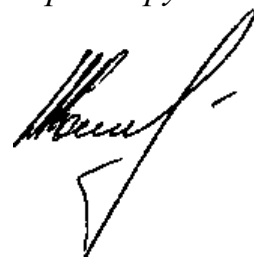


На правах рукописи



Солодский Сергей Анатольевич

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ
СВАРКИ В CO₂ С ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧЕЙ ПРОВОЛОКИ И
МОДУЛЯЦИЕЙ СВАРОЧНОГО ТОКА**

Специальность 05.02.10 – «Сварка, родственные процессы и технологии»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск 2010

Работа выполнена на кафедре Сварочного производства Юргинского технологического института (филиала) Томского политехнического университета.

Научный руководитель – Доктор технических наук, доцент
Сергей Борисович Сапожков, декан механико-машиностроительного факультета Юргинского технологического института (филиала) Томского политехнического университета, г. Юрга

Официальные оппоненты: доктор технических наук, ст. научный сотрудник
Владимир Антонович Лупин, профессор кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск
кандидат технических наук, профессор
Юрий Гаврилович Новосельцев, зав. кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства» Сибирского федерального университета, г. Красноярск

Ведущая организация – ОАО «Западно-Сибирский металлургический комбинат», г. Новокузнецк.

Защита состоится «31» марта 2010 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.298.06 при ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» по адресу 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76, ауд.201^A

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «__» февраля 2010г.

Ученый секретарь диссертационного совета



И. А. Щуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Широко распространенная сварка в углекислом газе наряду с очевидными достоинствами (высокая производительность, доступная механизация, относительно малая себестоимость достаточные механические свойства сварного соединения) обладает существенными недостатками, снижающими эффективность ее применения (нестабильность процесса сварки и повышенное разбрызгивание электродного металла). Для повышения эффективности сварки и снижения потерь электродного металла предлагается перевод сварки стационарной дугой в импульсно-дуговой управляемый процесс. Существует два способа модуляции тока дуги при механизированной сварке в защитных газах:

- 1) периодическое изменение сварочного тока;
- 2) изменение скорости подачи сварочной проволоки за счет импульсной подачи.

Данному способу посвящены работы авторов: Патона Б.Е., Дудко Д.А., Зарубы И.И., Потапьевского А.Г., Дюргерова Н.Г., Брунова О.Г., Князькова А.Ф., Сараева В.Н. и многих других.

При импульсной подаче сварочной проволоки, можно получить управляемый мелкокапельный перенос электродного металла, уменьшить потери на угар и разбрызгивание, улучшить качество и геометрию сварного шва.

Недостатками известного способа являются нестабильность переноса электродного металла во время импульса подачи, отсутствие малогабаритных механизмов подачи проволоки с возможностью регулирования параметров ее подачи в составе полуавтомата. Для устранения вышеперечисленных недостатков необходимо разработать способ сварки в среде CO_2 с одновременной реализацией двух принципов автоматизированного управления режимами процесса сварки.

Решение этих задач является актуальным для дальнейшего совершенствования технологии сварки с использованием импульсной подачи сварочной проволоки.

Цель работы. Повышение эффективности механизированной сварки в углекислом газе с управляемой импульсной подачей сварочной проволоки и автоматизированным управлением энергетическими и технологическими параметрами процесса сварки.

Задачи исследования. 1. На основании анализа процесса сварки с импульсной подачей сварочной проволоки обосновать кинетику ее движения с использованием обратных электрических связей для повышения стабильности переноса электродного металла.

2. Разработать циклограмму и автоматизированную систему, реализующие процесс модуляции тока дуги, согласованный с циклами импульсной подачи сварочной проволоки.

3. Разработать методику управления и функционирование системы автоматизированного управления режимами сварки.

4. Создать механическую оснастку и адаптивную электрическую схему управления с обратными связями для автоматизации процесса управляемого переноса электродного металла, совмещенного с модуляцией тока дуги.

5. Выявить влияние регулируемых параметров режима сварки на геометрию сварного шва и свойства сварных соединений.

Методы исследований и достоверность результатов. Применяли математическое, физическое моделирование физических и энергетических параметров процесса переноса электродного металла, образования сварочной ванны. Вычислительные эксперименты выполняли на компьютере с помощью системы MathCAD. Регистрация процесса формирования сварного шва, форму дуги и переноса электродного металла осуществляли с помощью цифровой скоростной видеокамеры «Видео-Спринт» (максимальная скорость съемки 8000 кадров в сек). Параметры процесса сварки определялись цифровым регистратором «AWR54», осциллограммы процесса регистрировались самописцем марки НЗ38. Для измерения уровня локальной вибрации использовали «Измеритель шума и вибрации ВШВ-003-М2». Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием известных положений классических и прикладных наук, корректностью математических моделей и их адекватностью известным критериям оценки изучаемых процессов, сходимостью теоретических и экспериментальных данных, а также промышленной проверкой.

Научная новизна работы. 1. Впервые теоретически обоснован и экспериментально доказан процесс совмещения модуляции тока дуги и переноса капли электродного металла при импульсной подаче сварочной проволоки. Доказана возможность управления не только энергетическими, но и технологическими параметрами сварки путем кратковременного шунтирования сварочной дуги, что позволяет управлять не только энергетическими, но и технологическими параметрами сварки.

2. Разработан системный подход к прогнозированию физических и энергетических параметров процесса сварки, включающий:

- алгоритм перехода капли в сварочную ванну;
- математическую зависимость энергетических характеристик переноса электродного металла;
- взаимосвязь параметров модуляции тока с толщиной металла, пространственного положения и его свойств.

Совокупность перечисленных характеристик позволяет поставить краевые условия процесса сварки.

3. Впервые разработана адаптивная электромеханическая система автоматизированного управления импульсной подачей сварочной проволоки, совмещенной с модуляцией тока дуги.

Практическая значимость результатов исследования. На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработан новый способ сварки, отличительной особенностью которого является одновременное механическое и энергетическое управление процессом. Разработана оснастка для реализации данного процесса, включающая в себя механизм импульсной подачи проволоки и автоматизированную систему

управления процессом сварки. Определены зависимости формы шва от режимов сварки. Разработаны методики расчета:

- основных энергетических параметров переноса электродного металла;
- определения энергетического воздействия на каплю расплавленного металла;
- параметров модуляции тока.

Отдельные разделы диссертационной работы выполнялись в рамках программ, НИР и НИОКР:

1. Аналитическая ведомственная целевая программа «Развитие научного потенциала высшей школы (2009 – 2010). Проект «Развитие теории физико-химических процессов, протекающих в дуговом разряде и расплавленном металле сварочной ванны». Регистрационный номер: 2.1.2/1949.

2. Договор на выполнение научно-исследовательских работ (№ 01/09-СП от 28.04.2009) «Исследование влияния способов и режимов сварки на образование дефектов в сварных соединениях». Заказчик – ООО «Аттестационный региональный центр специалистов неразрушающего контроля» (г. Томск), 2009 г.

3. Договор на выполнение опытно-конструкторских и технологических работ (№ 04/08-СП от 01.03.2008) «Повышение эффективности дуговой сварки плавящимся электродом». Заказчик – ООО РТЦ «Сибирь» (г. Новокузнецк), 2008 г.

Результаты работы внедрены на ОАО «Анжеромаш» (г. Анжеро-Судженск), экономический эффект составил 9756 руб/год на один сварочный пост в год.

Диссертационные исследования и разработки используются в учебном процессе ЮТИ ТПУ студентов специальности 150202 «Оборудование и технология сварочного производства» по курсам «Технология и оборудование сварки плавлением», «Источники питания сварки», «Методология научных исследований», при выполнении выпускных квалификационных работ.

Основные положения, выносимые на защиту. 1. Способ сварки, при котором используется совмещенная модуляция сварочного тока с импульсной подачей сварочной проволоки.

2. Адаптивная электромеханическая схема управления с обратными связями для автоматизации процесса управляемого переноса электродного металла.

3. Результаты экспериментальных исследований влияния параметров механизированной сварки в CO_2 на геометрию шва и механические свойства сварного соединения.

