

М 421330

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

- . -

М о с к о в с к о е

ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового
Красного Знамени высшее техническое училище имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

ЛОСЕВ Владимир Макарович

УДК 621.791.92.039:62-52

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ

АДАПТАЦИИ РОБОТОВ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

05.04.05 - Технология и машины сварочного
производства

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 1984

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - д.т.н., профессор ГЛАДКОВ Э.А.

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор СТЕКЛОВ О.И.
к.т.н. МАСЛОВ В.В.

Ведущее предприятие - указано в решении специализированного совета.

Защита состоится " " _____ 1984 г. на заседании специализированного совета К 053.15.03 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Ваш отзыв в 2-х экземплярах, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С л

Училища.

Ав.

спе

В.М.

М421330

Подп

Л-83486.

Типогр

раж 100 экз.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Основные требования современного производства – полная автоматизация технологических процессов при возможности частого изменения номенклатуры производимых изделий – для процессов дуговой сварки удовлетворяются с помощью сварочных роботов.

Роботизация сварочного производства решает следующие важнейшие задачи: восполнение дефицита сварщиков, улучшение условий труда, повышение производительности труда и качества сварных соединений, унификация технических и программных средств автоматизации сварки. Возможности роботизации сварочных производств сдерживаются тем, что большинство существующих роботов – жестко программируемые. Они многократно воспроизводят траекторию движения горелки и сварочный цикл, которые заранее заложены в программу (например, при сварке эталонного изделия в процессе обучения). Однако, положение стыка на свариваемых изделиях может не соответствовать программной траектории вследствие погрешностей изготовления, сборки и фиксации изделий. Величины зазоров (и разделки кромок) на свариваемых изделиях могут не соответствовать запрограммированным режимам сварки. Вследствие этого жестко программируемые роботы зачастую не в состоянии обеспечить качество сварных соединений.

Организационно-технологические мероприятия, направленные на повышение точности изготовления, сборки и фиксации свариваемых изделий, что необходимо для промышленного внедрения жестко программируемых роботов, как правило, экономически не оправданы. Для роботизации сварки большинства изделий современной промышленности целесообразнее применение систем адаптивного управления сварочными робототехническими комплексами (РТК).

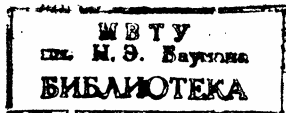
Создание адаптивных систем позволит осуществлять траекторию электрода, которая соответствует реальному положению стыка, и осуществлять режимы сварки, которые являются наилучшими для реальных геометрических параметров свариваемого стыка. Соответственно, эти задачи получили названия геометрической и технологической адаптации. Внедрение роботов с системами геометрической и технологической адаптации позволит повысить производительность труда (исключается трудоемкий процесс ручного

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1421330

Посев В.М. Разработка сред



обучения) и обеспечить качество сварных швов (исключается недопустимое смещение электрода, сварка ведется на режимах, которые гарантируют качество при измеренной ширине зазора).

Цель работы. Целью работы является управление качеством роботизированной сварки угловых соединений в условиях несоответствия программной траектории действительному положению стыка, изменения ширины зазора и других технологических возмущений.

Оно осуществляется с использованием разработанных средств геометрической и технологической адаптации, включающих технические средства – датчики, дающие необходимую информацию, и системы ввода их сигналов в ЭВМ РТК – и программные средства – алгоритмы и реализующие их программы, позволяющие вычислять необходимые траекторию сварочной горелки и режимы сварки.

В работе решались следующие основные задачи:

1. Анализ характеристик существующих средств адаптации, формулировка задач адаптации и требований к разрабатываемым средствам геометрической и технологической адаптации.

2. Выбор принципа измерений необходимых параметров. Разработка конструкции макета датчика. Разработка блока преобразования сигналов датчика в шестнадцатичисленный цифровой код.

3. Разработка алгоритмов геометрической адаптации для сварки угловых соединений.

4. Разработка методики построения регрессионных моделей зависимости характеристик швов от параметров режимов для сварки угловых соединений в углекислом газе.

5. Разработка алгоритмов технологической адаптации для сварки угловых соединений в углекислом газе.

6. Создание рекомендаций по дальнейшим направлениям разработок средств адаптивного управления роботами для сварки.

