. Скорость образования соединения увеличивается в 4–6 раз по сравнению с обычной АРДС. Для расчета температур в зоне термического влияния для данного способа хорошо подходит схема линейного движущегося с ограниченной скоростью источника тепла [8].

В работе [1] отмечены такие достоинства сварки проникающей дугой, как высокая стабильность сквозного проплавления во всех пространственных по-

ложениях, малая чувствительность к неточностям сборки соединяемых элементов, высокая скорость сварки, возможность формирования шва на весу без подкладки с обратной стороны.

Применение данного способа при сварке корня шва трубы диаметром 1420 мм с увеличенным притуплением кромок до 3–4 мм позволило получить скорость образования соединения при сварке  $J = 0,2 \text{ см}^2/\text{с}$ , что в 4 раза превышает показатели ручной сварки покрытыми электродами.

Среди распространенных электродуговых способов обработки металлов широкое применение находят технологии, основанные на использовании сжатой дуги [20; 21]. Преимуществами сжатой дуги по сравнению со свободной является возможность гибкого регулирования тепловых и силовых характеристик дуги, увеличение диапазонов регулирования. Новые параметры сжатой дуги (диаметр и длина канала сопла, расход плазмообразующего газа) в разной степени влияют на эти характеристики, что позволяет найти оптимальные значения. Важным преимуществом является также повышение пространственной устойчивости дуги. Сжатая дуга обеспечивает полное проплавление металлов толщиной от 8 до 12 мм без разделки кромок. В этом случае также используется проникающая дуга. Качество получаемых сварных соединений одинаково с качеством швов, получаемых при АРДС.

### 1.5. Сварка трехфазной дугой

Для сварки алюминиевых сплавов применяют трехфазную дугу с вольфрамовыми электродами [22]. Для реализации возможностей трехфазной дуги необходим источник с несимметричной схемой питания и регулированием линейных токов, что позволяет осуществить изменение в требуемых диапазонах фазных токов, фазных мощностей и соотношение между ними.

Технологическим преимуществом трехфазной дуги является возможность получить отношение тока в изделии к току в электродах до  $K_T = 1,73$ . В этом случае при токе в изделии 500 А диаметры вольфрамовых электродов 6 мм, в то время как при однофазной дуге потребовался бы электрод диаметром 10 мм. Поэтому масса сварочной горелки для ручной сварки трехфазной дугой меньше, чем для сварки однофазной дугой [22; 23].

В трехфазной дуге одновременно могут гореть не более двух дуг. По видимому, из-за постоянного зажигания и гашения дуг плотность теплового потока на изделии и максимальное давление трехфазной дуги ниже, чем у однофазной дуги. Это позволяет дополнительно повесить ток в изделие без нарушения формирования шва, наблюдаемого при сварке высоколегированных сталей и алюминиевых сплавов.

В [24] экспериментально было установлено, что при сварке трехфазной дугой листов  $\delta < 30$  мм удается поддержать глубину ванны 18–22 мм, что обеспечивает высокую скорость сварки и исключает образование окисных пленок в шве. Дальнейшее углубление ванны в результате увеличения мощности теплового потока нарушает динамическое равновесие сил, действующих на жидкий металл в хвостовой части ванны. Вследствие этого ванна бурлит и на поверхности шва образуется много окислов, наблюдается образование таких дефектов, как подрезы, грубая чешуйчатость, наплывы. Во избежание бурления необходимо сварочную ванну наклонять под углом 10–25°, то есть вести сварку на подъем.

Также в [24] было установлено, что при сварке глубоким проплавлением наиболее целесообразно располагать электроды в плоскости стыка друг за другом, что на 35–40 % увеличивает глубину проплавления. При сварке углом вперед и наклоне более 5–7° глубина проплавления уменьшается, а формирование шва ухудшается. При сварке углом назад внешний вид шва немного улучшается, однако проплавление также уменьшается, по-видимому, из-за удлинения сварочной ванны.

