М302127

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

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

На правах рукописи

ЛИВШИЦ Марк Гедальевич

# РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СВАРКИ В $CO_2$

(Специальность 05.04.05 – "Технология и машины сварочного производства")

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Москва 1977

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

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

На правах рукописи

ЛИВШИЦ Марк Гедальевич

Т302127

# РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СВАРКИ В $CO_2$

(Специальность 05.04.05 – "Технология и машины сварочного производства")

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана
1302127
Лившиц М.Г. Разработка и у

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Москва 1977

Работа выполнена в Краматорском индустриальном институте.

Научные руководители: Лауреат Ленинской премии, доктор технических наук А.Г.ПОТАПЬЕВСКИЙ

Кандидат технических наук, доцент КАССОВ Д.С.

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор ФРОЛОВ В.В.

Кандидат технических наук СЛАВИН Г.А.

Ведущее предприятие - "Ленинская кузница", г. Киев

Защита диссертации состоится " " _____ 197_ г. на заседании специализированного Совета К-33/3 "Технология и машины сварочного производства" Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища имени Н.Э.Баумана.

Адрес. 107005, г. Москва, -я Бауманская ул., д. 5.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан " " _____ 197_г.

Ученый секретарь
специализированного Совета,
доктор технических наук В.М.ЯМПОЛЬСКИЙ

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
МВТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Л 93299 Подп к печ.20.01.77 г. Тип. МВТУ Зак.225 Тир.100 экз.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современная технология дуговой сварки плавящимся электродом в $CO_2$ является результатом обобщения большого количества работ, выполненных в ЦНИИТМАШе, МВТУ им. Н.Э.Баумана, Институте электросварки им. Е.О.Патона АН УССР и ряде других научно-исследовательских организациях и вузах, а также опыта работников производства. Анализ литературных данных и значительный производственный опыт сварки в $CO_2$ показывают, что возможности совершенствования этого процесса в настоящее время не исчерпаны.

Механизация сварки конструкций из углеродистых сталей толщиной 0,5...0,8 мм, объем применения которых все время увеличивается, реально возможна в основном за счет применения сварки в $CO_2$ на токах менее 45 А. Однако процесс на таких токах протекает нестабильно, исключая тем самым возможность сварки в $CO_2$ тонколистового металла. В связи с общей интенсификацией работ в машиностроении оказалось естественным стремление сварщиков вести работы также и на повышенных режимах, и с увеличенным вылетом электрода. И в этом случае процесс часто протекает недостаточно стабильно, отличается повышенным разбрызгиванием и неудовлетворительным формообразованием шва.

Целью работы являлось расширение области применения и диапазона стабильного течения процесса сварки в $CO_2$ плавящимся электродом.

Общая методика. В процессе выполнения работы использован комплексный метод, включающий в себя разработку математической модели и аналитические расчеты, и экспериментальные исследования процесса сварки с помощью скоростной киносъемки, фотосъемки и осциллографирования, физико-химические исследования свойств сварных соединений.

Научная новизна. Анализ условий устойчивости перемычки жидкого металла, выполненный в работе на основе предложенной математической модели, показал возможность перехода капли коротким замыканием за счет силы поверхностного натяжения. Отсутствие электромагнитных сил при разрыве перемычки и управление формообразованием шва позволяют добиться стабильного течения процесса сварки на токах менее 35...45 А. Возмущения

по вылету электрода оказывают влияние не только на наклон внешней характеристики питающей системы, но и на скорость его плавления. Поэтому длительные установившиеся возмущения по вылету электрода при постоянной скорости его подачи приводят к повышенному разбрызгиванию, изменению тока и длины дуги, ухудшению формообразования сварного шва, т.е. к нарушению стабильности процесса.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в разработке способа импульсно-дуговой сварки в $CO_2$ металла толщиной 0,5...0,8 мм на весу во всех пространственных положениях; рекомендаций по повышению производительности и улучшению формообразования шва при сварке металла средних и больших толщин; расчетных зависимостей и номограмм для выбора параметров режима сварки в $CO_2$ в функции вылета электрода и типа соединения; аппаратуры для реализации предложенных технологических рекомендаций.