Методы исследований. Основные задачи работы решались экспериментальными и расчетными методами. Для разработки датчика использовались энергетические, габаритные и абберационные расчеты оптики. Оптимизация параметров осветителя производилась методом Гаусса-Зайделя. Выявление длин волн для подсветки в условиях дуги производилось по данным спектрального анализа. Вывод формул алгоритма геометрической адаптации осуществлялся методами аналитической геометрии. Математические модели зависимости характеристик швов от параметров режимов сварки строились методом отсечивающей регрессии. Расчеты оптимальных режи-

лов велись методом скользящего допуска.

Расчеты, связанные с теоретическими исследованиями, моделирование алгоритмов и обработка экспериментальных данных производились с помощью ЭВМ. Испытания макетов датчиков производились в лабораторных условиях.

Научная новизна:

— для обеспечения соответствия траектории горелки робота действительному положению стыка и обеспечения режимов сварки, компенсирующих влияние переменной ширины зазора и других технологических возмущений, предложено получать информацию о координатах и размерах стыков разработанным методом двухлучевого светового сечения. При этом датчик освещает стык двумя плоскими наклонными лучами, а изображение освещаемого участка проецируется на двумерный фотоприемник. Если определены линейные регрессионные уравнения линий изображения световых полос в системе координат фотоприемника, то по выведенной формуле определяются уравнения плоскостей, описывающих поверхности стыка;

— установлено, что для определения углов наклона электрода к линии стыка угловых соединений и величины вылета электрода по изображениям двухлучевых световых сечений достаточной информацией являются углы наклона световых линий и координаты точек излома линий. На основании выведенных формул разработан алгоритм геометрической адаптации для сварки угловых соединений;

— установлено, что для синтеза алгоритма технологической адаптации сварки угловых соединений, с использованием информации двухлучевого датчика светового сечения, необходимо наличие формул, позволяющих по координатам точек разрыва линий изображения определять ширину и положение зазора, а по углам наклона линий определять угол электрода к направлению сварки, а также матричной модели вычисления в реальном масштабе времени оптимальных уставок режимов по значениям входных технологических параметров — углу электрода к направлению сварки, ширине и положению зазора. В построенной матричной модели для сварки угловых соединений в CO_2 критерием оптимальности режимов были выбраны требования максимума функции оценки качества формирования швов при соответствии размеров швов допускам ГОСТ 14771-76. Размры сваренных по расчетным режимам швов, с вероятностью 0,82, лежат внутри диапазона допуска.

Практическая ценность. Впервые разработан двухлучевой

датчик светового сечения, предназначенный для системы адаптивного управления сварочными роботами. К телевизионной установке "Сварка-1" разработан цилиндрический зеркальный коллимирующий осветитель и система цифрового ввода телевизионного сигнала датчика в ЭВМ типа "Электроника-60".

Для сварки стыков магистральных трубопроводов впервые разработана однокоординатная следящая система с телевизионным датчиком светового сечения. Погрешность слежения $0,545 \pm 0,115$ мм.

Проведен анализ спектра дуги в CO_2 и выбраны источники освещения, при которых датчик будет работоспособен в условиях дуги — полупроводниковые лазеры и дуговые криптоновые лампы.

Существовавшие датчики и алгоритмы адаптации на их основе позволили определять только координаты стыка. По информации от двухлучевого датчика светового сечения и разработанным формулам можно также вычислять следующие параметры угловых стыков: уравнения плоскостей поверхностей стыка, углы электрода к свариваемым плоскостям и направлению сварки, ширину и положение зазора, величину вылета электрода. На базе этих формул впервые разработан алгоритм геометрической адаптации.

Существовавшие алгоритмы технологической адаптации использовали только косвенную информацию о параметрах процесса и управляли одним параметром режима. Впервые разработанный алгоритм вычисляет в реальном масштабе времени вектор оптимальных параметров режима сварки угловых соединений непосредственно по значениям технологических возмущений (ширине зазора и др.).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на Всесоюзном совещании "Автоматическое управление и регулирование процессов дуговой сварки" (Москва, 1979 г.); на XXII итоговом совещании по производственным и научно-исследовательским работам в области сварки и плазменной обработки (Ленинград, 1980 г.); на секции "Автоматизация сварки плавлением" (Ленинград, ВНИЭСО, 1982 г.); на конференции "Применение вычислительной техники и автоматизация сварочного производства" (Липецк, 1982 г.); на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Н.Э. Баумана (1982 г.); на Всесоюзной конференции по сварке в судостроении и судоремонте (Владивосток, 1983 г.).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов по работе и приложения. Работа

выполнена на 178 машинописных листах, из них 103 машинописного текста, 45 стр. содержит 75 рисунков, 8 стр. - 10 таблиц. Список литературы на 15 стр. содержит 156 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена сравнительному анализу средств адаптивного управления дуговой сваркой роботами, постановке задач исследований.

