

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
Институт электросварки им. Е. О. Патона

На правах рукописи

**КАЧИНСКИЙ**  
*Владимир Станиславович*

УДК 621.791.75:621.3.013

ПРЕССОВАЯ СВАРКА С НАГРЕВОМ ДУГОЙ,  
ПЕРЕМЕЩАЮЩЕЙСЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ,  
СТЕРЖНЕЙ ВСТЫК

05.03.06 —

Технология и машины сварочного производства

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев 1995

АВ 33.872

Работа\* выполнена в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН  
Украины

Научный руководитель

академик НАН Украины  
профессор Кучук-Яценко С. И.

Официальные оппоненты

доктор технических наук  
профессор Заруба И. И.  
кандидат технических наук  
доцент Сыроватка В. В.

Будущее предприятие - АО "Автоагрегат" г. Краснодон

Направляет Вам для ознакомления автореферат диссертации ин-  
женера Качинского В. С. Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения  
принять участие в заседании специализированного совета или прис-  
лать свои отзывы (1 экз., заверенный печатью) по адресу: 252650,  
Киев-5, ГСП, ул. Боженко, 11, ученому секретарю спецсовета.

Защита состоится 24 января 1996 г. на заседании  
специализированного совета (К 50.02.02) при Институте электрос-  
варки им. Е. О. Патона.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библи-  
отеке института.

Автореферат разослан 22 декабря 1995 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
доктор техн. наук

А. А. Бондарев

ЛННБ України ім. В. Стефаника



00754818 (X)

АВ - 33.872

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

### АННОТАЦИЯ

**АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ.** В различных отраслях промышленности и строительстве находят применение конструктивные элементы, представляющие собой неразъемные стыковые соединения стержней и других деталей с компактными сплошными сечениями. Для получения стыковых соединений применяют различные методы сварки. Широкое применение при сварке стержней встык диаметром более  $\varnothing 20$  мм получили сварка трением и контактная стыковая сварка (КСС). Однако, для них существуют определенные ограничения, связанные с громоздкостью оборудования, интенсивным разбрызгиванием жидкого металла, искрообразованием в процессе сварки, существенным расходом металла на оплавление и осадку.

Высокая эффективность прессовой сварки с нагревом дугой, перемещающейся в магнитном поле (ПМД) сварка тонкостенных труб, имеющей ряд новых технических возможностей (относительно небольшое время сварки, концентрированный нагрев, минимальные припуски на оплавление и осадку, высокая производительность, особенно при массовом производстве), дала толчок к расширению ее области применения. Принципиально новым направлением в развитии ПМД сварки стала работа по сварке деталей с компактными сплошными сечениями.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ.** Определение основных параметров режима и разработка технологического процесса сварки стержней на базе исследований динамики перемещения дуги, управляемой внешним магнитным полем. Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи.

1. Исследование распределения индукции магнитного поля в пространстве зазора между торцами деталей сплошного сечения.
2. Исследование динамики перемещения дуги в зависимости от величины и направления составляющих индукции магнитного поля.
3. Изыскание способов и разработка оптимального программного управления перемещением дуги под действием магнитного поля.
4. Исследование формирования температурного поля в процессе нагрева стержней.
5. Исследование распределения жидкого расплава по поверхностям нагрева и формирования соединений.

6. Разработка технологии ПМД сварки стержней и определение возможных пределов изменения параметров режима сварки, обеспечивающих получение качественных соединений стержней.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. 1. Доказано, что взаимодействие радиальной составляющей тока с постоянной по направлению аксиальной составляющей индукции управляющего магнитного поля (УМП) создает силу, смещающую дугу к кромкам торцов стержней, в зону максимального значения радиальной составляющей индукции УМП.

2. Установлена принципиальная возможность перемещения столба дуги в зазоре из центральной части сечения торцов к периферийной части и в обратном направлении за счет управления величинами аксиальной и радиальной составляющих индукции УМП.

3. Предложено распределять индукцию магнитного поля в зазоре таким образом, что отсутствует стремление дуги после ее возбуждения сместиться к осевой линии торцов стержней.

4. Разработка программного УМП позволило добиться устойчивого процесса нагрева торцов стержней и качественного формирования сварных соединений.

5. Результаты научных исследований позволили разработать принципиально новый технологический процесс сварки ферромагнитных сталей диаметром  $\varnothing 10+25$  мм.

