

41997060

На правах рукописи

Бабкин Александр Сергеевич

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ
СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В ЗАЩИТНЫХ
ГАЗАХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ И
НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ**

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва 2012

Работа выполнена в Липецком государственном техническом университете

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **ЛАСТОВИРЯ Вячеслав Николаевич**,
заведующий кафедрой МГИУ

доктор технических наук

КИСЕЛЕВ Алексей Сергеевич,
в.н.с. НИЦ «Курчатовский Институт»

доктор технических наук

ПОЛОСКОВ Сергей Иосифович,
нач. отд. сварки ФГУ НУЦ «Сварка и контроль»

Ведущее предприятие – Научно-исследовательский институт транспортного строительства (ОАО ЦНИИС), г. Москва

Защита состоится «14» июня 2012 г. на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005 Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

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

Ваш отзыв на автореферат диссертации в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат диссертации разослан «10» мая 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.01
доктор технических наук, доцент



Коновалов А

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



Бабкин А.С. Развитие методов

- 034

24.41

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Современный этап развития мировой промышленности и промышленности России, как ее части, характеризуется развитием и применением технологий информационной поддержки жизненного цикла изделий (ИПИ/CALS) как средства повышения качества продукции и конкурентоспособности предприятий. В области сварочного производства решение поставленной задачи осложняется практическим отсутствием важного элемента ИПИ – систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП), также достаточно серьезна проблема недостатка квалифицированных кадров, в том числе, технологов и специалистов низшего звена – сварщиков, выполняющих механизированную сварку в защитных газах.

Сварка плавящимся электродом в защитных газах очень широко применяется при изготовлении стальных конструкций из низколегированных сталей. Достигнута высокая степень автоматизации этого процесса сварки: применяется как механизированная, так и автоматическая сварка, используются сварочные роботы. Однако технологический процесс (ТП) сварки не всегда обеспечивает требуемый уровень качества сварных соединений и высокую производительность при установленных сроках, объеме выпуска и затратах.

Для разработки ТП и оформления его в виде технологического документа (ТД) требуются значительные затраты времени и ресурсов в связи со сложностью решаемых задач. ТД содержит последовательность технологических операций (маршрут) и последовательность сборки конструкции. Для каждой операции определяют параметры режима (ПР) сварки, сварочные материалы, технические нормы времени и расхода материалов, оборудование, инструмент и технологическую оснастку.

Автоматизированное создание ТД требует знания количественных зависимостей между исходными данными и данными, содержащимися в ТД. Несмотря на широкое распространение сварки в защитных газах и множество исследований по моделированию процесса, в настоящее время не известны САПР ТП сварки в защитных газах конструкций из углеродистых и низколегированных сталей. Применяемые при технологической подготовке производства (ТПП) программы в лучшем случае позволяют производить выбор элементов ТП из базы данных и оформлять технологическую документацию. Поэтому на большинстве предприятий технология сварки разрабатывается на основе технологического и производственного опыта сварщиков и технологов, без применения ЭВМ, с большими затратами времени. В связи с отсутствием в распоряжении технологов математических методов, получаемые технологические решения часто далеки от оптимальных: велики затраты на исправление дефектов сварки, допускаются значительные потери электродного металла на разбрызгивание. Кроме того, разработанные ТД зачастую многословны и нечитабельны.

Поэтому разработка математических моделей, методик и алгоритмов автоматизированного проектирования технологических процессов сварки в защитных газах является актуальной задачей.

Цель работы

Заключается в разработке математических моделей, методик и алгоритмов автоматизированного проектирования технологических процессов сварки в защитных газах для повышения качества сварных конструкций из углеродистых и низколегированных сталей и снижения трудоемкости проектирования технологических процессов.