На основе анализа недостатков, присущих роботам с жестким программированием, обоснована необходимость разработки систем адаптивного управления РТК для дуговой сварки. Рассмотрены возможные постановки задач адаптации: УСТАНОВОЧНАЯ АДАПТАЦИЯ, позволяющая по измерениям координат базовых точек изделия перед сваркой пересчитать траекторию горелки для компенсации погрешностей установки изделия; САМООБУЧЕНИЕ ДВУХПРОХОДНОЙ СИСТЕМОЙ, при которой датчик перемещается вдоль стыка до сварки, по полученной информации вычисляется требуемая траектория; СЛЕЖЕНИЕ ПО СТЫКУ, при котором опрос датчиков происходит в условиях горения дуги, а вычисление и отработка траектории производятся в реальном масштабе времени (эти задачи относятся к геометрической адаптации); РАЗОМНУТОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ, где оптимальные управляемые параметры вычисляются, как функции входных технологических параметров (возмущений) по моделям, которые построены заранее на основании экспериментальных данных; УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО ПАРАМЕТРАМ ПРОЦЕССА ИЛИ ШВА, которое осуществляется по моделям, коэффициенты которых зависят от измеряемых значений параметров процесса, шва (температурного поля поверхности изделия, геометрии усиления сваренного шва и др.).

Системы адаптации содержат технические (датчики, системы ввода их сигналов в ЭВМ и исполнительные механизмы) и программные средства (алгоритмы и реализующие их программы). Возможности систем и области их применения определяются, в первую очередь, характеристиками датчиков. Сравнительный анализ возможностей датчиков различных типов производится на основе литературных данных (работы Н.С.Львова, В.В.Смирнова, К.Р.Шульце, К.Р.Щурихта, Р.Нидше и др.). Сформулированы требования к

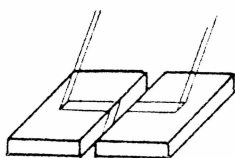
проектируемым датчикам: бесконтактность с поверхностью свариваемого изделия, универсальность к типам и размерам измеряемых стыков, возможность измерения координат и размеров стыков в условиях помех от сварочной дуги и наличия технологических возмущений, погрешность измерений – не более величины 0,3 – 0,5 диаметра электродной проволоки.

В большей степени этим требованиям соответствуют опτικο-электронные датчики светового сечения. Измеряемый профиль освещается плоским лучом, направленным под углом поперек линии стыка. Двухмерный фотоприемник, воспринимающий изображение световых полос на поверхности стыка, дает требуемую системе адаптации информацию, по которой вычисляются координаты стыка и его геометрические размеры. Изображения световых сечений стыков различных типов показаны на рисунке 1.

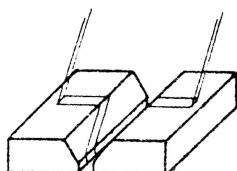
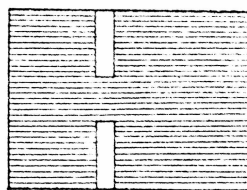
Основные алгоритмы задач адаптивного управления РТК для дуговой сварки приведены по отечественным литературным данным. Это алгоритмы геометрической адаптации (работы В.Т.Тертышного; К.Б.Алексеева, М.М.Фишкиса, В.В.Фокина; Ф.Н.Кисилевского, В.Т.Тертышного и Р.Н.Швыдкого), наибольший интерес из которых представляют алгоритмы трехмерного слежения. А также алгоритмы технологической адаптации (работы Г.И.Сергацкого, С.В.Дубовецкого, О.Г.Касаткина; В.М.Лосева, А.В.Саса, Э.А.Гладкова; Н.С.Львова и Э.А.Гладкова; А.В.Чернова; А.В.Саса; А.И.Акулова, И.А.Гуслистова, Э.А.Гладкова и др.), из которых наиболее перспективными представляются модели разомкнутого управления на базе полиномиальных регрессионных моделей и алгоритмы с идентификацией в цепи обратной связи по параметрам процесса сварки.