На защиту выносятся следующие положения работы.

1. Методика исследований поведения дуги в пространстве зазора между торцами деталей сплошного сечения.

2. Определяющее влияние аксиальной составляющей индукции магнитного поля на смещение дуги к кромкам торцов стержней.

3. Необходимость создания программного УМП в пространстве зазора с целью осуществлений заданного сканирования движущейся дуги.

4. Необходимость перемещения дуги по кромкам торцов стержней для получения требуемого нагрева стыкуемых поверхностей.

5. Особенности формирования соединений стержней, полученных методом ПМД сварки с программным УМП.

6. Области практического применения разработанной технологии сварки.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В основу исследований работы следует отнести разработку и изготовление комбинированного устройства ввода магнитного поля, измерения распределения индукции магнитного поля в пространстве зазора с помощью тесламетра 43205. Изучение следов, оставляемых активными пятнами дуги на поверхностях

нагрева, измерения фотоэлектрическим способом скорости перемещения дуги по кромкам торцов деталей, измерения температуры поверхностей нагрева с помощью хромель-алюмелевых термопар, использование оптической и растровой микроскопии, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализ, различных стандартных методов определения прочностных свойств сварных соединений.

**ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ.** На основании проведенного комплекса исследовательских и экспериментальных работ разработана технология прессовой стыковой сварки деталей с компактными сплошными сечениями. По контрактам с АО "АВТОВАЗ", г.Запорожье и АО "АВТОАГРЕГАТ", г.Краснодон разработаны технологии ПМД сварки различных автомобильных деталей. Сварены опытно-промышленные партии, которые сейчас проходят испытания.

Разработанная новая технология сварки может найти применение в машиностроении, автомобилестроении, инструментальном производстве и др.

**АПРОВАЦИЯ РАБОТЫ.** Основные положения работы докладывались на научно-техническом совете ИЭС им.Е.О.Патона (1990 г.).

Диссертационная работа в целом обсуждалась на технологическом семинаре ИЭС им.Е.О.Патона (1995 г.).

**ПУБЛИКАЦИИ.** Основные идеи работы отражены в 6 авторских свидетельствах.

**СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка использованной литературы. Работа содержит 165 страниц, в том числе 105 страниц машинописного текста, 118 рисунков, 3 таблицы, списка основной использованной литературы, включающего 107 наименований.

**ВО ВВЕДЕНИИ** обоснована актуальность выполненной работы, сформулированы научная новизна полученных результатов, положения выносимые на защиту.

**В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ** на основе литературных данных проведен анализ возможных способов стыковой сварки компактных деталей, имеющих сплошное сечение, обоснована целесообразность применения метода ПМД сварки, сформулированы цель и задачи исследований.

**ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ** описаны экспериментальная установка, устройства ввода магнитного поля, методика измерений и результаты исследований распределения индукции магнитного поля и скорость перемещения дуги. Определено влияние составляющих индукции магнитного поля и других параметров режима сварки на динамику пере-

мещения дуги. Обосновано создание программного УМП, обеспечивающее получение стабильного нагрева и полного обновления окисленной поверхности металла перед осадкой.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ изложены особенности влияния программируемого нагрева торцов стержней, на формирование сварного соединения. Представлены результаты измерений распределения температурного поля по поверхностям нагрева и проведенных металлографических исследований.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ описаны особенности технологии сварки стержней методом ПМД сварки с программным УМП. Определены основные требования, предъявляемые к сварочному оборудованию.

В ОСНОВНЫХ ВЫВОДАХ кратко сформулированы результаты работы.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Высокая эффективность ПМД сварки тонкостенных труб дала толчок к расширению ее области применения. В настоящее время известным способом сваривают полые детали встык. При этом сварка возможна только лишь, деталей с толщиной стенки до 6 мм. Связано это с тем, что на перемещение активных пятен дуги накладываются ограничения, обусловленные тем, что размеры кромок свариваемых деталей должны быть соизмеримы с размерами активных пятен столба дуги. При этом характер и направление перемещения дуги заранее обусловлены распределением индукции внешнего управляющего магнитного поля и формой поперечного сечения трубчатых деталей. В случае, когда размеры кромок деталей превышают размеры активных пятен дуги, известный способ ПМД сварки теряет свою эффективность.

