

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование кафедры)

22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки)

**«Сварка и пайка новых металлических и неметаллических
неорганических материалов»**

(направленность (профиль/специализация)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: «Современные достижения и технологические возможности двухдуговых и двухэлектродных способов автоматической сварки»

Студент(ка) К.Ю. НОВИКОВ

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель В.П. Сидоров

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты В.Г. Виткалов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы: д.т.н, профессор А.И. Ковтунов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« » 20 Г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н, профессор В.В. Ельцов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« » 20 Г.

Тольятти 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА	
1.1 Преимущества и развитие двухдуговой сварки в защитных газах	7
1.2 Повышение эффективности двухдуговой сварки	12
1.3 Технологические возможности двухдуговой сварки	15
1.4 Общая постановка проблемы	23
1.4 Выводы по первой главе и задачи диссертационного исследования	25
2 СОВРЕМЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ДВУХДУГОВОЙ СВАРКИ	
2.1 Преимущества и область применения	27
2.2 Сущность процесса	30
2.3 Источники питания сварочной дуги	35
2.4 Устройства подачи проволоки	39
2.5 Сварочная горелка	41
2.6 Программное обеспечение	43
2.7 Скорость сварки и производительность наплавки	44
2.8 Перспективы применения технологии TimeTwin	46
2.9 Заключение по второму разделу	50
3 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВУХДУГОВОЙ СВАРКИ	
3.1 Описание технического решения	52
3.2 Методика определения химического состава	

металла шва	55
3.3 Методика экспериментальной сварки	56
3.4 Выводы по третьему разделу	60
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	62
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	64

ВВЕДЕНИЕ

Сварочное оборудование и сами способы сварки в настоящий момент продолжают непрерывно совершенствоваться в направлении повышения производительности и стабильности качества сварки. Достаточно широкое распространение получил зарекомендовавший себя способ сварки с использованием нескольких электродов, которые горят в одну сварочную ванну. Использование нескольких электродов предполагает, что они находятся в непосредственной близости друг от друга, это приводит к появлению такого отрицательного явления, как взаимодействие магнитных полей от каждого электрода, нарушению стабильности горения дуги и ухудшению качества сварки. В настоящее время существует два пути одновременного использования нескольких электродов при сварке – это сварка спаренными электродами и двухдуговая сварка.

При сварке спаренными электродами [1, 2] сварку производят двумя электродами, которые соединены между собой. Сначала сварочная дуга горит между свариваемым изделием и одним из электродов, далее этот электрод оплавляється и укорачивается, и дуга переходит на соседний электрод. Таким образом, дуга попеременно горит то на одном, то на другом электроде. Поскольку происходит подогрев соседнего электрода от горячей дуги, то повышается производительность сварки. Также следует учесть, что уменьшаются потери на смену электродов, что также повышает производительность сварки. При использовании спаренных электродов можно увеличить сварочный ток, что также повышает производительность сварки. Следует ожидать уменьшения зоны термического влияния за счёт снижения теплопередачи к сварочной ванне [3]. Использование спаренного электрода позволяет расширить возможности управления процессом сварки за счёт регулирования состава [17] и сечения сварочных электродов [4, 5]. В отличие от аппаратов для двухдуговой сварки, которые предусматривают

наличие источников питания для каждого электрода, аппараты для сварки спаренными электродами менее громоздки и намного дешевле. Также следует отметить, что при сварке в ограниченном пространстве доступ к месту сварки проще при использовании спаренных электродов. Основной проблемой, которая возникает при сварке спаренными электродами, является необходимость устранения магнитного взаимодействия электродов и обеспечение стабильного и одинакового подвода сварочного тока к каждому электроду.

При двухдуговой сварке питание каждого электрода производят от отдельного источника. Это существенно расширяет возможности способа за счёт независимого управления горения дуги на каждом электроде. В частности, становится возможным производить сварку закаливаемых сталей без предварительного подогрева [6]. Взаимное влияние магнитных полей от двух горящих дуг может быть снижено путём соответствующего управления сварочным током на каждом электроде. Как показала практика, использование двухдуговой сварки позволяет существенно повысить производительность и качество выполняемых соединений и с успехом применяется при строительстве магистральных трубопроводов [7]. Независимое управление горением дуг позволяет успешно бороться с образованием трещин при сварке высокопрочных среднелегированных сталей [8, 9, 10]. Использование двухдуговой сварки позволяет добиваться стабильного качества сварных швов при узкой разделке кромок [11, 12]. При двухэлектродной сварке в защитных газах приходится бороться с повышенным разбрызгиванием металла, которое вызывается блужданием дуги и силами реактивного горения паров металла [13, 14].

Применение двухдуговой сварки делает возможным использование одновременное использование нескольких способов сварки, например, сочетание сварки плавящимся и неплавящимся электродом, когда одна дуга горит между неплавящимся электродом и изделием, а вторая дуга горит между плавящимся электродом и изделием [15, 16]. Для осуществления

такой комбинированной сварки требуется формирование специфических импульсов напряжения, соблюдение высоких требований к поддержанию параметров режима сварки и, особенно, скорости подачи сварочной проволоки.

В настоящее время достигнут предел производительности механизированной сварки в углекислом газе, который составляет 3,5...4,0 кг/час [8]. Поэтому совершенствовать технологию сварки можно только за счёт внедрения новых перспективных решений, направленных на повышение производительности и стабильности качества сварки. Может представлять перспективным замена дуговых способов сварки такими наукоёмкими технологиями, как плазменная сварка, лазерная сварка, электронно-лучевая сварка. Однако применение таких высококонцентрированных источников энергии требует существенной перестройки всего производства – повышения культуры производства, замены основного и вспомогательного оборудования, переобучения персонала, повышения точности заготовительных и сборочных операций. Это приведёт к дополнительным затратам и снизит эффективность производства.

Повышение производительности и качества сварочных работ без значительных финансовых и интеллектуальных вливаний особенно актуально в условиях санкций и возможной экономической блокады Российской Федерации.

Таким образом, актуальна цель диссертационного исследования – повышение производительности и стабильности качества дуговой сварки за счёт научно обоснованных методов моделирования и управления процессом двухдуговой сварки.

1 ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

1.1 Преимущества и развитие двухдуговой сварки в защитных газах

Характерные термические циклы (рис. 1.1) при сварке однодуговой и двухдуговой сварке показывают более плавный спад температуры при двухдуговой сварке, что приведёт к уменьшению вероятности возникновения холодных трещин [9, 26].

На термическом цикле при двухдуговой сварке наблюдается более пологий и удлинённый участок охлаждения во время кристаллизации шва. Поэтому погонная энергия при двухдуговой сварке может быть увеличена по сравнению с однодуговой сваркой.

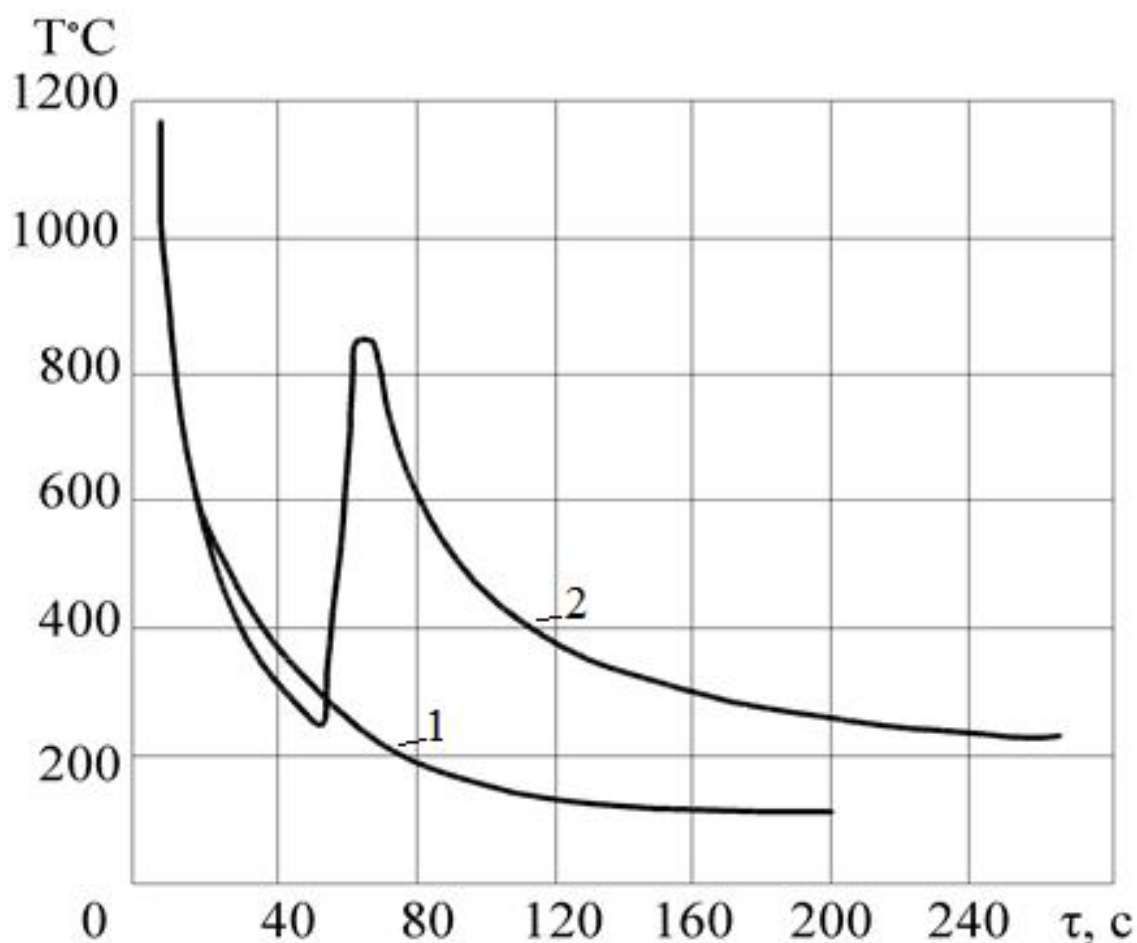


Рисунок 1.1 – Термический циклы при однодуговой (1) и двухдуговой (2) сварке

Двудуговая сварка позволяет:

- с одной стороны обеспечить замедленное охлаждение и высокую производительность сварки;
- с другой стороны, ограничить погонную энергию и исключить перегрев основного металла.

Исследованию двухдуговой сварки посвящены работы [8, 9, 24, 25], в которых рассмотрено регулирование термического цикла, чтобы снизить погонную энергию, изменить химический состав и структуру металла шва. За рубежом исследованию двухдуговой сварки посвящены работы [27, 28].

Классическая однодуговая сварка плавящимся электродом в защитных газах (рис. 1.2 а) позволяет осуществлять управление процессом сварки путём регулирования сварочного тока и скорости подачи электродной проволоки. Для расширения технологических возможностей сварки можно использовать двухдуговую сварку (рис. 1.2 б) или сварку с подачей дополнительной присадочной проволоки (рис. 1.2 в).

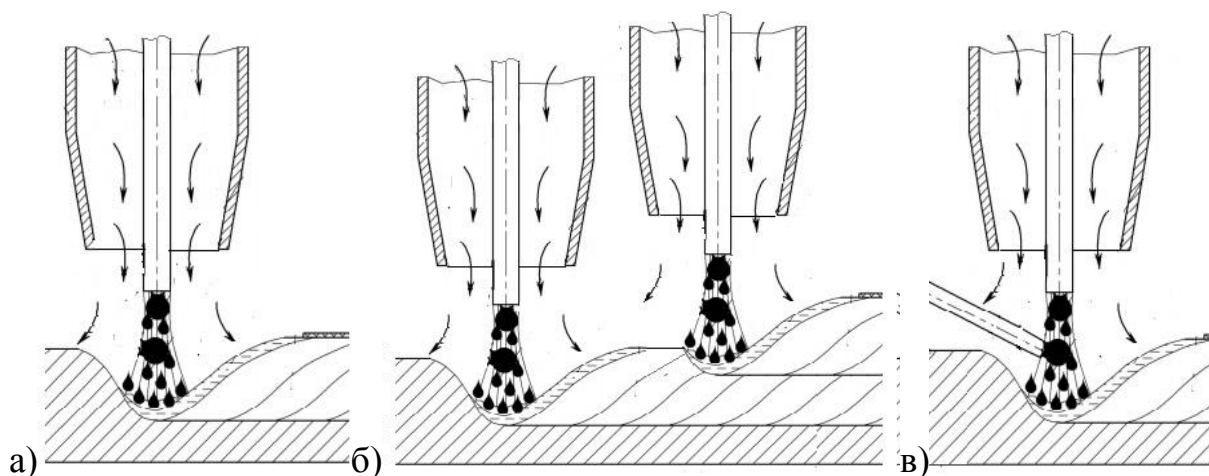


Рисунок 1.2 – Варианты сварки плавящимся электродом в защитных газах: а) классическая однодуговая сварка; б) двухдуговая сварка; в) сварка с дополнительной присадочной проволокой

Несмотря на то, что введение дополнительной присадочной проволоки обеспечивает благоприятное изменение химического состава сварного шва, позволяет управлять формой и размерами шва [29], он существенно уступает двухдуговой сварке, так как не позволяет управлять термическим циклом [10]. Кроме этого, двухдуговая сварка позволяет сочетать режимы для каждой дуги, различные диаметры и состав сварочных проволок, нагрев от второй дуги задерживает охлаждение металла в зоне термического влияния и препятствует образованию холодных трещин [30], что может регулироваться расстоянием между дугами (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Результаты сварки с применением одной и двух дуг образцов из стали 14ХНЗМДА [30]

№ опыта	Сварка	Расстояние между дугами, мм	Температура ЗТВ на границе сплавления в момент начала действия второй дуги, °С	Скорость охлаждения металла на границе сплавления, °С/с	Наличие трещин в ЗТВ
1	Однодуговая без подогрева	-	-	5,5	Есть
2	Однодуговая с подогревом	-	-	1,0	Нет
3	Двухдуговая	170	300	1,4	Есть
4	Двухдуговая	250	250	1,0	Нет
5	Двухдуговая	200	210	0,8	Нет

Двухдуговая сварка нашла широкое применение как в России, так и за рубежом [31, 32, 33]. Питание сварочных проводов может осуществляться двумя способами. При первом способе обе электродные проволоки соединены к общему токоподводу и получают питание от одного сварочного

источника (рис. 1.3 а) («двухэлектродная сварка», «сварка расщеплённым электродом»), при втором способе каждая электродная проволока имеет отдельный токоподвод и питается самостоятельным источником (рис. 1.3 б) («двухдуговая сварка»).

В связи с этим существует два подхода к организации процесса сварки. При осуществлении первого подхода обе сварочные проволоки поступают из одной горелки («twin-wire welding» или «double electrode welding») [28, 34] (рис. 1.4). Во втором случае каждая электродная проволока поступает из отдельной сварочной горелки (рис. 1.5) («tandem welding») [33].

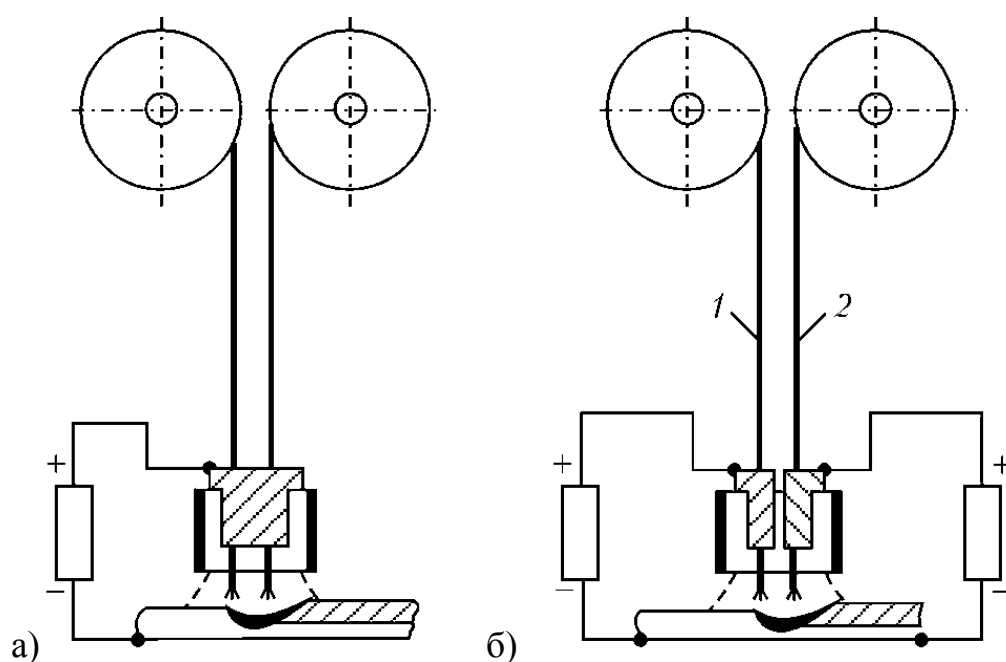


Рисунок 1.3 – Существующие схемы сварки: а) сварка расщеплённым электродом; б) сварка двумя дугами

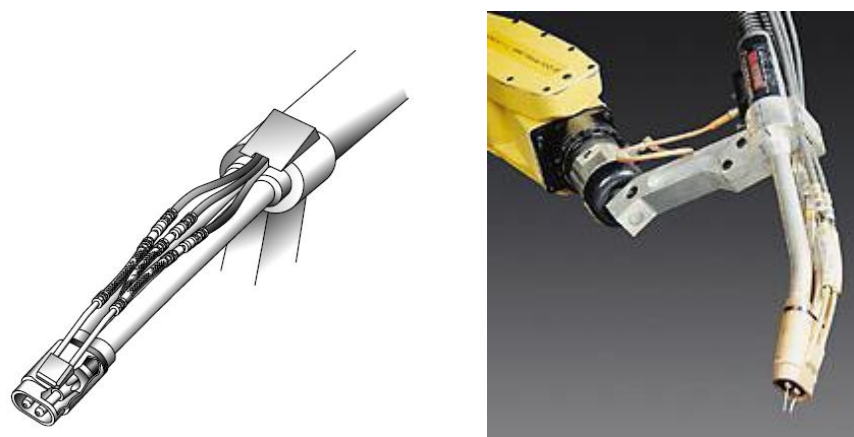


Рисунок 1.4 – Оборудование для двухэлектродной сварки

При двухэлектродной сварке («twin-wire welding») обе сварочные проволоки через общее сопло подаются в общую сварочную ванну, при этом обе проволоки запитываются от общего источника, а сами проволоки располагают как вдоль, так и поперёк стыка (рис. 1.6). В случае расположения проволок вдоль стыка можно получить максимальную глубину проплавления, а в случае расположения электродов поперёк стыка достигается максимальная ширина наплавки при минимальном проплавлении.