Апробация работы. Разработанные способы импульсно-дуговой сварки в $CO_2$, технологические рекомендации и аппаратура прошли опытно-промышленную проверку и внедрены на ряде предприятий с суммарным годовым экономическим эффектом 188 тыс. рублей.

Диссертационная работа и ее отдельные разделы доложены на общемосковском научном семинаре сварщиков при МВТУ им. Н.Э.Баумана, 1975 г., Белорусской научно-технической конференции по сварке, 1975 г., УП научно-технической конференции сварщиков Западного Урала, научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Краматорского индустриального института в 1967...1975 гг.

По теме диссертации опубликовано 8 статей, получено 3 авторских свидетельства.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, что составляет 120 страниц машинописного текста, 75 рис., 13 табл., списка цитируемой литературы из 150 наименований и приложения, в котором приведены акты промышленного внедрения результатов выполненных разработок.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Поставленная в работе цель и анализ литературных источников определили основные направления исследований:

- анализ причин нарушения стабильного течения процесса сварки в $CO_2$ на малых и повышенных токах;

- исследование условий перехода капли с электрода при коротком замыкании за счет силы поверхностного натяжения и разработка способа сварки тонколистового металла;

- исследование влияния вылета на характеристики плавления электрода и формообразование шва и разработка приемов управления энергетическими и технологическими характеристиками процесса сварки в $CO_2$;

- решение конструкторско-технологических вопросов по разработке технологии и аппаратуры для сварки в $CO_2$;

- проведение промышленной апробации результатов работы.

В настоящее время для сварки металла толщиной I,0...3,0 мм широкое применение нашел процесс с периодическими короткими замыканиями. Главным фактором, затрудняющим использование данного процесса для сварки более тонкого металла, является мгновенное выделение энергии при взрыве перемычки в конце короткого замыкания.

Как отмечено в работах А.И.Акулова и И.И.Зарубы, появление ударной волны, связанной с разлетом продуктов взрыва, и следующего за ней газодинамического удара, возникающего при возобновлении дугового разряда, увеличивает разбрызгивание и вероятность прожога тонкостенного изделия.

Решение задачи получения стабильного процесса в области малых токов ( $I_{cв} < 45$ А) связано с проблемой уменьшения силы взрыва и давления на ванну при перегорании перемычки и управления процессом плавления электрода и основного металла.

Впервые на принципиальную возможность разрыва цилиндрической перемычки между электродом и ванной при отсутствии электромагнитных сил указал Н.Ф.Медведенко. Впоследствии этот вопрос рассматривался И.И.Зарубой, И.С.Пинчуком и др. Однако, единой точки зрения по данному вопросу в литературе нет.

В настоящей работе сделано предположение, что перемычка образуется из капли известного объема. Если принять, что ванна имеет идеально ровную поверхность с изотропными свойствами, то образующаяся между круглым электродом и ванной перемычка представляет собой тело вращения с осью, совпадающей с осью электрода (рис.I). Поскольку перемычка является жидкой, естественно,

что ее поверхностная энергия стремится к минимуму. Следовательно, задача сводится к нахождению уравнения образующей $y(x)$ тела вращения, боковая поверхность которого стремится к минимуму при известном объеме и решается на основе аппарата вариационного исчисления.

Решив ее при граничных условиях $y'(0)=\infty, y(h)=\frac{d_э}{2}$, приходим к выводу, что в идеальном случае перемычка представляет собой тело, полученное при вращении отрезка окружности

$$(x+C_2)^2+(C_3-y)^2=R^2 \qquad (1)$$

радиуса $R$ вокруг оси $OX$ (оси электрода).

Постоянные $C_2$ и $C_3$ определяются соотношениями

$$C_2=-R\ ,\quad C_3=\frac{d_э}{2}+\sqrt{2Rh-h^2} \qquad (2)$$

Радиус кривизны $R$ можно найти, решив уравнение

$$\pi d_э+(h+R)\sqrt{2Rh-h^2}-R^2\arcsin\frac{h-R}{R}-\frac{\pi R^2}{2}=S_к\ , \qquad (3)$$

где $S_к$ - большое сечение перемычки.

