

М 358843

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана

На правах рукописи

СИНЕЛЬНИКОВ Николай Георгиевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВАРКИ ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ДУГОЙ С РАЗЛИЧНЫМ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ВАННУ

(Специальность 05.04.05 – Технология и машины сварочного
производства)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Тру-
дового Красного Знамени высшем техническом училище имени
Н.Э. Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук, доцент
ГЛАДКОВ Э.А.

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор МАЗЕЛЬ А.Г.
к.т.н., доцент МИКАЕЛЯН В.Г.

Ведущее предприятие: НИКИИТ

Защита диссертации состоится "____" _____ 1980 г.
на заседании специализированного Совета К053.15.03 по техно-
логии и машинам сварочного производства Московского ордена Ле-
нина и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического
училища имени Н.Э. Баумана по адресу: Москва, 107005, 2-я Ба-
уманская ул., д. 5.

Р____ е печатью, просим

В____ отечке МВТУ имени

Н____ 1980 г.

М358843

НИИ В.М.

л.

Заказ 238

По
Тв
Л

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Значительный объем сварочных работ в машиностроении и приборостроении составляет дуговая сварка соединений из металлов толщиной от 0,05 до 1 мм. Для решения этой задачи в нашей стране выпускается большое количество разнообразного оборудования. Однако отсутствие критериев оценки эффективности этого оборудования при сварке различных типов соединений не позволяет использовать все его возможности и устранить брак изделий.

В связи с этим актуальным является исследование процесса сварки типовых тонколистовых соединений с учетом особенностей теплового и силового воздействия дуги на ванну при различных способах сварки.

Решение этой задачи позволит правильно сформулировать требования к дуговому источнику нагрева, оценить на их основе возможности существующего оборудования, а также наметить пути разработки новых более совершенных сварочных систем питания дуги, позволяющих управлять процессом за счет изменения величины и плотности теплового потока на аноде.

Целью данной работы являлись разработка методов оценки пригодности различных дуговых источников нагрева для качественного выполнения сварных тонколистовых соединений; изыскание и реализация нового концентрированного устойчивого дугового источника нагрева.

Методы исследования, использовавшиеся в данной работе, включали: расчеты, выполненные на основе теории тепловых процессов при сварке; методы теории подобия; анализ импульсных систем; исследование энергетических, геометрических и пространственно-временных характеристик дуги импульсного и непрерывного режимов; изучение физико-технологических особенностей взаимодействия дуги и ванны. В исследованиях использовали осциллографирование параметров режима процесса, зондирование дугового разряда, фото- и киносъемку дуги и ванны, сравнительную оценку силового воздействия на анод дугового разряда при различных способах его формирования на специально разработанном стенде, оснащенном высокоточной контрольно-измерительной аппаратурой.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1358843

Синдильников Н.Б. Изд.

Научная новизна работы состоит:

а) В создании методики комплексной оценки условий формирования швов тонколистовых конструкций на основе положений теории подобия, гидромеханики, современных достижений в исследованиях низкотемпературной плазмы, учитывающей взаимосвязь физических процессов в дуге и сварочной ванне. С ее помощью между термомеханическими параметрами источника нагрева и соответствующими качественному формированию шва размерами сварочной ванны установлена связь для стыковых соединений, представленная в виде нелинейной математической модели; для торцовых - в виде линейных зависимостей между величиной сварочного тока и толщиной соединяемых кромок;

б) В разработке нового способа управления формой, размерами и структурой металла швов тонколистовых конструкций за счет варьирования параметров импульсов тока, которые выбираются с учетом инерционности анодных процессов в дуге.

Практическая ценность работы заключается в применении предложенной методики оценки пригодности источника нагрева для сварки тонколистовых соединений конкретной толщины и в промышленной реализации нового способа получения концентрированного источника нагрева с высокой пространственной устойчивостью и малым, по сравнению с микроплазменной дугой, давлением на сварочную ванну.

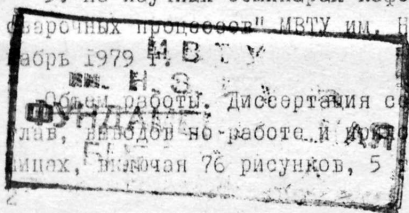
Апробация работы. Основные положения работы доложены:

1. На отраслевом семинаре "Сварка в приборостроении" Министерства приборостроения, средств автоматизации и систем управления. Смоленск. Ноябрь 1979 г.