Для реализации поставленной в работе цели необходимо решить следующие задачи:

1. Путем теоретического анализа разработать критерии подобия и на основе экспериментального изучения процессов сварки получить зависимости между ними, связывающие свойства плазмы сварочной дуги, свойства свариваемой стали, параметры сварного соединения, электрода и режима и позволяющие определять характеристики плавления основного металла и формирования сварного шва, плавления и переноса электродного металла.
2. Исследовать закономерности образования дефектов формирования сварного шва типа подрезы и несплавления и установить критерии подобия и математические зависимости между ними для расчета допустимых областей параметров режима сварки с качественным формированием шва.
3. Исследовать закономерности образования закалочных структур в ЗТВ сварного соединения и разработать методику расчета оптимальных параметров режима по заданным размерным и структурным свойствам сварного соединения.
4. Определить показатели качества (критерии оптимальности) сварки углеродистых и низколегированных сталей, управляемые параметры и их ограничения, сформулировать функцию цели и условия связи и разработать алгоритмы условной оптимизации параметров режима сварки в защитных газах соединений ГОСТ 14771.
5. Исследовать закономерности формирования технологического маршрута изготовления и последовательности сборки сварных конструкций.
6. Использовать полученные результаты для создания математического, алгоритмического и информационного обеспечения систем автоматизированного проектирования технологии сварки.

Методы исследований и достоверность полученных результатов

Экспериментальные исследования выполнены методами теории вероятностей и математической статистики. Регистрацию электрических параметров сварки осуществляли с помощью цифровых приборов (осциллографа Б-421) и пишущих аналоговых (Б-370/3). При изучении плавления основного металла, плавления и переноса электродного металла применяли цифровую цветную видео- и фотосъемку. Видеосъемку проводили WEB-камерой QuickCam Express

фирмы Logitech, а фотосъемку - цифровым фотоаппаратом Dimage Z фирмы Minolta с десятикратным оптическим увеличением. Изучение температуры плазмы дуги проводили с использованием спектрографа ДФС-452 и многоканального оптического регистратора спектра на приборах с зарядовой связью LX511 SONY. Расчеты при определении температуры плазмы дуги вели с применением данных Vienna Atomic Lines Database (VALD). Структуру сталей исследовали методами оптической металлографии, применяя металлографический микроскоп МИМ-6 с WEB-камерой.

Теоретические исследования проводились с применением методов теории подобия и размерностей, дифференциального и интегрального исчисления, теории графов и множеств. Для математического моделирования технологических процессов применены методы теории нелинейного программирования и исследования функций многих переменных с ограничениями в виде неравенств.

Степень адекватности математических моделей описываемых ими процессам проверялась по экспериментальным данным. Достоверность научных положений и выводов основывается на систематических экспериментальных исследованиях, использовании методов статистической обработки полученных результатов; подтверждается хорошим совпадением результатов эксперимента и теоретических расчетов, а также практическим использованием полученных результатов.

Научная новизна работы

1. Установлено, что для процесса плавления при сварке в защитных газах существенными параметрами являются свойства плазмы сварочной дуги. Разработаны критерии подобия, учитывающие физические характеристики процесса плавления основного и электродного металла и связывающие теплофизические свойства металлов, плазмы сварочной дуги, размеры электрода, параметры режима и получены зависимости между критериями подобия, позволяющие расчетным путем определять:

размеры сварного шва при сварке с зазором, а также при наплавке, область параметров режима без образования подрезов и несплавлений, величину силы критического тока струйного переноса электродного металла.

2. Установлено, что для расчета оптимальных параметров режима по заданным критериям оптимальности (решения обратной задачи) необходимы математические модели в виде систем уравнений и функции цели, включающей критерии оптимальности, которые определяют качество соединения. Разработанные системы уравнений включают зависимости, полученные методами теории подобия и математической статистики и связывающие характеристики плавления основного, электродного металлов, параметры режима, теплофизические свойства свариваемых материалов и применяемых защитных газов. Выявлено, что оптимизационные задачи сварочной технологии являются математическими задачами нелинейного программирования и их решение может быть

выполнено методом множителей Лагранжа в случае свертки критериев оптимальности или итерационными методами в противном случае. Разработанные методики расчета оптимальных параметров режима, включающие полученные математические модели и критерии оптимальности, дают возможность решать обратную задачу.

