

На правах рукописи

Перковский Роман Анатольевич

РАЗРАБОТКА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И  
МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОЦЕССОМ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ ТОНКОСТЕННЫХ  
ИЗДЕЛИЙ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

г. Москва — 2010г.

Работа выполнена на кафедре технологий сварки и диагностики в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана.

**Научный руководитель:** заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор  
**Гладков Эдуард Александрович**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Ямпольский Виктор Модестович**

кандидат технических наук  
**Трух Сергей Федорович**

**Ведущая организация:** **ОАО «НИКИМТ-Атомстрой»**

Защита состоится « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2010 г. на заседании диссертационного Совета Д 212.141.01 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим присылать по указанному адресу.

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

Телефон для справок 8-499-267-09-63

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент

**Коновалов А.В.**

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность работы.** Работа посвящена совершенствованию технологии автоматической однопроходной аргонодуговой сварки (АДС) стыковых соединений из коррозионностойкой стали толщиной до 3мм без разделки кромок. Такие соединения необходимы для большого числа изделий в атомной, авиационной, космической и пищевой промышленности. Для этих изделий вопросы недопустимости брака и обеспечения высокого качества сварного шва являются первостепенными. В 70-х – 80-х годах 20-го века в работах Б.Е. Патона, В.К. Лебедева, Э.А. Гладкова, Н.С. Львова, В.В. Смирнова, А.В. Петрова, М.Л. Лифшица, Г.А. Славина, В.А. Букарова и др. были разработаны теоретические основы автоматизации аргонодуговой сварки, на основании которых ведущими предприятиями страны создана широкая гамма автоматизированного оборудования. Однако разработанное оборудование не позволяло в полной мере управлять качеством сварного соединения из-за низкого быстродействия вычислительных систем и сложности оперативного изменения параметров аналоговых регуляторов. В настоящее время значительно увеличился ассортимент свариваемых конструкций, сократились сроки освоения производства новых изделий с одновременным повышением требований к качеству и необходимостью паспортизации каждой детали. Высокая конкуренция, повышение цены на металл и электроэнергию еще сильнее ужесточили требование к недопустимости брака в сварном соединении. Начиная с 90-х годов прошлого века, начала бурно развиваться микропроцессорная техника. Стали доступны быстродействующие ЭВМ, появились новые семейства микроконтроллеров и быстродействующих полупроводниковых приборов. Применение в сварочном оборудовании современной элементной базы позволило на новом уровне в цифровом виде решить задачи управления качеством аргонодуговой сваркой, разработать новые законы управления, создать и внедрить микропроцессорные системы контроля и управления процессом аргонодуговой сварки.

**Цель работы:** повышение качества и стабильности формирования шва при аргонодуговой сварке тонкостенных изделий ответственного назначения за счет внедрения микропроцессорных систем контроля и управления процессом.

Для достижения поставленной цели сформулированы задачи работы:

1. Провести анализ процесса автоматической АДС как объекта управления, определить входные и выходные параметры для систем управления качеством шва.
2. Разработать физико-математические модели связи параметров качества сварного шва с параметрами процесса и сигналами от датчиков физической информации из зоны сварки. Разработать законы управления качеством сварного шва.

3. Разработать методы защиты микропроцессорных систем контроля и управления от электромагнитных помех при АДС.
4. Разработать аппаратную часть и программное обеспечение микропроцессорных систем контроля и управления процессом АДС на основе разработанных моделей и законов управления.
5. Изготовить, испытать и внедрить результаты работы в производство.

**Методы исследования.** При проведении исследований, разработке математических моделей, программного обеспечения и микропроцессорных систем использованы законы теплового излучения, электротехники и электроники, полупроводниковой и прикладной оптики, современной теории автоматического управления. При расчетах на ЭВМ использовался пакет прикладных программ пакета LabView и программы собственной разработки в среде Pascal, Delphi. Для разработки аппаратной части микропроцессорных систем использовался пакет автоматизированного проектирования печатных плат PCAD и элементов конструкции ACAD. Программы для микроконтроллеров разрабатывались на языке Ассемблер и Си. Для исследования применялось современное цифровое оборудование Tektronix, Advantech, National Instruments и др.

#### **Научная новизна**

1. Применение быстродействующей микропроцессорной техники позволило в цифровом виде реализовать известные и предложить новые адаптивные алгоритмы управления процессом аргонодуговой сварки, использующие физическую информацию из зоны сварки для управления качеством сварного шва в условиях действия различных технологических возмущений.
2. На основе установленных физико-математических зависимостей, связывающих показатели качества шва с физической информацией из зоны сварки, создана управляющая программа, использующая регрессионные и нейросетевые алгоритмы, обеспечивающая получение качественного соединения при технологических возмущениях различной физической природы.
3. Предложена методика, разработаны алгоритмы и создана компьютерная модель синтеза наиболее простой структуры системы управления качеством сварки на основе анализа возмущений в сварочном контуре “источник питания – дуга - сварочная ванна”.
4. Разработана математическая модель световых полей в зоне аргонодуговой сварки, позволяющая обосновать возможность использования сварочной дуги для подсветки стыка в оптических системах слежения при аргонодуговой сварке. Предложен алгоритм определения положения стыка в следящих системах с оптическими датчиками на основе корреляционного анализа сигналов от реального стыка и его идеального образа.

#### **Практическая значимость**

1. Установленные законы управления качеством сварки могут быть использованы при проектировании различных систем управления АДС.