Принципиально новым направлением в развитии ПМД сварки стало проведение исследовательских и экспериментальных работ по сварке компактных деталей сплошного сечения.

Особенностью ПМД сварки является существование внешнего магнитного поля в зоне горения дуги, без которого процесс невозможен. Для устойчивого горения дуги требуется создание определенного распределения индукции магнитного поля. Для измерения распределения индукции магнитного поля использовали тесламетр 43205. С целью точного измерения, было изготовлено специальное устройство, позволявшее плавно перемещать 2 шупа, с размещенными в них датчиками Холла, в осевом, горизонтальном и вертикальном направлениях в пространстве зазора. Ввод магнитного поля в пространство зазора осуществлялся с помощью 2 комбинированных устройств, магнитные потоки которых были направлены встречно. Конструктивно каждое из

устройств состоит из постоянного магнита и катушки электромагнита, что позволило путем пропускания незначительной величины тока через катушки электромагнитов изменять распределение индукции магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами. Питание электромагнитов осуществлялось от 2 источников тока П138.

Отсутствие публикаций о проведении работ по исследованию распределения индукции УМП в пространстве зазора между торцами стержней определило для эксперимента широкое поле деятельности.

Главная задача состояла в том, чтобы изыскать способы управления дугой, позволяющие перемещать дугу по всей площади поперечного сечения стержней.

Измерения распределения индукции магнитного поля показали, что при использовании коаксиально расположенных магнитов, создающих встречно-симметричные магнитные потоки, значительное влияние на смещение дуги в область осевой линии торцов стержней оказывает градиент распределения радиальной  $B_r$  составляющей индукции магнитного поля, увеличивающийся от осевой линии к кромкам торцов стержней (рис.1). На дугу действует сила, направленная по радиусу к осевой линии торцов стержней, где и происходит ее горение после возбуждения. При этом распределение тепловой энергии дуги по торцам деталей происходит неравномерно, с большей плотностью сварочного тока, по гораздо меньшей площади свариваемого сечения. Применение симметрично-радиального УМП нецелесообразно использовать при ГМД сварке стержней встык.

По материалам публикаций известно, что дуга устойчиво перемещается по торцам труб в зоне максимального значения радиальной составляющей индукции УМП.

Стало очевидно, что начальная часть исследований должна свестись к тому, чтобы сразу после возбуждения посредством создания асимметричного распределения магнитного поля (рис.2), сместить дугу к кромкам торцов стержней и заставить ее там перемещаться. Перемещение дуги по кромкам представляет интерес в связи с тем, что при таком перемещении происходит равномерное распределение энергии дуги по торцам, с меньшей плотностью сварочного тока, по гораздо большей площади свариваемого сечения, чем занимают активные пятна дуги.

С технологической точки зрения рассредоточенное выделение энергии, осуществляет более равномерный нагрев свариваемых торцов стержней, чем при перемещении дуги в центральной части торцов.

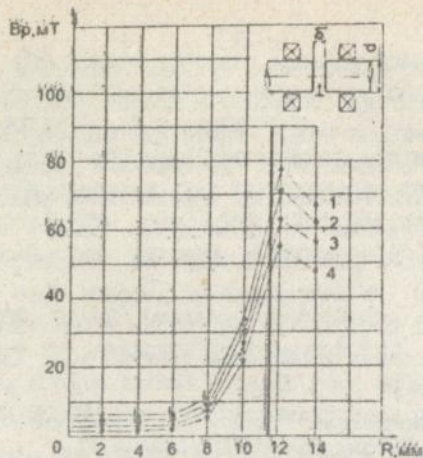


Рис.1. Распределение радиальной  $B_r$  составляющей индукции магнитного поля в пространстве зазора между торцами стержней ( $\varnothing 23\text{мм}$ ), при зазоре: 1 - 2,5мм; 2 - 3мм; 3 - 3,5мм; 4 - 4мм.