Рисунок 1.5 – Оборудование для двухдуговой тандемной сварки

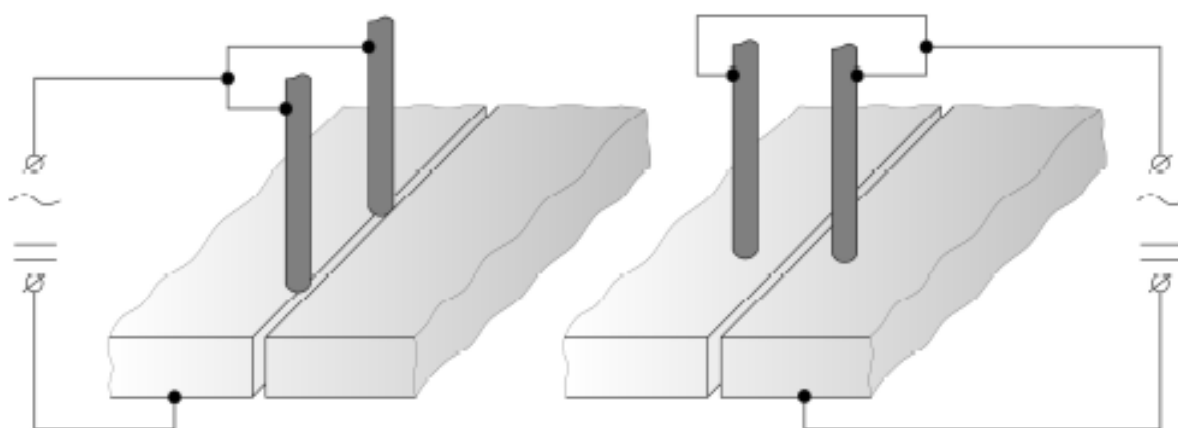


Рисунок 1.6 – Расположение сварочных проволок при двухэлектродной сварке вдоль стыка (а) и поперёк стыка (б)

При двухдуговой сварке через общее сопло проволоки электроизолированы друг от друга, сварочные дуги питаются от двух различных источников, электроизолированные токоподводы объединены в одном сопле, а сварочные дуги горят в общей ванне.

При двухдуговой тандемной сварке электродные проволоки подаются раздельно через две сварочные горелки, сварочные дуги питаются от двух источников и образуют две сварочные ванны.

Если сравнивать двухэлектродную и двухдуговую сварку, то вторая обеспечивает более широкие возможности для регулирования тепловложения в зону сварки, повышает стойкость металла шва к образованию горячих и холодных трещин, так как позволяет обеспечить необходимые скорости охлаждения [35, 36]. Кроме того, механические свойства соединений при двухдуговой сварке лучше [9]. Производительность процесса при двухдуговой сварке повышается до 6...9 кг/час [12].

1.2 Повышение эффективности двухдуговой сварки

Электромагнитное взаимодействие между дугами и интенсивное разбрызгивание электродного металла существенно ограничивают применение двухэлектродной сварки с защитой углекислым газом и питанием от одного источника [13, 14, 37].

Для повышения качества сварки плавящимся электродом в защитных газах необходимо обеспечить стабильное горение дуги и направленный перенос металла в сварочную ванну за счёт управления горением сварочной дуги [19]. Такие инверторные источники питания формируют импульсы тока и пауз в зависимости от скорости подачи электродной проволоки, которые строго соответствуют скорости плавления электрода [38], что позволяет получить мелкокапельный перенос электродного металла и уменьшить разбрызгивание.

В настоящее время широкое применение получило импульсное управление сварочной дугой (импульсно-дуговая сварка), которая используется в комбинированных, двухдуговых, гибридных и лазерно-дуговых процессах [20, 21, 22]. Фирмой Fronius предложен [23] гибридный двухдуговой процесс «CMT Twin», соединяющий преимущества импульсной дуги и переноса короткими замыканиями. Предложены и постоянно совершенствуются импульсно-дуговые процессы сварки, при которых происходит смена полярности базового тока дуги (MAG AC), что уменьшает тепловложение и устраняет магнитное «дутье». Импульсные процессы получили развитие в технологиях «Time Twin», «Pulse MIG/MAG-Laser» и «Time Twin Pulse MIG/MAG-Laser», где соответственно применены две импульсные дуги, импульсная дуга и лазер, три импульсные дуги и лазер.

Для построения источников питания для реализации импульсной двухдуговой сварки используют универсальные источники с микропроцессорным управлением током и подачей проволок [39, 40].

В оборудовании для импульсной двухдуговой сварки применяется специальный алгоритм поджигания сварочных дуг. Сначала происходит возбуждение одной дуги, затем второй. Современные источники обеспечивают сварочный ток до 1000 А при продолжительности включения ПВ=100 %, при этом скорость подачи электродных проволок до 800 м/час [31].

Для импульсной двухдуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах предложена установка [41], которая включает в себя: сварочный трансформатор, тиристорный силовой блок, блок управления, панели переключения режимов работы и управления импульсами тока. Существует возможность раздельной подачи одно- и разнополярных импульсов тока на сварочные электроды, обеспечения плавного нарастания и снижения сварочного тока. Сварка осуществляется проволоками диаметром 1,2...2,0 мм, подаваемыми от двух различных приводов. Такой источник обеспечивает устранение магнитного взаимодействия между дугами,

уменьшает ширину зоны термического влияния, позволяет устранить горячие и холодные трещины при сварке низколегированных сталей.

Как было показано ранее, производительность при двухдуговой сварке повышается с 3,5...4 кг/час для однодуговой сварки до 6...9 кг/час двухдуговой сварки. Дальнейшее повышение производительности сварочных операций должно осуществляться по пути оптимизации разделки кромок в сторону её уменьшения. Ранее проведённые исследования [42, 43] показали, что себестоимость условного одного метра сварного шва пропорциональна квадрату толщины свариваемого металла, в то же время при сварке в узкую разделку себестоимость растёт пропорционально толщине свариваемого металла. Поэтому сварка в узкую разделку или без разделки более экономически предпочтительна, а повышение производительности может достигнуть до трёх раз по сравнению с использованием обычной разделки. Сварка в защитных газах с применением узкой разделки уже применяется и доказала высокую эффективность при сварке магистральных газопроводов [44].

В настоящее время при использовании узкой разделки более широкое распространение получила сварка под флюсом [45, 46], так как она позволяет получать сварные соединения с благоприятной структурой и свойствами. Двухдуговая сварка применительно к узкой разделке получила меньшее распространение, что связано с повышением вероятности образования холодных трещин при переходе на узкую разделку [11]. Для повышения эффективности сварки предложено использовать импульсное воздействие дуги и поперечные колебания электродной проволоки в разделке [47], а также наклон горелок относительно свариваемых кромок [48].

Можно сформулировать проблемы, которые препятствуют повсеместному применению двухдуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах [12]. Первая группа трудностей связана со сложным доступом в зону сварки при узкой разделке (сложность или невозможность визуального контроля процесса сварки, сложность поддержания

оптимального вылета электрода, сложности газовой защиты корневого слоя шва). Вторая группа связана с обеспечением стабильности качества сварки (возникновение шлаковых карманов, повышение требований к точности сборки, необходимость компенсации деформаций свариваемых деталей, трудности формирования оптимальной зоны термического влияния).

Вследствие наличия этих трудностей могут появляться несплавления, глубокие подрезы, шлаковые карманы и повышенное разбрызгивание металла.

Получение сварных соединений стального качества возможно при условии правильного задания параметров технологии сварки, обеспечивающих выполнение заданных требований при разумных экономических затратах. Выбор оптимальных параметров технологического процесса может быть произведён на основе эксперимента или расчётным путём [49]. Первые работы по расчёту температурных полей с использованием движущихся концентрированных и распределённых источников тепла [50, 51] дали возможность интенсивного развития физико-математического моделирования сварочных процессов. В настоящее время разработано и применяется большое число аналитических моделей, что позволяет оценивать деформации и напряжения при сварке типовых конструкций [52]. Дальнейшее развитие методы моделирования получили с использованием численных методов [53]. Предложенные методы [54] позволяют моделировать процессы сварки источниками теплоты, которые разнесены в пространстве, как при двухдуговой сварке.

1.3 Технологические возможности двухдуговой сварки

В современном оборудовании для двухдуговой сварки предусмотрен прецизионный принцип поджига обеих дуг [39, 40, 58, 59]. Сначала импульс тока подают на один электрод. Возбуждение второй дуги происходит позже.

При необходимости процесс сварки может начинаться двумя дугами, горящими одновременно. Такие же технологические возможности имеются и при прекращении сварки. Параметры режимов сварки с момента поджига дуг до окончания процесса непрерывно контролирую и записывают. Управление основными блоками оборудования производят по тридцати и более программам. Инверторные источники питания при двухдуговой сварке и продолжительности включения ПВ=100 % обеспечивают номинальный сварочный ток до 1000 А. Скорость подачи электродных проволок достигает 800 м/ч.

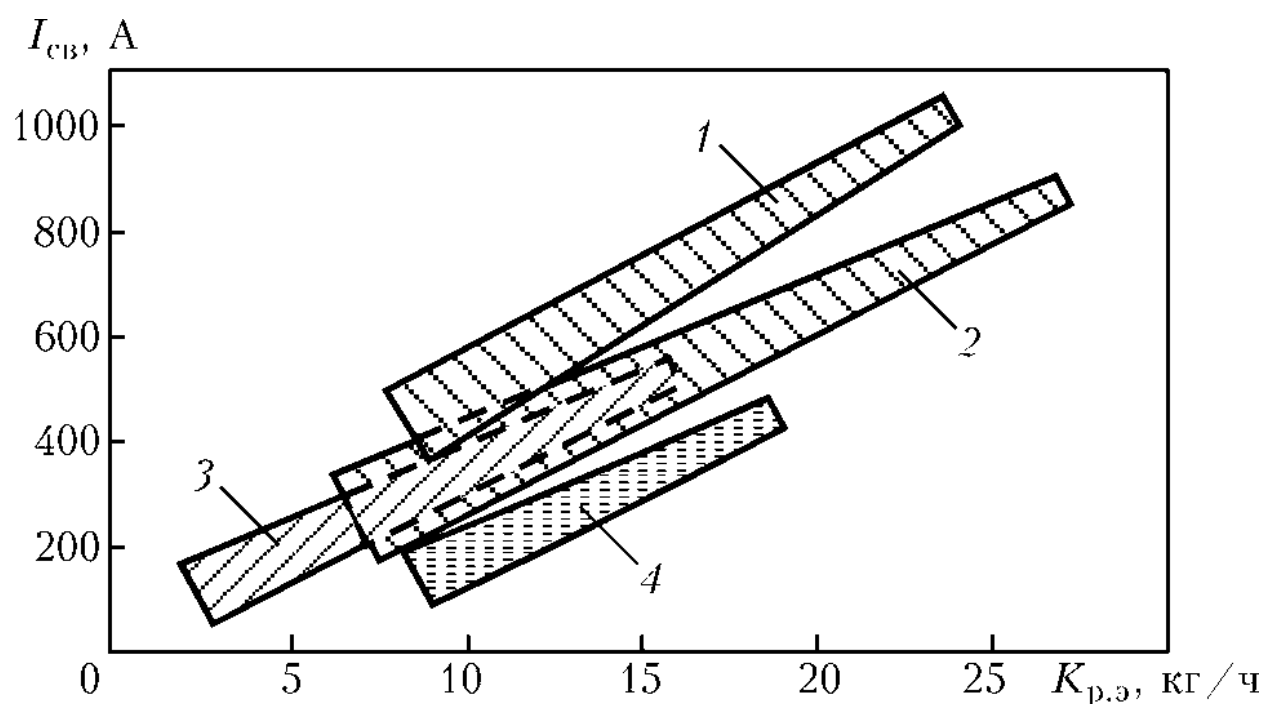
Коэффициент расплавления электродных проволок $K_{р.э}$ при двухдуговой сварке под флюсом равен 20...23 кг/ч на токах 800... 1000 А (рис. 1.7, область 1) [60]. В случае импульсной двухдуговой сварки в защитных газах он достигает 25 кг/ч и более при токах 800 А (рис. 1.7, область 2). Существенно меньшие значения коэффициентов расплавления электродных проволок сплошного сечения и порошковых имеют место при однодуговой сварке в защитных газах (рис. 1.7, области 3 и 4). Так, $K_{р.э}$ для проволоки сплошного сечения составляет 10...15 кг/ч при токах 300...500 А. При таком же значении $K_{р.э}$ для порошковых проволок требуется меньший сварочный ток [60].

За счет продольного расположения электродных проволок (рис. 1.8а) уменьшается ширина швов и увеличивается глубина проплавления основного металла [61]. Противоположные результаты получены в случае поперечного расположения электродных проволок (рис. 1.8в). При расположении электродных проволок под углом 45° к оси шва (рис. 1.8б) получают швы средней ширины и глубины проплавления, кроме того, уменьшается вероятность образования прожогов в стыковых и нахлесточных соединениях.

Фирма «Клосс» (Германия) разработала горелку для сварки плавящимся электродом в инертном и активном газах двумя проволоками. Сварочный ток подают от источника GLC 853 с компьютерной системой управления на импульсном и постоянном режимах (соответственно

$I_{св} < 1500$ А и $I_{св} < 850$ А). Скорость подачи обеих проволок регулируют раздельно. Скорость сварки металла толщиной 2...3 мм достигает 360 м/ч. На металле большей толщины при производительности расплавления 24 кг/ч возможно выполнение углового шва катетом 8 мм в один проход со скоростью 48 м/ч.

Система фирмы «Кука» (Германия) для дуговой роботизированной сварки в активном газе двумя электродными проволоками позволяет в 2 раза увеличить скорость сварки [62]. При этом одна из используемых проволок должна быть большего диаметра.