2. Разработанные алгоритмы, программно-аппаратные средства обмена информацией, средства защиты цифровой аппаратуры от помех при АДС рекомендованы разработчикам цифрового сварочного оборудования для других способов сварки.
3. Некоторые из разработанных цифровых приборов сертифицированы и внесены в государственный реестр средств измерения, что позволяет применять их в промышленности, учебных заведениях, научных учреждениях, сертификационных центрах национального агентства контроля и сварки (НАКС) при аттестации сварочного оборудования, технологий и материалов.
4. Созданные аппаратные и программные измерительные средства и цифровые системы управления процессом АДС используются в учебном процессе в цикле дисциплин по автоматизации сварочных процессов.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Разработки проведены на кафедре технологии сварки и диагностики МГТУ им. Н.Э.Баумана, в лаборатории микропроцессорные системы управления НИИКМиТП МГТУ им. Н.Э.Баумана и в ФГУ НУЦ Сварка и контроль МГТУ им. Н.Э.Баумана. Разработки внедрены на предприятиях: филиал ФГУП Инвестиционно-строительный концерн «Росатомстрой» НИКИМТ (г. Москва), ОАО Машиностроительный завод «Элемаш» (г. Электросталь), ООО ВНИИГАЗ (г. Москва), ГУП МОСГАЗ (г. Москва), ОАО Вологодский механический завод (г. Вологда), ОАО ПЗ «Машиностроитель» (г. Пермь), ООО Русские Инновационные Технологии (г. Москва), ЗАО Пензенское конструкторско-технологическое бюро арматуростроения, аттестационные центры НАКС и других. Разработки внедрены в серийное производство на предприятиях: НПО Технотрон (г. Чебоксары), ЗАО Завод электрооборудования (г. Москва), ООО АПС РАДИС (г. Москва).

**Публикации по теме диссертации.** По теме диссертационной работы опубликовано более 30 печатных работ в отечественных и зарубежных изданиях (в том числе 9 в изданиях, рекомендованных ВАК), разработанные системы ежегодно демонстрировались на российских и международных выставках по сварочному оборудованию.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на российских и международных конференциях: Научно-техническая конференция стран СНГ Производство и надежность сварных конструкций г. Калининград Московской обл. 1993, Международная научно-техническая конференция Современные проблемы сварочной науки и техники Ростов-на-Дону 1993, Российская научно-техническая конференция 165 лет МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва 1995, Научно-техническая конференция Современные проблемы сварочной науки и техники Пермь 1995, Международная научно-техническая конференция Современные проблемы и достижения в области сварки, родственных технологий и оборудования, Санкт-Петербург 1995, Международная научно-практическая конференция «Сварка – 96», Минск, 1996, Всероссий-

ская научно-техническая конференция Машиностроительные технологии МГТУ им. Н.Э.Баумана Москва 1998, Международная научно-техническая конференция Современные проблемы и достижения в области электротехнологий XXI века Санкт-Петербург 2001, Всероссийская научно-техническая конференция Перспективы пути развития сварки и контроля Сварка и контроль Воронеж 2001, Международная научно-техническая конференция Сварка и родственные технологии в современном мире Санкт-Петербург 2002, Международная научно-техническая конференция Проблемы сварки и прикладной электротехники Иваново 2003, Всероссийская конференция Сварка и Контроль 2004 посвященная 150-летию со дня рождения Николая Гавриловича СЛАВЯНОВА Пермь 2004, Заседания секции Источники питания и системы автоматического управления сварочным оборудованием Межгосударственного Научного Совета по сварке и родственными технологиям Крым 2003, Санкт-Петербург 2005, Крым 2007.

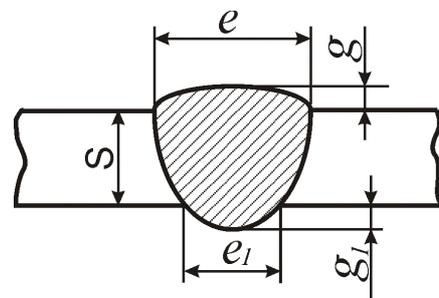
**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы. Работа содержит 139 страниц текста, в том числе 86 рисунков, 4 таблиц и 6 приложений.

**Личный вклад автора.** Вклад автора в разработки от 50 до 90% в качестве инженера, программиста, научного работника и руководителя лаборатории.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дается обоснование актуальности темы диссертационной работы, формулируются основные цели и задачи, определяется практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** проанализирован процесс однопроходной аргодуговой сварки тонкостенных изделий как объект управления. Качество сварного шва определяется нормативными документами (для атомной промышленности ПНАЭ Г-7-009-89), в которых задаются допустимые границы изменения геометрии шва (ширина и усиление сверху и снизу) и требования отсутствия дефектов. Для построения систем управления за основной параметр качества принята ширина корня шва, так как поддержание ее в требуемых пределах гарантирует отсутствие самых распространенных дефектов: прожог и непровар. За дополнительные параметры оценки качества приняты вероятность появления подреза  $b$  и коэффициент  $W$  равный отношению  $e/e_1$ . Такая комбинация параметров позволяет охватить до 90% дефектов. Около 10% дефектов, источником появления которых в основном является грубое нарушение технологии подготовки и сварки, не рассматриваются в данной работе (трещины, отслоения, свищи, наплывы, усадочные раковины, чешуйчатость, инородные включения, поры, вольфрамовые включения).



Формирование сварного соединения рассматривается как результат функционирования системы «источник питания — дуга — сварочная ванна». Отдельные компоненты этой системы объединены обратными связями в сложную многосвязную систему (Рис. 1) в которой можно выделить два относительно независимых контура: энергетический контур, обеспечивающий поступление энергии к дуге, и тепловой контур, обеспечивающий передачу энергии дуги в свариваемый металл. Применительно к однопроходной сварке определены возмущения, действующие в каждом из контуров, и из них выделены наиболее влияющие на качество сварного соединения. В энергетическом контуре это возмущения по параметрам режима (ток сварки, напряжение дуги, скорость сварки). В тепловом контуре это смещение дуги относительно центра стыка, изменение зазора, толщины, структурной и химической неоднородности металла. Каждое из возмущений может быть как контролируемым, так и неконтролируемым в зависимости от используемого комплекта датчиков.