2. На юбилейной У Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции, посвященной 150-летию ИВТУ им. Н.Э. Баумана "Научные основы автоматизации производственных процессов и управления качеством в машиностроении и приборостроении", ИВТУ им. Н.Э. Баумана. Декабрь 1979 г.

3. На научных семинарах кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" ИВТУ им. Н.Э. Баумана. Февраль и декабрь 1979 г.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по работе и приложения, изложена на 172 страницах, включая 76 рисунков, 5 таблиц, приложения. В списке



использованной литературы 157 наименований.

Глава I. Технологические особенности дуговой сварки тонколистовых конструкций

Важнейшими факторами, определяющими возможность получения качественных сварных тонколистовых соединений, являются их вид, конструктивное оформление соединяемых кромок и размеры.

На основании исследований Гвозденко В.С., Дудко Д.А., Широнова В.М. и Шнейдера Б.И. установлено, что помимо характеристик источника нагрева основными конструктивно-технологическими параметрами, регламентирующими выполнение качественных сварных соединений, являются: величина зазора между соединяемыми кромками толщиной δ , которая для стыковых соединений должна быть меньше $0,3 \delta$, для торцовых — $1,0 \delta$; превышение кромок, составляющее для стыковых соединений меньше $0,6 \delta$, а для торцовых может находиться в диапазоне $(0,6 \dots 6,0) \delta$; величина выступающих за приемы теплоотводов соединяемых кромок, которая не должна превышать 30δ .

Формирование швов тонколистовых конструкций имеет ряд технологических особенностей, учет которых является необходимым условием получения качественных соединений. Важнейшими из них являются:

- высокая чувствительность процесса к колебаниям теплового режима из-за небольшого теплосодержания сварочной ванны;
- значительное влияние площади пятна нагрева дуги на геометрические размеры ванны;
- высокая чувствительность процесса к механическому действию сварочного источника из ванны;
- повышенная склонность кромок к деформациям при сварке;
- значительное влияние сил поверхностного натяжения сварочной ванны на формирование шва;
- низкая пространственная устойчивость дуги на малых сварочных токах.

Указанные особенности определяют требования к источнику нагрева. Проведенный анализ современных способов дуговой сварки выявил следующие недостатки.

Для способа сварки свободной дугой в аргоне неплавящимся электродом характерны низкая пространственная устойчивость и большое пятно нагрева.

Процесс импульсно-дуговой сварки имеет малую производительность и характеризуется высокой чувствительностью формирования шва к изменению длины дуги.

У скатой дуги недостаточно высокая концентрация тепла в изделии на минимальных значениях сварочного тока, приводящая к провисанию швов и ухудшению работоспособности сварных соединений.

В микроплазменном процессе следует отметить высокое давление плазменной струи, вызывающее провисание швов, сложность, низкую мобильность и невысокий ресурс работы пистолета.

Наиболее общими недостатками для всех перечисленных способов сварки являются ограниченные возможности по управлению площадью пятна нагрева дуги.

Известные качественные оценки достоинств и недостатков различных способов сварки не позволяют получить однозначные выводы о применимости того или иного оборудования для бездефектного выполнения швов типовых соединений на изделиях конкретной толщины. Очевидно, создать дуговой источник нагрева, лишенный всех указанных недостатков, практически невозможно. Однако расширение существующих технологических возможностей и границ применимости оборудования для дуговой сварки является перспективным. Эффективен процесс сварки дугой, питаемой кратковременными мощными импульсами тока. В этом случае, по данным американских и японских исследователей, обнаружен ряд новых технологических свойств дуги. Учитывая последнее, представляется целесообразным провести исследования физических процессов в приэлектродных зонах и столбе дуги, питаемой кратковременными импульсами тока; используя полученные данные, сформулировать требования к импульсному источнику питания; получить импульсный дуговой разряд и исследовать некоторые его свойства; располагая набором оборудования и источников нагрева в виде свободной дуги в аргоне, микроплазменной дуги и импульсной дуги, разработать методику, определяющую границы их применимости с учетом характерных дефектов сварки.