1 - двухдуговая сварка под флюсом;

2 – двухдуговая сварка в защитных газах;

3 – однодуговая сварка в защитных газах проволокой сплошного сечения;

4 - однодуговая сварка в защитных газах порошковой проволокой

Рисунок 1.7 – Значение коэффициента расплавления электродных проволок $K_{р.э}$ в зависимости от величины сварочного тока

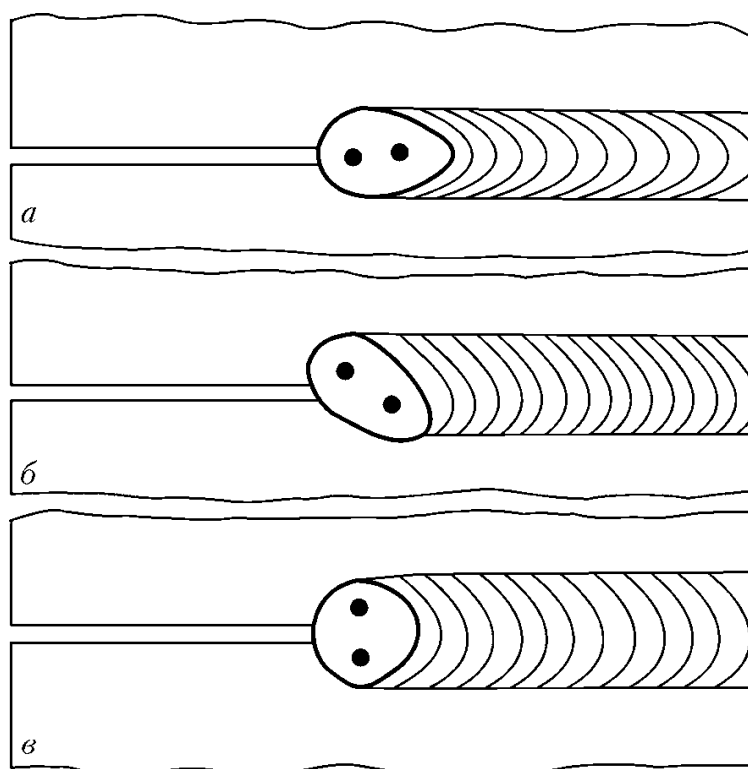


Рисунок 1.8 – Схема расположения электродных проволок при двухдуговой сварке: а) продольное; б) под углом 45°; в) поперечное

Эффективность дуговой сварки плавящимся электродом в инертном и активном газах различные авторы связывают с использованием двух расщепленных электродных проволок. Их одновременное расплавление увеличивает производительность сварочного процесса в 2 раза. Однако при этом возникает ряд серьезных проблем. Если вместо двухэлектродной сварки применить двухдуговую от двух отдельных источников тока, то разбрызгивание металла уменьшается. Кроме того, при высокой скорости сварки можно улучшить внешний вид соединений. В качестве источников питания рекомендуют два инвертора TPS 450 (сварочный ток составляет 900 А при ПВ = 100 %).

Для импульсной двухдуговой сварки плавящимися электродами в защитных газах создана установка на базе источника питания ОИ-126, состоящая из сварочного трансформатора, тиристорного силового блока, блока управления, панелей переключения режимов работы и распределения

импульсов тока [41]. Электрическая схема установки позволяет осуществлять раздельную подачу по заданной программе одно- и разполюсных импульсов тока на оба электрода и обеспечивает плавное нарастание и снижение сварочного тока. Подачу электродных проволок диаметром 1,2...2,0 мм выполняют с помощью раздельных приводов. По сравнению с традиционными технологиями выявлены следующие преимущества рассматриваемого процесса сварки: полное исключение электромагнитного взаимодействия между дугами, образующими общую ванну; уменьшение ширины зоны термического влияния (ЗТВ); качественное формирование швов без технологических подкладок; повышение хладостойкости металла сварных соединений низколегированных сталей повышенной прочности.

Технологические особенности двухдуговой сварки алюминиевых сплавов плавящимися электродами с применением двух импульсных источников питания TPS 2700 и TPS 450 производства австрийской фирмы «Фропиус» описаны в работе [47]. Показано, что при одинаковом сварочном токе на каждом из электродов двухдуговая сварка алюминиевых сплавов по сравнению с обычной однодуговой позволяет повысить глубину проплавления металла и уменьшить высоту выпуклости шва. По мнению авторов, двухдуговую импульсную сварку следует применять с целью предотвращения прожогов тонколистового металла при скоростной автоматизированной однопроводной сварке стыковых и замковых соединений. Этот способ сварки приемлем также для выполнения тавровых и нахлесточных соединений, когда необходимо получить большие катеты швов и требуется глубокое проплавление металла.

Импульсная двухдуговая сварка алюминиевых сплавов имеет следующие технологические особенности [47]: расход защитного газа – аргона до 15 л/мин; диаметр электродных проволок 1,2 мм; расстояние между проволоками 8...10 мм; частота импульсов тока 45...200 Гц; их длительность 1...3 мс и амплитуда 380... 520 А; скорость подачи проволоки

780 м/ч. Для сварки и наплавки литейных алюминиевых сплавов используют одновременно проволоки двух разных марок СвАК5 и Св-1201.

Трехдуговую сварку в защитных газах одним расщепленным вертикальным и одним наклонным электродами выполняли от двух отдельных источников питания (рис. 1.9). Такой процесс целесообразно применять при сварке стыковых швов для уменьшения глубины провара при выполнении первого слоя при наплавочных работах. Минимальное расстояние между дугами определяет длину и ширину сварочной ванны, а максимальное качество формирования швов и наплавленного металла. Различают две разновидности трехдуговой сварки в общую сварочную ванну и в отдельные ванны. В последнем случае соседняя дуга расплавляет уже закристаллизовавшийся слой, полученный с помощью предыдущей дуги [31].

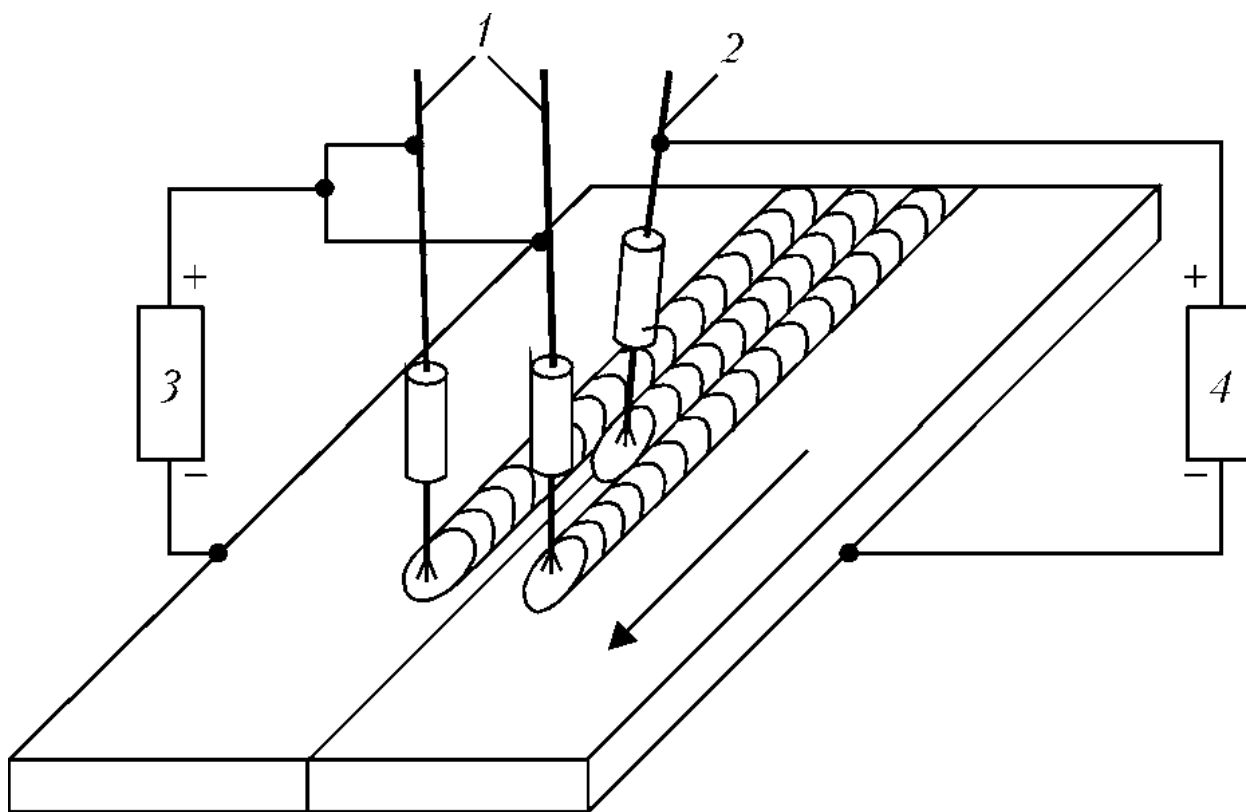


Рисунок 1.9 – Схема комбинированного процесса сварки в смеси газов $\text{Ar} + 20\% \text{CO}_2$ расщеплённым (1) и наклонным (2) электродами от двух источников питания (3 и 4)

Для повышения экономических показателей при строительстве нефте- и газопроводов в условиях севера Научно-техническим центром сварки Крепфильдского университета в Англии использована импульсная двухдуговая сварка плавящимся электродом в защитных газах [63]. Специалисты университета в качестве сварочного оборудования для данных целей выбрали систему, разработанную фирмой «Фропиус». Она включает источники питания TPS-4000R, устройства для подачи проволоки VR 1500 и специальные сварочные программы. Сварочные источники обеспечиваются питанием от дизель-генератора. Каждая сварочная установка оснащена двумя горелками с дугами, последовательно расположенными и находящимися друг от друга на расстоянии 70 мм. Сварка с использованием двух пар дуг позволяет выполнять кольцевые швы на скорости до 20 м/ч, в частности, при строительстве Аляскинского трубопровода. Для осуществления традиционной технологии однодуговой сварки требовалось 19 сварочных станций. Для выполнения двухдуговой сварки с использованием оборудования фирмы «Фрониус» необходимо только четыре станции, что обеспечивает экономию в 150 млн дол. США.

Сущность комбинированного плазменно-дугово-го процесса, предложенного в работе [64], состоит в том, что при подключении дополнительной дуги между плазмой и плавящимся электродом происходит перераспределение тока от источника питания плавящегося электрода, в результате чего увеличивается ток в плавящемся электроде, уменьшается тепловложение в основной металл и происходит более интенсивное расплавление электродной проволоки. При наличии дежурной дуги повышается стабильность горения промежуточной дуги между плазмотроном и проволокой. Однако для указанного процесса характерны нестабильная скорость плавления электродной проволоки, повышенное разбрызгивание металла и неблагоприятное формирование швов.

Перечисленных недостатков лишен процесс точечной плазменно-дуговой сварки с отдельным регулированием проплавления изделия и

заварки кратера [65]. Установлено [66], что оптимальные параметры режима сварки (сварочный ток, напряжение на дуге, расход плазмообразующего газа, время горения плазмы и дуги) должны быть заранее запрограммированы в зависимости от толщины свариваемого металла, диаметра электродной проволоки, расхода и типа защитного газа. Качественные нахлесточные соединения металла толщиной до 5 мм можно получить в результате сквозного проплавления верхнего листа плазмой и последующего сплавления его с нижним элементом за счет использования дуги с плавящимся электродом. Длительность чередующихся импульсов тока плазмы и дуги составляет 3...12 с.

В Германии разработана специализированная установка PSW-500 для точечной плазменной и дуговой сварки без использования присадочной проволоки [67]. Установка имеет существенные преимущества по сравнению с оборудованием для контактной точечной и лазерной сварки: меньшая стоимость оборудования и возможность одностороннего подхода к свариваемому изделию. Точечные швы получают за счет расплавления верхнего и нижнего элементов нахлесточного соединения. Плазменная дуга расплавляет деталь чередующимися импульсами тока. Специальная фокусировка дуги позволяет уменьшить ширину ЗТВ. Установка пригодна для сварки углеродистых и легированных сталей, алюминия, меди и их сплавов толщиной до 2,5 мм. Сварку можно производить вручную, автоматами и роботами. Роботизированная установка с устройством для точечной плазменной сварки успешно применяется при серийном изготовлении металлоконструкций, состоящих из полых гнутых и штампованных элементов [68].

В ИЭС им. Е.О. Патона разработан комбинированный способ двухдуговой сварки и наплавки, предусматривающий поочередное и раздельное формирование дуг при неплавящемся и плавящемся электродах с образованием общей ванны расплавленного металла [69]. Дугу с неплавящимся (вольфрамовым) электродом питают импульсами тока разной

полярности с преобладанием составляющей прямой полярности. Роль дуги на неплавящемся электроде сводится к проплавлению основного металла на заданную глубину. Под действием импульсов тока обратной полярности происходит расплавление плавящегося электрода и катодная очистка поверхности металла от оксидных плен. Отработана технология импульсной двухдуговой наплавки поршней из алюминиевых сплавов различных систем легирования, применяемых в автомобильных и тракторных двигателях внутреннего сгорания [70]. Легирование наплавленного металла обеспечивает существенное увеличение его износостойкости. Моторесурс наплавленных поршней повышается в 2,0...2,5 раза в сравнении с неупрочпепными поршнями.

Перечисленными примерами далеко не ограничиваются технологические возможности и сферы использования импульсной двухдуговой сварки. В перспективе следует ожидать новых разработок в области высокоэффективных тандем-процессов сварки и средств их реализации.

1.4 Общая постановка проблемы

Повышение производительности сварки и наплавки может быть достигнуто путём использования нескольких электродов, которые горят одновременно в одной сварочной ванне. Для этого требуется расположить сварочные электроды в непосредственной близости друг к другу. Малое расстояние между электродами вызывает взаимодействие магнитных полей, которые генерируются каждым электродом, что приводит к нарушению нормального процесса горения сварочных дуг и существенному ухудшению качества сварки [37].

Существует два подхода к организации сварки с применением нескольких сварочных электродов: двухдуговая сварка [31, 32, 33] и сварка спаренными электродами [1, 2].

В процессе двухдуговой сварки питание каждого электрода осуществляют от отдельного источника питания. Двухдуговая сварка имеет множество преимуществ благодаря простоте управления источниками, питающими каждый электрод. В процессе двухдуговой сварки магнитное взаимодействие между электродами может быть уменьшено за счёт сдвига по фазе токов, подводимых к электродам.

Использование при двухдуговой сварке двух отдельных источников питания приводит к повышению стоимости и сложности, увеличению массы и габаритных размеров аппаратуры для её осуществления. Поэтому в ряде случаев, например, при сварке в ограниченном пространстве, сварка спаренными электродами может оказаться более предпочтительной по сравнению с двухдуговой сваркой. Сварка спаренными электродами требует для своего осуществления одного источника питания, который питает оба электрода.

Преимуществом способов сварки спаренными электродами является то, что для данной величины входной мощности производительность сварки и наплавки может быть увеличена. В способах сварки спаренными электродами использование более одного электрода обеспечивает уменьшение диаметра электрода, что, в свою очередь, увеличивает плотность тока для каждого электрода. Увеличенная плотность тока позволяет увеличивать предварительный нагрев электрода, следовательно, может поддерживаться повышенная производительность наплавки при меньшей теплопередаче к сварочной ванне [3].

В источниках питания для сварки спаренными электродами выпрямление питающего дугу тока производили таким образом, чтобы одна дуга горела в положительном, а другая - в отрицательном полупериоде тока [55]. Такое устройство источников питания вызывает к сильное

электромагнитное взаимодействие между электродами. В целях уменьшения этого взаимодействия, приходится увеличивать расстояние между сварочными электродами, в результате чего затрудняется обеспечение плавления обоих электродов в одной сварочной ванне. Происходит разделение процессов сварки для каждого электрода, что нарушает процесс сварки.

Для уменьшения расстояния между электродами и гарантированного плавления обоих электродов в одну сварочную ванну предлагается питать спаренные проволоки через общий электропроводный контактный элемент [56]. Это позволит получить одинаковое напряжение дуги при плавлении обоих проволок.

Питание электродной проволоки через общий электропроводный контактный элемент доказало высокую эффективность при сварке спаренными электродами как при механизированной и автоматической сварке в защитных газах плавящимся электродом, так и для сварки под флюсом. Однако дальнейшее усовершенствование этого способа остаётся актуальным.

1.4 Выводы по первой главе и задачи диссертационного исследования

На основании проведённых литературных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1) Особенности процессов импульсной двухдуговой сварки плавящимися электродами в инертных газах и смесях газов определяются независимым и поочередным питанием дуг импульсами тока регулируемой амплитуды, длительности и частоты. Предусмотрена раздельная подача электродных проволок и горение дуг в общей сварочной ванне при продольном, наклонном либо поперечном расположении электродов.

2) Основой процессов импульсной двухдуговой сварки являются инверторные источники питания с синергетической системой управления параметрами режимов и двухэлектродной горелкой. Последнее позволяет плавно регулировать расстояние между осями токоподводящих мундштуков. Оптимальные режимы двухдуговой сварки заранее запрограммированы с учетом марки и диаметра электродной проволоки, расхода и состава защитного газа. Синергетическое управление в настоящее время реализовано только для импульсно-дуговой сварки плавящимися электродами в инертных газах и их смесях без коротких замыканий дугового промежутка.

3) Применительно к углеродистым и легированным сталям выявлены следующие технологические преимущества импульсной двухдуговой сварки [31]: увеличение глубины проплавления основного металла; уменьшение ширины ЗТВ; улучшение формирования швов на больших скоростях; повышение механических свойств сварных соединений. Недостатком импульсной двухдуговой сварки в защитных газах является повышенная излучательная способность дуг, а также более высокая стоимость сварочного оборудования и значительные затраты на его эксплуатацию и ремонт.

Как показал анализ литературы по теме исследования, в настоящий момент отсутствуют подходы к назначению параметров режима двухдуговой сварки, их допустимых значений и требований к поддержанию точности.

На основании проведенных литературных исследований можно сформулировать задачи диссертационного исследования:

- 1) проанализировать существующие способы поддержания стабильности качества при двухдуговой сварке;
- 2) предложить математическую модель формирования соединения при двухдуговой сварке и методику проверки её адекватности;
- 3) исследовать закономерности формирования температурного поля при двухдуговой сварке и предложить на их основе способ управления с пониженным вложением тепла в основной металл;
- 4) предложить способ сварки на основании проведенных исследований.