Величина боковой поверхности перемычки определяется следующим выражением:

$$S_1=2\pi R\left[C_3\left(\arcsin\frac{h-R}{R}+\frac{\pi}{2}\right)-h\right] \qquad (4)$$

Графоаналитический анализ выражения (I) показал, что при слиянии капли реальных размеров ( $d_к\leq 2{,}5\,d_э$ ) с абсолютно смачиваемой поверхностью на образующейся при этом перемычке появляется шейка, наличие которой предопределяет и облегчает разрыв перемычки силами поверхностного натяжения.

После разрыва перемычки образуется система тел, состоящая из полусферы радиуса $\frac{d_э}{2}$ на конце электрода и шарового сегмента на плоскости ванны (рис. I), параметры которой могут быть легко рассчитаны. На основе принципа "минимума энергии" можно предположить, что разрыв перемычки наступит тогда, когда ее энергия превысит энергию системы тел. Полная энергия включает потенциальную энергию поднятой жидкости и поверхностную энергию, причем, как показывают расчеты, последняя на два порядка больше первой. Поэтому потенциальной энергией при дальнейшем анализе можно пренебречь. Тогда упрощенное условие разрыва перемычки может быть записано следующим образом:

$$S_1>S_2+S_3\ , \qquad (5)$$

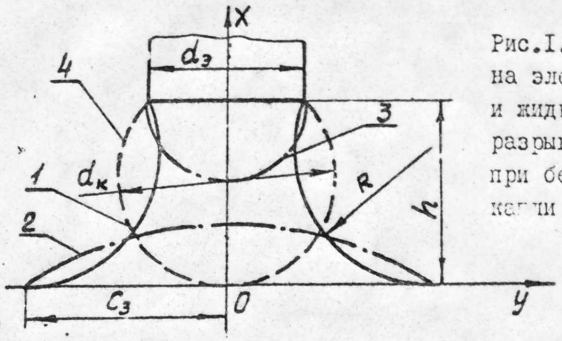



Рис.I. Форма капли (4) на электроде, перемычки (I) и жидкого металла после разрыва перемычки (2,3) при бестоковом переходе капли в ванну

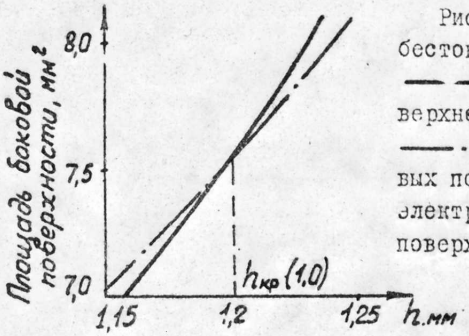



Рис.2. К определению условия бестокового разрыва перемычки:
— — — площадь боковой поверхности перемычки, $S_1(h)$;
— · — · — сумма площадей боковых поверхностей полусферы на электроде и шарового сегмента на поверхности ванны, $S_2(h)+S_3(h)$.

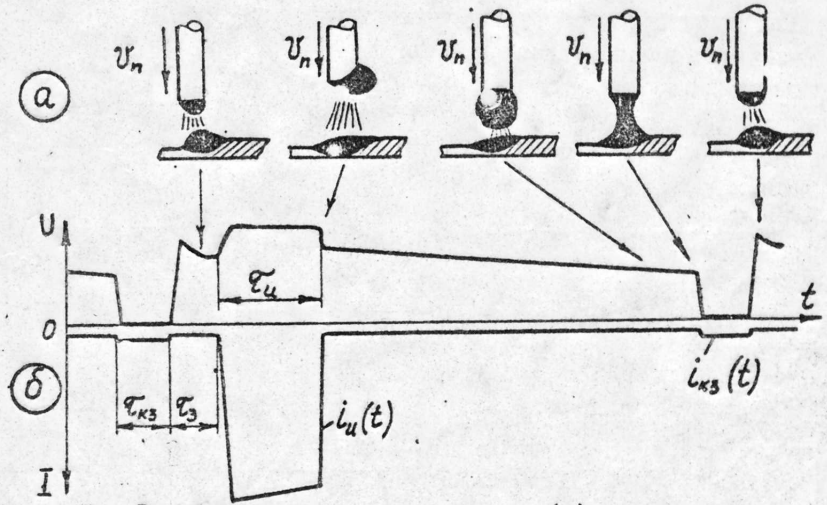



Рис.3. Образование и переход капли (а) и циклограмма процесса (б) при импульсно-дуговой сварке в $CO_2$