Апробация работы. Результаты данной работы заслушивались на: 2-ой Всероссийской научно-практической конференции «Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении», – Юрга 2004 г.; 2-ой Международной научно-технической конференции «Современные проблемы в машиностроении». – Томск: 2004 г.; международной научно-практической конференции «Наука - Образование - Производство», посвященной 60-летию Нижнетагильского технологического института УГТУ-УПИ «Актуальные проблемы

электрометаллургии, сварки, качества»: – Новокузнецк 2006 г.; 13-ой Международной практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» – Томск., 2007 г.; 6-ой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Томск 2008 г.; международном Китайско-Российском форуме безопасного производства шахты и технологий оборудования, посвященного 60-летию Ляонионского технического университета. – (Китай, г. Фусинь), 2009

Результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических семинарах кафедры «Сварочное производство» ЮТИ ТПУ (г. Юрга), «Металлургия и технология сварочного производства» СибГИУ, (г. Новокузнецк), «Оборудование и технология сварочного производства», СФУ, (г. Красноярск), «Оборудование и технология сварочного производства», ЮУрГУ, (г. Челябинск).

Механизм импульсной подачи сварочной проволоки отмечен дипломом первой степени на региональном конкурсе «Инновация и изобретение года–2005».

Результаты диссертационной работы экспонировались на выставках: «Повышение эксплуатационной надежности и экологической безопасности трубопроводного транспорта» (Томск, 2003), Китайской Международной ярмарке по технологии и продукции патентов (Китай, г. Далянь, 2006). «Северовосточная азиатская выставка высоких технологий - 2009» (Китай, г. Шеньян), 2009.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 работы, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 6 патентов РФ на изобретение, 1 патент на полезную модель. Личный вклад автора в опубликованных в соавторстве работах составляет не менее 50%.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы (116 наименований) и приложения. Работа выполнена на 126 страницах, содержит 70 рисунков, 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Работа состоит из четырех глав.

В первой главе на основе анализа литературы проведена классификация методов стабилизации процесса и уменьшения разбрызгивания при сварке в CO_2 , которые можно условно разделить на две группы: физико-химические и энергетические. Первая группа позволяет стабилизировать процесс, но в отличие от второй, не позволяет управлять энергетическими параметрами процесса сварки.

Также проведена классификация механизмов с импульсной подачей сварочной проволоки, применяемых при сварке в CO_2 , которая показала отсутствие малогабаритных механизмов подачи проволоки с возможностью регулирования параметров подачи с помощью обратных связей в составе полуавтомата. Сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе выполнен анализ сил, действующих на каплю электродного металла при сварке с импульсной подачей сварочной проволоки и особенности переноса электродного металла (Рис. 1).

Перенос электродного металла при сварке с импульсной подачей сварочной проволоки состоит из четырех этапов:

1. Процесс зажигания сварочной дуги;
2. Плавление проволоки и увеличение длины дуги (пауза в подаче проволоки);
3. Движение и плавление проволоки во время импульса подачи;
4. Торможение электродной проволоки и переход капли в сварочную ванну.

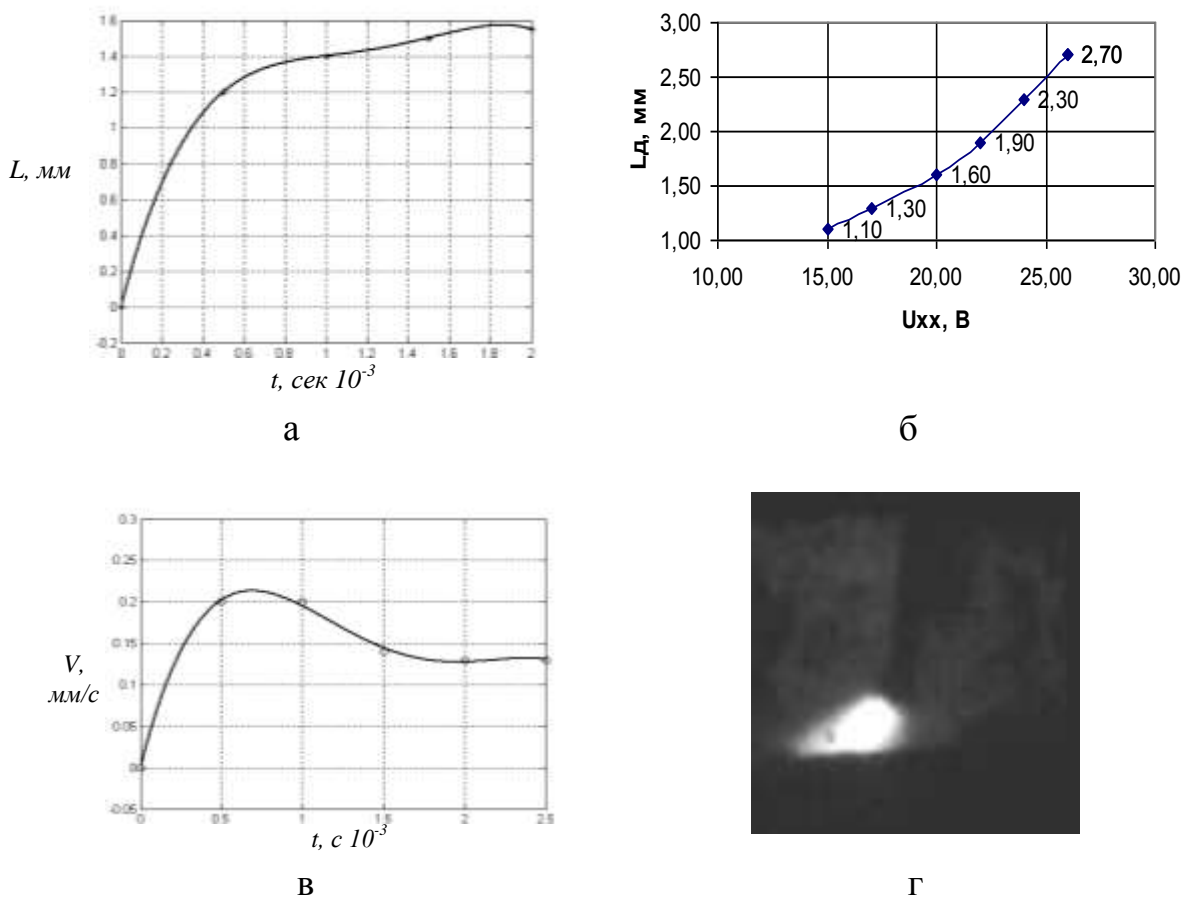


Рис. 1. Результаты исследования процесса сварки с импульсной подачей сварочной проволоки: а–изменение длины дуги при плавлении сварочной проволоки во время паузы, б– зависимость разрывной длины дуги от напряжения источника питания, в– диаграмма ускорения проволоки во время импульса ($d_{np} = 1.2$ мм, длина вылета $l = 12$ мм) г– выброс части капли во время импульса подачи проволоки

На основании анализа процесса сварки получены выводы, что при сварке с импульсной подачей сварочной проволоки большое значение имеет расстояние между проволокой и сварочной ванной в момент ее торможения l_t , от которого зависят вид и стабильность переноса металла, что определяет алгоритм управления процессом.

l_t зависит от шага подачи проволоки и времени включения импульса подачи. Вследствие этого необходимо управлять данными параметрами. Для этого вводится обратная связь по напряжению дуги, которая включает импульс подачи проволоки при достижении длины дуги строго определенного значения,

соответствующего определенному напряжению и задает время «паузы» (Рис. 1 а, б, в). Как показано на (рис. 1, г), в импульсе подачи проволоки в связи с увеличением плазменных потоков и сил инерции, направленных от сварочной ванны, капля часто отрывается от электрода и вылетает из зоны сварки, особенно в пространственных положениях, отличных от нижнего. Поэтому необходимо в момент импульса подачи проволоки снижать силу сварочного тока. Для определения основных энергетических параметров процесса сварки с импульсной подачей сварочной проволоки была разработана методика определения параметров переноса электродного металла в зависимости от массы капли. Для исследования процесса переноса необходимо вычислить массу капли, способную перейти в сварочную ванну под действием основных сил, действующих на каплю:

$$F_{\text{эо}} + F_{\text{д}} = F_{\text{п}} + F_{\text{нн}}, \quad (1)$$

где $F_{\text{эо}}$ - электродинамическая сила, Н; $F_{\text{д}}$ - динамическая сила, которая является суммой силы тяжести и силы инерции, полученной при движении капли, Н; $F_{\text{п}}$ - сила давления плазменных потоков, Н; $F_{\text{нн}}$ - сила поверхностного натяжения, Н.