2 СОВРЕМЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ДВУХДУГОВОЙ СВАРКИ

2.1 Преимущества и область применения

Фирмой «Фрониус» разработан новый высокопроизводительный способ сварки двумя плавящимися параллельно расположенными электродами в защитном газе – Time Twin. При этом используются два источника, устройство для синхронизации их работы и тандем-горелка для подачи двух изолированных друг от друга проволок. По сравнению со способом сварки T.I.M.E. (сварка вчетырехкомпонентной смеси газов) Time Twin позволяет повысить производительность процесса сварки, причем с использованием стандартных газов. Кроме того, этот способ удобен для реализации в автоматизированных и механизированных процессах.

Time Twin значительно повышает скорость сварки и количество наплавленного металла при сварке плавящимся электродом в защитном газе. Товарный вид сварных соединений очень высокий, благодаря хорошей воспроизводимости процесса, низкой разбрызгиваемости металла, гладкой поверхности шва в верхней и корневой его части с плавным переходом к основному металлу.

Способ может использоваться как при сварке сталей (от нелегированных до высоколегированных), так и при сварке алюминия и его сплавов. Хороший провар, незначительные деформации, стабильное горение дуги, высокая скорость сварки, использование стандартных газов обеспечивают получение экономической выгоды и высокого качества.

Область применения определяется техническими характеристиками оборудования, формой разделки соединяемых кромок, чувствительностью свариваемых материалов к перегреву. Классические области применения способа Time Twin – производство транспортных средств, включая рельсовый подвижной состав, строительные машины и суда, производство

аппаратов, сосудов, стальных конструкций, машин и оборудования. При этом обеспечивается сварка продольных швов в нижнем положении в лодочку, горизонтальных угловых швов в нижнем положении и швов внахлестку при V- и X-разделке, а также наплавка (рис. 2.1, 2.2). Скорость сварки продольных швов на стали составляет до 250, а кольцевых — до 400 см/мин. Производительность наплавки — до 16 кг/ч. Алюминиевые сплавы сваривают со скоростью 250 см/мин при производительности наплавки 7 кг/ч.

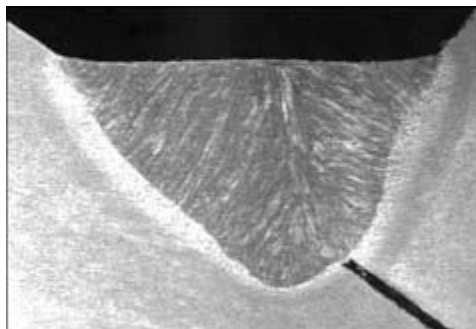


Рисунок 2.1 – Шлиф углового шва на продольной опоре двигателя, выполненного способом Time Twin

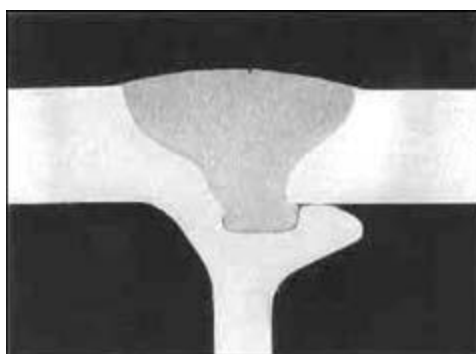


Рисунок 2.2 – Макрошлиф V-шва толщиной 8 мм, сваренного способом Time Twin за один проход

На заводе фирмы «MAN» в Пепдберге, выпускающем грузовые транспортные средства, используются два робота, оснащенные источниками питания фирмы «Фрониус» и водоохлаждаемыми сварочными горелками. Каждый робот в месяц сваривает до 4000 опор продольного рычага подвески из мелкозернистой строительной стали. Для сварки угловых швов применяется стандартная электродная проволока, например, Carbotil DIN EN 12534-G3 (NomolK000Sm43) диаметром 1,2 мм. Защитный газ Corgon 25 или

Corgon 18 (аргон соответственно с 25 или 18 % CO₂). При этом обеспечивается глубокий провар и малое разбрызгивание металла. Особое внимание инженеры фирмы «MAN» уделяют получению оптимальной геометрии шва и плавным переходам от шва к основному металлу (последующая механическая обработка не предусмотрена). По мнению потребителей, вместо 11,5 мин для сварки такой детали с использованием одной электродной проволоки в данном случае требуется 7,5 мин. На заводе способ Time Twin используется только для получения протяженных сварных швов. За год инвестиции на внедрение технологии Time Twin окупились в четырехкратном размере.

По словам Ю. Хвальчика, инженера-сварщика и руководителя отдела фирмы ALSTROM LHB в Зальцгиттере, при производстве алюминиевых конструкций вагонов скоростного поезда ICE фирмой выдвигаются довольно высокие требования к качеству сварных швов, а значит и к соответствующим производственным технологиям. В условиях глобальной конкуренции такое же значение придается и экономическим аспектам. Примером резкого повышения производительности при гарантии качества и надежности процесса может служить способ сварки Time Twin. При сварке элементов пола, крыши и боковых панелей вагонов ICE длиной до 25 м достигается средняя скорость сварки 1,2...1,8 м/мин. Это в 2...3 раза выше, чем при обычной сварке в инертном газе одной электродной проволокой. Кроме того, при толщине профиля 8 мм необходима сварка одного валика, в то время, как при использовании одной проволоки, необходимо 2...3 прохода. В зависимости от толщины шва экономия составляет 25...75 %.

Кроме «классической сварки», использование двух проволок открывает дополнительные возможности. Один из субподрядчиков, работающий в автомобильной промышленности, реализовал с помощью фирмы «Фрониус» свою инновационную идею и значительно повысил конкурентоспособность выпускаемой им продукции. Молодой предприниматель Б. Рус производит в Рансбах-Баумбахе наряду с прочими изделиями тормозные цилиндры. При

этом важно как соблюдение точных допусков с тем, чтобы подсоединяемые цилиндры точно подходили к системе, так и точное позиционирование привариваемых трубок, положение которых должно оставаться неизменным. Рус установил на работе две сварочные головки и обеспечил сведение двух соединительных операций в одну. Ранее закрепленные тормозные цилиндры нужно было после прихватки расположить по-новому для нанесения припоя. Благодаря горелке Robacta Drive Twin 500/900 удалось исключить дополнительное перемещение. С помощью горелки попеременно выполняют сварку одной электродной проволокой, а затем обеспечивают подачу припоя в измененном рабочем положении (рис. 2.3). При этом сокращается не только время сварки, но и достигается высокое качество соединения. Процесс контролирует «Q-Master» — система контроля в реальном времени, которая позволяет получить необходимую документацию, гарантирующую ответственность за продукцию.



Рисунок 2.3 – Водоохлаждаемая горелка Robacta Drive Twin в положении для пайки тормозных цилиндров

2.2 Сущность процесса

Если в процессе механизированной сварки плавящимся электродом в среде защитного газа одновременно используются два проволоочных электрода, фактически возможны два варианта организации процесса (рис. 2.4).

В первом варианте (рис. 2.4 а) в процессе сварки двумя проволоками два проволочных электрода направляются совместно через один контактный наконечник; таким образом, они обладают одинаковым электрическим потенциалом. Во втором варианте (рис. 2.4 б) в случае тандемной сварки, напротив, для каждого электрода предусмотрен отдельный контактный наконечник. Контактные наконечники электрически изолированы друг от друга. Таким образом, можно обеспечить разные электрические потенциалы двух электродов.

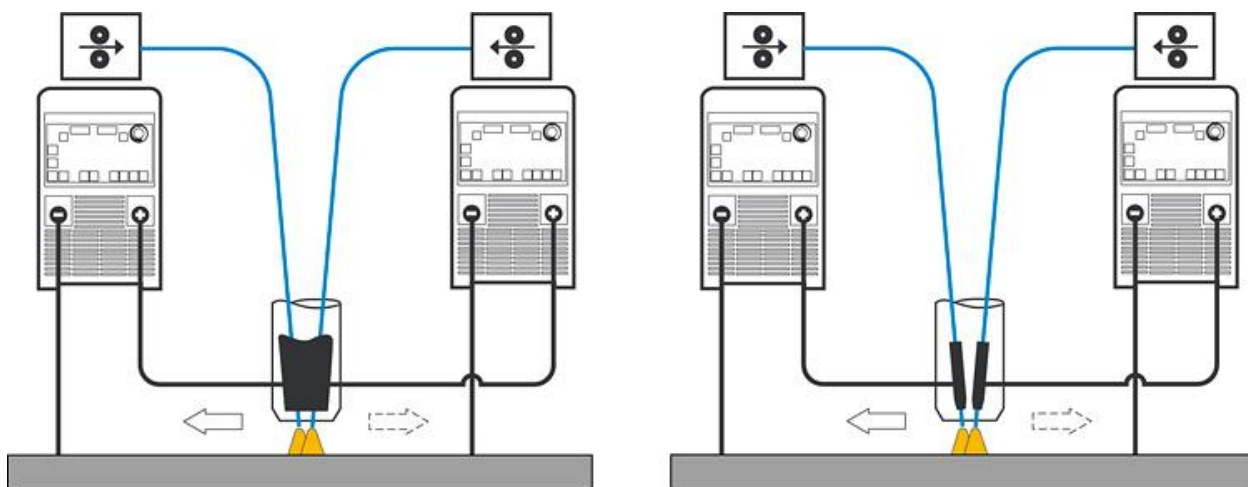


Рисунок 2.4 - Сварка двумя проволоками с общим контактным наконечником (слева) и тандемная сварка (справа)

Технология TimeTwin компании Fronius представляет собой технологию тандемной сварки. Благодаря тому, что два электрода электроизолированы, генерируется две электрических дуги, которые можно регулировать и оптимизировать независимо друг от друга. Как производительность, так и дополнительные параметры, такие, как, например, длина двух электрических дуг могут регулироваться по отдельности, что дает возможность обеспечить стабильность электрической дуги и идеальное отделение капли на обеих электрических дугах.

Еще одним преимуществом данного принципа является то, что любой из двух электродов может быть ведущим или ведомым. Это означает, что электрод, играющий ведущую роль в процессе сварки, можно заменить

ведомым. Это позволяет осуществлять сварку в обоих направлениях и это, в свою очередь, дает возможность сократить время цикла. Кроме того, также существует возможность использования только одной электрической дуги, т.е. осуществления сварки одиночным электродом.

Фундаментальные и прикладные исследования, в частности, в области переноса металла лежат в основе современных технологий дуговой сварки. Дальнейшее их совершенствование связано с разработкой источников тока с микропроцессорным управлением. Этому направлению в полной мере отвечает способ Time Twin, при котором две электродные проволоки синхронно плавятся в общей сварочной ванне. После успешного применения МАГ-сварки нелегированной и легированной сталей специалисты фирмы «Фрониус» разработали способ МИГ-сварки для алюминиевых сплавов. Успеху способствовала замена двухэлектродной сварки с общим токоподводом на двухэлектродную сварку с отдельными токоподводами (рис. 2.5).

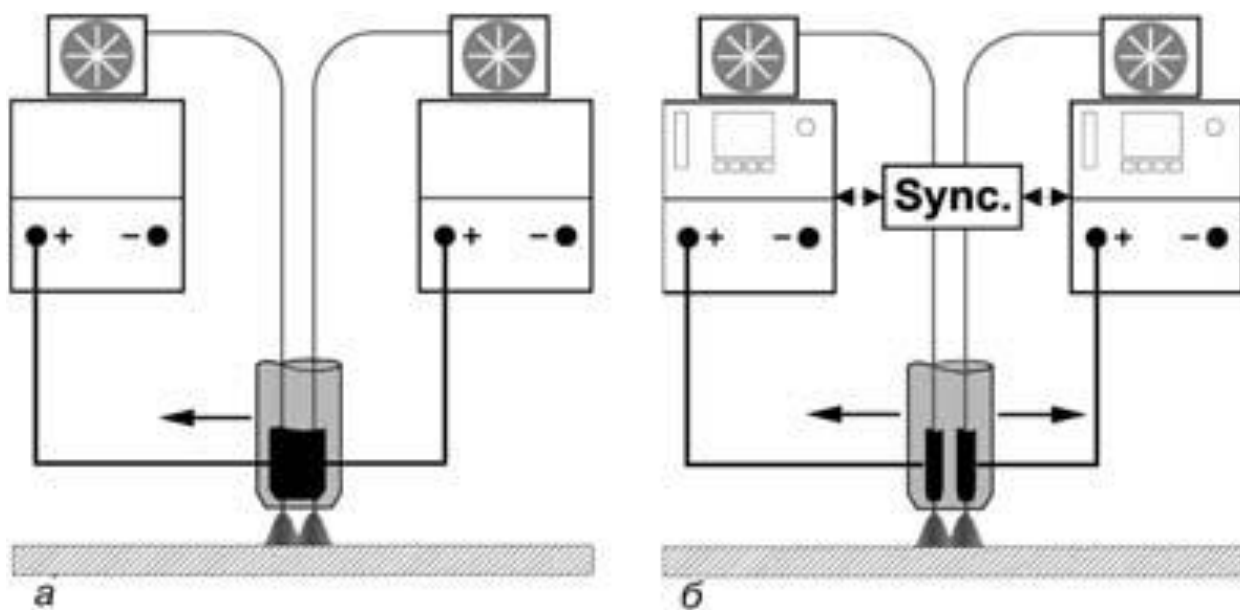


Рисунок 2.5 – Принципиальные схемы сварки двумя проволоками с общим (а) и отдельным (б) токоподводом

При двухэлектродной сварке с общим токоподводом периодически наблюдаются короткие замыкания между электродной проволокой и ванной. При этом гаснет дуга и на второй проволоке. Высокая плотность тока на

первой проволоке приводит к взрыву перемычки, что вызывает повышенное разбрызгивание металла, нестабильность процесса и колебание длины дуг. При увеличении длины дуг снижается разбрызгивание и повышается стабильность процесса, но при этом снижается скорость сварки. Благодаря применению горелки с двумя изолированными токоподводящими мундштуками для каждой проволоки отмеченные недостатки устраняются. Этому способствует также наличие отдельных источников питания, регулируемых блоков подачи каждой проволоки. Подача питания на каждую из дуг регулируется с помощью синхронизирующего устройства (рис. 2.6).

Важной особенностью процесса Time Twin является питание каждой из дуг в импульсном режиме. При установлении оптимальных параметров обеспечивается перенос металла одна капля за импульс без коротких замыканий и почти без брызг. На полученных с помощью скоростной камеры снимках четко видна последовательность: зажигание горение дуги – образование капли – отделение капли и переход ее в ванну (на одном электроде, а затем идентично и на втором) (рис. 2.7).

Подача импульсов тока на каждый электрод независимо от мощности дуги позволяет получать постоянный размер капель. Это благоприятно сказывается на равномерности выгорания легирующих элементов. Так, для алюминиевых сплавов системы Al-Mg оно почти постоянно во всем диапазоне мощностей. Кроме того, при отдельной подаче импульсов тока на каждом из электродов можно поддерживать дуги короткими и к тому же отдельно их регулировать. В результате достигается сочетаемое преимущество: короткие дуги дают небольшие расплавленные ванны, а остальная энергия идет на повышение скорости сварки. Возможность смещения электродов относительно друг друга (временное смещение направления перехода расплавленных капель) позволяет получить более однородную сварочную ванну и лучшее формирование сварного шва.