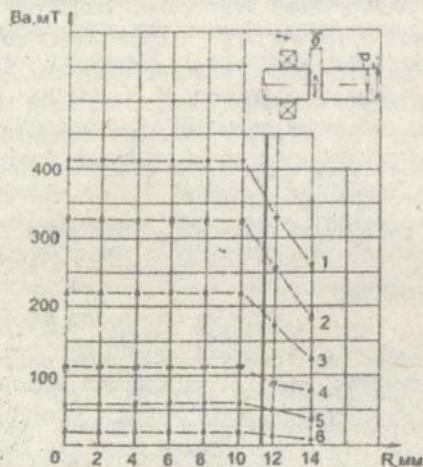


Рис.2. Распределение аксиальной составляющей  $B_a$  индукции магнитного поля в пространстве зазора между торцами стержней  $\delta = 1,4\text{мм}$  и магнитодвижущей или со стороны катода: 1 - 315А; 2 - 173А; 3 - 245А; 4 - 206А; 5 - 184А; 6 - 107А.

С этой целью были проведены исследования по определению влияния величины распределения аксиальной составляющей  $B_a$  индукции магнитного поля и ее направления со стороны катода или анода на динамику перемещения дуги в зазоре между торцами стержней.

Проанализируем влияние  $B_a$ , направленную на сварочную дугу со стороны катода. Индукция аксиальной составляющей  $\vec{B}_a$  магнитного поля направлена по оси проводника с током, однако совпадение всех линий тока с осью проводника следует рассматривать как частный идеальный случай. Практически всегда имеется радиальная составляющая тока  $\vec{I}_p$ , взаимодействующая с  $\vec{B}_a$ , что является причиной появления силы  $\vec{F}_{Ba}$ , оказывающей определяющее влияние на характер смещения дуги к кромкам торцов стержней (рис. 3).

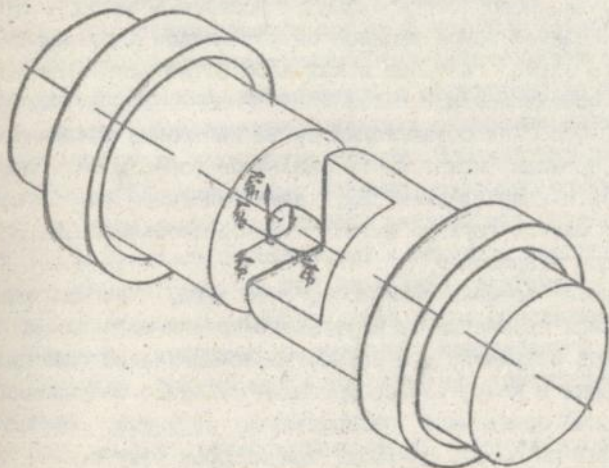


Рис. 3. Схема создания силы, оказывающей определяющее влияние на характер смещения дуги к кромкам торцов стержней.

При преобладании  $B_a$  со стороны анода перемещение дуги носит хаотический характер. Отсутствует ярко выраженное смещение активных пятен дуги к кромкам торцов стержней.

Большое влияние, на характер смещения активных пятен дуги, оказывает величина зазора между торцами стержней. При зазоре  $\delta=1,2\text{мм}$  и  $I_d=250\text{А}$ ,  $B_a=800\text{мТ}$ ,  $B_p=90\text{мТ}$ , дуга после смещения к кромкам торцов стержней оставляет широкий непрерывно-оплавленный

след, т.к. столб дуги при смещении сжат за счет малых размеров зазора. После выхода наружу и перемещении по кромкам стержней, следы активных пятен дуги становятся уже, приблизительно в 10 раз. Как показали измерения, скорость перемещения дуги при этом достигает  $V_d=90\text{м/с}$ , что можно связать с нахождением дуги в области достаточно большой величины радиальной составляющей  $B_p$  индукции магнитного поля.

Небольшая величина зазора  $\delta=1,2\text{ мм}$  не оказывает в начальной стадии процесса отрицательного влияния на устойчивость перемещения дуги по кромкам торцов стержней.

При увеличении зазора до  $\delta=1,5\text{ мм}$ , можно наблюдать следы, оставленные анодным и катодным пятнами при скачкообразном смещении дуги к кромкам. Увеличение зазора меняет форму смещения дуги. Под действием внешнего отклоняющего магнитного поля происходит перемещение катодного потока плазмы, смещенного относительно противостоящего ему анодного потока плазмы. Достигнув анода, катодный поток плазмы образует новое анодное пятно, следом происходит смещение катодного пятна. Анодное и катодное пятна стремятся расположиться друг против друга.