В соответствии с изложенным, в работе поставлены следующие задачи:

I. Анализ возможности создания концентрированного устойчивого источника нагрева при импульсном питании дуги.

2. Определение требований к импульсам тока, питающим дуговой разряд.

3. Разработка формирователя импульсов тока необходимых параметров и оборудования для сварки.

4. Экспериментальное исследование импульсной дуги.

5. Установление причин, вызывающих дефекты при выполнении торцовых и стыковых соединений с учетом особенностей воздействия дуги на ванну.

6. Разработка методики оценки технологической пригодности источников нагрева при различных способах сварки, обеспечивающих выполнение качественных сварных соединений металлов малой толщины.

Глава 2. Разработка концентрированного источника нагрева на основе устойчивого импульсного дугового разряда

При дуговой сварке на прямой полярности основная часть теплового потока в изделие вводится через анодное пятно. Это обеспечивает возможность управления тепловым потоком за счет изменения площади анодного пятна.

При дуговых способах сварки тонколистовых конструкций, в основном, стремятся уменьшить пятно нагрева, стабилизировать его размеры и положение на изделии. При микроплазменном способе сварки это приводит к значительному давлению дуги на ванну. Использование внешних магнитных полей большой напряженности, сжимающих разряд, осложняется трудностями их реализации при сварке.

Высокой плотности теплового потока и тока на аноде можно достичь периодическим кратковременным вводом энергии в дугу. Для этого необходимо знать параметры импульсов тока, создающие такие условия. В работах Рыкалина Н.Н., Кулагина И.Д., Николаева А.В. показано, что кинетика развития анодного пятна неподвижной дуги в интервале от момента включения тока до 1 секунды определяется отводом тепла в электрод. Это позволяет выполнить расчет изменяющегося во времени диаметра анодного пятна и средней плотности тока в нем от момента возбуждения дуги до их установившихся значений. В расчетах за границу пятна принимали изотерму, близкую к температуре кипения материала электрода T_k , расширяющаяся в течение времени под действием нормаль-

по распределенного источника с постоянной мощностью и уменьшающейся со временем сосредоточенностью. По данным Рыкалина Н.Н. для малых промежутков времени расчетные значения границы фазового перехода, полученные по уравнениям теплопроводности, удовлетворительно совпадают с фактическими. Меняя момент выключения тока в рассматриваемом временном интервале, можно управлять его плотностью в анодном пятне.

Согласно измерениям Гвоздецкого В.С., плотность тока в анодном пятне микроплазменной дуги достигает 50 А/мм^2 . Аппроксимация кривых уменьшения плотности тока во времени от момента включения тока до 50 А/мм^2 экспоненциальной зависимостью позволяет получить постоянные во времени изменения указанной плотности на анодах из различных материалов. Они равны для стали 700мкс, для титановых и алюминиевых сплавов соответственно 500мкс и 0,01с.

Таким образом, для достижения высоких плотностей теплового потока и тока на анодах из различных материалов следует вводить в них импульсы энергии за время, меньшее 500 мкс.

В работах Пфендера Е., Смита Дж. (США) установлено, что при питании дуги импульсами тока короче 10мкс из-за поверхностного эффекта тепло распространяется по всему аноду.

Периодический ввод энергии в дугу создает на изделии установившееся квазистационарное температурное поле, которое снижает степень контрагирования пятна.

Аналитический расчет температурного поля на аноде даже для неподвижного источника тепла при периодических дискретных изменениях тепловой мощности представляет значительные трудности. В нем не учитывается влияние на характер прианодных процессов собственного магнитного поля дуги.

При коротких импульсах тока в контрагировании прианодной области дуги важнейшая роль, по мнению Боксмана Р. (США) и Эккера Г. (ФРГ), принадлежит электромагнитному сжатию разряда.

Электромагнитное давление, действующее на разряд в прианодной области, уравнивается давлением паров металла анода.

Частичное давление ΔP паров металла анода по границе анодного пятна составляет по данным Рыкалина Н.Н. и Гречихина Л.И. $(1,3 \dots 5) \cdot 10^3 \text{ Па}$. Это позволяет определить радиус активного пятна из уравнения баланса давлений.