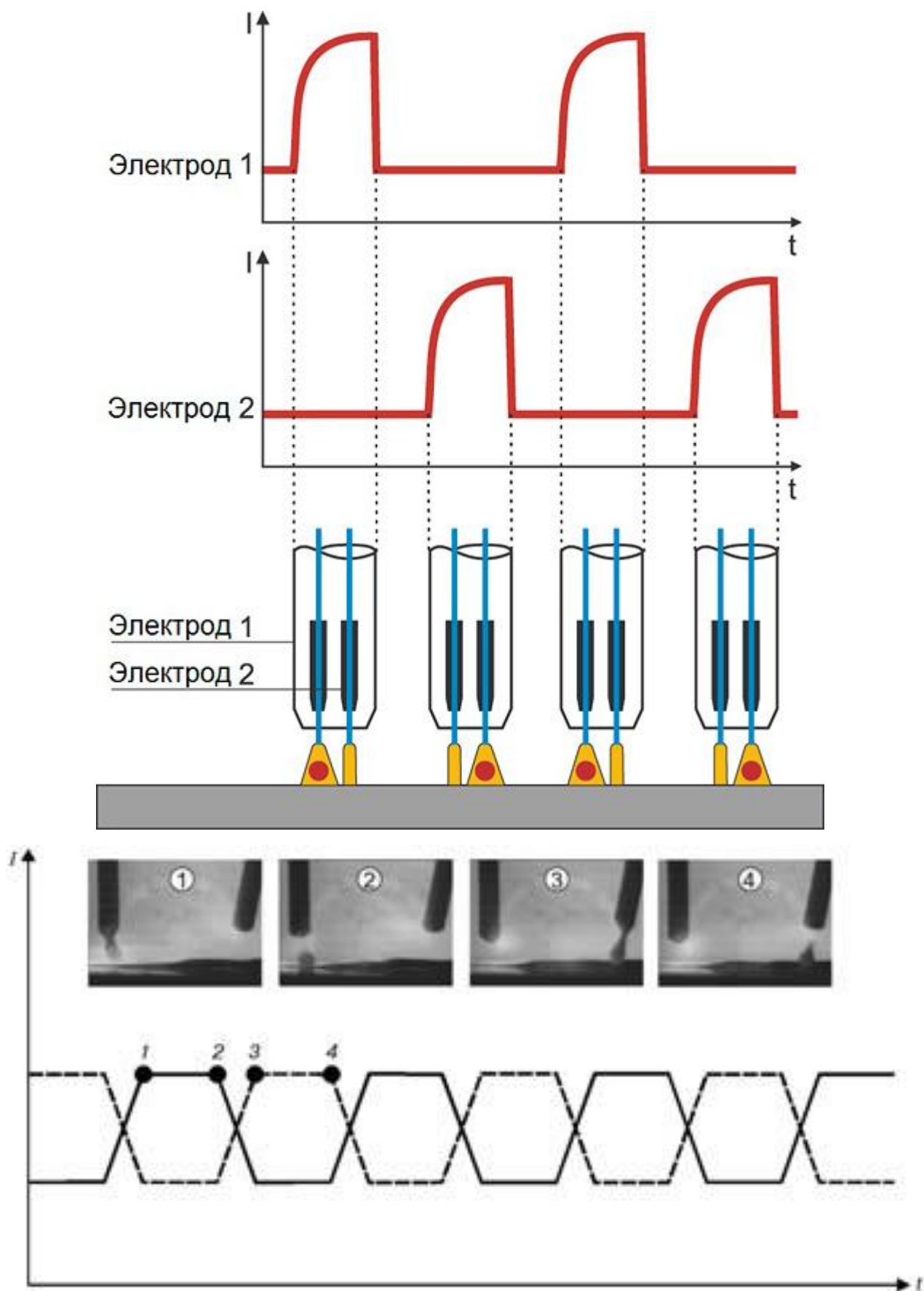


Рисунок 2.6 – Установленный во времени перенос металла с 1-го и 2-го электродов в импульсном режиме (снимки выполнены скоростной камерой)



Рисунок 2.7 – Горение сварочных дуг при сварке по технологии Time Twin

2.3 Источники питания сварочной дуги

Оборудование для сварки Time Twin включает два источника питания, синхронизирующее устройство, два устройства подачи проволоки, два мундштука, встроенных в корпус горелки, с общим соплом для подачи защитного газа.

Для тандемной технологии TimeTwin требуется наличие двух источников питания, поскольку необходимо обеспечить электропитание двух электрических дуг. Однако, недостаточно просто обеспечить соответствие источников питания требованиям данной технологии. Вместо этого, требуется произвести доработку всего оборудования. В основном это касается сварочной головки, механизма подачи проволоки и системы охлаждения. Принципиальные схемы этих элементов представлены на рис. 2.8.

Источники тока: Master и Slave. Для способа Time Twin требуется два источника тока по принципу Master-Slave. Суммарная сила тока обоих источников составляет 900 А при ПВ 100 %. Управление и регулирование мощностью каждого источника тока осуществляется независимо друг от друга с помощью микропроцессора. В зависимости от условий сварки компьютер определяет, какой источник тока берет на себя функцию Master или Slave. Они меняются, например, в зависимости от направления сварки.

Наличие более 30 регулируемых параметров позволяет оператору в каждом случае выбрать необходимый режим работы. Этому же служат дис-

плей и элементы обслуживания. Серийный интерфейс RS-232 передает при необходимости данные на принтер. Повторяющиеся задачи с полным набором параметров легко вызываются через интерфейс робота или через дистанционный регулятор, так что пользователь может сколько угодно воспроизводить оптимальные режимы сварки. Каждый источник тока снабжен вентилятором для защиты электроники от пыли.

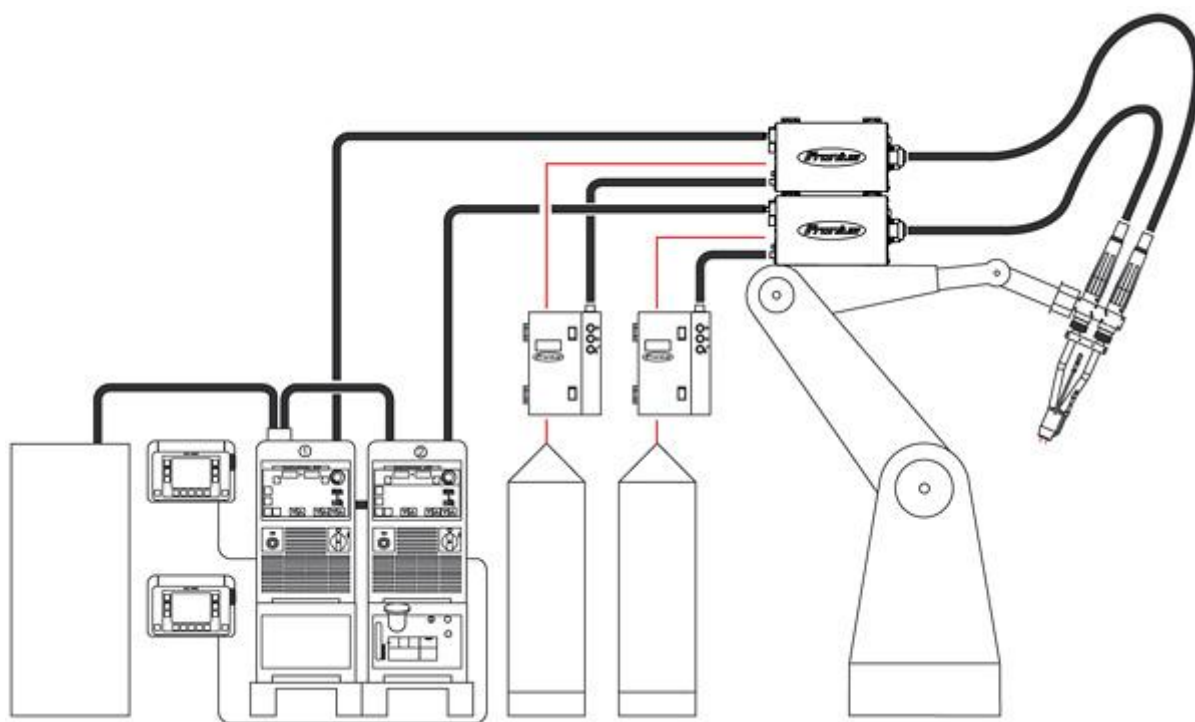


Рисунок 2.8 - Принципиальная схема оборудования для реализации технологии TimeTwin

Синхронизирующее устройство отвечает принципу «целое больше, чем сумма составляющих». По сути дела оно является посредником между Master и Slave. Каждый из источников «знает», что делает другой в данный момент.

Данный принцип автоматического управления обеспечивает значительные преимущества:

1) Электронные схемы управления теперь имеют очень малые размеры, поскольку функции управления полностью переданы единственному электронному модулю — процессору DSP. В применении к инверторным

источникам электропитания данный принцип гарантирует минимальный вес и габариты источников.

2) Управление системой отличается быстротой и технологической гибкостью, что существенно влияет на результаты сварки. Например, обеспечивается возможность быстрой реакции на изменения зазора между контактным наконечником и заготовкой, т.е. возможность быстрого регулирования длины электрической дуги.

3) Программное управление нечувствительно к температурным дрейфам и т.д. Вследствие этого программное управление обеспечивает очень высокую стабильность параметров в течение длительного времени.

Помимо указанного важным фактором является необходимость взаимодействия двух источников электропитания между собой в целях синхронизации двух электрических дуг и обеспечения последовательного переноса металла. К решению данной задачи также был применен инновационный подход: в аппаратах серии TimeTwin Digital 4000 / 5000 обмен данными между источниками электропитания осуществляется по шине данных с возможной скоростью передачи информации до 10 Мбит/с.

В данном случае два источника электропитания представляют собой стандартные источники, укомплектованные средствами для подключения шины данных и установки соответствующего ПО. Существенным преимуществом подобной конфигурации является возможность отключения источников друг от друга в любой момент времени с последующим их использованием по отдельности. Помимо прочего для данных источников применяются запасные части, аналогичные запчастям для стандартных источников, что существенно упрощает материально-техническое снабжение.

На рисунке 2.9 показан источник электропитания TimeTwin Digital 4000 с механизмами подачи проволоки, устройством дистанционного управления, сварочной горелкой и станцией очистки горелки.



Рисунок 2.9 - Комплектная сварочная система на базе источника электропитания TimeTwin Digital 4000

Дополнительным преимуществом данной системы является возможность включения роботом автоматизированного комплекса двух источников электропитания по принципу включения одного, что значительно повышает технологичность. По сравнению с системами предыдущего поколения серьезно оптимизирован обмен данными между сварочным роботом и источником электропитания. В отличие от систем предыдущего поколения, в которых между источником и роботом поддерживалось до 40 коммуникационных каналов, в новых аппаратах серии TimeTwin Digital

4000 / 5000 обмен данными осуществляется по сети LocalNet или магистральной шине. Оба решения, LocalNet и магистральная шина, снижают до минимума расходы на прокладку кабелей, а также уменьшают влияние помех.

2.4 Устройства подачи проволоки

По причине применения в тандемной технологии двух сварочных проволочных электродов также необходимы два механизма подачи проволоки, каждый из которых осуществляет подачу одного электрода. В зависимости от производственной отрасли могут быть использованы различные варианты автоматизированных систем и типов механизмов подачи.

Устройства подачи проволоки отвечают принципу «быстро и надежно» и оба представляют собой гармоничное целое. Периодически ими можно управлять совместно или раздельно и использовать их в этом случае как отдельные аппараты для обычной сварки МИГ/МАГ.

Каждое из двух устройств подачи проволоки представляет собой серийный привод с четырьмя роликами. Тахорегулируемые водоохлаждаемые двигатели подают проволоку со скоростью до 30 м/мин. Эти приводы обеспечивают равномерное распределение давления на проволоку и идеальную подачу.

1) VR 1500: Механизм VR 1500 обычно устанавливается на третьей оси сварочного робота, в результате чего расстояние между механизмом подачи проволоки и сварочной горелкой оказывается относительно малым. Конструкция робота должна выдерживать вес механизма подачи проволоки, и этот факт должен приниматься во внимание при выборе размеров робота.

2) VR 1530 PD: Данный механизм подачи проволоки применяется для размотки проволоки из больших бухт. Механизм укомплектован планетарной передачей, которая, помимо подачи сварочной проволоки, обеспечивает

выполнение функции выпрямления проволоки, что является очень важным для автоматизированных систем. В большинстве случаев механизм VR 1500 применяется совместно с VR 1530 PD или Robacta Drive Twin.

3) VR 4040: Помимо типовых корзиночных катушек алюминиевые проволоки часто поставляются в бухтах массой 40 кг в целях уменьшения частоты смены бухт. С учетом больших размеров данных бухт применение стандартных механизмов подачи проволоки невозможно. В механизме VR 4040 предусмотрено создание определенного запаса проволоки с целью компенсации задержки при разгоне / торможении таких бухт, что обеспечивает подачу проволоки с постоянной скоростью от начала и до конца процесса сварки. VR 4040 представляет собой механизм размотки, который обычно используется в комбинации с устройством VR 1500.

4) VR 7000: VR 7000 представляет собой отдельный блок подачи проволоки, который в большинстве случаев устанавливается отдельно от робота. Важным преимуществом данного механизма подачи является обеспечение защиты бухты проволоки от воздействия факторов окружающей среды.

На рис. 2.10 показаны механизмы подачи проволоки VR 1500 и VR 1530 PD; в последнем можно увидеть упомянутую планетарную передачу.



Рисунок 2.10 - Механизмы подачи проволоки VR 1500 и VR 1530 PD

2.5 Сварочная горелка

Тандемная технология предполагает одновременное использование для сварки двух электродов. Несмотря на то, что в данной технологии контактные наконечники двух электродов электрически изолированы друг от друга, они оба проходят через общее газовое сопло, и, следовательно, должны быть встроены в одну сварочную горелку. На рисунке 2.11 показано схематическое изображение горелки в разрезе. На данном рисунке четко показана электрическая изоляция контактных наконечников. Основной особенностью сварочной горелки для технологии TimeTwin является наличие системы охлаждения горелки. В данном процессе выделяется большое количество тепла. Это тепло должно постоянно отводиться и, поэтому газовое сопло охлаждается по всей длине. Надлежащий отвод тепла предусмотрен также в зоне контактных наконечников.

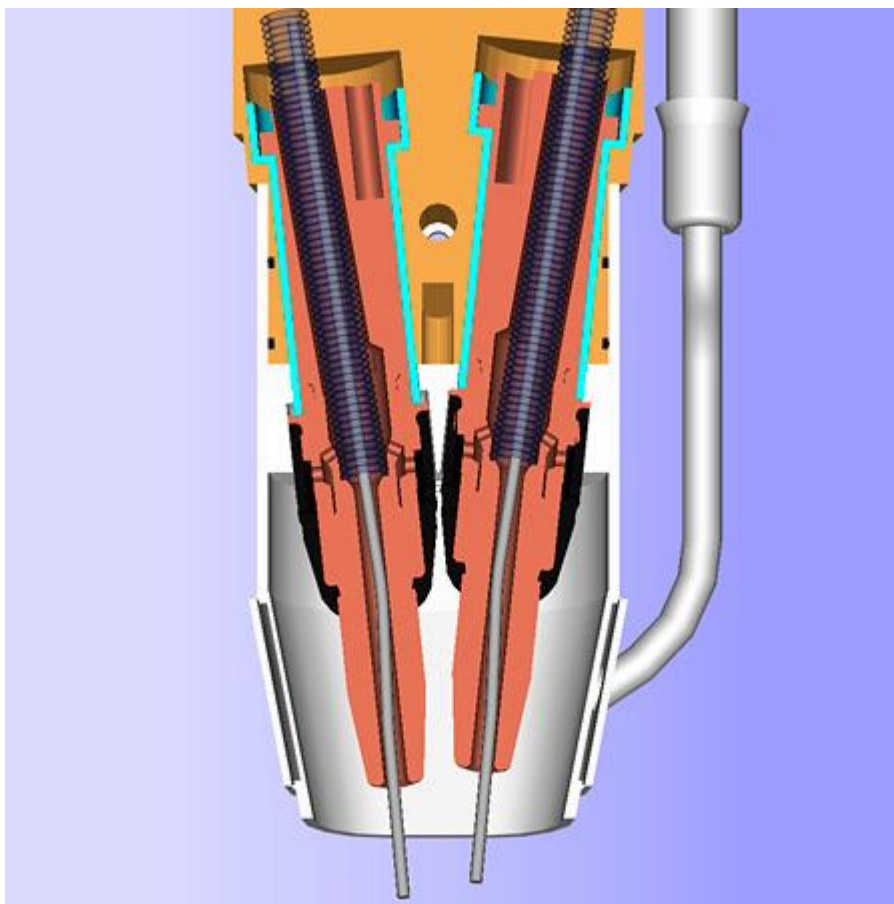


Рисунок 2.11 – Сварочная горелка для тандемной технологии TimeTwin в разрезе

Горелка - «активный инструмент» и решающий «интерфейс» между системой Time Twin и соединяемыми деталями, так как от нее зависит качество сварки. Разработчики и конструкторы уделили ей особое внимание. В результате появилась горелка Robacta Drive Twin. Отличительные особенности горелки: оба проволочных электрода перемещаются в электрически изолированных токоподводящих мундштуках, подача электрического тока на каждый электрод происходит под точно определенным углом через принудительный контакт. Таким образом исключаются случайные точечные контакты между мундштуком и проволокой. Надежная электрическая изоляция электродов одного от другого является обязательным условием безупречного функционирования способа Time Twin. Для повышения надежности работы горелки при продолжительной эксплуатации каждый из токоподводов и газовое сопло охлаждаются водой.