На примере анализа технологических особенностей сварки угловых соединений водогрейного котла КС-4 роботом РС-2 была сформулирована основная цель работы – создание технических и алгоритмических средств геометрической и технологической адаптации роботизированного процесса сварки, которые обеспечивали бы получение качественных угловых соединений в условиях несоответствия положения стыка траектории обучения и колебаний ширины зазора. Сформулированы задачи, решением которых достигается поставленная цель.

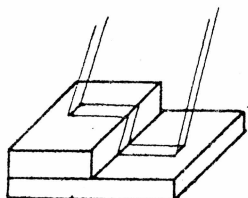
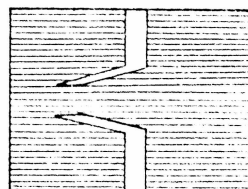
Вторая глава посвящена разработке двухлучевого датчика светового сечения на базе промышленной телевизионной установки



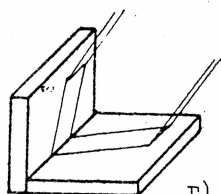
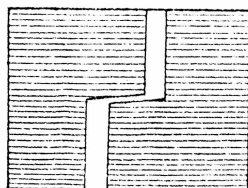
а) плоский стык



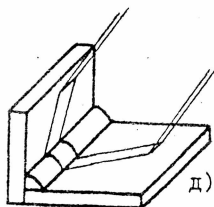
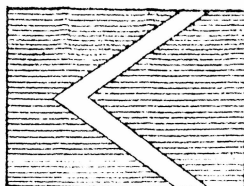
б) плоский стык с разделкой



в) нахлесточный стык



г) угловой стык



д) сваренный угловой шов (прихватка)

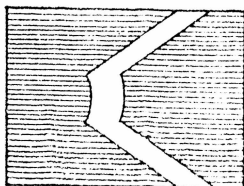


Рис. 1. Изображения световых сечений

"Сварка-I". Рассмотрены принципы профилометрии методом светового сечения, показаны преимущества двухлучевого метода для задач геометрической адаптации.

Рассмотрены варианты оптических схем осветителя: со щелевой диафрагмой и с волоконно-оптическим трансформатором проектирующие; однолинзовая и двухлинзовая цилиндрические коллимирующие; с зеркальным цилиндрическим коллиматором.

На основании габаритных, светоэнергетических и аберрационных расчетов показана работоспособность датчика с осветителем на волоконно-оптическом трансформаторе (в условиях отсутствия дуги). Некоторые преимущества по глубине резкости имеет зеркальный коллимирующий осветитель.

Оптимальные конструктивные параметры зеркального цилиндрического осветителя рассчитывались по формулам геометрической оптики, исходя из критерия минимума расходимости лучей. После девятой итерации процедуры Гаусса-Зайделя получено: расстояние от диафрагмы до внутреннего зеркала - 40 мм, радиус внутреннего выпуклого зеркала - 8,52 мм, радиус наружного вогнутого зеркала - 55 мм.

На основании экспериментальных и литературных данных проведен сравнительный анализ спектральных линий сварочной дуги в CO_2 и спектров перспективных источников подсвета для работы датчика в условиях сварочной дуги. Предложено использовать диапазон длин волн от 915 до 919 нм. В этом диапазоне отсутствуют интенсивные линии в спектре дуги и имеются достаточно мощные источники подсвета: полупроводниковые лазерные диоды (для импульсных фотоприемников) и дуговые трубчатые криптоновые лампы с добавками цезия (для телевизионного приемника).

Третья глава посвящена алгоритмизации задач геометрической адаптации сварки угловых соединений с использованием двухлучевого датчика светового сечения.

Для кусочно-линейной аппроксимации изображений линий светового сечения использовался модифицированный алгоритм Робертса, который удобен для поэтапного ввода информации с телевизионного приемника изображения. Каждый отрезок прямой описывается тремя коэффициентами регрессии и оценкой ошибки аппроксимации, при превышении допустимого значения которой происходит "переключение" на описание следующего отрезка.