где $S_2$ и $S_3$ – боковая поверхность соответственно шаровой сферы на конце электрода и шарового сегмента на поверхности ванны.

Решить задачу в общем виде не представляется возможным. Графическая интерпретация выражения (5) для случая сварки проволокой диаметром 1,0 мм приведена на рис. 2. Точка пересечения кривых $S_1(h)$ и $S_2(h)+S_3(h)$ характеризует состояние неустойчивого равновесия перемычки; при $h<h_{кр}(d_э)$ перемычка устойчива, при $h>h_{кр}(d_э)$ имеет место разрыв перемычки. При сварке проволоками $d_э$ =0,8...2,0 мм оказываются справедливыми следующие соотношения

$$h_{кр}\approx 1{,}2\,d_э \quad \text{и} \quad d_{к\,кр}\approx 1{,}4\,d_э , \qquad (6)$$

которые хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Одним из вариантов реализации данной математической модели разрыва перемычки явилось осуществление сварки в $CO_2$ с импульсным изменением тока и мгновенной мощности процесса при резком ограничении тока короткого замыкания.

Реализация импульсно-дуговых процессов при сварке в $CO_2$ встречает определенные трудности, связанные главным образом с тем, что нанесение импульса тока на дугу, горящую в $CO_2$, вызывает отталкивание капли от ванны с дальнейшим нарушением стабильности. Поэтому оптимальным решением оказалось наложение импульса тока, необходимого для образования ванны, с небольшой задержкой $\tau_з$ по отношению к концу короткого замыкания, когда еще не успела сформироваться капля на конце электрода. Часть капли, образовавшаяся за время наложения импульса и отброшенная его действием от ванны, после окончания импульса постепенно восстанавливает свое положение, увеличиваясь при этом в размерах в результате оплавления электрода под действием маломощной дуги (рис. 3).

Поскольку значения таких параметров процесса, как длительность короткого замыкания $\tau_{кз}$ и горения дуги $\tau_д$, колеблются в значительных пределах, то данный процесс осуществляется по схеме с обратной связью по напряжению дуги.

Область стабильного течения рассматриваемого процесса определяется совокупностью многих факторов, но при заданном диаметре электрода основными параметрами, влияющими на характер течения процесса, являются количество электричества импульса $I_и\tau_и$ ток дуги $I_д$ и скорость подачи электрода $V_п$.

Статистическая обработка экспериментальных данных позволи-

ла установить зависимости, связывающие параметры процесса с массой образующейся капли, а с учетом условия (6) - взаимозависимость между самими параметрами процесса

$$I_u \tau_u > \frac{7{,}5 \cdot 10^{-3} d_э^3 (A U_п - \beta I_э)}{\alpha A U_п} , \qquad (7)$$

где $A$ , $\alpha$ и $\beta$ - постоянные коэффициенты, определяемые диаметром электрода.

Одним из критериев оценки стабильности процесса сварки с короткими замыканиями является время перехода капли $\tau_{кз}$ , которое при сварке проволоками $d_э$ =0,8...I,2 мм определяется следующей зависимостью:

$$M(\tau_{кз}) \approx 0{,}9896 \cdot 10^{-3} d_э^{0{,}322} \sqrt{\frac{\alpha A U_п M(I_u \tau_u)}{A U_п - \beta I_э} \cdot 10^{-3} + 2{,}055 d_э^3} \ , c \qquad (8)$$

Величина $\tau_{кз}$ при обеспечении смачиваемости основного металла в основном определяется массой капли и, в меньшей степени, диаметром электрода. Наложение дополнительного импульса тока во время короткого замыкания при условии выполнения условия (6) не оказывает влияния на величину $\tau_{кз}$ , но увеличивает разбрызгивание. При одних и тех же параметрах процесса длительность короткого замыкания $M(\tau_к)$ одинакова при сварке в нижнем и потолочном положениях, что подтверждает ранее сделанный вывод о незначительном влиянии силы тяжести на механизм разрыва перемычки.