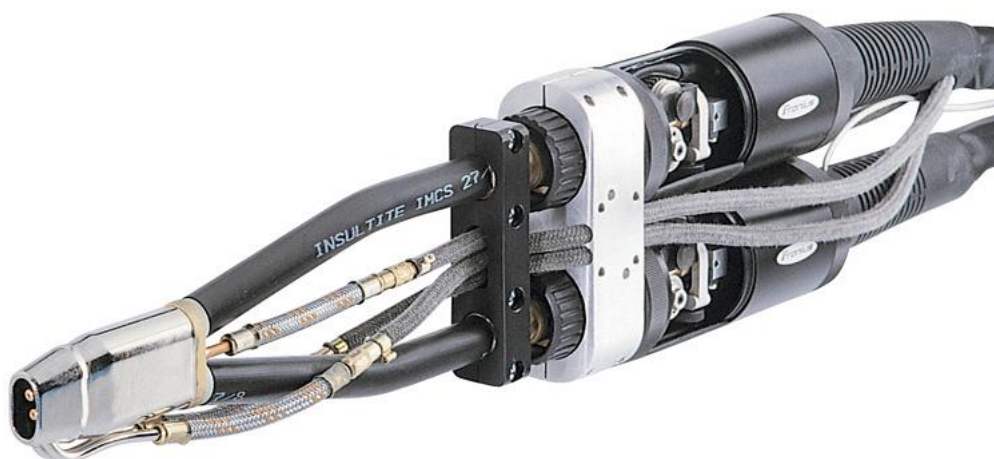


Рисунок 2.12 – Горелка Time Twin с принудительным электрическим контактом и водоохлаждаемым газовым соплом

Помимо горелки Robacta Drive Twin в наличии имеется горелка Robacta Twin Compact (рис. 2.13), в которой два электрода протягиваются между механизмами подачи проволоки и сварочной горелкой через общий комплект гибких труб. Несмотря на то, что последняя горелка не является двухтактной, её компактная конструкция даёт значительные преимущества при необходимости работы с труднодоступными участками.



Рисунок 2.13 – Сварочная горелка Robacta Twin Compact

2.6 Программное обеспечение

Системные программы процесса Time Twin подготовлены для серийного производства в двух различных исполнениях: Q-Master и Q-Vision.

Q Master (сбор информации, контроль, оформление документации) – программное обеспечение, которое пользователь может интегрировать в источники питания Time Twin. Оно представляет собой базу для «запоминания» рабочих параметров оптимальных режимов сварки с целью их последующего воспроизведения с любой периодичностью. Более того, программное обеспечение, интегрированное в процесс управления качеством, непрерывно собирает все релевантные сварочные параметры и регистрирует в документации превышение предельных значений. Особенно это касается сварочного напряжения, сварочного тока, а также скорости подачи проволоки. Анализ данных позволяет получить сведения о переносе материала, оплавлении и стабильности процесса. Отсюда можно быстро и точно сделать выводы о качестве сварного шва. Пользователь определяет для контролируемых параметров максимально допустимые отклонения, которые вместе с соответствующими рабочими точками запоминаются в источниках

тока. Их микропроцессоры в реальном времени контролируют параметры и подают сигнал о каждом нарушении предельного значения.

Q Vision (оценка и архивирование) – это программа для персонального компьютера. Она может обрабатывать полученные сварочные параметры, производить расчеты и передавать их в архив. Таким образом, благодаря обширным критериям поиска можно иметь информацию о сварных элементах. К тому же программа помогает специалисту определить предельные значения для функции Q-Master.

Разработчики фирмы «Фрониус» особое внимание уделяют конструкции сварочной горелки. Поэтому по-прежнему их целью является создание еще более компактной горелки, которая еще интенсивнее бы охлаждалась для достижения большей производительности при длительной работе, обеспечила бы полную свободу по шести осям, упростила бы подачу расходных материалов и гарантировала бы еще лучшую доступность к изделию. Такая усовершенствованная горелка должна в обозримом будущем заменить сегодняшнюю. В дальнейших совершенствованиях процесса Time Twin будет учитываться опыт практической работы.

2.7 Скорость сварки и производительность наплавки

Путем применения технологии TimeTwin можно достичь значительного увеличения производительности наплавки по сравнению с традиционными технологиями электродуговой сварки. Пользователь может использовать такую производительность либо для повышения скорости сварки, либо для увеличения площади сечения шва. В большинстве случаев преимущественное значение имеет повышение скорости сварки. Точная величина, на которую может быть повышена скорость сварки, зависит от марки материала, толщины листового материала, геометрии и положения шва и т.д. Путем применения технологии TimeTwin при сварке стальных

заготовок можно достичь скорости сварки до 7 м/мин. и производительности наплавки до 30 кг/ч.

Таблица 2.1 – Типовые значения скорости сварки и производительности наплавки. Основной материал: алюминий

	Нахлѣсточное соединение с отбортовкой	Нахлѣсточное соединение	Тавровое соединение	Тавровое соединение
Толщина листового металла (мм)	2	3	6	10
Положение шва при сварке	РА	РВ		
Диаметр проволоки	1,2			
Скорость подачи проволоки (м/мин.), одна проволока / две проволоки	10–12 / 9–11	10–13 / 9–12	12–14 / 11–13	16–18 / 15–17
Скорость сварки (см/мин.)	250–300	150–250	120–150	100–120
Защитный газ в соответствии с EN 439	(аргон или аргоно-гелиевые смеси)			

Таблица 2.2 – Типовые значения скорости сварки и производительности наплавки. Основной материал: сталь

	Нахлесточное соединение с отбортовкой	Нахлесточное соединение	Стыковой шов	Тавровое соединение	Тавровое соединение
Толщина листового металла (мм)	2	3	3	10	10-20
Положение шва при сварке	РА	РВ	РА	РВ	РА
Диаметр проволоки	1,0	1,2			
Скорость подачи проволоки (м/мин.), одна проволока / две проволоки	14–16 / 12–14	9–12 / 7–10	9–12 / 7–10	12–14 / 11–13	15–18 / 14–17
Скорость сварки (см/мин.)	250–300	150–250	150–200	100–120	60–160
Защитный газ в соответствии с EN 439	M2s, с или без He M 21 или M21(1), с содерж. прибл. 10% Co2				

2.8 Перспективы применения технологии TimeTwin

В настоящее время технология TimeTwin уже применяется в большом количестве отраслей. Данные отрасли входят в сферу применения сварки

плавлением и MIG пайки (плавящимся электродом в среде защитных газов). Технология TimeTwin может применяться в ряде иных областей, включая, помимо прочего, следующие:

- производство железнодорожных вагонов
- судостроение
- автомобилестроение
- танкостроение
- машиностроение
- производство экскаваторов и специального механического оборудования
- строительство трубопроводов

Технология TimeTwin может применяться с любыми стандартными вспомогательными материалами. Помимо сварки технология TimeTwin также может применяться для MIG пайки, в ходе которой расплавляется только присадочный материал, а основной не расплавляется. В общем случае технология TimeTwin допускает использование следующих проволок:

- проволока из алюминия и его сплавов
- проволока из стали
- проволока из CrNi
- порошковая проволока
- проволоки на медной основе для MIG пайки

В данной технологии также предусмотрено использование защитных газов. Это обеспечивает высокую гибкость данной технологии и упрощает усовершенствование существующих однопроволочных аппаратов до TimeTwin. В таблице 2.3 представлен перечень защитных газов, применяемых для работы с различными основными материалами и типами электрической дуги.

Таблица 2.3 - Защитные газы, используемые для работы с различными основными материалами и типами электрической дуги

Основной материал	Защитный газ
-------------------	--------------

Нелегированная и низколегированная сталь / импульсная сварка	90% Ar + 10% CO ₂ / 82% Ar + 18% CO ₂
Нелегированная и низколегированная сталь / стандартная сварка	95...98% Ar / 2...5% O ₂
Алюминий / импульсная сварка	Ar или смесь Ar + He
Нержавеющая сталь / импульсная сварка	97,5% Ar + 2,5% CO ₂

В университете Крэнфилда (Cranfield University) был проведен анализ экономической целесообразности применения технологий автоматической сварки при строительстве трубопроводов (взамен ручной сварки электродами с целлюлозным покрытием). Технология сварки TimeTwin теперь применяется на газопроводах большого диаметра (1800 мм); работы выполняются на очень большой протяженности. В частности сейчас ведется строительство трубопровода длиной 3200 км между Аляской и Чикаго. Основная часть строительных работ на Аляске осуществляется в зимний период при очень низких температурах до -50°C.

В данном случае применяется двойная тандемная сварка четырьмя электрическими дугами со всех сторон трубопровода одновременно. Результатом применения данной технологии явилось сокращение продолжительности сварки одного шва с 4 часов (в случае ручной сварки) до 20 минут. Благодаря такому невероятному увеличению скорости сварки стоимость строительных конструкций существенно снижена. Наиболее значимые параметры сварки:

- тип шва: швы с разделкой кромок
- основной конструкционный материал: X100
- вспомогательный технологический материал: Mn3Ni1Mo
- скорость сварки: 130 см / мин.
- производительность наплавки: 12 кг / ч
- положение шва при сварке: PA, PB, PC, PD

На рисунке 2.14 показан участок трубопровода с защитным кожухом, позволяющим поддерживать температуру окружающей среды -20°C , а также сварочный процесс по тандемной технологии. Достигнуто снижение времени, затрачиваемого на сварку шва, в 12 раз.



Рисунок 2.14 – Применение технологии TimeTwin в сфере строительства трубопроводов

Итальянский производитель железнодорожного подвижного состава Alstom Ferroviaria, до 2001 года известный под названием Fiat Ferroviaria, выпускает, помимо прочего, итальянские высокоскоростные поезда Pendolino. Сварка экструдированных алюминиевых профилей для конструкций полов, стен и крыш вагонов данного высокоскоростного поезда осуществлялась с помощью технологии TimeTwin.

Проблемой в данном случае являлась высокая скорость сварки с одной стороны и необходимость уменьшения излишних задержек с другой стороны. Однако, главным требованием было высокое качество швов, так как швы находились на лицевых поверхностях изделий.

Аппараты TimeTwin монтировались на продольных шасси длиной около 10 м. Свариваемые металлические профили имели длину порядка 27 м. В ходе работы одновременно осуществлялась сварка двух швов. В качестве направляющего устройства применялся тактильный датчик.

С января 2000 г. по ноябрь 2001 г., т.е. менее чем за 2 года, общая длина сварных швов, выполненных установками Fronius TimeTwin, составила 3000 км — что равно расстоянию от Стокгольма до Рима. Наиболее значимые параметры сварки:

- тип шва: швы с разделкой кромок, проплавные швы
- основной конструкционный материал: AlMgSi0.7
- вспомогательный технологический материал: AlMg4.5 mn0.7
- скорость сварки: 250 см / мин.
- производительность наплавки: 7 кг / ч
- положение шва при сварке: РА

На рисунке 2.15 показаны свариваемые экструдированные профили и сварочная операция, выполняемая двумя горелками TimeTwin одновременно.



Рисунок 2.15 - Тандемная сварка при производстве железнодорожных вагонов, достигнутая скорость сварки: 250 см / мин.

2.9 Заключение по второму разделу

Система CMT Twin сочетает в себе преимущества систем TimeTwin и CMT. По сравнению с традиционными технологиями сварки двумя проволоками данная технология обеспечивает следующие преимущества: высокая стабильность процесса, способность по перекрытию зазора и скорость сварки, а также высокое качество шва. Кроме того, изделия нуждаются лишь в минимальной послесварочной обработке. Благодаря этим особым функциональным свойствам технология CMT Twin позволяет добиваться более высоких результатов сварки по сравнению с традиционными технологиями сварки двумя проволоками и тандемной сварки. Это особенно заметно при соединении листов малой толщины на высокой скорости при тепловложении, не превышающем оптимального уровня. Компания Fronius предоставляет соответствующие таблицы параметров для использования различных комбинаций процессов в широком ряде отраслей. Помимо прочего технология CMT Twin выделяется также простотой применения. Рассмотренные выше особенности делают технологию CMT Twin идеальной для использования в автомобильной промышленности, судостроении и машиностроении, а также в энергетике.

Особенности процессов импульсной двухдуговой сварки плавящимися электродами в инертных газах и смесях газов определяются независимым и поочередным питанием дуг импульсами тока регулируемой амплитуды, длительности и частоты. Предусмотрена отдельная подача электродных проволок и горение дуг в общей сварочной ванне при продольном, наклонном либо поперечном расположении электродов.

Основой процессов импульсной двухдуговой сварки являются инверторные источники питания с синергетической системой управления параметрами режимов и двухэлектродной горелкой. Последнее позволяет плавно регулировать расстояние между осями токоподводящих мундштуков. Оптимальные режимы двухдуговой сварки заранее запрограммированы с учетом марки и диаметра электродной проволоки, расхода и состава защит-

ного газа. Синергетическое управление в настоящее время реализовано только для импульсно-дуговой сварки плавящимися электродами в инертных газах и их смесях без коротких замыканий дугового промежутка.

Применительно к углеродистым и легированным сталям выявлены следующие технологические преимущества импульсной двухдуговой сварки: увеличение глубины проплавления основного металла; уменьшение ширины ЗТВ; улучшение формирования швов на больших скоростях; повышение механических свойств сварных соединений. Недостатком импульсной двухдуговой сварки в защитных газах является повышенная излучательная способность дуг, а также более высокая стоимость сварочного оборудования и значительные затраты на его эксплуатацию и ремонт.

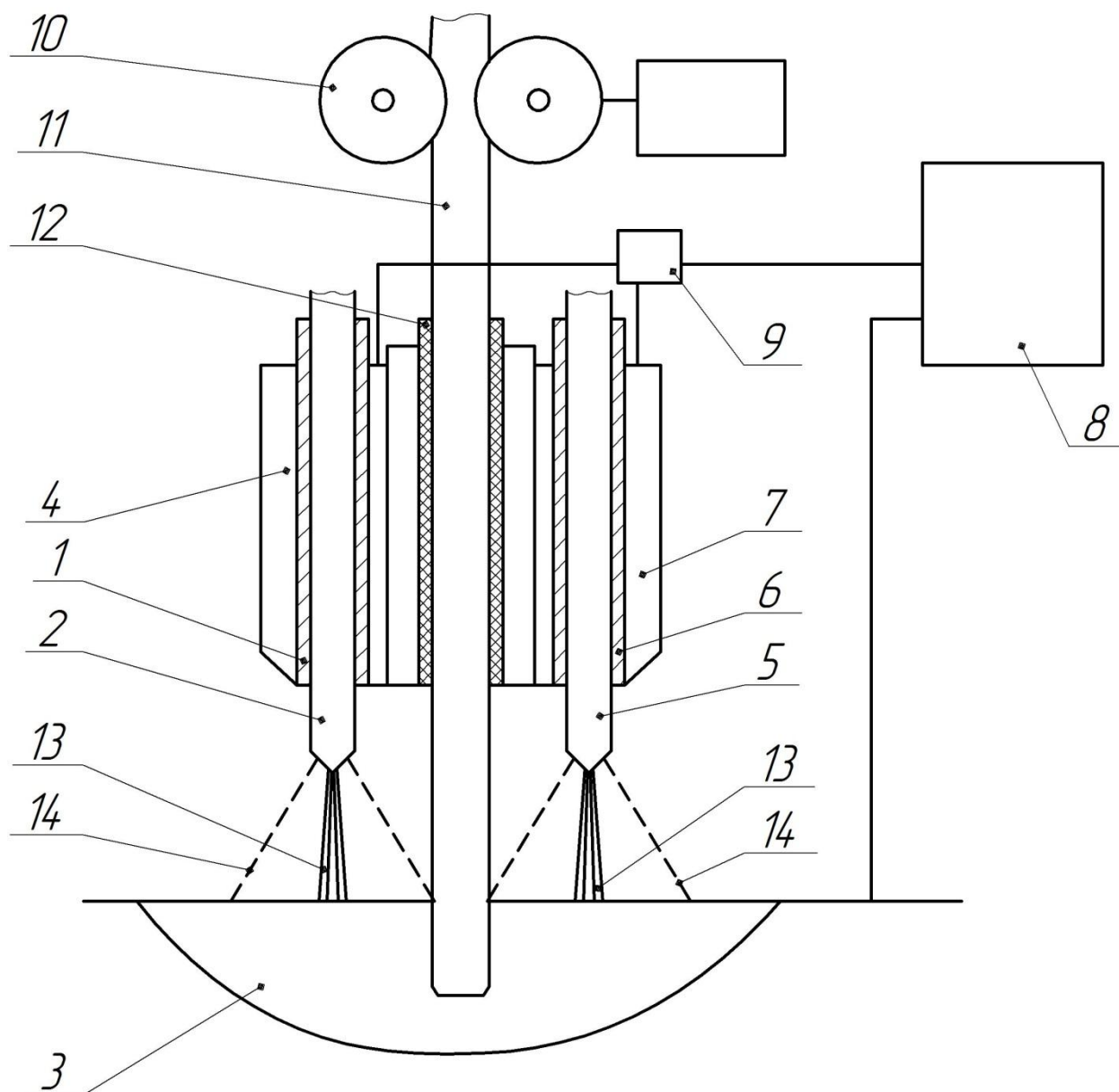
3 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВУХДУГОВОЙ СВАРКИ

3.1 Описание технического решения

На рис. 3.1 показана схема предлагаемого аппарата для сварки спаренной проволокой, в соответствии с изобретением. Аппарат для сварки спаренной проволокой включает в себя: трубчатый токоподвод 1, который служит для направления первого расходуемого электрода 2 к сварочной ванне 3. Первый трубчатый токоподвод 1 расположен в токоподводящем наконечнике 4. По трубчатому токоподводу 1 сварочный ток передается к первому расходуемому электроду 2. Второй трубчатый токоподвод 5 служит для направления второго расходуемого электрода 6 к сварочной ванне 3. Второй трубчатый токоподвод 5 расположен в токоподводящем наконечнике 7. Первый и второй токоподводящие наконечники могут быть расположены как в одном корпусе, так и в отдельных корпусах. По второму трубчатому токоподводу 5 сварочный ток передается ко второму расходуемому электроду 6.