Для дуги, расположенной на поверхности неплавящегося электрода в виде полубесконечного тела, при совместном учете тепловых и электромагнитных процессов в приэлектродной области можно получить значение коэффициента заполнения импульсов тока, при котором будет происходить эффективное контрагирование дугового разряда. В расчетах импульсный источник теплоты был заменен непрерывно действующим мощностью γQ_n , где γ - коэффициент заполнения импульсов тока, Q_n - эффективная мощность в импульсе. Установлено, что коэффициент заполнения импульсов тока не должен превышать 0,3 для создания контрагированного разряда на электродах с различными теплофизическими свойствами.

Амплитуда прямоугольных импульсов тока определялась на основании максимально допустимых тепловых потоков в электрод.

Глава 3. Разработка оборудования для питания импульсной дуги и исследование некоторых ее физических особенностей

Для практического получения импульсов тока необходимых параметров был разработан сварочный широтно-импульсный тиристорный преобразователь со звеном постоянного тока и двухступенчатой последовательной схемой коммутации вентилей, рис. 1. С его помощью осуществлялось формирование импульсов тока с крутыми фронтами в диапазоне частот 0,8...5 кГц и амплитудой до 200А. Коэффициент заполнения импульсов изменялся от 0 до 0,9 при максимальной частоте их следования. При экспериментальном исследовании дуги, питаемой мощными кратковременными импульсами тока, установлен ряд ее особенностей.

Электрическая мощность импульсной дуги при $\gamma < 0,3$ превышает указанную мощность свободной дуги непрерывного режима при равенстве действующих значений сварочного тока. Определение диаметра электропроводящего пятна импульсного дугового разряда производилось принятыми измерениями с помощью трехсекционного электрода и по фотоснимкам приэлектродной области. Было установлено, что увеличение длительности импульсов тока свыше 200мкс создает условия, приближающие импульсный разряд к свойствам непрерывно горящей дуги. Для оценки степени влияния параметров импульсов тока на диаметр электродного пятна изменяли мощность дуги в одном случае длительностью импульсов тока, в другом -

амплитудой. Обнаружено, что при сохранении равенства эффективной мощности анодное пятно дуги сильнее изменяется под влиянием первого параметра.

Частота импульсов тока в исследованном диапазоне $1...4$ кГц линейно связана с диаметром анодного пятна. Концентрации тепловых потоков дуги импульсного и непрерывного режимов сравнивались по плотностям тока на аноде с использованием известной методики. Для питания непрерывной дуги применялся источник тока дуги типа ВСВУ. Обработка осциллограммы тока через среднюю секцию анода при действующем значении тока $10A$ позволила установить значения диаметров активных пятен, составляющие для непрерывной дуги, $2,2$ мм, для импульсной — $1,72$ мм. Средние величины плотности тока на анодах указанных дуг оцениваются в $2,63$ А/мм² и 43 А/мм².

Измерение газодинамического давления плазмы на поверхность анода производили для импульсной дуги, микроплазменной и свободной дуги в аргоне манометрическим способом. Опыты показали, что максимальные давления на анод импульсной и свободной дуги в аргоне имеют близкие значения. Отношение максимальных давлений микроплазменной дуги и свободной дуги имело значения $12...16$ в интервале сварочных токов $5...20A$ при расходах плазмообразующих и защитных газов, соответствующих номинальным технологическим режимам.

Оценка пространственной устойчивости импульсной дуги производилась по методике, предложенной Ковалевым И.М. С помощью этой методики была установлена более высокая по сравнению с непрерывной пространственная устойчивость импульсной дуги, питаемой кратковременными мощными импульсами тока, за счет стабилизирующих действий на разряд мощного катодного потока и его собственного магнитного поля.

Глава 4. Исследование процесса формирования сварочной ванны с различными источниками нагрева

Наиболее часто встречающимся дефектом торцовых сварных соединений является пилообразность шва. Оценка сил, действующих на ванну, поверхность которой с достаточным приближением можно представить поверхностью эллипсоида вращения, показала, что решающая роль в формировании поверхности ванны принадлежит силам поверхностного натяжения. При сварке форма

ванны может изменяться за счет высвобождающейся в этом случае поверхностной энергии. Сопоставление указанной энергии с работой, которую необходимо совершить при формоизменении ванны, привело к выводу о возможности трансформирования формы расплава из эллипсоидной в сферическую. Рассчитано, что этот процесс способен происходить даже в том случае, если свободная поверхность ванны близка к сферической. Однако в реальных условиях этого не наблюдается. Можно предположить, что в процессе сварки возникновение "пилы" вызвано локальным нарушением равновесия между силами внутреннего давления в ванне и межмолекулярными силами взаимодействия в поверхностном слое жидкости, зависящими от температуры.