Использование трехфазной дуги позволяет существенно повысить производительность труда и качество соединений при толщине листов алюминиевых сплавов до 20 мм. Однако в настоящий момент на рынке нет доступных, серийно выпускаемых сварочных источников питания, вследствие чего данный способ до сих пор не нашел широкого применения на практике. Применение этого способа для сварки высоколегированных сталей сталкивается с трудностями обеспечения стабильного повторного зажигания зависимых дуг.

Трехфазная дуга в аргоне была исследована также в сжатом варианте [52]. Для нее характерна высокая степень асимметрии межэлектродной и зависимой дуг. Тем не менее это не явилось препятствием для получения высоких значений отношений тока в изделии к токам в электродах. Кроме того, межэлектродная дуга с успехом может использоваться в качестве дежурной, а сопло не участвует в зажигании дуги.

## 1.6. Тандемная сварка

Сварка несколькими дугами с вольфрамовыми электродами, расположенными вдоль линии шва, является эффективным способом получения швов без подреза при высоких скоростях сварки [1]. Число электродов выбирается в зависимости от толщины металла и необходимой скорости сварки. На практике, как правило, используются двух- и трехэлектродные горелки. Расстояние между электродами устанавливается в пределах 15–30 мм. Чем ближе расположены электро-

ды, тем выше концентрация нагрева и скорость сварки. Минимальное расстояние определяется из условий устойчивого горения сварочных дуг, которые под действием электромагнитных сил взаимно притягиваются и искривляются.

В таблице 1.5 приведены режимы трехдуговой сварки продольного шва труб из высоколегированной стали и анализ энергетической эффективности процесса. В расчетах эффективной мощности принимали удельную эффективную мощность  $q_v = 7,0 \text{ Вт/А}$ , а токи суммировали.

Из расчетных данных видно, что по эффективности данный способ близок к способу сварки проникающей дугой, что в несколько раз эффективнее АДС. Для сварки металла толщиной 4 мм в таблице 1.5 приводятся меньшие токи, что привело к существенному снижению скорости образования соединения сварки и ее энергетической эффективности.

Таблица 1.5

Энергетические характеристики трехдуговой сварки

Толщина стенки, мм	Сварочный ток, А			Скорость сварки, см/с	Скорость соединения, см <sup>2</sup> /с	Удельная энергия, кДж/см <sup>2</sup>
	1-я дуга	2-я дуга	3-я дуга			
3,0	275	280	310	3,33	1,0	6,06
4,0	250	150	140	1,39	0,56	6,80

Преимуществом тандемного способа (рис. 1.4) является небольшая сила тока при работе на одну дугу с одновременным обеспечением высокой производительности процесса за счет одновременной работы двух дуг. Изучением процесса и технологии тандемной сварки занимались китайские ученые Х.-S. Leng, G.-J. Zhang и L. Wu [27].

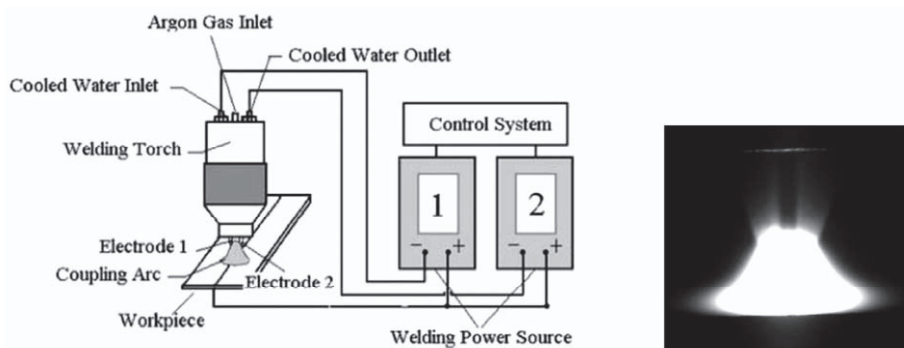


Рис. 1.4. Схема двухдугового тандемного процесса