Один источник питания 8 подключен к контактному устройству 9, включающему токоподводящие наконечники 4, 7 и вмещающему первый и второй трубчатые токоподводы 1, 5. Один источник питания 8 обеспечивает одинаковое напряжение на первом и втором расходуемых электродах 2, 6. В качестве источника питания может быть использован источник питания обычного типа, например, сварочный выпрямитель, сварочный трансформатор, или инверторный источник питания.

Аппарат для сварки спаренной проволокой дополнительно содержит устройство 10 для подачи нетоковедущей проволоки 11 к сварочной ванне 3. Подающее устройство содержит трубку 12, которая электрически изолирована от первого и второго токоподводящих наконечников. Нетоковедущая проволока подается по этой трубке.



1 – первый трубчатый токоподвод, 2 – первый расходуемый электрод, 3 – сварочная ванна, 4 – первый токоподводящий наконечник, 5 – второй трубчатый токоподвод, 6 – второй расходуемый электрод, 7 – второй токоподводящий наконечник, 8 – источник питания, 9 – контактное устройство, 10 - устройство подачи нетоковедущей проволоки, 11 – нетоковедущая проволока, 12 – трубка подачи нетоковедущей проволоки, 13 – сварочная дуга, 14 – конус дуги

Рисунок 3.1 – Работа устройства для сварки спаренным электродом

При сварке дуга будет образовываться на первом и втором расходуемых электродах 2, 6, а не на нетоковедущей проволоке 11. Нетоковедущая проволока плавится вследствие введения в сварочную ванну 3. Таким образом, нетоковедущая проволока 11 не подключена к источнику питания и имеет нулевой потенциал. Между нетоковедущей проволокой и свариваемыми деталями дуга не горит. Трубка 12 выполнена в виде керамической трубки.

В процессе сварки между концом электрода и деталью горит дуга 13. Контактное пятно дуги перемещается по свариваемым деталям случайным образом. Однако обычно считается, что дуга находится в пределах конуса 14 от наконечника расходуемого электрода до сварочной ванны. Угол раствора β конуса 14 может изменяться в зависимости от условий сварки и обычно составляет около 30° . По этой причине предпочтительно располагать нетоковедущую проволоку 11 таким образом, чтобы она входила в сварочную ванну перпендикулярно её поверхности, на расстоянии $D < L \cdot \text{ctg}(\beta/2)$ от расходуемого электрода, где L – длина дуги, то есть расстояние от наконечника электрода до ближайшей точки сварочной ванны.

Для регулировки расстояния между соответствующим наконечником первого и второго трубчатого токоподвода, сварочный аппарат должен содержать механизм установки промежутка трубчатого токоподвода. Для регулировки наклона между осями первого и второго трубчатых токоподводов, сварочный аппарат должен дополнительно содержать механизм установки наклона трубчатого токоподвода.

Отдельные токоподводящие наконечники предназначены для того, чтобы сварочные проволоки не образовывали монолитной проводящей структуры, содержащей все проволоки вместе. Вместо этого предусмотрено несколько отдельных токоподводящих наконечников, каждый из которых вмещает один трубчатый токоподвод для одной сварочной проволоки. Все токоподводящие наконечники должны быть электрически соединены, что гарантирует подключение расходуемых электродов к одному источнику

питания и приобретение ими одинакового напряжения. Электрическое соединение может быть выполнено на токоподводящих наконечниках, на источнике питания или в любом месте между токоподводящим наконечником и источником питания.

Введение нетоковедущей проволоки в сварочную ванну приводит к охлаждению сварочной ванны. Уменьшение температуры сварочной ванны приводит к меньшему испарению легирующих добавок и уменьшению разбрызгивания. Также снижается вероятность образования горячих трещин за счёт оптимизации термического цикла металла шва и околошовной зоны. Кроме того, подача нетоковедущей проволоки в сварочную ванну приводит к увеличению производительности приблизительно на 20 %.

3.2 Методика определения химического состава металла шва

При образовании сварного шва в сварочной ванне перемешиваются основной и присадочный металлы, происходит их реакции взаимодействия с защитным газом и атмосферой. В результате этого химический состав металла шва отличается от состава основного металла. Более того, сборочный узел может свариваться из деталей, которые были изготовлены из разных марок сталей.

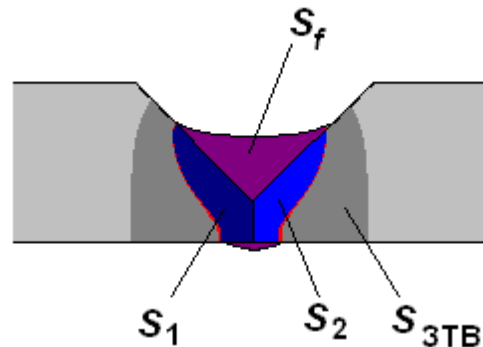
При приближённых исследованиях можно пренебречь окислительно-восстановительными реакциями в металле сварочной ванны. Тогда содержание легирующих элементов в сварном шве может быть оценено в результате расчёта долей электродного металла и свариваемых кромок в металле шва. Эти расчёты могут быть выполнены по площадям поперечных сечений S_f , S_1 и S_2 , (рис. 3.2).

Таким образом, содержание легирующего элемента в металле шва может быть рассчитано по формуле:

$$K = \frac{K_f \cdot S_f + K_1 \cdot S_1 + K_2 \cdot S_2}{S_f + S_1 + S_2},$$

где S_f , S_1 и S_2 – площадь наплавленного металла и свариваемых кромок;

K_f , K_1 и K_2 – содержание легирующего элемента в электродной проволоке, основном металле первой и второй кромок.



S_f – площадь наплавленного металла; S_1 и S_2 – площадь свариваемых кромок;

$S_{3ТВ}$ – площадь зоны термического влияния

Рисунок 3.2 – Определение долей наплавленного и основного металла в шве по площадям в поперечном сечении шва

3.3 Методика экспериментальной сварки

Экспериментальную сварку будем проводить на пластинах из стали 09Г2С (ГОСТ19281-89) размеры которых составляют 400x150x22 мм. Угол скоса кромок составляет 10° и притупление кромок 2 мм, что соответствует сварке по узкой разделке.

Сварку произведём с использованием сварочного аппарата ШТОРМ-ЛОРХ Р 4500 Basic с источником сварочного тока S5 Pulse ШТОРМ-LORCH (рис. 3.3).

Для перемещения сварочных горелок используем механизм перемещения горелки Noboruder NB-5H, на котором закрепляют две сварочные горелки (рис. 3.4).



Рисунок 3.3 – Сварочное оборудование ШТОРМ-ЛОРХ

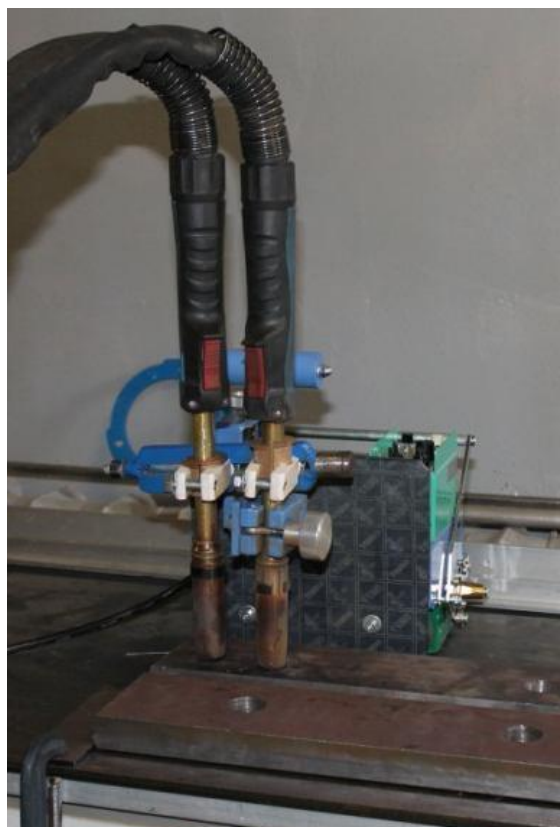


Рисунок 3.4 - Механизм перемещения горелок вдоль стыка

Для сварки будем использовать сварочную проволоку Св-08Г2С (ГОСТ 2246-70), в качестве защитного газа применим смесь (82% аргон + 18 % углекислый газ).

Экспериментальную наплавку валиков осуществим с учётом рекомендаций [12]: расстояние между дугами 20 мм, ток и напряжение первой дуги – 245 А, 26,1 В, ток и напряжение второй дуги – 217 А, 29,3 В. Зададим скорость подачи электрода на первой дуге 8,1 м/мин, скорость подачи электрода на второй дуге – 7,1 мм/мин, скорость сварки 35 м/час.

Такой режим сварки должен обеспечить стабильность горения дуг и формирование шва с хорошим качеством. Взаимного влияния дуг друг на друга наблюдаться не должно. Ожидаемый внешний вид швов представлен на рис. 3.5 [12].



Рисунок 3.5 – Окончание сварного шва при двухдуговой сварке на заданных режимах

Характерной особенностью при формировании сварочной ванны в процессе двухдуговой сварки является характерный бугор расплава, образующийся в промежутке между дугами. Работа [57] объясняет такое формирование сварочной ванны наличием электродинамического давления двух дуг (рис. 3.6) которое приводит к образованию на её поверхности двух кратеров с характерной волной расплава между ними.

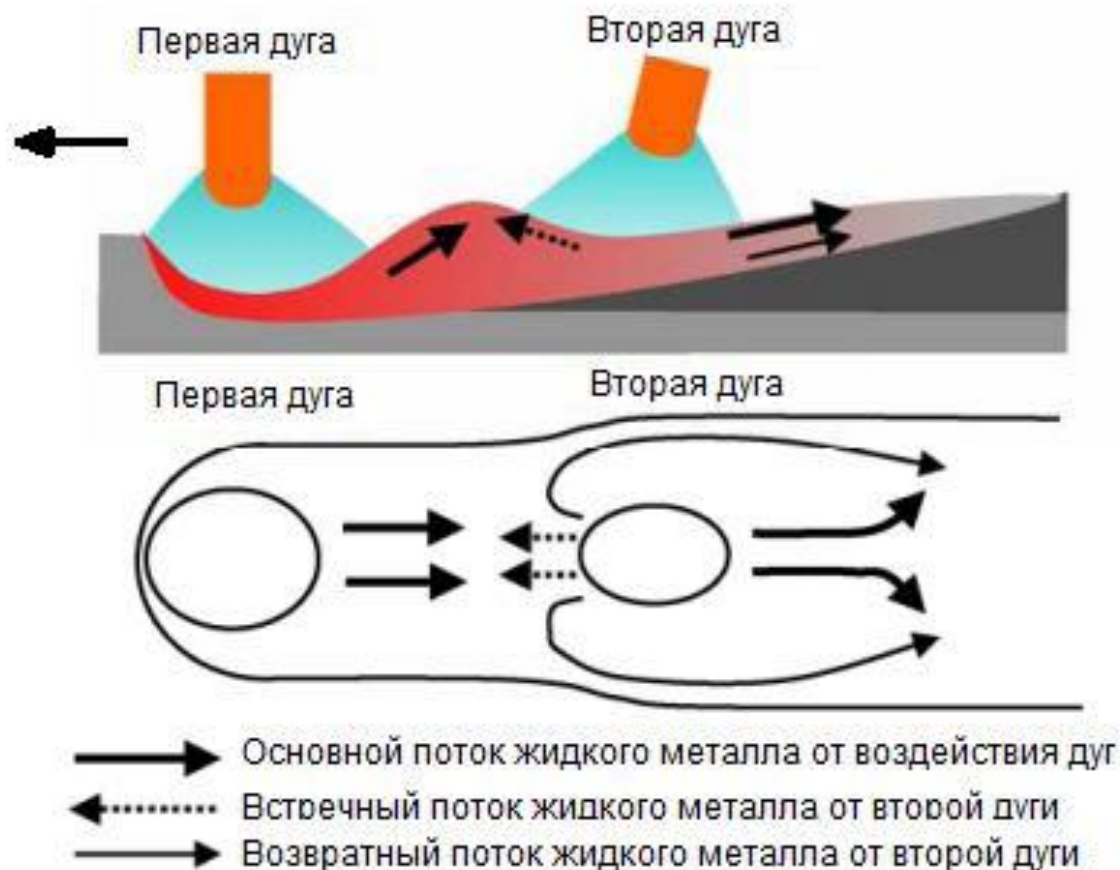


Рисунок 3.6 – Формирование сварочной ванны в процессе двухдуговой сварки согласно [57]

Эти два обстоятельства являются причинами разных скоростей течения расплава в хвостовую часть ванны по ее центру и в пристеночных областях.

Виртуальное воспроизведение шва при двухдуговой сварке также воспроизводит эти особенности формирования сварочной ванны, рис. 3.7 а,б, полученные в ходе проведенных ранее исследований [12, 29]

При достаточном удалении дуг ванна между ними начинает кристаллизоваться. Это приводит к поднятию уровня сварочной ванны и второй дуги. Поэтому поверхность предшествующего валика переплавляется преимущественно первой дугой, рис. 3.7 б. Данное обстоятельство следует учитывать при отработке режимов двухдуговой сварки по узкому зазору.

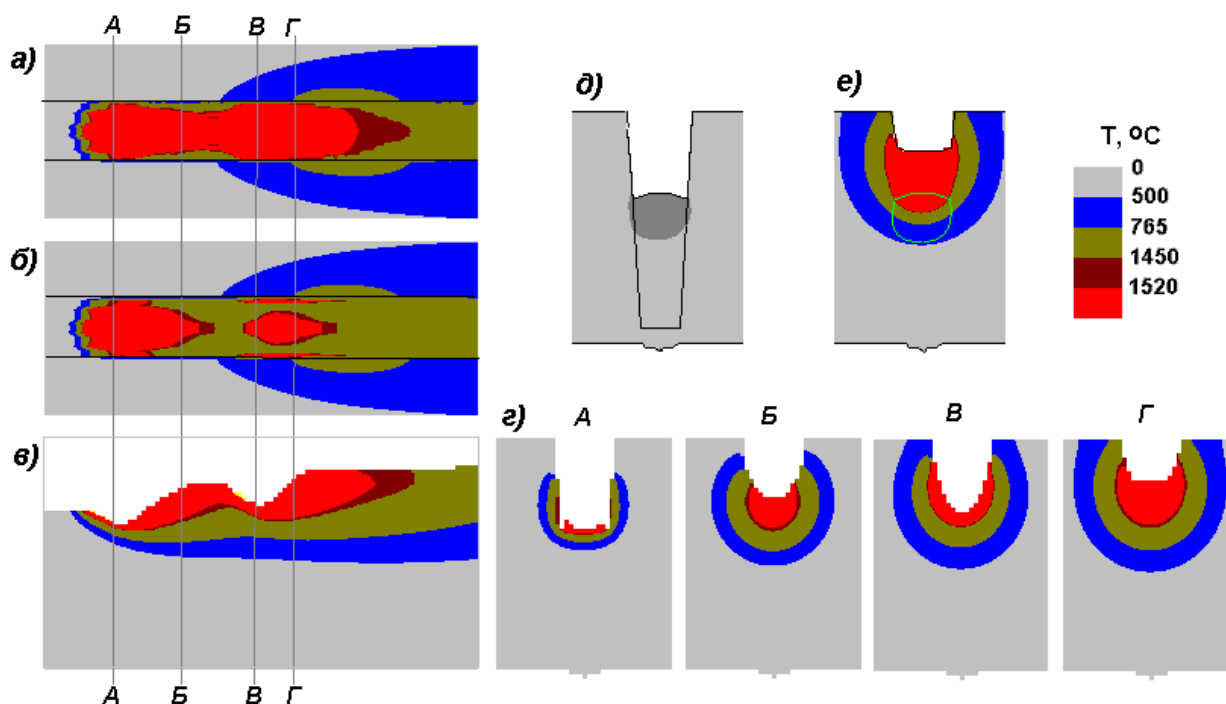


Рисунок 3.7 - Результат моделирования формирования сварочной ванны при двухдуговой сварке - распределение температуры и форма поверхности: а) сверху стыка, б) на поверхности предыдущего прохода, в) в плоскости симметрии стыка, г) в поперечных сечениях, д) профиль сечения предыдущего прохода, е) предельное распределение температуры

3.4 Выводы по третьему разделу

Проведённые исследования [12, 29] позволили установить, что главной особенностью сварки по зауженной разделке можно назвать снижающуюся устойчивость горения дуги, которая получается по причине периодического изменения температуры и сопротивления из-за вылета электрода. Также следует принимать во внимание существенное влияние особенности положения электрода в разделке шва на несимметричность формирования сварочной ванны, опасность получения непроваров и межслойного несплавления.