Силу давления плазменных потоков определяют:

$$F_{\text{п}} = A \frac{I^2}{S_{\text{а}}}, \text{ Н} \quad (2)$$

где A - коэффициент, зависящий от материала электрода и параметров приэлектродных областей; I - сварочный ток, А; $S_{\text{а}}$ - площадь анодного пятна, м^2 ;

При определении силы давления плазменных потоков необходимо найти значение коэффициента A , для данного вида сварки. Это давление изменяет форму сварочной ванны. Для определения коэффициента A при сварке в среде CO_2 , с помощью цифровой скоростной видеосъемки была выявлена форма сварочной ванны (Рис. 2).

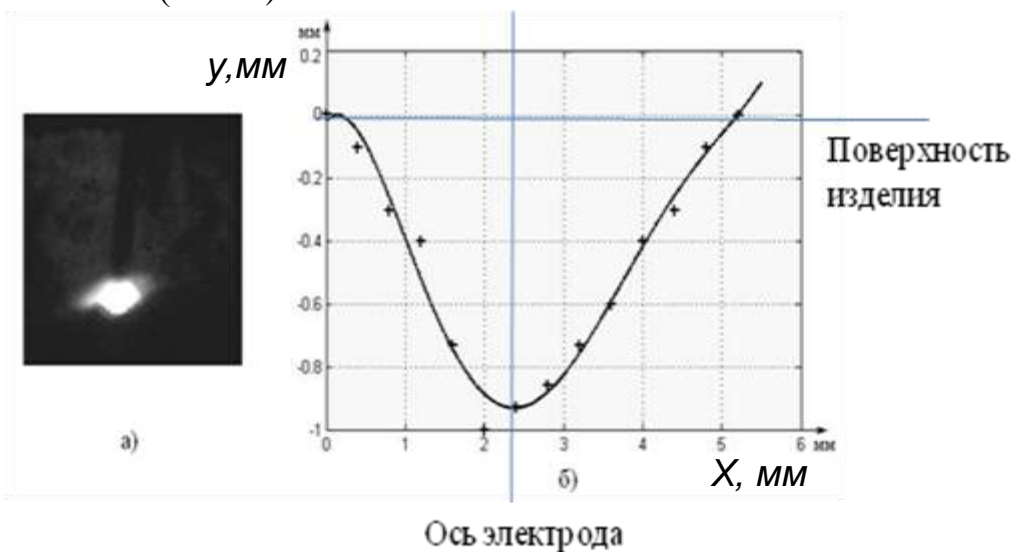


Рис. 2. Форма сварочной ванны при сварке в CO_2 : проволока Св-08Г2С $d = 1.2 \text{ мм}$ на режиме $I = 180 \text{ А}$, $U = 28 \text{ В}$: а – фотография дуги; б – форма сварочной ванны

Для расчета силового воздействия сварочной дуги используем закон нормального распределения силового воздействия:

$$F_s = P_{\max} e^{(-kR)^2}, \text{ Н} \quad (3)$$

где P_{\max} – максимальное давление в центре кратера, Па; k – коэффициент сосредоточенности давления; R – радиальная координата.

В каждой координате сила давления зависит от силы поверхностного натяжения сварочной ванны, поэтому можно предположить, что для каждой точки $F_s = z\sigma$, где z – глубина сварочной ванны в данной точке, σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м. Следовательно, силу давления дуги можно вычислить как интеграл по поверхности ее кратера. Кривая поверхности кратера приблизительно описывается трансцендентной показательной функцией:

$$y = be^{-(ax)^2} \quad (4)$$

где b – глубина кратера по осевой линии, м, равная F_{\max}/σ ; $a = k \approx 1$, x – радиус кратера сварочной дуги, м. Таким образом, произведение интеграла выражения (4) на коэффициент поверхностного натяжения сварочной ванны является силой давления сварочной дуги:

$$F_s = \sigma \int_{-x}^x be^{-x^2} dx, \text{ Н}. \quad (5)$$

Известно, что коэффициент поверхностного натяжения для жидкой стали, в зависимости от температуры изменяется в пределах $\sigma = 1,1 - 2,5$ Н/м. Учитывая, что сварка в CO_2 ведется на повышенной плотности тока, допускаем максимальное значение коэффициента, получаем силу давления сварочной дуги для данного случая $F_s = 0,23$ Н. Тогда из выражения (2) коэффициент A равен:

$$A = \frac{F_s S}{I^2} \quad (6)$$

и с учетом начальных условий ($I = 180$ А, $S = 1,47$ мм²) для сварки в CO_2 проволокой Св-08Г2С $A = 2,27 \cdot 10^{-11}$. Используя данный коэффициент, построена номограмма зависимости давления сварочной дуги от тока и диаметра сварочной проволоки, которая представлена на (Рис. 3.а).

Введя значения сил в выражение (1) и разделив на ускорение свободного падения, определяем массу капли, способную перейти в сварочную ванну при сварке с короткими замыканиями:

$$m = \left(A \frac{I^2}{S_a g} + \frac{\sigma 2\pi r}{g} - \frac{\mu \mu_0 i^2}{4\pi g} \ln \frac{R}{r} \right), \text{ кг} \quad (7)$$

где: μ – абсолютная магнитная проницаемость воздуха, Гн/м; R_{CT} – радиус столба дуги, м; r – радиус электрода, м. g – ускорение свободного падения, м/с²

Для заданных начальных условий, можно вычислить размер капли электродного металла, способный перейти в сварочную ванну под действием сил (10) при заданных начальных условиях. Начальные условия – это диаметр наиболее применяемой сварочной проволоки $d = 1,2$ мм, падение напряжения на дуге $U_d = 28$ В, сварочный ток $I = 180$ А. Размер капли, необходимый для расчета электродинамической силы, определяем из кадра киносъемки,

представленного на (Рис. 3.б). Из представленного кадра определяем, что для данных условий $R \approx 1,7r$. Подставив в выражение (10) известные данные получаем $m = 0,0315$ г. Проведенные измерения показывают, что задав радиус капли $R \approx 1,7r$, и зная, что при температуре $T = 1530^0$ С плотность жидкой стали $\rho = 7,23$ г/мм³, получаем массу капли $m \approx 0,0321$ г, что на 1,9% больше расчетной.

Рассмотрим изменение массы капли в зависимости от сварочного тока.

$$F_{эд} = \frac{\mu \cdot I^2}{4 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{R}{r} \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что уменьшение радиуса капли R снижает $F_{эд}$. На основании этих данных построена номограмма (Рис. 3.в), которая отражает изменения массы капли электродного металла при изменении силы тока от 180А до 360А. При этом происходит снижение массы капли способной перейти в сварочную ванну.

Приняв начальное ускорение движения капли за ноль, как при сварке с непрерывной подачей проволоки, и подставив это ускорение в выражение (3), можно вычислить силу F_0 , необходимую для отрыва капли при начальных условиях. $F_0 = 4,15 \cdot 10^{-4}$, Н. Учитывая это, можно определить зависимость $m = f a$, которая при увеличении ускорения от $9,8$ м/с² до 80 м/с² изменяется от $m = 0,0322$ г до $0,0045$ г. Таким образом, при сохранении равновесия, увеличение ускорения способствует снижению массы капли.

Номограмма (Рис. 3, г) позволяет определить изменения допустимого размера капли электродного металла в зависимости от ее ускорения.