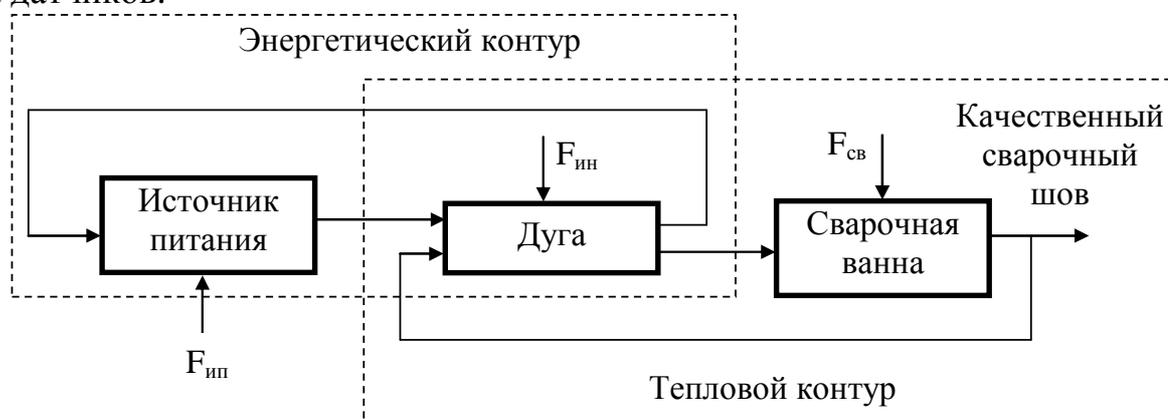


Рис. 1. Структурная схема сварочного контура.  $F_{ип}$  – возмущения в источнике питания,  $F_{ин}$  – возмущения в источнике нагрева,  $F_{св}$  – возмущение в сварочной ванне

Применение локальных регуляторов, компенсирующих действие одного или нескольких возмущений, является одним из способов повышения качества сварного соединения. Другим способом является регулирование непосредственно ширины корня шва, что обеспечивает компенсацию всех возможных возмущений. Наиболее оптимальным является использование обоих способов, позволяющих снизить действие контролируемых возмущений и компенсировать общей обратной связью неконтролируемые возмущения и неточности работы локальных регуляторов. За управляющий параметр выбран ток сварки, так как он воздействует на оба контура, легко управляется, имеет меньшую инерционность по сравнению с тепловыми процессами в сварочной ванне.

Так как математически полностью решить задачу управления качеством практически невозможно из-за большого числа взаимосвязанных параметров, то предложена 3-х контурная система управления, содержащая относительно независимые контура (Рис. 2), которые могут быть описаны физико-математическими моделями:

1. Контур траектории (I) обеспечивает наведение сварочного электрода на центр стыка.
2. Контур формирования (II) обеспечивает управление параметрами сварки для получения требуемой ширины корня сварного шва.
3. Контур определения вероятности появления дефектов (III) накладывает ограничения на управляющие воздействия с целью недопущения возникновения дефектов даже при требуемой ширине корня сварного шва.

Исходные данные о процессе поступают из базы данных, правила предсказания дефектов содержатся в базе знаний, все данные о ходе сварочного процесса сохраняются в блоке регистрации параметров.



Рис. 2. Структурная схема трехконтурной системы управления аргонодуговой сваркой. УСО – устройство связи с объектом

**Вторая глава** посвящена разработке систем наведения сварочного электрода на линию стыка. Проведен анализ существующих систем управления положением электрода относительно стыка и определено, что наиболее целесообразным для ответственных тонкостенных изделий является использование оптических датчиков, позволяющих дистанционно производить измерения с погрешностью 0,1мм и обеспечивающих визуализацию зоны сварки. Использование дуги в качестве источника подсвета позволяет производить измерения в непосредственной близости от точки сварки для исключения ошибок транспортного запаздывания.

Разработана математическая модель распределения освещенности в зоне аргонодуговой сварки при использовании дуги в качестве источника подсвета. Изображение в телекамере наблюдения формируется четырьмя пучками лучей (Рис. 3 а), источниками которых являются: электрод (луч 1), дуга (луч 2), сварочная ванна (луч 3), освещенное дугой и электродом изде-

лие (луч 4). Электрод рассматривается как тепловой ламбертовский излучатель с температурой поверхности экспоненциально убывающей от кончика к месту крепления. Сварочная дуга рассматривается как прозрачный объемный цилиндрический источник теплового излучения диаметром примерно равным электроду  $d_{эл}$  и высотой  $h$ . Сварочная ванна принимается за тепловой ламбертовский излучатель с температурой плавления металла. Поверхность изделия рассматривается как частично диффузный и зеркальный отражатель излучения от электрода (лучи  $4_1, 4_2$ ) и дуги (луч  $4_3$ ). Используя закон излучения Планка  $M_{ελ}$ , и зная спектральную характеристику приемника  $V(λ)$  в диапазоне его чувствительности от  $λ_1$  до  $λ_2$ , для каждой температуры излучателя определен коэффициент использования излучения

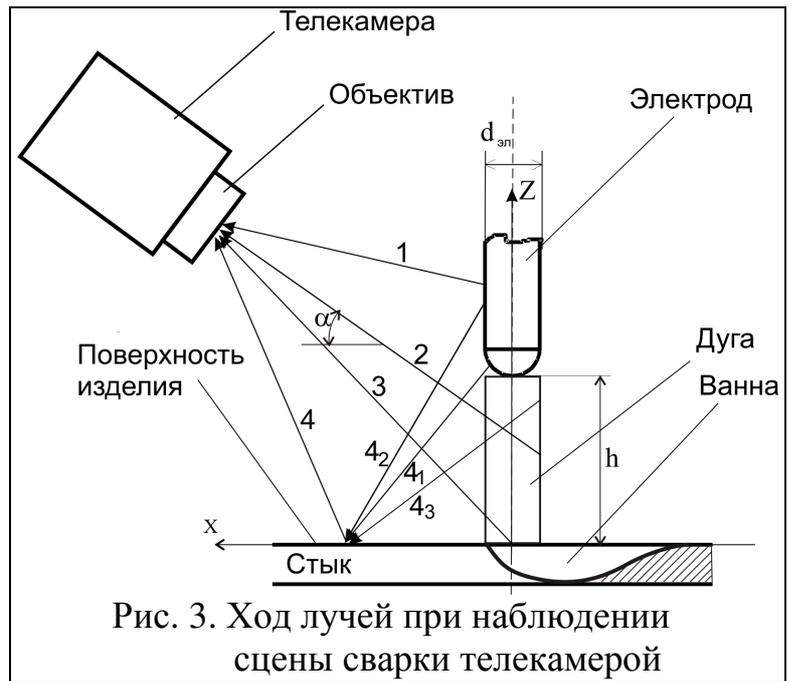


Рис. 3. Ход лучей при наблюдении сцены сварки телекамерой

Используя законы теплового излучения, геометрической оптики и учитывая  $ζ(T)$ , получена расчетная модель распределения яркостей каждой зоны изображения на фотоприемнике. Полученная модель показала, что диапазон изменения яркости в изображении сцены сварки достигает  $10^5$ , что не может быть зафиксировано стандартной телевизионной камерой, поэтому предложено 2 способа построения оптических систем слежения за стыком:

$$\xi(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{ελ}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} M_{ελ}(\lambda) d\lambda}, \text{ где } M_{ελ} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 \left( \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right)} \quad \text{Вт/М}^3$$

Используя законы теплового излучения, геометрической оптики и учитывая  $ζ(T)$ , получена расчетная модель распределения яркостей каждой зоны изображения на фотоприемнике. Полученная модель показала, что диапазон изменения яркости в изображении сцены сварки достигает  $10^5$ , что не может быть зафиксировано стандартной телевизионной камерой, поэтому предложено 2 способа построения оптических систем слежения за стыком:

1. Использовать стандартную телекамеру со специальной оптической насадкой, снижающей контраст изображения. Предложена конструкция и произведен расчет оптической насадки на объектив телекамеры [1], позволяющей снизить контраст изображения за счет переменного коэффициента пропускания по полю изображения. В этом случае телекамера устанавливается неподвижно и по анализу оцифрованного изображения программно определяются положения электрода и стыка.
2. Использовать специальную камеру на ПЗС линейке, анализирующую одну линию изображения только в области стыка. ПЗС линейка позволяет передать диапазон яркостей изображения  $10^3$ , что достаточно, если дуга не по-

падает в поле зрения. Жесткое закрепление датчика на горелке позволяет не вычислять положение электрода.

Для определения координат стыка разработан алгоритм, основанный на вычислении функции взаимной корреляции сигнала от реального стыка и его идеального образа. Образ идеального стыка (Рис.4) формируется по двум параметрам: ширина нижнего основания (а) и ширина верхнего основания (б). За положение стыка принимается точка максимума функции взаимной корреляции  $R_{AB}$  сигналов с реального  $A(x)$  и идеального стыков  $B(x)$  на отрезке от  $(x_0-L)$  до  $(x_0+L)$ .

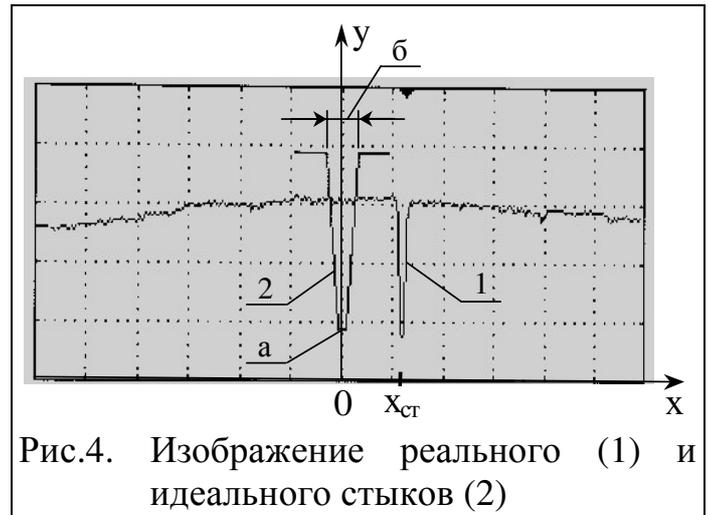


Рис.4. Изображение реального (1) и идеального стыков (2)

$$R_{AB}(x_{cm}) = \frac{1}{2L} \int_{x_0-L}^{x_0+L} A(x)B(x+x_{cm})dx, \quad \text{где } x_{cm} \text{ – величина смещения функции}$$

$B(x)$ ,  $x_0$  - положение стыка на предыдущем шаге измерения,  $2L$  – ширина зоны поиска положения стыка. Величина зазора определяется по точкам пересечения сигналом  $A(x)$  заданного порога в окрестностях центра стыка. Ширина зоны поиска автоматически увеличивается при пропадании изображения стыка с учетом скорости сварки и возможной кривизны стыка.

**Третья глава** посвящена описанию ряда теоретических положений, использованных при разработке микропроцессорных систем управления, обеспечивающих поддержание требуемой формы шва и отсутствие дефектов при действии различного рода возмущений за счет применения локальных регуляторов и управления током сварки по информации о реальной ширине корня шва. Определение ширины корня шва возможно двумя способами:

- с помощью датчика ширины корня шва, расположенного под свариваемым изделием;
- с помощью набора датчиков, расположенных со стороны сварки и математической модели.

Источником информации о реальной ширине корня шва является излучение расплавленного металла, участвующего в формировании шва, которое может быть зафиксировано оптическим датчиком, расположенным под свариваемым изделием. Проведен расчет характеристик теплового излучения в зоне корня шва. Для выделения из всего излучения длин волн, соответствующих расплавленному металлу, применен кремниевый фотодиод с дополнительным светофильтром, пропускающим излучения длиной волны менее 0,8 мкм. Для вычисления ширины шва по сигналу от фотоприемника применена регрессионная модель второго порядка, коэффициенты которой определены по методу наименьших квадратов.