Исследования, производственный опыт и анализ литературных данных показывают, что стабильность процесса сварки, особенно полуавтоматической, во многом определяется постоянством величины вылета электрода. Выполненные в производственных условиях исследования показали, что сварщик-оператор на протяжении даже небольшого промежутка времени не может поддерживать вылет постоянным, а тем более заданный. Ток дуги в процессе сварки может принимать бесконечное множество значений в интервале, определяемом при постоянной скорости подачи прежде всего диапазоном колебаний вылета. Статистическая обработка полученных результатов показала, что математическое ожидание $M(I_{св})$ обычно на I5...25% меньше величин тока, рекомендуемых нормалями, дисперсия и среднеквадратичные отклонения тока дуги намного больше технологически допустимых.

При импульсно-дуговом процессе возмущения по вылету элект-

рода наряду с возмущениями по напряжению сети вызывают изменение размеров капли и смачиваемости основного металла. Динамическое сопротивление вылета электрода включено последовательно с внутренним сопротивлением генератора импульсов и вызывает дополнительный наклон внешней характеристики источника питания. Изменение угла наклона характеристики питающей системы приводит к колебаниям величины амплитуды тока и общей энергии импульса.

В работах Л.Е.Алекина, Н.Г.Дюргерова, Б.Е.Патона и др. показано, что при сварке стационарной непрерывно горящей дугой возмущения по вылету электрода оказывают влияние не только на наклон характеристики питающей системы, но и на скорость плавления электрода.

Влияние вылета на скорость плавления электрода $\upsilon_э$ может быть учтено коэффициентом саморегулирования по вылету электрода:

$$\upsilon_э = \kappa_{ст} I_{св} - \kappa_{сн} U_д + \kappa_{св} L_в \quad , \qquad (9)$$

где $\kappa_{ст}$ – коэффициент саморегулирования по току дуги, $см \cdot с^{-1} \cdot А^{-1}$;

$\kappa_{сн}$ – коэффициент саморегулирования по напряжению дуги, $см \cdot с^{-1} \cdot В^{-1}$;

$\kappa_{св}$ – коэффициент саморегулирования по вылету электрода, $см \cdot с^{-1} \cdot см^{-1}$.

Отмечая, что статическая характеристика системы саморегулирования есть геометрическое место точек, удовлетворяющих условию $\upsilon_э = \upsilon_п$, из (9) получим уравнение статической характеристики системы саморегулирования для дуги с вольтамперной характеристикой, отличной от жесткой (динамическое сопротивление дуги $\kappa_{эт} \neq 0$)

$$I_{св} = \frac{\upsilon_п - \kappa_{св} L_о}{\kappa_{ст} + \kappa_{сн} \cdot \kappa_{эт}} + \frac{U_д}{\kappa_{ст} + \kappa_{сн} \cdot \kappa_{эт}} \left[ \kappa_{сн} + \frac{\kappa_{св}}{\kappa_э} \left( \frac{\kappa_{эт}}{\kappa_{эт} - \frac{1}{\kappa_и}} + 1 \right) \right] \qquad (10)$$

где $\kappa_э$ – градиент потенциала столба дуги, $В \cdot см^{-1}$;

$L_о$ – расстояние от токоподвода до изделия, см;

$\kappa_и$ – коэффициент внешней характеристики источника питания, $А \cdot В^{-1}$.

Экспериментальным путем были определены значения коэффициентов саморегулирования в диапазоне токов 150...500 А (нижний предел тока варьировался в зависимости от диаметра электрода). При этом учитывалось, что напряжение дуги $U_д$ определяется

следующей зависимостью:

$$U_д = U_и - U_в \ , \qquad (II)$$

где $U_и$ – напряжение источника питания с учетом падения напряжения в подводящих проводах;

$U_в$ – падение напряжения на вылете электрода.