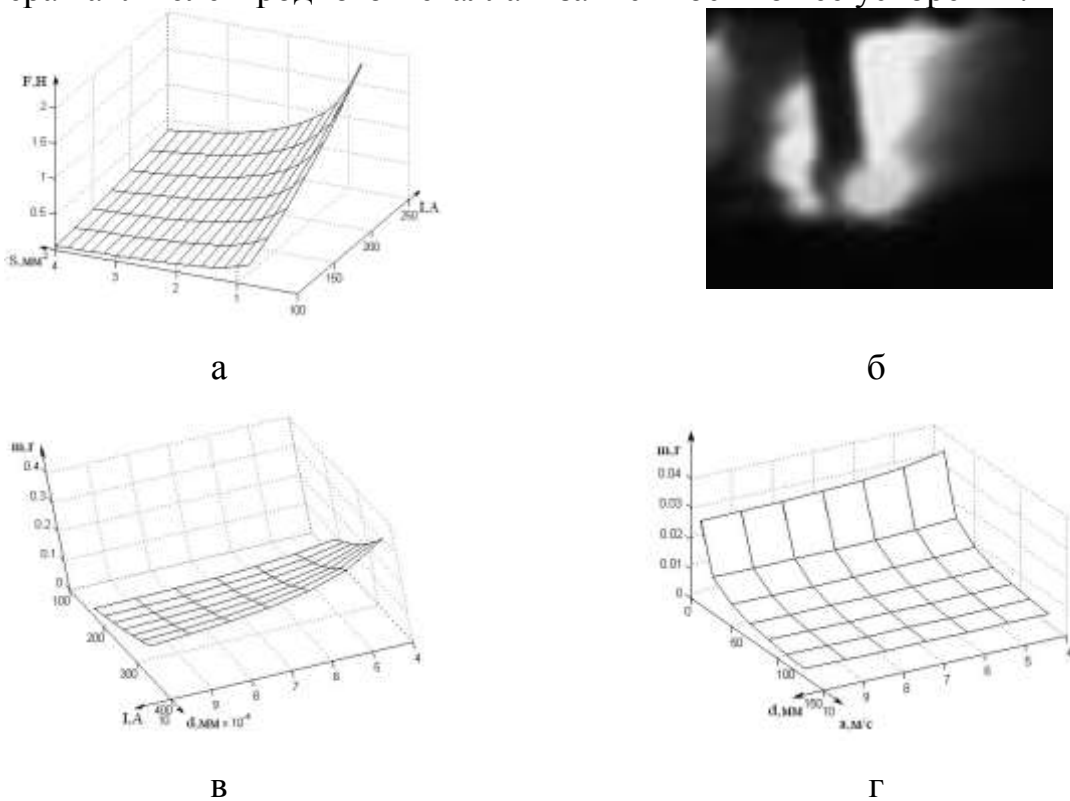


Рис. 3. Номограммы зависимости энергетических параметров при сварке с импульсной подачей сварочной проволоки:

а–изменение давления плазменных потоков в зависимости от силы сварочного тока и диаметра проволоки; б– кинокадр касания капли со сварочной ванной при сварке в CO_2 проволокой Св-08Г2С, $d = 1,2\text{мм}$, $I = 180\text{А}$; в–зависимость массы капли от изменения сварочного тока и радиуса капли для проволоки $d = 1,2\text{ мм}$; г –зависимость массы капли от изменения ускорения движения капли и ее радиуса для проволоки $d = 1,2\text{ мм}$

Для определения режимов сварки тонколистового металла выполнен расчет режимов модуляции тока при сварке в CO_2 .

Для определения критической массы сварочной ванны применяем уравнение равновесия расплавленного металла в виде:

$$G \cdot (1 - \cos\alpha) + F_d + N = F_{n.n.}, \quad (9)$$

где G – вес ванны, кг; α – угол, отклонения от нижнего, горизонтального положения; F_d – суммарная сила давления дуги, H ; N – поправка на неизотермические условия; $F_{n.n.}$ – сила поверхностного натяжения, H .

По полученным экспериментальным данным, $N = -0.23G$, тогда при сварке в нижнем положении:

$$0.77 \cdot V \cdot \gamma \cdot g + A \cdot \frac{I^2}{S_a} = P \cdot \sigma, \quad (10)$$

где V – объем сварочной ванны, м^3 ; γ – плотность металла, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; A – коэффициент, зависящий от материала электрода и параметров приэлектродных областей, для сварки в CO_2 , $A = 2,27 \cdot 10^{-11}$; I – сила сварочного тока, A ; S_a – площадь анодного пятна, м^2 ; σ – коэффициент поверхностного натяжения, для стали $\sigma = 1,10 \div 2,5 \text{ Н}/\text{м}$; P – периметр ванны, м .

Приближенно можно представить форму сварочной ванны в виде двух сферических сегментов и сегмента, имеющего в сечении вид сектора круга между ними (Рис. 4).

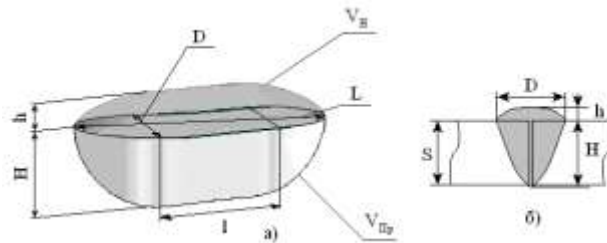


Рис. 4. Модель ванны:

V_H – объем металла полученного от плавления проволоки, м^3 ; $V_{Пр}$ – объем расплавленного основного металла, м^3 ; D – диаметр сварочной ванны, м ; L – координата сварочной точки, м ; H – глубина проплавления, м ; l – длина полусфер, м ; h – высота наплавленного валика, м ; S – толщина металла, м .

Объем сварочной ванны равен:

$$V = 2\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \frac{h}{3} + \left[\frac{D^2}{8} \cdot \left(\frac{\pi \cdot \alpha}{180} - \sin \alpha\right) L \right], \quad (11)$$

Периметр равен:

$$\pi \cdot D + 2 \cdot l. \quad (12)$$

Тогда сварочный ток равен:

$$I^2 \cdot \left(\frac{8.6 \cdot 10^{-3}}{d_{np}^3} - \frac{6.4 \cdot 10^{-5} \cdot l_6}{d_{np}^4} \right) + I \cdot \left(\frac{1.16 - 9.6 \cdot 10^{-2} \cdot U}{d_{np}^2} \right) = 0, \quad (13)$$

где d_{np} – диаметр электродной проволоки, м; l_g – длина вылета электрода, м; U – напряжение сварочной дуги, В.

Составляющие уравнения (13) заменяются: квадратный
 $a = \frac{8.6 \cdot 10^{-3}}{d_{np}^3} - \frac{6.4 \cdot 10^{-5} \cdot l_g}{d_{np}^4}$; линейный; $b = \frac{1.16 - 9.6 \cdot 10^{-2} \cdot U}{d_{np}^2}$; свободный $c = 0$.

Уравнение принимает вид:

$$a \cdot I^2 + b \cdot I + 0 = 0, \quad (14)$$

где: $a = f(l_g)$, $b = f(U)$.

Из решения квадратного уравнения (16), относительно I и учитывая, что ток не может иметь отрицательного значения, определяется сила сварочного тока. Затем подставив выражения (9) и (10) в уравнение (8), получим:

$$0.77 \cdot \left\langle 2\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \frac{h}{3} + \left[\frac{D^2}{8} \cdot \left(\frac{\pi \cdot \alpha}{180} - \sin \alpha\right) L \right] \right\rangle \cdot \gamma \cdot g + A \cdot \frac{I^2}{S} = (\pi D + 2l) \cdot \sigma \cdot \quad (15)$$

Скорость сварки, исходя из стабильности формы шва, и оптимального перекрытия точек, равна:

$$v = 0.444 \cdot \frac{D}{t_n + t_u}, \quad (16)$$

где t_n – время паузы (время кристаллизации сварочной ванны), с; t_u – время импульса (время сварки), с.

Зная разрывную длину сварочной дуги (Рис. 1 б), напряжение источника питания, определяем необходимый минимальный ток для данного процесса. Известно, что жесткая ВАХ дуги распространяется на область, где плотность тока лежит в пределах ($12 \text{ А/мм}^2 \div 80 \text{ А/мм}^2$), $j = \frac{I}{S_\delta}$, где I – сварочный ток, А, а

S_δ – площадь столба дуги, м^2 , $S_\delta = \pi \cdot r^2$, r – радиус сварочной проволоки, м. При допущении, что площадь сечения проволоки равна площади столба дуги, определим ток кристаллизации сварочной ванны:

$$I = j \cdot S_\delta \geq 12 \cdot \pi \cdot r^2 \quad (17)$$

На следующем этапе расчета определяем время паузы из условия:

$$v_{nl} < \frac{\Delta l}{t_n} \quad (18)$$

где Δl – участок проволоки, который может расплавиться до обрыва, равный $\Delta l = l_p - l_{\delta(n.m.)}$, l_p – разрывная длина дуги, м; $l_{\delta(n.m.)}$ – длина дуги в момент повторного зажигания дуги, м.