Доказано, что след оставляемый дугой на торцах стержней после смещения к кромкам, может иметь различные формы и быть связанным с величиной и направлением  $B_a$ , электрическими и тепловыми процессами в местах горения дуги, шероховатостью обработки поверхности торцов стержней.

До недавнего времени считалось, что дуга, при ПМД сварке, после возбуждения смещается на внутренние кромки труб или к осевой линии торцов стержней, что не всегда положительно сказывается на процесс сварки и качество формирования сварного соединения. В ходе исследований предложено распределять индукции магнитного поля  $B_a$  от  $400\text{мТ}$  до  $230\text{мТ}$ ,  $B_p=100\text{мТ}$  при котором отсутствует стремление дуги после ее возбуждения сместиться к осевой линии торцов стержней или на внутренние кромки торцов труб. Столб дуги при этом изогнут в противоположную сторону от геометрической оси свариваемых деталей.

Однако, при неизменном в процессе сварки распределении  $B_a$  и  $B_p$  индукции магнитного поля через  $1,5\dots 2\text{с}$  происходит увеличение напряжения на дуге и обрыв дуги.

Для дальнейшего прохождения ПМД сварки стержней были разработаны и апробированы различные схемы процесса и выбрана наиболее

оптимальная программа изменения магнитного поля. В пространстве зазора между собранными под сварку деталями создается программное управляющее магнитное поле, состоящее из аксиальной  $B_a$  и радиальной  $B_p$  составляющих магнитной индукции. После возбуждения дуги при ПМД сварке с УМП происходит смещение дуги на кромки торцов стержней. Процесс нагрева свариваемых торцов происходит при перемещении дуги по их кромкам в зоне с повышенным значением радиальной составляющей  $B_p$  индукции магнитного поля, что обеспечивает устойчивое, со скоростью до 105 м/с, перемещение дуги. Перед осадкой деталей производится уменьшение величины аксиальной  $B_a$  и радиальной  $B_p$  составляющих индукции УМП до заданных величин. Дуга смещается к центру торцов стержней. Последующее увеличение аксиальной составляющей  $B_a$  индукции УМП приводит к скачкообразному смещению дуги к кромкам торцов стержней, а одновременное увеличение сварочного тока - к интенсивному обновлению свариваемых поверхностей. Затем производится осадка стержней.

Исследование свариваемости стержней методом ПМД сварки позволили расширить применение способа на сварку пластин. Особенность разработанной схемы заключается в отсутствии на концах свариваемых пластин фотоэлектрических или сенсорных датчиков. Это значительно упростило технологию сварки. Перемещение дуги в зазоре между торцами пластин внешне подобно возвратно-поступательному движению: Дуга по достижении концов деталей под воздействием УМП поворачивает и начинает перемещаться в обратном направлении.

Применение программного УМП позволило получить: устойчивый процесс нагрева торцов стержней, интенсивное обновление свариваемых поверхностей, нагретых до состояния пластической деформации, и, как следствие, формирование качественных соединений, рассматриваемое ниже.

При ПМД сварке тонкостенных труб существуют ограничения, связанные с тем, что поперечные размеры свариваемых деталей должны быть соизмеримы с размерами активных пятен дуги. Тем самым можно допустить, что мощность, выделяемая активными пятнами дуги, равномерно распределяется по толщине стенок свариваемых труб в процессе перемещения дуги.

Совершенно иная картина при ПМД сварке стержней. Возьмем, к примеру, стержень  $\varnothing 22$  мм. К концу нагрева ширина катодного и анодного пятен приблизительно одинаковая и составляет 2,9 мм. Активное пятно дуги в процессе нагрева охватывает 25% площади по-

перечного сечения стержня. Соединение при таком нагреве необходимо сформировать по всей поверхности торцов стержней, что является одной из особенностей ПМД сварки стержней встык с программным УМП. В данном случае мы имеем существенное отличие процесса нагрева торцов при ПМД сварке стержней от процессов нагрева при ПМД сварке труб, контактной стыковой сварки оплавлением и сварки сопротивлением, где нагрев свариваемых торцов труб или стержней происходит практически одновременно по всей поверхности поперечного сечения деталей.

Для определения характера нагрева дугой торцов стержней провели измерения распределения температуры в процессе ПМД сварки стержней с программным УМП.