Для вычисления ширины корня шва  $e_1^i$  по параметрам процесса и сигналам датчиков, расположенных только со стороны сварки, выбрана регрессионная модель второго порядка не учитывающая взаимные влияния параметров.

$$e_1^i = e_1^0 + \sum_{n=6} (a_{n0} + a_{n1}X_n + a_{n2}X_n^2), \quad (1)$$

где  $n$  – число входных параметров,  $e_1^0$ ,  $a_{n0}$ ,  $a_{n1}$ ,  $a_{n2}$  – коэффициенты модели,  $X_1$  – ток сварки ( $I_{св}$ ),  $X_2$  – напряжение дуги ( $U_d$ ),  $X_3$  – скорость сварки ( $V_{св}$ ),  $X_4$  – толщина материала ( $S$ ),  $X_5$  – зазор ( $b$ ),  $X_6$  – критериальный параметр. Первые три параметра описывают возмущения в энергетическом контуре, три последних – возмущения в тепловом контуре. Критериальный параметр позволяет учесть сложно измеряемые возмущения (изменение теплопроводности, теплоемкости и др.) и рассчитывается из теплового уравнения распределения температуры в зоне сварки от распределенного источника тепла в плоском слое. С учетом ряда допущений критериальный параметр определяется выражением:

$$K = B_u^2 \ln\left(\frac{T_3}{T_u}\right), \text{ где } B_u \text{ – измеренная ширина изотермы температуры } T_3 \text{ на}$$

расстоянии  $x$  от дуги,  $T_u$  температура, измеряемая в центре шва внутри изотермы  $T_3$  на расстоянии  $x$  от дуги. На практике с помощью специально разработанного датчика измерялась ширина изотермы  $800^\circ$  и температура на оси шва на расстоянии 50мм от дуги.

Для вычисления коэффициентов модели (1) разработано специальное программное обеспечение с использованием пакета LabView. Результаты экспериментов заносятся в таблицу, а коэффициенты модели вычисляются по методу наименьших квадратов для любого числа опытов.

Для реализации замкнутой системы управления шириной корня шва применен цифровой ПИД-регулятор, определяющий значение тока сварки на  $i$ -том шаге регулирования:

$$I_{св}^i = I_{св}^0 + K \left( \delta_i + M_i + \frac{T_D}{\tau} (\delta_i - \delta_{i-1}) \right), \quad \text{где } M_i = M_{i-1} + \frac{\tau}{T_i} \delta_i,$$

$\delta_i = (e_1 - e_1^i)$  – ошибка регулирования проплавления на  $i$  шаге,  $e_1$  – требуемая ширина корня шва,  $e_1^i$  – измеренная или вычисленная ширина корня шва,  $K$  – коэффициент пропорциональности,  $T_D$  – постоянная времени дифференцирования,  $T_i$  – постоянная времени интегрирования,  $\tau$  – время цикла работы регулятора. Коэффициенты ПИД-регулятора вычисляются по форме переходного процесса разомкнутой системы при ступенчатом входном воздействии методом CHR (Chien, Hrones, Reswick), позволяющий получить малое перерегулирование и быстрый переходной процесс.

Определив коэффициенты регрессионной модели и ПИД-регулятора можно реализовать замкнутую систему управления, обеспечивающую стабилизацию ширины корня шва при действии возмущений как в энергетическом, так и в тепловом контурах. Однако даже если ширина корня шва укладывается

ся в требуемые допуски, могут возникнуть другие дефекты, наиболее часто это подрез и нарушение геометрии верхней части шва. Для определения вероятности появления таких дефектов служит контур III (Рис. 2).

Контур определения вероятности появления дефектов в сварном шве построен на основе нейросетевой модели, использующей тот же набор входных параметров, что и регрессионная модель [3], [11]. Выходными параметрами модели являются величина подреза  $b$  и коэффициент  $W$  равный отношению  $e/e_1$ . Нейросетевая модель прямого действия создана на нейронах с сигмоидальной переходной функцией и содержит два скрытых слоя (Рис. 5). Выходной сигнал каждого нейрона скрытого слоя описывается выражением:

$$f_j = \tanh\left(\sum_{i=1}^n w_{ji}\varphi_{ji} + w_{j0}\right), \text{ где } n - \text{ число}$$

входов нейрона,  $w_{ij}$ ,  $w_{i0}$  – весовые коэффициенты и нейронные смещения,  $\varphi_{ji}$  – входные сигналы от предыдущего слоя. Сигнал выходных нейронов описывается выражением:

$$P_j = k_j \left( \sum_{i=1}^m W_{ji}\varphi_{ji} + W_{j0} \right), \quad (2)$$

где  $m$  – число нейронов второго слоя,  $W_{ji}$ ,  $W_{j0}$  – весовые коэффициенты и нейронные смещения,  $\varphi_{ji}$  – входные сигналы от второго слоя,  $P_1 = b$ ,  $P_2 = W$ .

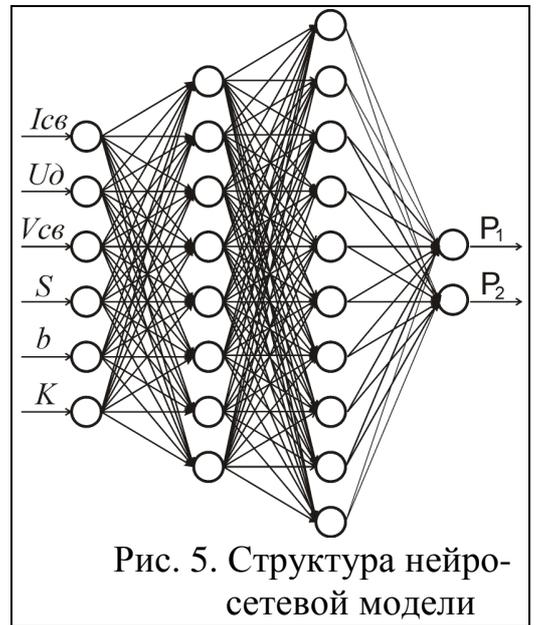
Для обучения модели использован метод «обратной ошибки (back propagation)», позволяющий получить коэффициенты модели при небольшом числе экспериментов.

Синтез структуры системы управления качеством сварного шва для конкретного процесса на основе разработанных моделей предполагает на основе анализа возмущений выделение параметров, требующих применения локальных систем стабилизации и выбор минимального набора измеряемых параметров для использования в замкнутой управляющей модели.