Решая совместно неравенство (13) и выражение (18) определяем время паузы:

$$t_n < \frac{\Delta l}{2.6 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{I \cdot U}{d_{np}^2} + 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{I^2 \cdot l_g}{d_{np}^4}}, \quad (19)$$

Определив из выражения (11) объем сварочной ванны в зависимости от пространственного положения сварного шва и учитывая скорость плавления сварочной проволоки, можно найти время формирования сварочной ванны:

$$t_{с.} = \frac{0.133 \cdot K_B \cdot I^A \cdot U^B \cdot T^{k \cdot k+1} - F_d \cdot \rho}{\left(9.6 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{I \cdot U}{d^2} + 6.4 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{I^2 \cdot l}{d^4} \right)} \quad (20)$$

$$H = K_h \cdot \frac{I^a \cdot U^b}{V^c}, \quad (21)$$

$$D = K_D \cdot \frac{I^m \cdot U^n}{V^k}, \quad (22)$$

$$g = K_g \cdot \frac{I^r}{V^w \cdot U^v}, \quad (23)$$

где K_h , K_e , K_g – коэффициенты, зависящие от теплофизических свойств металла, мощности источника питания, коэффициента формы проплавления; a , b , m , n , r , w , v – показатели степени определяющие влияние данного фактора (определены экспериментально). С помощью модели можно определять параметры модуляции (Рис. 5)

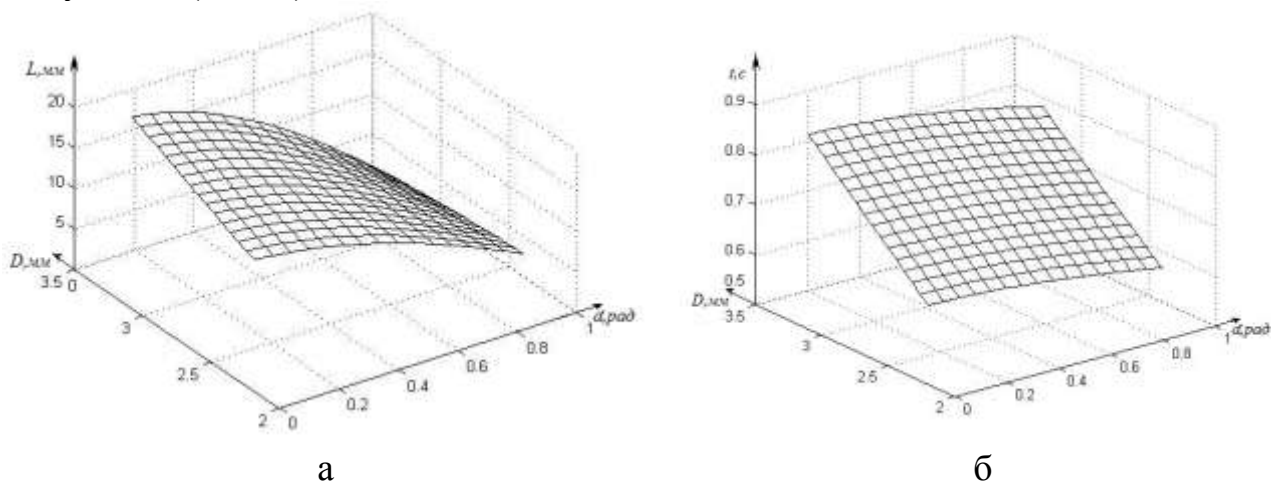


Рис. 5. Параметры модуляции: а – Изменение длины сварной точки в зависимости от пространственного положения; б – время импульса в зависимости от пространственного положения.

Определив время формирования сварочной ванны и время ее кристаллизации можно в зависимости от диаметра сварочной проволоки и напряжения источника питания сварочной дуги определить изменения частоты модуляции. Для данной методики разработана компьютерная программа, которая позволяет обрабатывать экспериментальные данные и на их основе строить номограммы.

Третья глава посвящена созданию автоматизированной системы управления. Для получения процесса управляемого переноса применяется импульсная подача сварочной проволоки. При этом необходимая длина проволоки (шаг подачи) с частотой, определяемой механизмом импульсной подачи проволоки (МИПС), поступает в зону сварки в режиме «импульс-пауза». Осциллограмма процесса представлена на (Рис. 6). В момент паузы (скорость подачи равна нулю) дуга горит между проволокой и изделием, растет длина дуги и, соответственно, напряжение, а сила тока уменьшается. При достижении напряжения дуги значения U_d , заданного блоком управления через обратную связь, включается импульс подачи проволоки. В связи с высокой

скоростью подачи проволоки резко возрастает сварочный ток. Блок управления шунтирует дугу (за счет включенного в цепь дуги силового транзистора) до заданного блоком значения. После остановки проволоки капля под действием сил инерции переходит в сварочную ванну. Момент короткого замыкания отключает силовой транзистор.

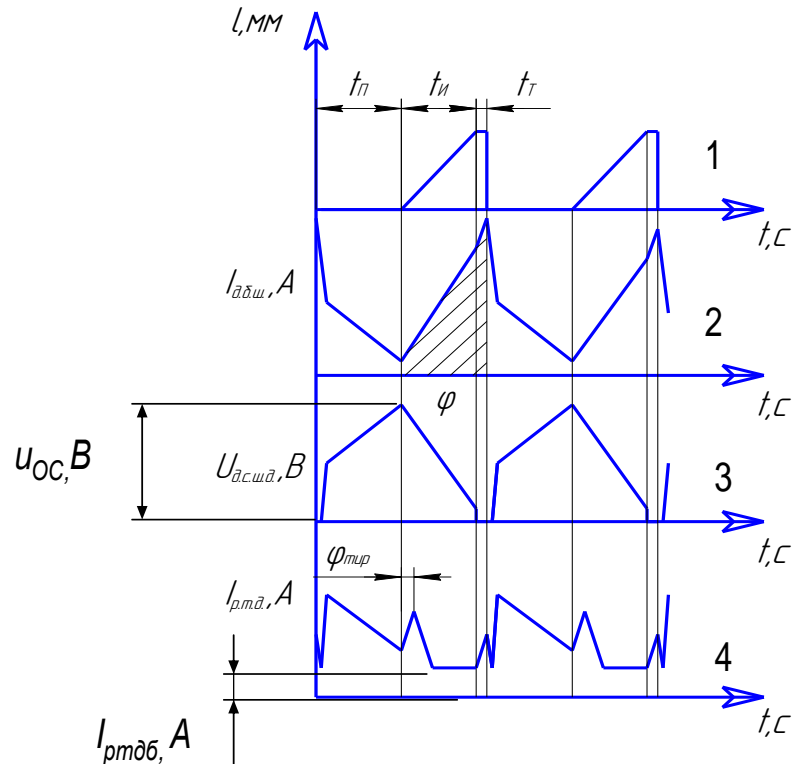


Рис. 6. Циклограмма способа сварки

где t_n -время паузы подачи проволоки; t_i -время импульса подачи проволоки t_r -время торможения; $I_{дш}$ -ток дуги без шунтирования, А; $U_{дсшд}$ - напряжение с шунтированием дуги, В; $I_{р.т.д}$ -ток дуги с шунтированием, А; $U_{ос}$ - напряжение, заданное блоком обратной связи, В; $I_{р.т.дб}$ - сила тока, заданная регулятором тока; $\varphi_{т.р}$ -время задержки включения регулятора тока дуги, сек.

Для реализации способа сварки разработана автоматизированная функциональная блок-схема (Рис. 7), позволяющая объединить и согласовать импульсную подачу проволоки с модуляцией тока дуги с использованием адаптивных обратных связей.



Рис. 7. Блок-схема автоматизированного управления процессом сварки
ИП-источник питания; БОС-блок обратной связи; БУМП-блок управления механизмом подачи проволоки; БУРТД-блок управления регулятором тока дуги; МИПСП- механизм импульсной подачи сварочной проволоки; РТД- регулятор тока дуги.

Схема функционирует следующим образом. Блок управления *БУМП* задает частоту подачи сварочной проволоки ($f_{\text{под}}$) подающим механизмом *МИПСП*. Для стабилизации момента включения импульса подачи проволоки используется обратная связь по напряжению дуги *БОС*. Напряжение, при котором происходит импульс подачи, задается блоком управления *БОС*, который через *БУМП* выдает сигнал на *МИПСП* при достижении на дуге заданного значения с помощью сигнала обратной связи. Уменьшение влияния сил плазменных потоков на каплю достигается регулированием тока дуги в момент импульса подачи проволоки включением в цепь параллельно сварочной дуге блока *РТД*. Согласование импульсной подачи проволоки с моментом модуляции тока и время задержки включения ($t_{\text{вкл}}$) блока *РТД* выполняет *БУРТД*, который синхронизирует время подачи проволоки со временем включения *РТД*. В момент шунтирования дуги капля расплавленного металла продолжает движение к сварочной ванне вместе с проволокой, а после остановки проволоки, под действием сил инерции. Отключение *РТД* происходит в момент касания капель сварочной ванны ($t_{\text{выкл}}$), т.е. в момент короткого замыкания. В основе регулятора тока используется биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT) CM600HA-24A 1200 H Series.