На рисунке 2 показано расположение двухлучевого осветителя и приемника изображения при выводе формулы аппроксимации плоскостей. Начало координат выбрано так, что ось Z совпадает с осью визирования, а нулевая точка лежит на расстоянии f (величины фокусного расстояния объектива приемника) перед объективом. Изображения световых полос описываются алгоритмом Робертса в неявной форме:

$$\begin{aligned} a_1x + b_1y + c_1 &= 0 - \text{для нижней линии} \\ a_2x + b_2y + c_2 &= 0 - \text{для верхней линии} \end{aligned} \quad (I)$$

Освещающие плоскости задаются уравнениями:

$$\begin{aligned} A_1x + B_1y + C_1z + D_1 &= 0 - \text{верхняя} \\ A_2x + B_2y + C_2z + D_2 &= 0 - \text{нижняя} \end{aligned} \quad (2)$$

Плоскости, проектирующие в объектив приемника световые полосы, можно задать, как проходящие через три точки: $(0, 0, -f)$, $(0, -c_1/b_1, 0)$ и $(-c_1/a_1, 0, 0)$ - для нижней плоскости; $(0, 0, -f)$, $(0, -c_2/b_2, 0)$ и $(-c_2/a_2, 0, 0)$ - для верхней плоскости. Эти плоскости пересекаются с освещающими плоскостями (2) по двум прямым, которые лежат в искомой плоскости. Откуда, стандартными приемами аналитической геометрии можно определить уравнение искомой плоскости. В матричной форме в однородных координатах оно имеет вид:

$$\begin{vmatrix} x & y & z & 1 \\ \frac{(D_1 + B_1 c_1 / b_1) c_1 / a_1}{(B_1 c_1 / b_1 - A_1 c_1 / a_1)} & \frac{-(D_1 + A_1 c_1 / a_1) c_1 / b_1}{(B_1 c_1 / b_1 - A_1 c_1 / a_1)} & 0 & 1 \\ \frac{(D_2 + B_2 c_2 / b_2) c_2 / a_2}{(B_2 c_2 / b_2 - A_2 c_2 / a_2)} & \frac{-(D_2 + A_2 c_2 / a_2) c_2 / b_2}{(B_2 c_2 / b_2 - A_2 c_2 / a_2)} & 0 & 1 \\ (-B_1 c_1 / a_1 + f C_1) c_1 / a_1 & (A_1 c_1 / a_1 - f C_1) c_1 / b_1 & -f C_1 (A_1 / a_1 - B_1 / b_1) & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (3)$$

Для углового соединения линия стыка может задаваться, как линия пересечения двух плоскостей, описываемых по изображениям двухлучевых световых сечений формулой (3).

При расположении оси визирования параллельно оси электрода и поддержании перпендикулярности полос световых сечений линии стыка, элементы траектории при сварке угловых швов вы-

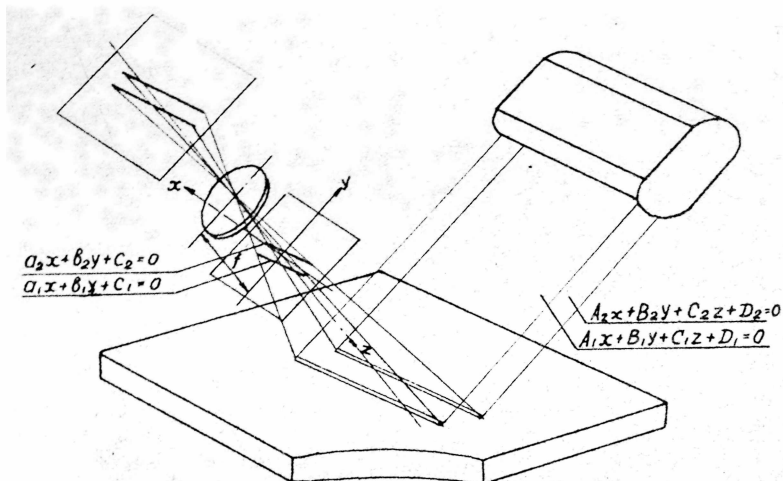


Рис. 2 К формуле аппроксимации плоскостей

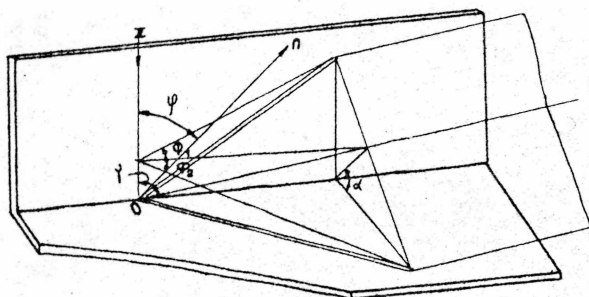


Рис. 3 К формулам вычисления углов ориентации электрода относительно углового стыка