Для синтеза структуры системы управления предложено использовать двухмерную «область качества». «Область качества» подразумевает фигуру в пространстве двух параметров процесса, один из которых управляемый, при нахождении внутри которой рабочей точки ширина корня шва находится в заданных пределах при фиксированных остальных параметрах. Для построения области качества, учитывающей только изменения тока и скорости сварки, просчитываются все точки модели (1), которая в этом случае имеет вид:

$$e_1^i = e_1^0 + a_{10} + a_{11}X_1 + a_{12}X_1^2 + a_{30} + a_{31}X_3 + a_{32}X_3^2, \quad (3)$$

Если задать возможный допуск ширины корня шва  $\pm de_1$ , то область качества будет ограничена двумя кривыми:



$e_1^i < (e_1 - de_1)$ , ширина корня шва менее допустимой – непровар;

$e_1^i > (e_1 + de_1)$ , ширина корня шва больше допустимой – прожог.

Эти две кривые не пересекаются. Для определения всех границ «области качества» дополнительно вычисляются значения выходных сигналов нейросетевой модели по формуле (2) при условии, что все параметры, кроме тока и скорости сварки, равны номинальным значениям. Если принять, исходя из требований к сварному шву, максимальное допустимое значение параметра  $W$  равное  $W_{np}$ , а величину подреза не более ошибки модели  $b_{np}$ , то можно дополнительно ограничить «область качества» еще двумя кривыми:

$W > W_{np}$  - избыточная ширина шва;

$b > b_{np}$  - есть подрез.

На Рис. 6 (поз.1) условно показана область качества в координатах «ток-скорость сварки». Кривые  $a$ ,  $b$  получены из регрессионного уравнения, а линии  $c$ ,  $d$  - из нейросетевой модели. При нахождении рабочей точки внутри «области качества» гарантируется получение качественного сварного шва при равенстве номинальным значениям всех остальных параметров.

Если учесть изменения еще одного параметра, то можно построить «рабочую область качества» (Рис. 6 поз.2), при нахождении рабочей точки внутри которой гарантируется требуемая ширина корня шва при колебаниях этого параметра в известных пределах. Например, если возможны колебания толщины изделия в пределах  $X_{4min} \dots X_{4max}$ , то в каждой точке области качества возможны колебания ширины корня шва от  $e_{11}^i$  и  $e_{12}^i$ :

$$e_{11}^i = e_1^0 + a_{10} + a_{11}X_1 + a_{12}X_1^2 + a_{20} + a_{21}X_2 + a_{22}X_2^2 + a_{40} + a_{41}X_{4min} + a_{42}X_{4min}^2$$

$$e_{12}^i = e_1^0 + a_{10} + a_{11}X_1 + a_{12}X_1^2 + a_{20} + a_{21}X_2 + a_{22}X_2^2 + a_{40} + a_{41}X_{4max} + a_{42}X_{4max}^2$$

Поэтому рабочая область качества строится из условий:

$e_{11}^i < (e_1 - de_1)$  или  $e_{12}^i < (e_1 - de_1)$ , непровар;

$e_{11}^i > (e_1 + de_1)$  или  $e_{12}^i > (e_1 + de_1)$ , прожог.

Для нейросетевой модели, также для каждой точки вычисляется 2 значения каждого параметра  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , соответствующие предельным отклонениям толщины свариваемого металла. Ограничение рабочей области качества определяется из условий:

$W_1 > W_{np}$  или  $W_2 > W_{np}$ , избыточная ширина шва;

$b_1 > b_{np}$  или  $b_2 > b_{np}$ , есть подрез.

Аналогичным образом строятся области качества при отклонении каждого параметра. Для синтеза структуры системы управления необходимо измерить реальные отклонения параметров на конкретном оборудовании. Если колебания какого-либо параметра превышают размер области качества (например, колебания скорости сварки выходят на диапазон  $V_1$ - $V_2$  Рис. 6), то этот параметр необходимо дополнительно стабилизировать.