Разработан и изготовлен *МИПСП* (Рис. 8,9) с возможностью регулирования параметров подачи с помощью обратных связей в составе автомата или полуавтомата. *МИПСП* обеспечивает: стабильность шага подачи, быстродействие (возможность работать на частотах до 120 Гц), малую инерционность, малые массогабаритные характеристики, управление механизмом по мгновенным параметрам дуги.

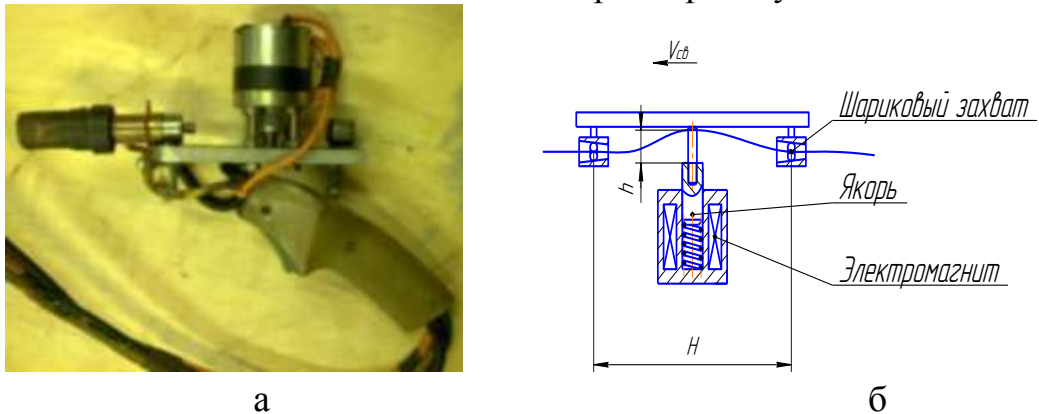


Рис. 8. Механизм импульсной подачи проволоки: а – рабочий образец; б – схема работы *МИПСП*

Разработанный подающий механизм обеспечил высокую стабильность подачи сварочной проволоки, надежность при эксплуатации, и хорошие технологические характеристики. Измерения вибрации показали уровень виброскорости – $0,98 \cdot 10^{-2}$ м/с ($\pm 10\%$), виброускорения – $2,1$ м/с². Данный уровень не превышает предельно-допустимых уровней локальной вибрации.

Разработана схема управления *МИПСП*, обладающая быстродействием на уровне частоты переноса (Рис. 9).

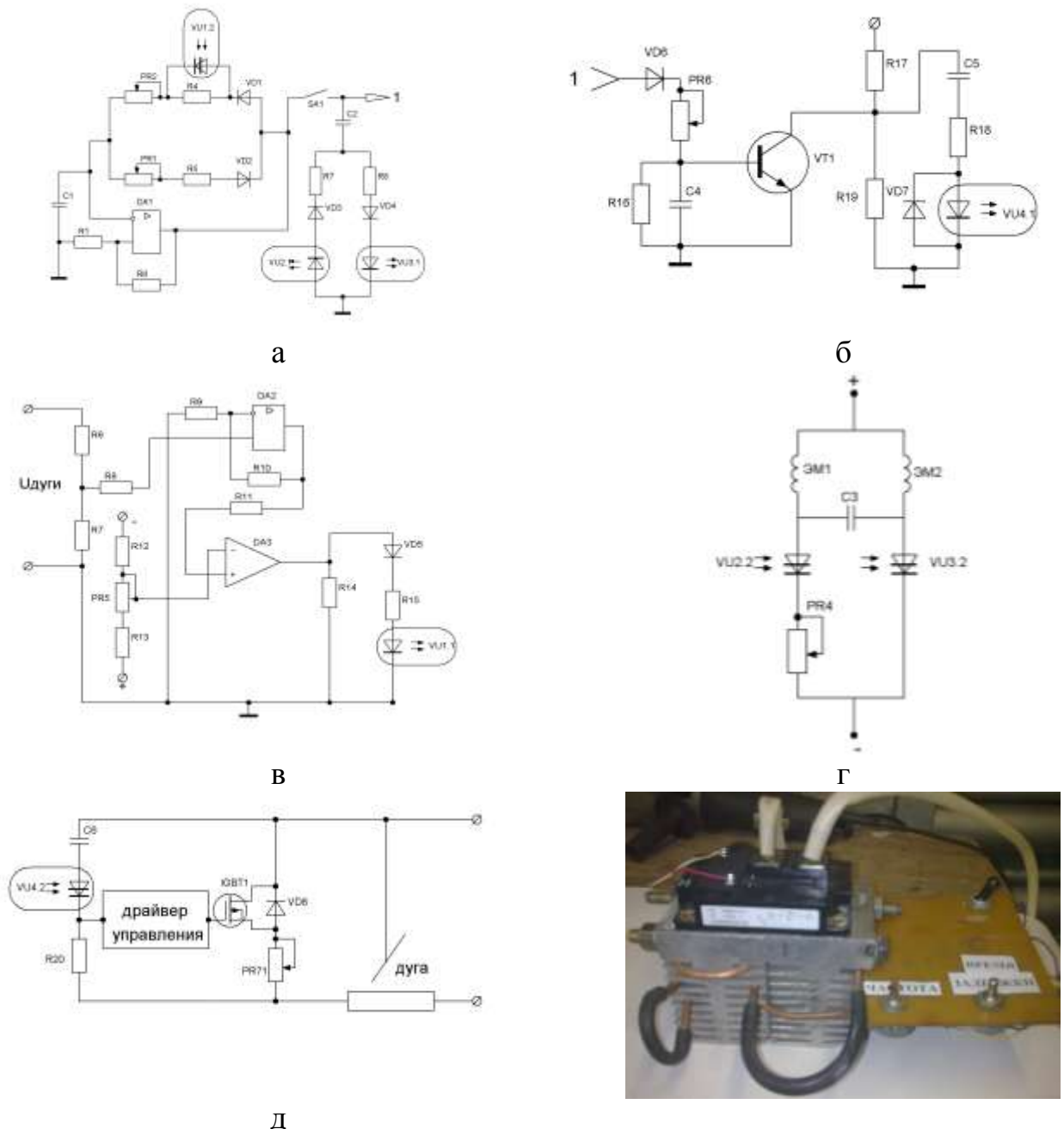


Рис. 9. Схема управления МИПСР: а - генератор импульсов; б - блок формирования управляющего импульса регулятора тока; в - блок согласования и коррекции скважности импульсов; г - система электромагнитов; д - регулятор тока дуги

Для согласования блока управления механизмом подачи проволоки с процессами, происходящими с каплей расплавленного металла и обеспечения стабильности переноса, в систему управления вводится обратная связь по напряжению дуги (рис. 9, в). Задача блока согласования и коррекции скважности импульсов - отслеживать напряжение на дуге и включать импульс подачи проволоки при достижении длины дуги заданной управления, соответствующей определенному напряжению дуги (максимальное напряжение дуги). Так как шаг подачи проволоки постоянный, то изменяя максимальное напряжение дуги на блоке управления, можно изменять глубину проплавления и ширину шва.

В четвертой главе представлены результаты разработки и применения способа сварки с импульсной подачей сварочной проволоки и модуляцией тока дуги (рис. 10, 11).