Измерение температуры поверхности, нагреваемой дугой, связано со сложными явлениями, возникающими при теплообмене между чувствительным элементом, объектом измерения (нагреваемыми поверхностями) и окружающей средой. Поверхность нагреваемых торцов стержней представляет собой границу раздела двух сред с резко различающимися тепловыми свойствами. При этом вблизи поверхностей нагрева обычно возникают большие градиенты температур, что существенно затрудняет точное измерение ее температуры. В данном случае, когда термодатчик одной стороной касается поверхности, температуру которой необходимо измерить, а с другой стороны подвержен влиянию воздуха, тепловое влияние которого неизбежно искажает результаты измерений, было принято вводить рабочие концы термопар в тело стержней и зачеканивать их там. В этом случае исследуемые стержни состояли из двух половинок.

Измерения температуры поверхностей торцов стержней, нагреваемых перемещающейся дугой проводили в следующей последовательности. Вначале было измерено распределение температуры при горении дуги в области осевой линии, затем при перемещении по кромкам торцов стержней.

При горении дуги в центре торцов уже через 3с после начала процесса нагрева в центре достигается температура плавления металла, при этом на кромках торцов температура значительно ниже. Металлографические исследования подтвердили неравномерность нагрева торцов стержней. Ширина оплавленного слоя в основном  $0,063 \pm 0,136$  мм. У выплавленной лунки ширина увеличивается до 1 мм.

При перемещении дуги по кромкам торцов стержней на расстоянии  $\ell = 1$  мм наблюдается разброс температуры в точках измерения. В

начальной стадии нагрева температура кромок плоскости стержней несколько выше, чем в объемах, расположенных внутри сечения образца. В процессе нагрева температура по сечению образца выравнивается, после чего температура в объемах, расположенных внутри образца, возрастает немного быстрее в течении последующей стадии нагрева. Более низкая температура объемов, размещенных на кромках плоскости стержней, объясняется интенсивной поверхностной теплоотдачей в воздух. С увеличением расстояния от конца термодуговой пары до нагреваемой плоскости стержня, температуры в четырех объемах отличались друг от друга в пределах  $100^{\circ}\text{C}$ , в течение всего процесса нагрева.

Установлено, что при перемещении дуги по кромкам торцов стержней участок перегрева с грубой структурой образуется в месте горения дуги. На основании проведенных исследований доказано, что перемещение дуги по кромкам стержней или внешним кромкам труб позволяет получать равномерный нагрев торцов стержней.

Формирование соединений при ПМД сварке, как и при других прессовых способах сварки, происходит посредством деформации поверхностей деталей нагретых до пластического состояния. Равномерный нагрев торцов стержней является основным, но недостаточным условием для формирования качественного соединения. При ПМД сварке стержней защитные среды, как правило, не используются, что приводит к окислению нагреваемых торцов стержней кислородом воздуха и образованию в процессе сварки оксидной пленки. С помощью ПМД сварки можно создать условия нагрева с высокими градиентами температурного поля. При этом сохраняются общие закономерности, присущие всем видам прессовой сварки. Главной же специфической особенностью для каждой разновидности являются условия удаления оксидов, находящихся на торцах нагреваемых деталей. Предотвратить окисление можно двумя путями, известными из опыта сварки давлением: 1. Защитить нагреваемые поверхности деталей от окисления (сварка в твердой фазе) или 2. Перевести окисленный металл в жидкое состояние. Для формирования соединений при ПМД сварке эти оба приема в принципе могут быть использованы.

При разработке представленной технологии ПМД сварки, исследования проводились без использования защитных газов, предотвращающих окисление нагреваемых поверхностей. Данный выбор был сделан преднамеренно с целью упрощения технологии ПМД сварки стержней.

Принято считать, что при ПМД сварке механизм формирования соединений такой же, как при любых методах прессовой сварки, где имеет место плавление торцов (контактная оплавлением, высокочастотная). Опыт ПМД сварки труб подтверждает этот вывод. Качественная сварка труб обеспечивается без какой-либо газовой защиты при условии, что частота вращения дуги в момент перед осадкой выбрана такой, что слой расплава в любой точке на поверхности торцов не успевает закристаллизоваться за интервалы времени при прохождении дуги через эти участки. При этом неизменно выдерживается условие, что диаметр пятна дуги соизмерим с толщиной стенки трубы.