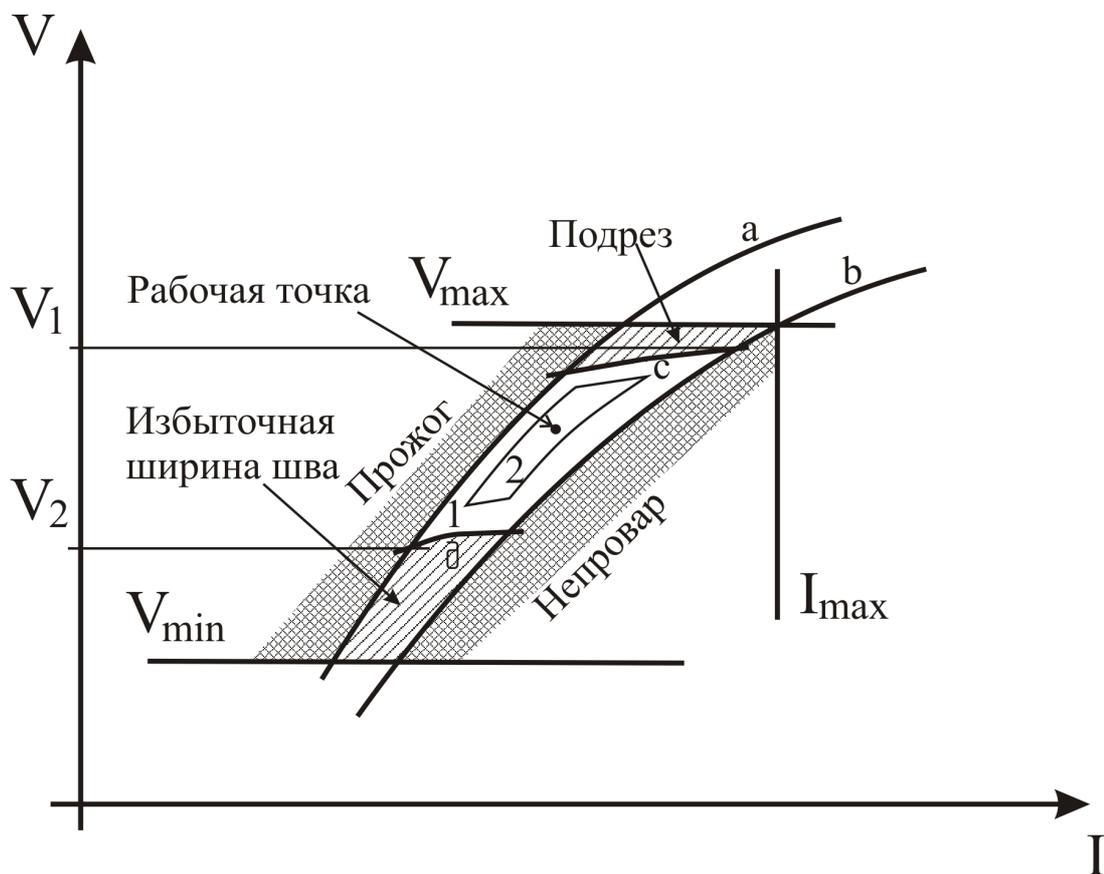


Рис. 6. Схема условных границ области качества при сварке тонкостенных пластин встык

Для формирования минимального набора параметров, требуемых для управления конкретным процессом, необходимо определить, какие параметры или наборы параметров приводят к допустимому уменьшению границ области качества и могут не учитываться при построении системы управления. За минимально допустимый граничный размер области качества принято значение ошибки построения модели, которую можно определить как среднеквадратичную сумму всех невязок, при построении модели.

Таким образом, по анализу колебаний параметров реального процесса, можно определить параметры, которые необходимо дополнительно стабилизировать, и выбрать те, которые можно исключить из управляющей модели без ущерба для качества сварного шва.

Для определения коэффициентов моделей разработан компьютерно-телевизионный программно-аппаратный комплекс [2], [3], содержащий датчики тока сварки, напряжения дуги, скорости сварки, зазора, смещения стыка, толщины изделия, температуры околошовной зоны и излучения из зоны сварки. Для определения коэффициентов регрессионной и нейросетевой моделей проводились тестовые сварки образцов с наложением на сварочные параметры искусственных возмущений в пределах  $\pm 30 \dots 50\%$  от стандартного режима при точном наведении электрода на стык. Ширина шва и корня шва, величина подреза определялась методом визуального контроля или с помощью специально разработанного лазерного триангуляционного датчика,

содержащего лазер с цилиндрической оптикой, телекамеру блок ввода изображения в компьютер и программное обеспечение.

**Четвертая глава** посвящена разработке и внедрению микропроцессорных систем контроля и управления процессом аргодуговой сварки. Разработка велась в 4 направлениях: оптические системы наведения электрода на стык, системы регистрации параметров процесса сварки, системы стабилизации параметров, системы управления процессом АДС.

**Оптические системы наведения электрода на стык.** На основе разработанной модели световых полей в зоне сварки разработаны и внедрены на нескольких предприятиях оптические системы наведения электрода на стык на основе телекамеры с оптической насадкой [4] и ПЗС линейки [7], [10], использующий дугу в качестве источника подсвета.

**Системы регистрации параметров процесса сварки.** Особенностью систем регистрации параметров при АДС является возможность работы при большом уровне электромагнитных помех в момент зажигания дуги разрядом осциллятора, большая продолжительность процесса и разнородность измеряемых сигналов. Это делает невозможным применение стандартных устройств и требует разработки специализированных микропроцессорных систем. За период с 1993 по 2008 г. разработано 6 типов систем контроля и регистрации параметров АДС с числом информационных каналов от 2 до 16 [6]. Разработанные системы регистрации параметров позволяют получить полные данные о ходе процесса сварки. Эта информация необходима для детального изучения процесса АДС, разработки математических моделей, выбора структуры системы управления и для обучения нейросетевых моделей. Разработанные системы контроля и регистрации широко используются при производстве изделий в атомной промышленности для паспортизации каждой детали, при аттестации сварочного оборудования, технологии и персонала по системе НАКС, в учебном процессе. Все системы регистрации имеют микропроцессорное управление, специальные схемы защиты от воздействия помех, гальваническую развязку всех входов, широкий диапазон измерения, цифровую индикацию параметров, встроенные часы реального времени, возможность печати на принтере и передачи данных в компьютер.

**Системы стабилизации параметров** являются локальными регуляторами, повышающими стабильность одного параметра для уменьшения его влияния одного на качество сварного шва. Анализ реальных производственных процессов требовал в большинстве случаев применение систем стабилизации скорости и тока сварки.

Для управления коллекторными двигателями мощностью до 500Вт разработана линейка цифровых модулей [6]. Модули позволяют стабилизировать скорость вращения двигателя с помощью ПИД регулятора по сигналу противо-ЭДС двигателя или энкодеру. Модули имеют защиту всех силовых и сигнальных линий от электромагнитных помех и используются для управления приводами скорости сварки.

Анализ применяемых на реальных установках сварочных источников показал, что часто причиной брака является нестабильность характеристик сварочных источников: изменение наклона статической ВАХ, изменение тока при сварке протяженных швов, нестабильность регулировочной характеристики. Для измерения статических вольтамперных характеристик сварочных источников разработан измеритель AWS-024 [5]. Измерение ВАХ производится на активной нагрузке, с линейно изменяемым сопротивлением от 10 Ом до короткого замыкания с шагом 0,02 Ом. Для измерения продолжительности нагрузки (ПН), статических ВАХ и параметров импульсного режима сварочных источников разработан измеритель ИПН-500. Измеритель представляет собой стабилизатор протекающего через него сварочного тока. Измерение ВАХ сварочного источника происходит при плавном увеличении тока от 0 до максимально установленного значения. Измерение ПН производится нагружением сварочного источника заданным током в соответствии с выбранными продолжительностью цикла и процентом нагружения. Измеренные данные отображаются на встроенном дисплее и передаются в компьютер для обработки и сохранения.