Информация о характере распределения температуры по поверхности ванны торцового соединения металлов малой толщины отсутствует. Получение такой информации представляет собой довольно сложную теоретическую и экспериментальную задачу, которая еще не нашла удовлетворительного решения. В работах Авдеева М.В. и Коперсака Н.И., касающихся температурных режимов ванн, показано, что изменение температуры и коэффициента поверхностного натяжения по длине сварочной ванны в приближенных расчетах может быть принято в виде линейных зависимостей. На основании закона Лапласа для давления под искривленной поверхностью жидкости можно составить уравнение.

$$\frac{\sigma_k}{b} = \sigma_i \left(\frac{1}{R_{1i}} + \frac{1}{R_{2i}} \right), \quad (I)$$

где σ_k, b - коэффициент поверхностного натяжения и радиус кривизны в хвостовой части ванны, R_{1i}, R_{2i} - главные радиусы кривизны в i - той точке поверхности.

Возникающее в локальной области под искривленной поверхностью ванны давление, величина которого зависит от кривизны этой поверхности и коэффициента поверхностного натяжения, распространяется по всему объему расплава. Это давление должно быть уравновешено давлением поверхностного слоя других областей со своими значениями кривизны и σ_i . Форма ванны в указанных областях не нарушится, если кривизна поверхности, аппроксимируемая поверхностью эллипсоида вращения, будет равна значению кривизны, полученному из уравнения Лапласа, или будет превышать это значение. Указанные условия выполняются

при отношении длины ванны к ширине меньше 2. С помощью киностенки зафиксировано предельное отношение - 4. Такое различие результатов связано с принятым допущением о линейном характере изменения коэффициента поверхностного натяжения вдоль продольной оси ванны.

Установлено большое влияние площади пятна нагрева источника на длину ванны при формировании швов торцовых соединений. Выполняя сварку источниками нагрева одинаковой тепловой мощности, но различной сосредоточенности, можно получать стабильный в поперечном сечении по всей длине или пилообразный шов.

При оценке технологической пригодности источника нагрева следует учитывать его эффективную мощность, величину площади пятна нагрева, а также давление дуги на свариваемый металл.

Для торцовых соединений при толщине кромок до 0,3 мм не было обнаружено существенного влияния на форму шва давления дуги. Экспериментальные исследования процесса сварки торцовых соединений на скоростях до 10 м/ч позволяют принять линейными зависимости длины ванны и диаметра токопроводящего пятна, связанного с пятном нагрева дуги, от сварочного тока при небольших значениях последнего. Следовательно, можно построить плоскости параметров режимов при различных способах сварки, рис. 2. Согласно ГОСТу 21754-76 и исследованиям Шнейдера Б.И. оптимальным является диаметр шва, равный 3,0 δ, тогда предельная длина ванны связывается с толщиной соединяемых кромок простой зависимостью $L_{в.кр} = 12 \delta$. Совместное решение уравнений плоскостей позволяет определить максимально допустимые токи различных источников нагрева для выполнения соединений на изделиях конкретной толщины. АРДС: $I_{сб. max} = 33 \delta$, /А/, МПС, сварка дугой, питаемой мощными кратковременными импульсами тока: $I_{сб. max} = 87,4 \delta$ /А/, где δ в мм. Учитывая, что для формирования шва заданных размеров необходима определенная мощность источника нагрева, можно сделать вывод о непригодности использования свободной дуги для соединения кромок толщиной менее 0,1 мм из-за ее малой сосредоточенности.

По сравнению с обычной аргонодуговой сваркой, микроплазменный способ и импульсно-дуговая сварка на частоте 1...3 кГц обеспечивают повышение производительности процесса выполнения торцовых соединений в 2,6 раза, что достигается уменьшением диаметра анодного пятна в 1,4 раза в отличие от диаметра пят-

10

на свободной дуги в аргоне.