При сварке деталей сплошного сечения, как следует из вышесказанного, такие условия нагрева перед осадкой в принципе можно обеспечить для центрального и периферийного участков торцов шириной до 3мм, за счет программного управления перемещением дуги. На промежуточном участке трудно обеспечить строго ориентированное движение дуги.

Термопары устанавливали как со стороны катода, так и со стороны анода. Нагрев катода и анода был практически одинаков, что является одним из факторов, позволяющих получать качественные сварные соединения.

В связи с тем, что активные пятна дуги при нагреве составляют след, занимающий лишь 25% от общей площади поперечного сечения торца стержня были проведены так же металлографические исследования. Их цель состояла в том, чтобы определить наличие жидкого расплава на поверхности торцов стержней. Получены следующие результаты. Слой расплавленного металла узкий и неравномерный, ширина от 0,11 мм в центральном участке до 0,26мм на периферии. На промежуточном участке между центром и периферией обнаружены только следы движения дуги, толщина слоя 0,01+0,05 мм. Структура характерна для литого металла.

При кратковременном,  $t=0,05+0,1с$  смещении дуги к центру перед форсировкой, структура металла подобна структуре без кратковременного смещения.

Экспериментально установлено, что при программном перемещении столба дуги из центральной части сечения образцов на периферийную удается на образцах диаметром до 30мм обеспечить требуемую частоту прохождения дуги на центральном и периферийном участках, обеспечивающих удаление расплава в жидком состоянии. При этом в пространстве зазора между деталями в результате интенсивного

испарения металла создается естественная газовая защитная среда, препятствующая окислению участков, не подвергавшихся нагреву дугой. На этих участках формирование соединения происходит в твердой фазе, без каких-либо дефектов.

Уакая З.Т.В., по сравнению с КСС позволяет производить соадку, без упора на ограничение хода подвижной плиты сварочной установки. Этим достигается удаление из зоны соединения слоя расплавленного металла на поверхности торцов деталей и формирование в отдельных случаях соединений без участка перегрева в ЗТВ.

Таким образом, глубокая локальная деформация приконтактных слоев металла является одним из важнейших условий формирования качественных соединений, получаемых прессовыми способами (контактная, холодная сварка, а также ПМД сварка).

В целом основу технологии ПМД сварки стержней составила разработка программного УМП, при котором в процессе сварки изменяли величину магнитной индукции, осуществляя перемещение дуги по поверхностям торцов стержней.

В процессе проведения работы были определены основные параметры режима ПМД сварки, влияющие на качество сварного соединения, это: величина сварочного тока  $I_d, A$ ; время  $t, c$  прохождения сварочного цикла; напряжение на дуге  $U_d, B$ ; величина индукции магнитного поля  $B, mT$ ; размер зазора  $\delta, mm$  между торцами поверхностей нагрева стержней; давление осадки  $P, MPa$ ; величина осадки  $L, mm$ .

Разработана технология сварки углеродистой, низколегированной и легированной сталей.

Подготовлены технические данные на установку для ПМД сварки стержней диаметром  $\varnothing 10 \times 25$  мм.

#### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.

1. Известные способы управления движением дуги не позволяют создать требуемые условия нагрева при сварке деталей сплошного сечения.

2. Взаимодействие радиальной составляющей тока  $I_p$  с постоянной по направлению аксиальной составляющей  $B_a$  индукции УМП создает силу  $F_{Ba}$ , смещающую дугу к кромкам торцов стержней, в зону максимального значения радиальной составляющей индукции УМП.

3. Разработаны способы управления дугой по всей площади поперечного сечения в связи с тем, что размеры торцов деталей сплошного сечения превышают размеры активных пятен дуги. Это поз-

волило установить принципиальную возможность перемещения столба дуги в зазоре из центральной части сечения торцов к периферийной и в обратном направлении за счет управления величинами  $V_p$  в пределах  $35+110$  мТ;  $V_a$  в пределах  $10+400$  мТ.

4. При перемещении дуги в пространстве зазора по торцам стержней наблюдаются скачкообразные следы, оставляемые анодным и катодным пятнами. Под действием внешнего магнитного поля происходят перемещение катодного потока плазмы смещенного относительно анодного потока плазмы. Отмечено скачкообразное опережение в процессе движения одного активного пятна дуги другим.