Для стабилизации характеристик сварочных источников разработаны микропроцессорные блоки управления для замены аналоговых систем управления в серийных сварочных источниках для АДС. Микропроцессорные системы управления позволяют в цифровой форме управлять всеми параметрами сварочного источника и стабилизировать его характеристики за счет применения точных измерительных схем и введения внешней дополнительной обратной связи по току.

**Системы управления процессом.** На основе датчика ширины корня шва разработана система управления качеством сварных швов при аргонодуговой сварке трубчатых чехлов теплообменников из аустенитных сталей толщиной 3 мм. Малогабаритный датчик излучения корня шва вводится в зону контроля сварки на жесткой штанге, через которую выводятся электрические сигналы, и подается аргон для защиты входного оптического отверстия и охлаждения датчика. Микропроцессорная обработка позволяет линеаризовать выходной сигнал, и обеспечить выдачу его в аналоговом и цифровом виде. Погрешность стабилизации ширины корня шва не превышала 10%.

С 2000 по 2009 годы разработано, изготовлено и внедрено на предприятиях атомной, авиационной и пищевой промышленности около двух десятков микропроцессорных систем управления многомоторными сварочными установками для аргонодуговой сварки ответственных изделий. Основной задачей внедрения была модернизация существующих установок с целью повышение качества сварки. Для этого с помощью комплекта датчиков и регистраторов были записаны параметры при сварке типовых изделий, и, по предложенной методике, определен требуемый набор систем стабилизации параметров и датчиков параметров. Для реализации выбранных законов управления разработана модульная микропроцессорная система управления,

позволяющая гибко изменять состав оборудования и связи между блоками. Аппаратная часть реализована на микропроцессорных модулях [6] образующих цифровую распределенную систему управления. Для связи между модулями используется промышленный интерфейс RS485, со специально разработанной защитой от помех [8], [9]. Применение микропроцессорных модулей с системами защиты позволило реализовать разработанные законы управления в цифровом виде при производстве серийной продукции, что позволило снизить брак и повысить производительность процесса АДС.

Достоверность научных положений подтверждается соответствием результатов теоретических исследований и экспериментальных данных.

### ***ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ***

1. Разработаны и реализованы в виде программ физико-математические модели, связывающие показатели качества сварки с физической информацией из зоны сварки. На базе этих моделей разработаны микропроцессорные системы управления сварочным комплексом, минимизирующие вероятность образования дефектов в сварном соединении при возмущениях различной физической природы.
2. Разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий проанализировать стабильность параметров сварочного оборудования и синтезировать оптимальную структуру цифровой системы управления, минимизирующей возможность появления дефектов при сварке.
3. Созданная математическая модель распределения освещенности в зоне сварки позволила разработать следящие системы за стыком с оптическими датчиками, использующими световое излучение от дуги для подсвета зоны измерения.
4. Применение цифровых технологий на всех стадиях управления процессом сварки позволило реализовать новые технологические возможности существующих аргонодуговых сварочных установок: управление наведением электрода на стык, управление проплавлением, управление качеством сварного стыка по нейросетевым моделям.
5. Разработана линейка цифровых многоканальных систем контроля параметров процесса аргонодуговой сварки. Приборы применяются в промышленности, сертификационных центрах национального агентства контроля и сварки (НАКС), в учебных и исследовательских учреждениях.
6. Научные и технические результаты работы опубликованы в печати. Разработанные системы нашли применение в учебном процессе в курсе «Автоматизация сварочных процессов».
7. Разработаны аппаратные и программные средства защиты микропроцессорных устройств от помех при аргонодуговой сварке, существенно повышающие надежность работы микропроцессорных систем управления.
8. За 15 лет разработано несколько десятков различных микропроцессорных устройств для контроля и управления процессом аргонодуговой сварки. Внедрены в производство в общей сложности около 100 различных систем

контроля и управления процессом аргодуговой сварки. Пять устройств переданы для серийного производства на предприятия России.

***ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В РАБОТАХ:***

1. Гладков Э. А., Перковский Р. А. Компьютерное управление качеством дуговой сварки (TIG, MIG) с использованием ПЗС камеры // Сварочное производство. 1995. №4. С. 21-23.
2. Гладков Э. А., Малолетков А. В., Перковский Р. А. Компьютерно-телевизионный комплекс для управления и прогнозирования качества сварки // Сварочное производство. 1997. № 7. С. 40-44.
3. Гладков Э. А., Малолетков А. В., Перковский Р. А. Прогнозирование качества стыковых соединений при дуговой сварке неплавящимся электродом с помощью нейросетевых моделей // Сварочное производство. 1997. №8. С.35-39.
4. Гладков Э. А., Перковский Р. А. Видеокомпьютерный модуль (ВКМ-1) для слежения за траекторией стыка и управления формированием шва при сварке труб // Черная металлургия. 2000. №1-2. С. 60-63.
5. Измеритель статических ВАХ сварочных источников AWS-024 / Перковский Р. А. [и др.] // Сварочное производство. 2004. №3. С. 22-24.
6. Гладков Э. А., Перковский Р. А., Невзоров В. А. Комплект цифровых модулей для контроля и управления параметрами сварочных установок // Тяжелое машиностроение. 2004. №6. С. 36-38.
7. Цифровая система слежения за стыком на ПЗС линейке при дуговой сварке / Гладков Э.А. [и др.] // Сварочное производство. 2006. №5. С.7-12.
8. Перковский Р.А. Применение интерфейса RS485 в системах управления сварочным оборудованием //Электронные компоненты. 2007. №5. С. 75-78.
9. Перковский Р. А. Применение интерфейса RS485 в системах управления автоматами для аргодуговой сварки // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2008. №6. С. 80-85.
10. Гладков Э. А., Перковский Р. А., Невзоров В. А. Цифровая система слежения за стыком на ПЗС линейке при дуговой сварке // Технология машиностроения. 2009. № 4. С. 47—51.
11. Gladkov, E.A., Maloletkov A.V.,Perkovski R.A. Predicting the quality of TIG butt welded joints using neural network models // Welding International. 1998. №12. P. 215-219.