При анализе известных схем возникновения прожогов в стыковых соединениях учитывают равновесие действующих на ванну сил. Простым расчетом установлено, что для аргондуговой сварки неплавящимся электродом стыковых соединений толщиной до 0,6 мм со скоростью менее 10 м/ч решение задачи устойчивости ванны сводится к учету только сил поверхностного натяжения. В этом случае критическая ширина ванны перед наступлением прожога равна 9,56 δ, а предельные значения токов можно получить из критериального уравнения, связывающего параметры режима с шириной ванны.

Увеличение скорости сварки с сохранением величины погонной энергии вызывает значительное уменьшение критической ширины ванны и связано с ростом влияния на ванну давления дуги.

При воздействии движущейся дуги на металл под ней образуется жидкая прослойка h , через поперечное сечение которой переносится весь объем расплавляемого металла шва. Под действием давления на поверхность ванны при скорости сварки до 90 м/ч для указанных толщин гидродинамический режим течения жидкости — ламинарный. Он идентичен течению тонких слоев вязкой жидкости, исследованному Капицей П.Л. Давление на поверхность ванны

$$p = p_0 - \frac{\sigma}{r} + p_{\text{ник}} e^{-\alpha_p x}, \quad (2)$$

- где p_0 — давление пара над поверхностью жидкости,
 σ — коэффициент поверхностного натяжения расплава, зависящий от температуры,
 r — радиус кривизны поверхности ванны,
 $p_{\text{ник}}$ — осевое давление дуги на ванну,
 α_p — коэффициент сосредоточенности давления дуги при аппроксимации кривой давления функцией Лапласа,
 x — расстояние от центра анодного пятна до точки анода, в которой определяется давление.

При стабильном, без прожога, формировании шва стыкового соединения должно выполняться условие неразрывности движения. За одно и то же время количество протекающего под дугу расплавленного металла, приходящегося на единицу ширины центральной части потока, должно быть равно количеству металла,

вытекающего из центра пятна нагрева дуги в хвостовую часть ванны через сечение прослойки толщиной h единичной длины.

$$V_{св} \delta = \frac{h^2}{2\mu} \left(\kappa I^2 \frac{d_p^2}{2\pi} - \frac{\delta'}{r'} \right), \quad (3)$$

где $V_{св}$ - скорость сварки, μ - коэффициент динамической вязкости расплава, κ - коэффициент пропорциональности, δ', r' - коэффициент поверхностного натяжения расплава и радиус кривизны поверхности ванны в центре пятна нагрева.

Радиус r' определялся по трем точкам, исходя из заданной ширины ванны, шва и величины максимально возможного заглубления дуги в расплав $\delta - h$, где δ - толщина соединяемых кромок.

Для выполнения качественного проплавления необходимо вводить в соединяемые кромки вполне определенную погонную энергию с учетом давления источника нагрева на ванну.

Совместное решение уравнения (3) и критериального уравнения, связывающего ширину шва с параметрами режима аргонодуговой сварки на подкладке, позволило установить предельно допустимые значения тока и скорости, при которых еще не происходит разрушения ванны стыкового соединения.

Рассчитанные и экспериментальные значения указанных величин имели хорошее совпадение.

При других источниках нагрева расхождение расчетных и экспериментальных значений тока и скорости велико и может вызываться турбулентностью потоков в ванне.

Экспериментально обнаружено существенное расширение области качественных режимов сварки импульсной дугой повышенной частоты вместо микроплазменной. Это объясняется малым давлением импульсной дуги на сварочную ванну стыкового соединения.

Металлографические исследования швов, выполненных импульсной дугой, показали измельченную структуру и значительно меньшее их провисание по сравнению со швами, полученными микроплазменной сваркой.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. При исследовании процессов дуговой сварки тонколистовых конструкций обнаружено, что качественное выполнение сварных соединений и высокую производительность процесса можно обеспечить только при определенных значениях основных параметров источника нагрева: мощности, площади пятна нагрева и газодинамического давления потока плазмы на сварочную ванну.

Установлено, что оптимальными являются дуговые источники, позволяющие создавать малое давление на сварочную ванну и обеспечивать управление плотностью тока, тепловым потоком на изделии.

2. Указанные свойства дугового источника нагрева можно получить, изменяя площадь анодного пятна при варьировании параметров импульсов тока. Расчетным путем определено, что продолжительность импульсов тока должна быть меньше, чем длительность переходного процесса расширения изотермы кипения материала анода.