Экспериментально установлено, что при сварке непрерывно горящей дугой падение напряжения на вылете электрода определяется следующей зависимостью:

$$U_в = \beta I_{св} L_в \exp\left(c \frac{I_{св} L_в}{U_к}\right) \ , \qquad (I2)$$

где $\beta$ и $c$ – коэффициенты, зависящие от материала и диаметра электродной проволоки.

Знание закономерностей плавления электрода позволило построить расчетные номограммы, связывающие между собой ток дуги, вылет и скорость подачи электрода и напряжение источника питания. Напряжение источника питания определяется выражением (II), где $U_д = E_д + \kappa_{эт} I_{св}$ ( $E_д$ – противо-э.д.с. дуги, данные Н.Г.Дюргерова). В качестве примера на рис. 4 приведена номограмма для выбора параметров режима сварки в $CO_2$ электродной проволокой типа Св-08Г2С, $\alpha_э$ =I,4 мм).

В условиях неизбежных возмущений по вылету электрода к сварочному оборудованию предъявляются дополнительные требования по обеспечению заданной формы сварного шва. Схемы регулирования энергетических характеристик процесса, разработанные при участии автора и защищенные авторскими свидетельствами, реализованы в виде установок для автоматической и полуавтоматической сварки, прошли опытно-промышленную проверку и внедрены на ряде предприятий.

Конечной целью процесса сварки является получение шва с заданными геометрическими размерами. Как показывает практика, формообразование шва в общем случае определяется как величиной погонной энергии, так и типом соединения, параметрами разделки кромок и производительностью расплавления, зависящей в значительной степени от вылета электрода.

В тех случаях, когда облегчены условия растекания расплавленного металла и имеется возможность изменять форму шва путем подбора соответствующего режима сварки, например, электрозаклепочных или стыковых однопроходных соединений, граница расплав-

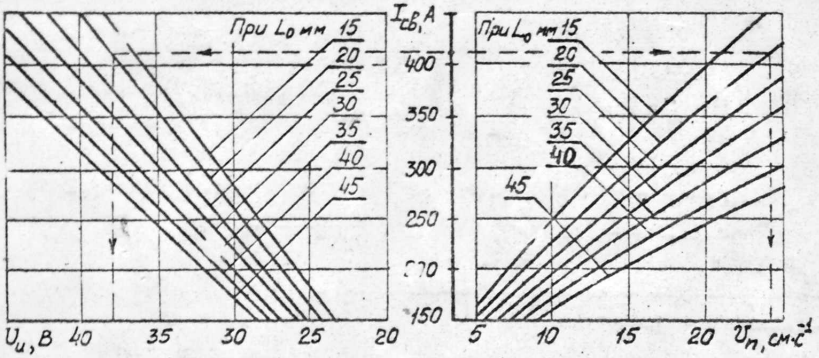
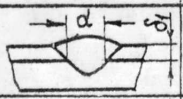
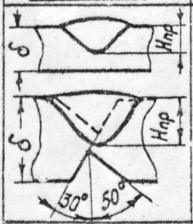
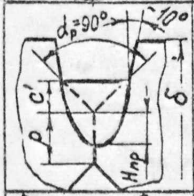



Рис.4 Номограмма для определения параметров режима сварки в $CO_2$, проволока Св-08Г2С, $d_э$=I,4 мм

Таблица I

Схема и условия оптимального формообразования сварных швов

| Тип соединения | Толщина металла, катет шва | Расчетный параметр сварного шва | Примечание |
|---|---|---|---|
|  | | $\alpha = 2\sqrt{\frac{1}{K}\cdot\ell n\frac{F_{пр}}{\delta_1}\sqrt{\frac{K}{\pi}}}$ | $k(I_{св}, U_д, v_{св}, d_э)$ – коэффициент остроты зоны проплавления $K$ = I,8...22 см$^{-2}$ |
|  | $\delta$ = I0...I2 мм<br>$\delta$ = I2...22 мм | $H_{пр} = F_{пр}\sqrt{\frac{K}{\pi}}$ | |
|  | $\delta > 22$ мм | $H_{пр} = \frac{1}{4\sqrt{F_н}}\left(3F_{пр} - F_н\right)$ | |
|  | $K_1$ = 3...I2 мм | $\alpha_1 = 2\sqrt{F_н}\left(1 - \frac{2}{3}\cdot\frac{F_н}{F_{пр}+F_н}\right)$ | Положение при сварке – "в лодочку". |