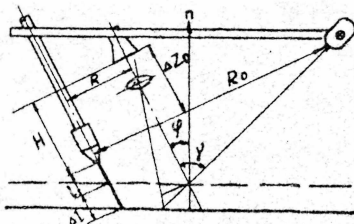


Рис. 4 К формулам вычисления вылета электрода

числяются по выведенным в работе формулам (в соответствии с рисунками 3 и 4):

$$a = \arctg(\sqrt{\operatorname{tg} \Phi_2 / \operatorname{tg} \Phi_1}) \quad (4); \quad f = (\arccos(\sin \& \sqrt{\operatorname{tg} \Phi_1 \cdot \operatorname{tg} \Phi_2})) - \& \quad (5),$$

где a - угол между электродом и нижней свариваемой плоскостью; f - угол между электродом и нормалью к линии стыка; Φ_1 и Φ_2 - углы между горизонталью и, соответственно, верхней и нижней световыми линиями изображения; $\&$ - угол между осью визирования и освещающей плоскостью;

$$L = (R_0 - R) \cdot \operatorname{ctg} \& + Z_0 - R \cdot \operatorname{tg} f - H \quad (6)$$

$$dL = dX \cdot \cos(\& + f) / (K_M \cdot \sin \& \cdot \cos f) \quad (7),$$

где L - вылет электрода, при котором абсцисса точек излома световых линий равна нулю; R_0 и R - расстояния от оси электрода до, соответственно, оси визирования и диафрагмы осветителя; H - расстояние от плоскости приемника до среза токоподвода; dL - требуемое изменение вылета; dX - изменение абсциссы точек излома световых линий; K_M - коэффициент оптического увеличения приемника; Z_0 - аппликата апертуры осветителя.

При наличии зазора, который практически не отражает свет, на изображении, в вершине угла световых линий, появляется разрыв. Если координаты конца короткой световой линии относительно конца длинной обозначить через dx и dy , можно вычислить ширину зазора по формулам:

$$\begin{aligned} B_T &= dy / (\cos a \cdot K_M) = dx \cdot \operatorname{tg} \Phi_1 / (\cos a \cdot K_M) \\ B_B &= -dy / (\cos a \cdot K_M) = dx \cdot \operatorname{tg} \Phi_2 / (\sin a \cdot K_M) \end{aligned} \quad (8),$$

где B_T и B_B - ширина зазора при, соответственно, горизонтальном и вертикальном расположении.

На основании формул 4 + 7 синтезирован алгоритм геометрической адаптации (формирования траектории) при сварке угловых соединений.

Четвертая глава посвящена разработке алгоритмов технологической адаптации сварки угловых соединений в CO_2 .

Рассмотрены особенности построения полиномиальных регрессионных моделей зависимости характеристик швов от параметров режима. Поскольку при планировании эксперимента в широких диапазонах варьирования факторов (параметров режимов сварки) нарушаются исходные предпосылки теории планирования экспериментов, опытные сварки проводились по деформированным

планам главных эффектов, а модели строились по оптимизирующей структуре полинома алгоритмам отсеивающей регрессии (ОР).

Построены модели для характеристик швов (экспертных оценок внешнего вида; величины катета шва; величины усиления шва; глубины проплавления) в зависимости от параметров режимов сварки в CO_2 угловых швов, расположенных горизонтально (тока; скорости сварки; угла электрода относительно нормали к линии стыка; вылета электрода; напряжения дуги; ширины зазора; положения зазора). Модели адекватны информационно и статистически (с уровнем значимости менее 0,05) и представляют собой неполные квадратичные полиномы.