Предложенные технологические рекомендации позволяют повысить стабильность качества сварки по узкому зазору за счёт учёта особенностей

формирования проходов, что позволяет исключить из технологического процесса операции предварительного и сопутствующего подогрева.

Предложен способ сварки спаренным электродом, в котором за счёт введения нетоковедущей проволоки в сварочную ванну происходит охлаждение сварочной ванны. Уменьшение температуры сварочной ванны приводит к меньшему испарению легирующих добавок и уменьшению разбрызгивания. Также снижается вероятность образования горячих трещин за счёт оптимизации термического цикла металла шва и околошовной зоны. Кроме того, подача нетоковедущей проволоки в сварочную ванну приводит к увеличению производительности приблизительно на 20 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель диссертационного исследования – повышение производительности и стабильности качества дуговой сварки за счёт научно обоснованных методов моделирования и управления процессом двухдуговой сварки.

Как показал анализ литературы по теме исследования, в настоящий момент отсутствуют подходы к назначению параметров режима двухдуговой сварки, их допустимых значений и требований к поддержанию точности.

На основании проведённых литературных исследований были сформулированы задачи диссертационного исследования:

- 1) проанализировать существующие способы поддержания стабильности качества при двухдуговой сварке;
- 2) предложить математическую модель формирования соединения при двухдуговой сварке и методику проверки её адекватности;
- 3) исследовать закономерности формирования температурного поля при двухдуговой сварке и предложить на их основе способ управления с пониженным вложением тепла в основной металл;
- 4) предложить способ сварки на основании проведённых исследований.

Особенности процессов импульсной двухдуговой сварки плавящимися электродами в инертных газах и смесях газов определяются независимым и поочередным питанием дуг импульсами тока регулируемой амплитуды, длительности и частоты. Предусмотрена отдельная подача электродных проволок и горение дуг в общей сварочной ванне при продольном, наклонном либо поперечном расположении электродов.

Применительно к углеродистым и легированным сталям выявлены следующие технологические преимущества импульсной двухдуговой сварки: увеличение глубины проплавления основного металла; уменьшение ширины ЗТВ; улучшение формирования швов на больших скоростях; повышение механических свойств сварных соединений. Недостатком импульсной

двухдуговой сварки в защитных газах является повышенная излучательная способность дуг, а также более высокая стоимость сварочного оборудования и значительные затраты на его эксплуатацию и ремонт.

Предложен способ сварки спаренным электродом, в котором за счёт введения нетоковедущей проволоки в сварочную ванну происходит охлаждение сварочной ванны. Уменьшение температуры сварочной ванны приводит к меньшему испарению легирующих добавок и уменьшению разбрызгивания. Также снижается вероятность образования горячих трещин за счёт оптимизации термического цикла металла шва и околошовной зоны. Кроме того, подача нетоковедущей проволоки в сварочную ванну приводит к увеличению производительности приблизительно на 20 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галактионов, А.Т. Справочник рабочего сварщика / А.Т. Галактионов, Ю.А. Денисов, Г.Т. Копытов [и др.]. – Москва: МАШГИЗ. – 1961. – 640 с.
2. Машиностроение. Энциклопедия. Т IV-6 Оборудование для сварки / В.К. Лебедев, С.И. Кучук-Яценко, А.И. Четвертко и др. – М.: Машиностроение. – 1999. – 496 с.
3. Патент № 2547985 РФ. Сварочный аппарат и способ сварки / Микаэль Берг. – Оpubл. 10.04.2015, Бюл. № 10.
- 4 А.с. № 1459849 СССР. Способ дуговой сварки плавящимся электродом / А.В. Иванников. – Оpubл. 23.02.89, Бюл. № 7.
5. Потапьевский, А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. – М.: Машиностроение. – 1974. – 142 с.
6. А.с. № 1486292 СССР. Способ двухдуговой сварки / А.Т. Назарчук. – Оpubл. 15.06.89, Бюл. № 22.
7. Беспалов, В.И. Оптимизация технологий строительства для обеспечения нормативных требований к сварным соединениям магистральных газопроводов: Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. – Москва: ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – 2010.
8. Гончаров, С.Н. Исследование и разработка технологии двухдуговой автоматической сварки в защитных газах корпусов из высокопрочных среднелегированных сталей: Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. – Екатеринбург: Уральский ГТУ. – 2009.
9. Гончаров, С.Н. Влияние термического цикла двухдуговой сварки на стойкость стали 20ХГСНМ против образования холодных трещин / С.Н. Гончаров, Н.З. Гуднев, Ю.А. Стеренбоген и др. // Автоматическая сварка. – 1982. – № 7. – С. 14–15.

10. Метелев, А.В. Регулирование термического цикла двухдуговой сварки закаливающихся сталей / А.В. Метелев, Ю.И. Горбачев // Сварочное производство. – 1984. – № 4. – С. 4–5.

11. Бурский, С.Г. Стойкость против образования холодных трещин ЗТВ соединений стали типа 14ХНЗМДА, выполненных двухдуговой сваркой в узкий зазор / С.Г. Бурский, В.А. Довженко, Ю.А. Стеренбоген // Автоматическая сварка. – 1990. – № 2. – С. 20–24.

12. Шолохов, М.А. Развитие элементов теории формирования шва и технологических основ многопроходной сварки плавящимся электродом по узкому зазору корпусных конструкций специальной техники из высокопрочных сталей: Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. – Екатеринбург: Уральский ГТУ. – 2016.

13. А.с № 998039 СССР. Способ двухэлектродной сварки с короткими замыканиями дугового промежутка и устройство для его осуществления / А.Ф. Князьков, Ю.Н. Сараев, А.К. Тимошенко, С.А. Колесин. – Оpubл. 23.02.83, Бюл. № 7.

14. Мандельберг, С.Я. Двухдуговая сварка в углекислом газе / С.Я. Мандельберг, Ю.Л. Богачек // Автоматическая сварка. – 1968. – № 9 – С. 72–73.

15. Патент № 2362659 РФ. Способ многодуговой сварки или наплавки в защитном газе / А.В. Масалков, Ю.А. Степанов, З.М. Морозова [и др.]. – Оpubл. 27.07.2009, Бюл. № 21

16. А.с. № 689800 СССР. Способ многодуговой сварки / Д.Г. Быховский, А.Л. Болотников, А.И. Данилов. – Оpubл. 05.10.79, Бюл. № 37.

17. Потапьевский, А.Г. Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего / А.Г. Потапьевский, Ю.Н. Сараев, Д.А. Чинахов. – Томск: Томский политехнический университет. – 2012. – 208 с.

18. Крампит, А.Г. Современные способы импульсно-дуговой MIG-MAG сварки / А.Г. Крампит, Е.А. Зернин, М.А. Крампит // Технологии и материалы. 2015. – № 1. – С. 4–11.

19. Крампит, А.Г. Управление процессом сварки в углекислом газе длинной дугой: монография / А.Г. Крампит, Н.Ю. Крампит. – Издатель: LAPLAMBERT Academic Publishing GmbH&Co. KG. – 2012. – 255 с.

20. Геке, С. МИГ/МАГ сварка тандемом / С. Геке, Й. Хедергард, М. Лундин, Г. Кауфманн // Сварочное производство. – 2002. – № 4. – С. 30–35.

21. Ках, П. Особенности применения гибридной лазерно-дуговой сварки (Обзор) / П. Ках, А.Салминен, Дж. Мартикаинен // Автоматическая сварка. – 2010. – № 6. – С. 38–47.

22. Жерносеков А.М., Андреев В.В. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом (обзор) // Автоматическая сварка. – 2007. – № 10. – С. 48–52.

23. Рекламная информация фирмы Fronius: CMT ADVANCE: специалист по сварке тонкого металла // Автоматическая сварка. – 2010. – № 10. – С. 67–68.

24. Серенко, А.Н. Особенности процесса двухдуговой сварки с программированием параметров режима // Сварочное производство. – 1991. – № 11. – С. 5–7.

25. Савицкий, А.М. Влияние скорости и длительности периодического охлаждения на формирование структуры сварных соединений закаливающихся сталей при дуговой сварке термоциклированием / А.М. Савицкий, М.М. Савицкий, Д.П. Новикова // Автоматическая сварка. – 2004. – № 8. – С. 41–44.

26. Чинахов, Д.А. Влияние режимов сварки плавлением на структуру и свойства соединений из легированных сталей: монография. – Томск: ТПУ. – 2010. – 114 с.

27. Goecke S., Hedegard J. Tandem MIG/MAG welding // Svetsaren. – 2001. – № 2. – P. 24–28.
28. Li, K.H., Chen, J.S. and Zhang, Y.M. Double-electrode GMAW process and control // Welding Journal. – 2007. – № 8– P. 231–237
29. Шолохов, М.А. Исследование и разработка технологии механизированной сварки в защитных газах сталей с пониженным содержанием вредных примесей: Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. – Екатеринбург: Уральский ГТУ. – 2009.
30. Стеренбоген, Ю.А. Роль пиковых напряжений в образовании холодных трещин в сварных соединениях закаливающих сталей / Ю.А. Стеренбоген, Д.В. Васильев, Э.Л. Демченко, Д.П. Новикова // Автоматическая сварка. – 2006. – № 4. – С. 11–20.
31. Воропай, Н.М. Технологические возможности процессов импульсной двухдуговой сварки в защитных газах (обзор) / Н.М. Воропай, В.М. Илюшенко, В.А. Мешенков // Автоматическая сварка. – 2005. – № 7. – С. 44–48.
32. Kah P. Current trends in welding processes and materials: improve in effectiveness / Kah P., Marikinen J. // Reviews and Advanced Materials Science. – 2012. – Vol. 30. – P. 189–200.
33. Kiran, D.V. Arc behavior in two wire tandem submerged arc welding / D.V. Kiran, D.W. Cho, W.H. Song, S.J. Na // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – № 8. – P. 1546–1556.
34. Egerland S. The pulsed GMAW twin-wire process for high / Egerland S., Hills G., Hummer W. // African fusion . – 2009. № 9. – P. 26–32.
35. Коновалов, А.В. Теория сварочных процессов / А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Макаров [и др.] // М: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2007. – 752 с.
36. Shi Y., Numerical simulation for shaping feature of molten pool in twin-arc submerged arc welding / Y. Shi, X. Liu, Y. Zhang // Open Journal of Applied Sciences. – 2012. № 2. – P. 47–53.

37. Файнберг, Л.И. Двухдуговая сварка в углекислом газе с повышенной скоростью / Л.И. Файнберг, А.А. Рыбаков, С.Л. Мандельберг // Автоматическая сварка. – 1975. – № 2. – С. 35–38.
38. Воропай, Н.М. Особенности импульсно-дуговой сварки с синергетическим управлением параметрами режима / Н.М. Воропай, В.М. Илюшенко, Ю.Н. Ланкин // Автоматическая сварка. – 1999. – № 6. – С. 26–32.
39. TIME TWIN – высокопроизводительный способ сварки // Автоматическая сварка. – 2003. – № 4. – С. 39–42.
40. Новый технологический процесс фирмы «Фрониус» // Автоматическая сварка. – 1988. – № 2. – С. 69–70.
41. Воропай, Н.М. Особенности формирования швов и ЗТВ при импульсной двухдуговой сварке в защитных газах низколегированной стали повышенной прочности / Н.М. Воропай, П.П. Проценко // Автоматическая сварка. – 2000. – № 8. – С. 41–47.
42. Барабаш, З.Н. Некоторые технологические особенности сварки в углекислом газе в узкую разделку / З.Н. Барабаш, В.А. Губенко, С.А. Шоно // Сварочное производство. – 1973. – № 9. – С. 19–21.
43. Гитлевич, А.Д. Техническое нормирование технологических процессов в сварочных цехах / А.Д. Гитлевич, Л.А. Животинский, Д.Ф. Жмакин. – М.: МАШГИЗ. – 1962. – 172 с.
44. Гецкин, О.Б. Опыт разработки и применение современных отечественных технологий и оборудования для автоматической орбитальной сварки магистральных газопроводов / О.Б. Гецкин, Е.М. Вышемирский, А.В. Шипилов, С.И. Полосков // Сварка и диагностика. – 2010. – № 6. – С. 51–57.
45. Крампит, А.Г. Процесс сварки в щелевую разделку под слоем флюса // Технология металлов. – 2010. – № 7. – С. 27–29.

46. Касаткин, Б.С. Двухдуговая сварка под флюсом толстолистовых сталей в узкий зазор // Б.С. Касаткин, К.С. Проценко, А.К. Царюк [и др.] // Автоматическая сварка. – 1991. – № 8. – С. 52–55.

47. Ищенко, А.Я. Технологические особенности двухдуговой импульсной сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов / А.Я. Ищенко, В.С. Машин, М.П. Пашуля // Автоматическая сварка. – 2005. – № 1. – С. 14–18.

48. Feasibility study on tandem narrow gap GMAW of 65 mm thick steel plate / Xu Wang hui, Lin San bao, Fan Cheng lei, Yang Chun li // China Welding. – 2012. – № 3. P. 7–11.

49. Баева, Л.С. Об усложнении сварочных технологий и необходимости качественного управления их эффективностью / Л.С. Баева, Т.Ю. Пашеева // Вестник МГТУ. – 2009. – № 1. С. 46–51.

50. Рыкалин, Н.Н. Расчёты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз. – 1951. – 296 с.

51. Rosenthal D. Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting // Welding Journal. – 1941. – № 5. – P. 220–234.

52. Николаев, Г.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций. – М.: Высшая школа. – 1982. – 272 с.

53. Судник, В.А. Расчёты сварочных процессов на ЭВМ. – Тула: ТПИ. – 1986. – 100 с.

54. Судник, В.А. Прогнозирование качества сварных соединений на основе численных моделей формирования шва при сварке плавлением тонкостенных конструкций: Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. – Ленинград: Ленинградский ГТУ. – 1991.

55. Twin arc welding - using single current source : пат. 2107617 Германия : МПК В 23 К 9/16 / D. D. Tenev, K. S. Sikov, A. S. Kovatschev ; заявл. 17.02.1971 ; опубл. 31.08.1972. – 6 с.

56. Method and apparatus for GMAW welding : пат. 5155330 США : МПК В 23 К 9/173 / P. J. Fratiello, D. K. Hartman, L. E. Seuffer ; заявл. 2.08.1991 ; опубл. 13.10.1992. – 12 с.
57. High-speed welding of steel sheets by the tandem pulsed Gas Metal Arc Welding system / T. Ueyama, T. Ohnava, K. Yamazaki et al // Transactions of JWRI (Osaka University). – 2005. – Vol. 34. – No. 1. – P.11–18.
58. MIG/MAG Hochleistungsschweißen mit TANDEM Technik // Schweiss. und Pruftechnik. – 1996. – № 9. – S. 150.
59. Hackl, H. TIME TWIN Schneller MSG Schweißen mit zwei Drahtelektroden // Ibid. – 1997. – № 5. – S. 71–73.
60. Andersson I., Tolf I., Hedegard I. Tandem MIG-MAG Vaxez sig starkare // Svetscn. – 2004. – № 2. – P. 7–11.
61. Killing, R. Das MAG Mehrdrahtschweißen ker. – 1997. – № 6. – S. 243–245.
62. Kuka two-wire MAG welding system doubles welding speeds // Industrial Robot. – 1996. – № 6. – P. 42.
63. Автоматизированная сварка трубопроводов: сварка за рубежом / Автоматическая сварка. – 2005. – № 1. – С. 52–56.
64. Zhaing M., Hang M., Lu W. Double electrodes improve GMAW heat input control // Welding Journal. – 2004. – № 11. – P. 39–41.
65. Воропай, Н.М. Особенности процессов дуговой точечной сварки в защитных газах (Обзор) // Автоматическая сварка. – 2004. – № 7. – С. 28–33.
66. Воропай, Н.М. Комбинированный процесс точечной плазменно-дуговой сварки / Н.М. Воропай, В.М. Илющенко, В.А. Мишенков // Сварщик. – 2004. – № 4. – С. 26, 27, 29.
67. Plasmapunktschweißen mit dem Plasma Spot Welder Schweiss. und Schneid. – 2003. – № 5. – P. 224–225/
68. Plasmapunktschweißen im Serieneinsatz // Ibid. – 2004. – № 12. – P. 642–643.

69. Воропай, Н.М. Двухдуговая наплавка алюминиевых поршней комбинированным неплавящимся и плавящимся электродом / Н.М. Воропай, В.В. Лесных, В.А. Мищенко // Автоматическая сварка. – 1996. – № 6. – С. 21–25.

70. Воропай, Н.М. Комбинированный процесс двухдуговой сварки и наплавки неплавящимся и плавящимся электродами / Н.М. Воропай, В.В. Лесных, В.А. Мищенко // Автоматическая сварка. – 1994. – № 4. – С. 56–57.