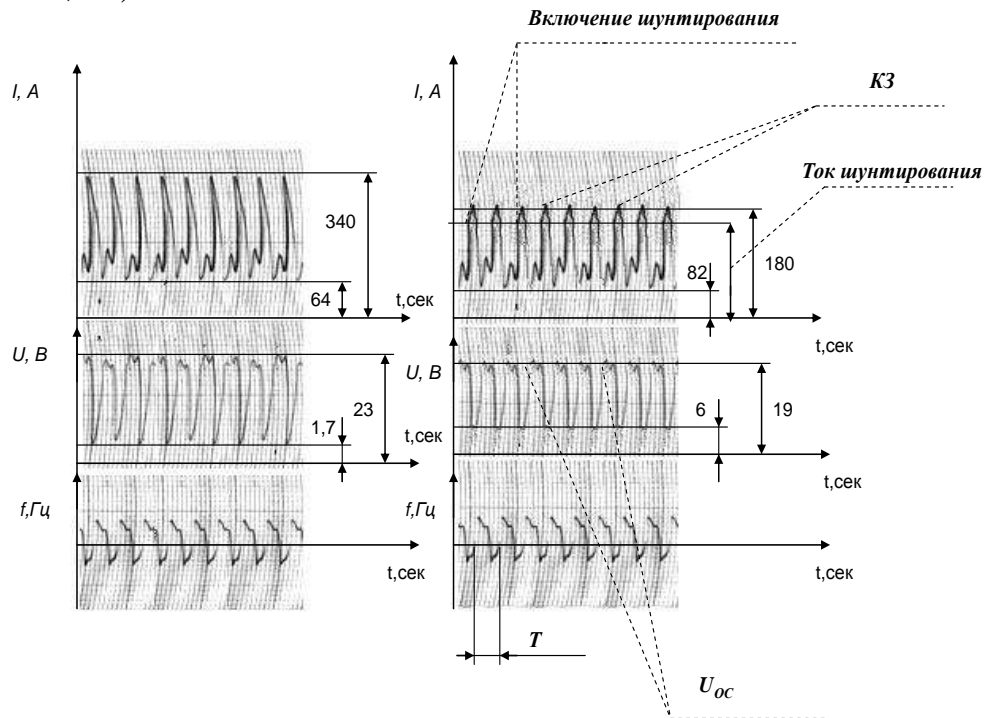


Рис. 10. Осциллограмма процесса сварки: а – импульсная подача проволоки с управлением по максимальному напряжению; б – импульсная подача проволоки с модуляцией тока

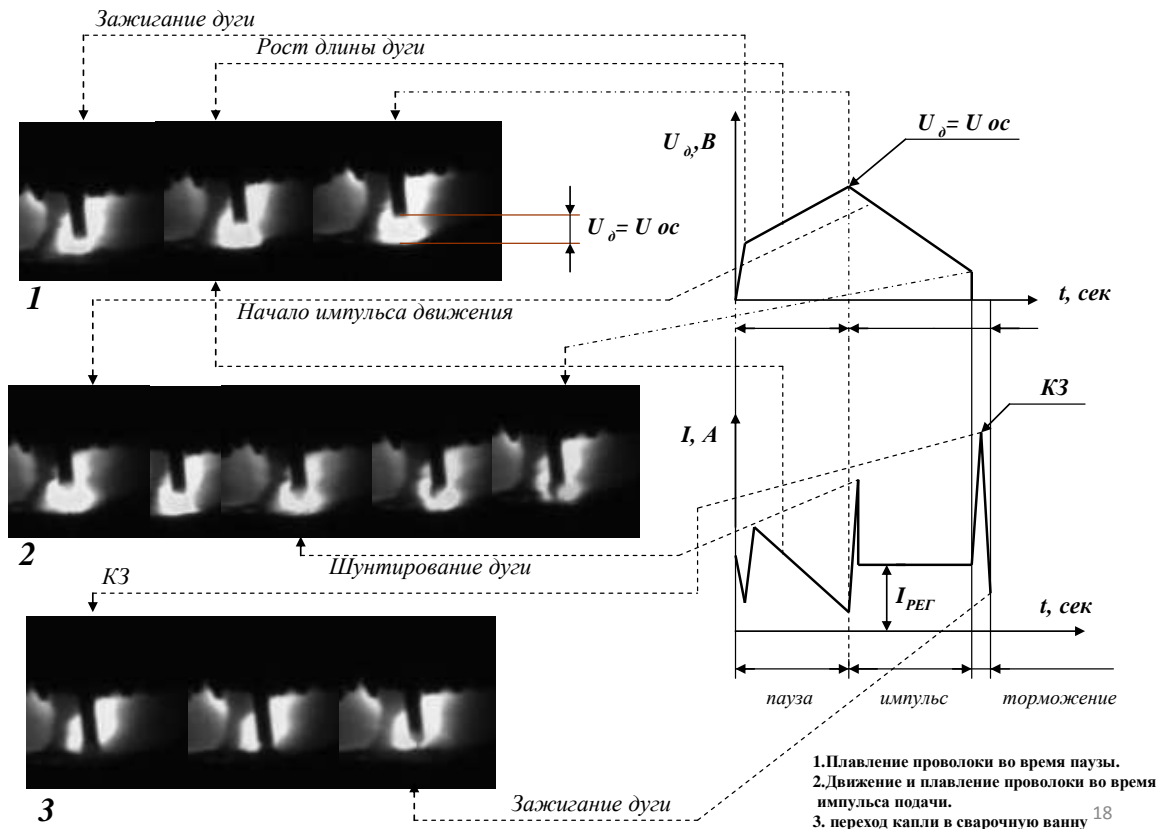


Рис. 11. Кадры скоростной видеосъемки: а – процесса паузы; б – процесса импульса подачи проволоки; в – процесса перехода капли и зажигания дуги

Зависимость формы сварного шва от параметров автоматизированной системы показана на рис. 12, 13. Сварку выполняли на образцах из стали

10ХСНД, тип соединения С2 и Т2, а также образцы толщиной 1 мм в вертикальном положении. В табл. 1 представлены рекомендуемые режимы сварки.

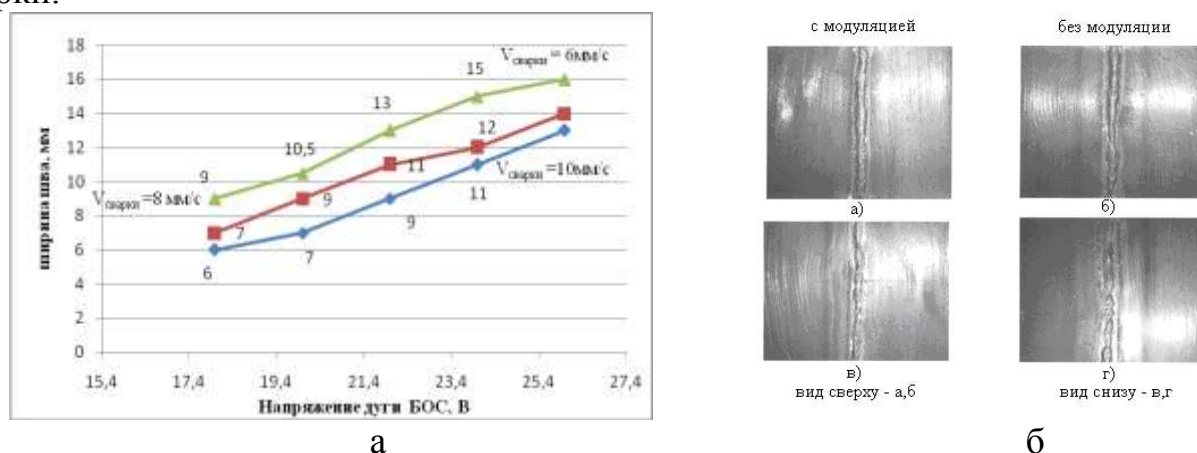


Рис. 12. Зависимость геометрии сварного шва от параметров системы: а – зависимость ширины шва от напряжения, заданного блоком ОС и скорости сварки ($h=1,6$ мм, $I_{pд}=80$ А); б – сварка тонколистового металла (1мм) в вертикальном положении $V_{сварки}=10$ мм/с, $I_{д}=180$ А, $I_{рл}=70$ А $U_{д}=20$ В