На основе построенных моделей сформулирована оптимизационная задача: за максимизируемую целевую функцию принята модель экспертных оценок внешнего вида, а остальные модели являются функциональными ограничениями-неравенствами. Решение осуществлялось по методу скользящего допуска. На основании полученных значений векторов оптимальных значений режимов сварки и соответствующих значений входных технологических параметров построена методом ОР аппроксимирующая матричная модель, статистически адекватная при уровне значимости 0,01, которая позволяет ускоренно вычислять приближенные значения оптимальных режимов по формуле:

$$Z^T \cdot A = X_0 \quad (9),$$

где Z^T — транспонированный вектор преобразованных значений входных технологических параметров (угла между электродом и нормалью к линии стыка, ширины зазора, положения зазора); X_0 — текущие значения вектора оптимальных режимов сварки (тока, напряжения и вылета); A — матричная (3×12) аппроксимирующая модель.

На основании формул 8 и 9 синтезирован алгоритм технологической адаптации при сварке угловых соединений в CO_2 .

Пятая глава посвящена аппаратной реализации средств геометрической адаптации и формулированию рекомендаций по дальнейшим разработкам систем адаптивного управления оварочными роботами.

Разработана система ввода телевизионного сигнала двухлучевого датчика светового сечения в мини-ЭВМ "Электроника-60". Система содержит блоки фильтрации и цифрового ввода.

Блок фильтрации предназначен для выделения из телевизионного сигнала нормализованных импульсов, временной сдвиг которых относительно строчных синхроимпульсов соответствует положению световых сигналов датчика на мишени видикона для каждой строки, а также для фильтрации от электрических и оптических помех.

Блок цифрового ввода организован так, чтобы каждая строка давала три цифровых кода, которые соответствуют: номеру строки, времени от поступления строчного синхроимпульса до импульса от первой световой полосы, времени между импульсами от первой и второй световых полос.

Лабораторные испытания (без дуги) двухлучевого датчика светового сечения, содержащего телевизионную установку "Сварка-1", цилиндрический коллимирующий зеркальный осветитель и систему цифрового ввода, показали, что дискретность измерений (без учета коэффициента уменьшения объектива приемника) составила 0,035 мм по горизонтали и 0,0448 мм по вертикали. При расчетах данных по алгоритму геометрической адаптации, погрешность определения координат углового стыка не превышала 0,3 мм.

Для установки сварки стыков магистральных трубопроводов была разработана однокоординатная следящая система с однолучевым телевизионным датчиком светового сечения, содержащая блок аналоговой обработки сигнала и блок управления приводом коррекции. Погрешность позиционирования на плоский стык с катетом разделки 2 мм составила (при доверительной вероятности 0,95) $0,545 \pm 0,115$ мм.

Были выработаны рекомендации по дальнейшим направлениям разработок средств адаптивного управления сварочными роботами. Они касаются: уменьшения габаритов оптико-электронных датчиков светового сечения, защиты датчиков от брызг металла и воздействия сварочных аэрозолей, повышения надежности работы фотоприборов в условиях дуговой сварки, повышения оптической помехозащищенности датчиков и повышения быстродействия обработки видеoinформации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.

I. Сварочные роботы с жестким программированием часто не обеспечивают качества швов из-за несоответствия программной траектории движения горелки действительному положению стыка в

пространстве и из-за несоответствия запрограммированных значений режимов сварки величинам действующих технологических возмущений (изменениям ширины зазора и т.п.).

Для получения информации, необходимой для адаптивного управления траекторией и режимами сварки, предложено использовать датчик светового сечения, в котором стык освещается наклонным плоским лучом, а изображение освещенного участка проецируется на двумерный координатно-чувствительный фотоприемник. Изображения линий светового сечения позволяют определять координаты и геометрические размеры стыков свариваемых изделий для любых типов сварных соединений.

Показано, что с целью устранения накоплений погрешностей и получения информации, достаточной для линейной интерполяции траекторий, необходимо использовать два плоских световых луча.

2. Если линии изображений двухлучевых световых сечений аппроксимировать в координатах приемника изображения линейными регрессионными уравнениями, то по выведенной формуле можно идентифицировать уравнения плоскостей, описывающих поверхности стыка.

3. Если ось визирования двухлучевого датчика светового сечения расположить параллельно оси электрода, а освещающие полосы — перпендикулярно направлению углового стыка, то по выведенным формулам, определив на изображении углы наклона световых линий и координаты точек излома и разрыва линий, можно вычислить углы наклона электрода к свариваемым плоскостям и к направлению стыка, величину вылета электрода, ширину и положение зазора. На основе этих формул разработан алгоритм геометрической адаптации для сварки угловых соединений.