ленного металла в поперечном сечении довольно точно описывается уравнением закона нормального распределения (табл. I). При наложении первого слоя в разделку кромок многопроходного шва возможность изменения формы шва (с одновременным соблюдением глубины проплавления) очень ограничена.

В связи с внедрением форсированных режимов тонкой проволокой наметилась тенденция к уменьшению угла раскрытия кромок. При этом типичным явлением стало появление непровара вершины угла разделки и других дефектов даже при минимально возможных величинах притуплений. Эксперименты показали, что с целью улучшения формообразования шва и достижения требуемой глубины проплавления в условиях возросшей производительности наплавки, угол при вершине разделки необходимо увеличивать. Предпочтение следует отдать сложной разделке с углом при вершине $\alpha_p = 90^0$ (табл. I). Сварной шов в данном случае с достаточной достоверностью ограничен кривой параболлического типа, а коэффициент формы шва $\varphi = \frac{B}{H}$ определяется выражением

$$\varphi = \frac{8}{3} \cdot \frac{F_н}{F_{нр} + F_н} \qquad (I3)$$

Если принять, что $\varphi \geqslant I$, то площадь проплавления $F_{нр}$ оказывается связанной с площадью наплавки $F_н$ следующим соотношением:

$$F_{нр} \leqslant \frac{5}{3} F_н \qquad (I4)$$

Угловой шов можно рассматривать как стыковой с $\alpha_p = 90^0$ и, следовательно, для него справедливы вышеприведенные соотношения.

В соответствии с принятыми схемами формообразования швов определены величины расчетных параметров (табл. I) в зависимости от типа соединения и режима сварки и построены номограммы для электрозаклепочных, стыковых и угловых швов.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

I. Наиболее достоверным подходом к вопросу о стабильном течении сварки в $CO_2$ следует считать комплексную оценку данных о плавлении и переносе электродного металла, энергетических характеристиках процесса и формообразовании сварного шва.

2. Стабильное течение сварки в $CO_2$ на токах менее 45 А может быть достигнуто путем ограничения тока короткого замыкания

и управления процессом плавления электрода и основного металла. Анализ условий устойчивости перемычки жидкого металла, выполненный на основе предложенной математической модели, показал возможность перехода капли коротким замыканием при отсутствии электромагнитных сил, если расстояние между торцом электрода и поверхностью сварочной ванны превышает $1{,}2\ d_э$.

3. Разработан процесс импульсно-дуговой сварки в $CO_2$ с короткими замыканиями и ограничением тока короткого замыкания, осуществляемый по схеме с обратной связью, при котором капли переходят на изделие в основном под действием силы поверхностного натяжения. Данный процесс позволяет осуществить сварку на весу во всех пространственных положениях металла толщиной 0,5...1,0 мм.

4. Завышенная величина и колебания вылета электрода при полуавтоматической сварке в $CO_2$ являются причинами того, что математическое ожидание тока дуги $M(I_{св})$ обычно на 15...25% меньше величин, рекомендуемых нормалями, дисперсия и среднеквадратичные отклонения тока дуги намного больше технологически допустимых, в результате чего стабильность процесса резко нарушается.

5. Возмущения по вылету электрода и напряжению сети приводят при импульсно-дуговой сварке в $CO_2$ к колебаниям величины амплитуды тока и общей энергии импульса, в результате чего либо ухудшаются условия смачиваемости основного металла и условия перехода капли коротким замыканием под действием силы поверхностного натяжения, либо образуется прожог тонкостенного изделия при сварке на весу. Возмущения по вылету электрода при сварке непрерывно горящей дугой оказывают влияние как на наклон внешней характеристики питающей системы, так и на скорость его плавления.