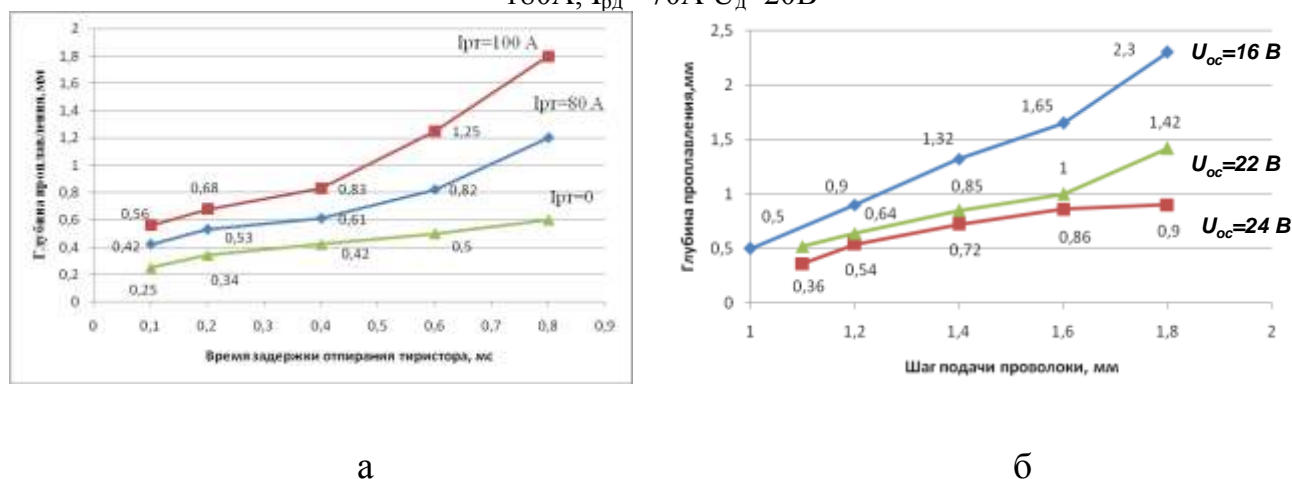


Рис. 13 Зависимость геометрии сварного шва от параметров системы: а – зависимость глубины проплавления от времени включения регулятора тока и тока, заданного блоком управления ($U_{ос}=20$ В, $h=1,6$ мм) б – Зависимость глубины проплавления от шага подачи проволоки и напряжения блока ОС ($I_{pд}=100$ А, $t_3=0,35$ сек.).

Механические свойства сварных соединений, полученных разработанным способом сварки представлены в таблице 1. Рекомендуемые режимы сварки в таблице 2.

Таблица 1. Механические свойств сварных швов, сваренных различными способами

Вид сварки	Диаметр проволоки, мм	Толщина пластин, мм	Рентген	Предел прочности, МПа	Угол загиба, град
Предлагаемый способ	1.6	5	Дефектов не обнаружено	494	180
		8		510	
	1.2	5		556	
		8		491	
Импульсная подача проволоки	1.6	5		487	
		8		474	
	1.2	5		490	
		8		491	

Таблица 2. Рекомендуемые режимы сварки.

Сварное соединение типа С2				
Толщина металла, мм	Напряжение блока ОС, В (Частота, Гц)	Шаг подачи, мм	Сила тока регулятора дуги, А	Время задержки, мс
0.8–1.2	16–18 (40-50)	1.0–1.2	70–90	0.18–0.2
1.4–2.0	22 (55-65)	1.2–1.4	100	0.6
2.2–4.0	20–22 (60-70)	1.6	110	0.6
4.5–6.0	18–20 (50-60)	1.6	110	0.8
Сварное соединение типа Т2				
0.8–1.2	16–18 (40-50)	1.0–1.2	80–100	0.2–0.22
1.4–2.0	22 (55-65)	1.2–1.4	100–120	0.5–0.6
2.2–4.0	20–22 (60-70)	1.6	120–140	0.6–0.8
4.5–6.0	18–20 (50-60)	1.6	120–140	0.6–0.8

Основные выводы и результаты работы:

1. Научно обоснована и подтверждена опытом кинетика переноса расплавленного электродного металла при управляемой импульсной подаче сварочной проволоки, совмещенной с модуляцией сварочного тока.

2. Разработана методика управления режимами сварки и электромеханическая схема для улучшения стабильности переноса электродного металла

3. Создана система, включающая в себя механизм импульсной подачи проволоки, регулятора тока дуги и блока автоматизированного управления импульсной подачей сварочной проволоки с модуляцией сварочного тока, которые позволяют управлять переносом электродного металла, в широком диапазоне изменять энергетические характеристики процесса сварки, регулировать тепловложение в сварное соединение. Данный способ позволяет: вести сварку металла в различных пространственных положениях с толщинами от 0,8 мм до 12мм за счет возможности регулировки глубины проплавления; производить наплавку металла с минимальной долей расплавления основного металла за счет управления процессом сварки по максимальному напряжению.

4. Результаты работы внедрены на ОАО «Анжеромаш» (г. Анжеро-Судженск), экономический эффект составил 9756 руб/год на один сварочный пост.

Основные положения диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Федько, В. Т. Методы борьбы с разбрызгиванием при сварке в CO₂ [Текст] / В.Т. Федько, О.Г. Брунов, С.А. Солодский, А.В. Крюков, П.Д. Соколов //Технология машиностроения – 2005. – №5 – С. 24 – 30.

2. Федько, В.Т. Перенос электродного металла при сварке с импульсной подачей сварочной проволоки [Текст] / В.Т. Федько, О.Г. Брунов, С.А. Солодский // Сварочное производство – 2006. №8 – С. 9–14¹.

3. Брунов, О.Г. Физико-математическое моделирование перехода капли электродного металла в сварочную ванну [Текст] / О.Г. Брунов, С.А. Солодский // Сварочное производство – 2008. – №4. – С16-19.

¹ Статья переведена и опубликована в международном сборнике Welding International 2007 vol.21, №1, P. 50–54

4. Пат. 2288083 (РФ). МПК В23К 9/12., В23К 9/133. Механизм импульсной подачи сварочной проволоки [Текст] / С.А. Солодский, В.Т. Федыко, О.Г. Брунов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Томский политехнический университет». Заяв. 21.06.05; опубл. 27.11.2006. Бюл. №33.

5. Пат. 2288820 (РФ). В23К 9/095., В23К 9/12. Способ управления механизмом импульсной подачи сварочной проволоки [Текст] / С.А. Солодский, В.Т. Федыко, О.Г. Брунов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Томский политехнический университет». Заяв. 21.06.05; опубл. 27.11.2006. Бюл. №34.

6. Пат. 2293630 (РФ). В23К 9/095., В23К 9/12. Способ механизированной сварки в CO_2 с низкочастотной модуляцией сварочной ванны [Текст] / В.Т. Федыко, О.Г. Брунов, А.В. Крюков, С.А. Солодский, В.В. Седнев; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Томский политехнический университет». Заяв. 21.02.06; Опубл. 10.04.07. Бюл. №10.

7. Пат. 2296654 (РФ). МПК В23К 9/33 Механизм импульсной подачи сварочной проволоки [Текст] / В.В. Седнев В.В., О.Г. Брунов, С.А. Солодский, А.В. Крюков, заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Томский политехнический университет». Заяв. 26. 02. 2006. Опубл. 10.04.2007. Бюл. №10

8. Солодский, С.А. Особенности переноса электродного металла при сварке в активных газах [Текст] / С.А. Солодский, О.Г. Брунов, В.И. Васильев, А.А. Зеленковский // Труды 6 Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Томск: Издательство Томского политехнического университета – 2007. – С.50-52.

9. Федыко, В.Т. Импульсная подача сварочной проволоки с управляемым переносом электродного металла [Текст] / В.Т. Федыко, С.А. Солодский, А.В. Крюков // Материалы научно-технической конференции «Наука - Образование – Производство», посвященной 60-летию Нижнетагильского технологического института УГТУ-УПИ. В 3 т. Т. 2: Сварка реновация и инженерия поверхности. Нижний Тагил: НТИ (ф) ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, – 2004. – С100-102.

10. Солодский, С.А. Влияние газодинамического удара на разбрызгивание электродного металла при сварке в CO_2 [Текст] / С.А. Солодский, О.Г. Брунов // 13 Международная практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» / Сборник трудов в 3-х томах. Т.1. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 547 с. С.363-365..

11. Солодский, С.А. Повышение эффективности сварки плавящимся электродом в защитных газах [Текст] / С.А. Солодский, Е.А. Зернин, Н.В. Павлов // Материалы международного Китайско-Российского форума безопасного производства шахты и технологий оборудования, посвященного 60-летию Ляонионского технического университета. - Фусинь: Изд. ЛТУ, – 2009. – С. 44 - 47.

Подписано к печати 10.01. 2010 г.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная.

Печать RISO. Усл. печ. л. 0.47. Уч.-изд. л.0.42

Тираж 120 экз. Заказ 1109.

ИПЛ ЮТИ ТПУ. Лицензия ПЛД № 44-55 от 04.12.97

Ризограф ЮТИ ТПУ. 652050, Юрга, ул. Московская, 17