3. Решение интегрального уравнения кинетики развития анодного пятна показывает, что для управления анодным пятном за счет изменения его площади необходимо питать дугу импульсами тока длительностью менее 500 мкс.

В этом случае концентрация тепловой энергии на аноде может иметь равные или большие значения, чем получаемые при микроплазменной сварке. Сокращение длительности импульсов тока до 10 мкс и менее вызывает значительный нагрев всей поверхности анода.

4. Совместный учет тепловых и электромагнитных процессов в анодной области позволил установить, что наиболее интенсивное изменение площади анодного пятна происходит под действием переменного коэффициента заполнения импульсов тока, не превышающего величины 0,3.

Для выполнения требований по управлению площадью анодного пятна и создания необходимой эффективной мощности импульсной дуги ее следует питать импульсами тока с частотой более 1 кГц.

5. При фиксированном сварочном токе и напряжении с помощью экспериментальных методик, позволяющих определить размеры анодного пятна, установлены следующие особенности дугового

разряда:

а) увеличение продолжительности питающих дугу импульсов тока свыше 200 мкс приводит к распаду контрагированного пятна и снижению плотности тока на аноде, уменьшению импульсных и действующих значений напряжения дуги;

б) при равенстве действующих значений сварочного тока плотность его в контрагированном пятне на порядок больше, чем на аноде дуги непрерывного режима.

6. Сравнительная экспериментальная оценка характеристик дуги импульсного и непрерывного режимов равных эффективных мощностей показала, что при более высокой пространственной устойчивости импульсного разряда его газодинамическое давление на анод незначительно отличается от давления дуги непрерывного режима.

7. Установлено, что качественное формирование шва торцового соединения может достигаться только при определенном распределении сил поверхностного натяжения по ванне, которое зависит от геометрических размеров пятна нагрева дуги и ванны, а также от стабильности пространственного положения анодного пятна.

Основные параметры источника нагрева и скорость сварки необходимо выбирать с условием, чтобы отношение между длиной и шириной ванны было меньше 4 и обеспечивало благоприятное распределение сил поверхностного натяжения.

8. Из-за значительного внутреннего давления в ванне малого объема, создаваемого силами поверхностного натяжения, оценку пригодности дуговых источников нагрева достаточно производить по их эффективной мощности и площади пятна нагрева.

Совместное решение уравнений, связывающих величину сварочного тока, диаметр токопроводящего пятна и длину ванны позволило установить предельное значение тока, превышение которого вызывает дефекты шва. Его величина для различной толщины δ кромок составляет при аргонодуговой сварке свободной дугой 33δ /А/, при ЛПС - $87,4 \delta$ /А/.

9. На базе проведенных в работе исследований создана методика, позволяющая оценить пригодность различных дуговых источников нагрева для изготовления сварных тонколистовых

конструкций. Предложены пути расширения области качественных режимов сварки. Результаты работы были использованы рядом предприятий и получили положительную оценку. Расчетный экономический эффект только по данным НАТИ, где был применен способ сварки дугой повышенной частоты, составляет 40 тыс. рублей в год.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Гладков Э.А. и др. Коммутатор сварочного тока импульсного источника питания/ Э.А. Гладков, В.Р. Лепп, Н.Г. Синельников - Известия вузов. Машиностроение, 1978, №12, с. 136-138.

2. Гладков Э.А. и др. К вопросу разработки управляемого источника питания для сварки неплавящимся электродом/ Э.А. Гладков, Н.Г. Синельников, И.А. Гуслистов - Известия вузов. Машиностроение, 1979, №10, с. 130-136.

3. Гладков Э.А. и др. Технологические особенности дуговой сварки тонколистовых конструкций/ Э.А. Гладков, Н.Г. Синельников, В.В. Шерemet - Тезисы докладов/ У Всесоюзная межвузовская научно-техническая конференция по научным основам автоматизации производственных процессов и управления качеством в машиностроении и приборостроении. - М.: 1979, секция "Машины и автоматизация сварочных процессов", с. 61-65.

4. Синельников Н.Г., Гладков Э.А. Устойчивость процесса формирования швов торцовых соединений. - Известия вузов. Машиностроение, 1979, №3, с. 139-143.

5. Синельников Н.Г. Сварочная дуга с контрагированным анодным пятном. - В сб.: Управление сварочными процессами. - Труды ТПИ, Тула, вып. II, 1979, с. 10-20.