6. Влияние вылета на стабильность процесса дуговой сварки плавящимся электродом должно быть учтено при проектировании и анализе регуляторов энергетических характеристик дуги и разработке технологических рекомендаций с помощью коэффициента саморегулирования по вылету $\kappa_{св}$, динамического сопротивления вылета $\kappa_{вт}$ и градиента потенциала по длине вылета $\kappa_в$.

7. Формообразование шва определяется производительностью процессов как проплавления, так и наплавки, соответствием параметров режима сварки форме и параметрам разделки кромок. Длительные установившиеся возмущения по вылету электрода при по-

стоянной скорости его подачи приводят к изменению длины и тока дуги, в результате чего стабильность процесса нарушается. Однопроходные швы и первые слои многопроходных швов должны выполняться при минимально возможном вылете электрода. Увеличение производительности наплавки, определяемой в значительной степени вылетом электрода, и уменьшение угла раскрытия кромок снижают стабильность процесса при выполнении первого прохода многослойных швов.

8. На основании выполненных исследований разработана технология сварки в $CO_2$ плавящимся электродом тонкого металла ( $\delta$ = 0,5...0,8 мм) и металла средних и больших толщин. Установлены соотношения между параметрами режима сварки, параметрами шва, формой и размерами разделки кромок, обеспечивающие стабильное течение процесса. Для облегчения выбора параметров режима сварки в зависимости от типа соединения и вылета электрода построены номограммы.

9. Разработана приставка к серийно выпускаемым выпрямителям типа ВС, ВДГ и др. для сварки тонколистового металла. Усовершенствована серийная аппаратура на базе полуавтоматов типа А-537, А-1197 для сварки на форсированных режимах.

10. Разработанные способ импульсно-дуговой сварки, рекомендации и аппаратура прошли опытно-промышленную проверку и внедрены на ряде предприятий. Годовой экономический эффект от внедрения составил 188 тыс. рублей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Сварка углеродистых и низколегированных сталей в среде углекислого газа на форсированных режимах. Сб. "Прогрессивная технология и новые материалы". ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1967, вып. 2, (соавторы Велигура П.Н. и др.).
2. Повышение технико-экономических показателей полуавтоматической сварки в углекислом газе. Сб. "Прогрессивная технология и новые материалы". ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1967, вып. 3 (соавторы Кассов Д.С. и др.).
3. Регулирование сварочного тока при автоматической сварке тонкой проволокой в среде $CO_2$. "Сварочное производство", 1967, № 12 (соавторы Кассов Д.С. и др.).

4. О прочности угловых швов. "Сварочное производство", 1969. № 2 (соавторы Кассов Д.С. и Рейдерман Ю.И.).
5. Устройство с постоянной скоростью подачи для полуавтоматической сварки многоамперной дугой. "Сварочное производство", 1969, № 9 (соавторы Кассов Д.С. и др.).
6. Исследование процесса плавления электродной проволоки и основного металла при сварке в углекислом газе. "Сварочное производство", 1969, № 10 (соавтор Кассов Д.С.).
7. Математическая модель самопроизвольного разрушения перемычки жидкого металла. Тезисы докладов Белорусской республиканской научно-технической конференции "Механизация и автоматизация сварочного производства", Могилев, 1975 (соавторы Потапьевский А.Г. и др.).
8. К вопросу о переносе металла короткими замыканиями. "Сварочное производство", 1976, № 6 (соавторы Потапьевский А.Г. и др.).
9. Устройство для дуговой сварки плавящимся электродом с постоянной скоростью подачи. Авторское свидетельство СССР № 207302 от 26.07.1966 (соавторы Кассов Д.С. и др.).
10. Способ электродуговой сварки плавящимся электродом. Авторское свидетельство СССР № 433980 от 18.02.1972 (соавторы Кассов Д.С. и др.).
11. Способ импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом и устройство для его осуществления (заявка № 2051532/25-27 от 29.07.1974 с положительным решением). (Соавторы Потапьевский А.Г. и др.).