4. Для формирования алгоритмов технологической адаптации режимов дуговой сварки необходимо построение регрессионных моделей зависимости характеристик швов от значений параметров режимов и величин технологических возмущений. Вследствие нарушения исходных предпосылок теории оптимального планирования экспериментов, построение моделей дуговой сварки стандартными методами затруднено. Предложена методика построения полиномиальных моделей по минимальному числу экспериментов. Она заключается в использовании планов главных эффектов, которые формируются в соответствии с положением области режимов, дающих удовлетворительное формирование швов, и в обработке данных

по алгоритму отсеивающей регрессии, позволяющему получить модели оптимальной структуры. По экспериментальным данным о использовании разработанной методики получены адекватные, с доверительной вероятностью 0,90 – 0,975, модели зависимости характеристик швов от параметров режимов для сварки угловых соединений в CO_2 .

5. Для возможности вычисления оптимальных уставок режимов сварки в реальном масштабе времени, методами нелинейного программирования и отсеивающей регрессии, получена матричная модель оптимизации режимов сварки угловых соединений в CO_2 . В качестве критерия оптимальности режимов были выбраны тресования максимума функции оценки качества формирования швов при соответствии размеров швов допускам ГОСТ 14771-76.

Статистический анализ размеров катетов швов, сваренных по рассчитанным оптимальным режимам, показал, что с вероятностью 0,82 размеры лежат в пределах допусков по ГОСТ 14771-76.

На базе матричной модели и формул, которые связывают координаты точек разрыва линий изображений двухлучевых световых сечений с шириной и положением зазора, а также формулы, которая по углам наклона линий изображения позволяет вычислять угол наклона электрода к направлению сварки, разработан алгоритм технологической адаптации сварки в CO_2 угловых соединений.

6. Был разработан макет двухлучевого датчика светового сечения на базе телевизионной установки "Сварка-1", предназначенный для системы адаптации сварочного робота РС-2. Макет содержит цилиндрический зеркальный коллимирующий осветитель, параметры которого оптимизированы по критерию минимума расходимости лучей, блок фильтрации телевизионного сигнала и блок цифрового ввода сигнала в ЭВМ "Электроника-60". Лабораторные испытания макета показали, что при расчетах данных по алгоритму геометрической адаптации погрешность определения координат углового стыка не превышает 0,3 мм.

7. Опыт разработки макета двухлучевого датчика светового сечения позволил выработать рекомендации по основным направлениям дальнейших разработок средств адаптации сварочных роботов.

8. Годовой ожидаемый экономический эффект от внедрения одного робота РС-2 с системами геометрической и технологической адаптации при сварке водогрейного котла КС-4 составит 40 тыс.руб.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Иванников А.В., Лосев В.М., Андреева Т.Е. Формирование и параметры шва при сварке на повышенных скоростях в углекислом газе. - Тезисы докл. на XXIX итоговом совещании по производственным и научно-исследовательским работам в области сварки, выполненным в 1977 г. - Л.: Судостроение, 1978, с.42-44.

2. Анализ влияния режимов сварки на геометрические параметры угловых сварных швов на основе метода планирования экспериментов / А.В.Шурпицкий, В.М.Лосев, Т.Е.Андреева и др. - Тезисы докл. на XXXI итоговом совещании по производственным и научно-исследовательским работам в области сварки и плазменной обработки, выполненным в 1979 г. - Л.: Судостроение, 1980, с. 37-39.

3. Лосев В.М., Сас А.В., Гладков Э.А. Вопросы идентификации моделей в дуговой сварке. - Труды / МВТУ, 1981, № 363, с. 101-110.

4. Принципы построения АСУ технологическим процессом сварки / Э.А.Гладков, А.В.Сас, В.Н.Бродягин, В.М.Лосев. - В кн.: Применение вычислительной техники и автоматизация сварочного производства. Тезисы докл. конф. - Ленинск, 1982, а. 151-157.

5. Лосев В.М. Адаптивное управление роботом для дуговой сварки. М., 1983. 12 с. - Рукопись представлена МВТУ. Деп. в ВИНТИ 19 апреля 1983 г., № 2058-83.

6. Лосев В.М., Величко С.И. Датчик для адаптивного управления дуговой сваркой в защитных газах. - Тезисы докл. Всесоюзной конф. по сварке в судостроении и судоремонте. - Владивосток, 1983, с. 40-41.

В.М.Лосев