5. Предложено распределять индукцию магнитного поля в пространстве зазора  $V_a$  от  $400$  мТ до  $230$  мТ,  $V_p=100$  мТ при котором отсутствует стремление дуги после ее возбуждения сместиться к осевой линии торцов стержней или на внутренние кромки торцов труб. Столб дуги при этом, изогнут в противоположную сторону от геометрической оси свариваемых деталей.

6. Разработка программного управляющего магнитного поля позволило добиться устойчивого процесса нагрева торцов стержней, путем чередования в определенной последовательности периодов горения дуги в центральной и периферийной части сечения деталей. Требуемый нагрев стыкуемых поверхностей достигается при перемещении дуги по кромкам торцов стержней.

7. В процессе нагрева участок перегрева с грубой структурой образуется в местах горения дуги. Как установлено, область участка крупного зерна, расположенная на кромках, выдавливается в наружное усиление и грат, а сварное соединение формируется за счет участка мелкого зерна.

8. Установлено, что формирование соединений в центральной и периферийной части сечения деталей происходит через слой расплавленного металла, а на участке между ними в твердой фазе. Последнее обусловлено наличием в пространстве зазора между деталями защитной газовой среды, генерируемой при испарении металла, дугой, движущейся по периферийной части сечения, перед осадкой.

9. Результаты научных исследований позволили разработать технологию сварки стержней диаметром  $\varnothing 10+25$  мм сталей ВСтЗ,20;40;45; 35ХГФ; 30ХМА, что позволит использовать разработанный способ сварки в автомобильной промышленности, инструментальном производстве и др. областях промышленности.

Основные идеи диссертации опубликованы в следующих работах.

1. А.с. 1766637 СССР, В 23 К 9/08. Способ сварки дугой, вращающейся в магнитном поле/ В.Ю.Игнатенко, С.И.Кучук-Яценко, П.В.Кузнецов, В.С.Качинский. - Оpubл.07.10.92, Бюл.№37.

2. А.с. 1718460 СССР, В 23 К 9/08. Способ термопрессовой сварки с нагревом дугой, управляемой магнитным полем /В.С.Качинский, С.И.Кучук-Яценко, П.В.Кузнецов, В.Ю.Игнатенко. -

3. Патент 1838060 Россия, В 23 К 9/08. Способ сварки

/В.С.Качинский, С.И.Кучук-Яценко, П.В.Кузнецов, В.Ю.Игнатенко - Оpubл.30.08.93. Бюл.№32.

4. Патент 5117084 США, В 23 К 9/08. Способ сварки дугой, движущейся в магнитном поле./В.Ю.Игнатенко, С.И.Кучук-Яценко, П.В.Кузнецов, В.С.Качинский/

5. Патент 94128093 Украина, В 23 К 9/08. Способ сварки дугой, вращающейся в магнитном поле/В.Ю.Игнатенко, С.И.Кучук-Яценко, В.С.Качинский/.

6. Патент 94128094 Украина, В 23 К 9/08. Машина для прессовой сварки с нагревом дугой, управляемой магнитным полем. /С.И.Кучук-Яценко, В.Г.Кривенко, С.И.Головченко, В.С.Качинский.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА. В [1] обоснована возможность применения способа для сварки стержней. В [2] предложена идея создания управляющего магнитного поля с постоянным по направлению аксиальной составляющей индукции магнитного поля, с целью радиального смещения дуги в пространстве зазора торцов деталей сплошного сечения. В [3] разработана технология сварки деталей сплошного сечения. В [4] предложено производить увеличение сварочного тока по достижении напряжения на дуге заданного минимального значения. В [5] предложено производить осадку деталей, после того, как напряжение на дуге увеличится в 1,3+1,9 раза по сравнению с напряжением на дуге перед увеличением сварочного тока. В [6] обоснованы требования к установке с целью ее использования для сварки деталей сплошного сечения.

*Лаш* —

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

Подп. в печ. 20.12.95. Формат 60x84/16. Бум. офс. № 2. Офс. печ.  
Усл. печ. л. 0,93. Усл. кр.-отт. 1,16. Уч.-изд. л. 0,96. Тираж 100  
экз. Зак. 5-345р.

---

ИЭС им. Е.О.Патона, 252650 Киев 5, ГСП, ул. Горького, 69.  
ПОП ИЭС им. Е.О.Патона, 252650 Киев 5, ГСП, ул. Горького, 69.

450 506

AB 33.872