3. В результате экспериментальных исследований установлены закономерности изменения средней температуры плазмы дуги в смесях $\text{Ar}+\text{O}_2$, $\text{Ar}+\text{CO}_2$ и CO_2+O_2 с плавящимся электродом. Температура плазмы смеси $\text{Ar}+\text{O}_2$ при увеличении содержания O_2 от 0 до 15% падает от $8300\pm 500\text{K}$ (температура аргоновой плазмы дуги Ar) до $7600\pm 300\text{K}$. Температура плазмы смеси CO_2+O_2 при увеличении содержания O_2 от 0 до 40% снижается от $9000\pm 200\text{K}$ (температура плазмы дуги в CO_2) до $7700\pm 500\text{K}$. Температура плазмы смеси $\text{Ar}+\text{CO}_2$ при изменении содержания CO_2 от 0% до 40% сначала падает от $8300\pm 500\text{K}$ до $7400\pm 300\text{K}$ при 15...20% CO_2 в смеси, затем возрастает, достигая $7700\pm 500\text{K}$ при 40% CO_2 . Выявлено, что снижение температуры плазмы смеси происходит примерно на 40K при увеличении содержания примеси CO_2 или O_2 в смеси на один процент, что позволяет точно определять температуру сварочной плазмы в зависимости от ее состава.

4. Анализом магнито-гидродинамических процессов в сварочной ванне с использованием теории подобия установлено, что магнитное поле сварочного тока существенно влияет на устойчивость движения жидкого металла сварочной ванны: энергия магнитного поля сварочного тока в случае образования несплавов и подрезов не превышает, а при качественном формировании превышает кинетическую энергию движущегося потока металла. На основе аналитического описания распределения напряженности магнитного поля в свариваемом изделии и обработки экспериментальных данных получена зависимость между критериями подобия, позволяющая расчетным путем определять параметры режима сварки, обеспечивающие формирование сварных швов без образования подрезов.

5. На основе расчетно-экспериментального описания процессов структурных превращений и температурного поля, создаваемого сварочной дугой, ванной жидкого металла и металлом шва, разработана методика расчета оптимальных параметров режима сварки углеродистых и низколегированных сталей, обеспечивающих минимальное содержание закалочных структур в ЗТВ при соответствии размеров шва требуемым.

6. Используя методы дискретной математики, разработаны методики построения технологических маршрутов изготовления сварных конструкций. На основе анализа графовых моделей сварных конструкций разработаны эмпирические правила и алгоритмы, позволяющие определять варианты сборки деталей машин.

На защиту выносятся совокупность следующих научных результатов:

1. Закономерности изменения температуры плазмы сварочной дуги в защитных газах и смесях.

2. Критерии подобия и зависимости между ними, описывающие закономерности плавления электродного металла как функции параметров режима, свойств и размеров электрода, позволяющие решать прямую задачу – расчет параметров плавления при заданных параметрах режима, размерах электрода, защитной среды, а также обратную задачу – расчет критического тока струйного переноса в аргоне как функции свойств и размеров электрода.
3. Критерии подобия и зависимости между ними, описывающие закономерности проплавления основного металла, формирования швов при наплавке и при сварке с зазором, позволяющие решать прямую задачу – расчет размеров шва при заданных параметрах режима, размерах электрода, свойствах защитной среды в нижнем положении.
4. Методики расчета, включающие математические модели дуговой сварки в защитных газах, предназначенные для решения обратной задачи – определения оптимальных параметров режима сварки соединений по заданным размерам шва и подготовленных кромок с учетом металлографической структуры металла ЗТВ, а также зазора в стыке и разделки кромок.
5. Критерии подобия и зависимость между ними, описывающая закономерности формирования подрезов при сварке и дающая возможность рассчитывать ПР сварки в области качественного формирования швов при высокой производительности процесса.
6. Аналитические выражения, определяющие скорость образования центров новой фазы и скорость движения межфазной границы с коэффициентами, определяемыми по диаграммам распада аустенита.
7. Алгоритмы построения структуры технологического процесса и последовательности сборки сварных конструкций деталей машин.
8. Концепция построения САПР технологии сварки.

Практическая значимость работы

Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований являются научной основой автоматизированного проектирования технологических процессов сварки в защитных газах стальных конструкций.

На основании полученных математических моделей разработаны способы сварки в защитных газах, способствующие повышению качества сварных соединений и сокращению затрат на экспериментальное определение значений параметров режима сварки.

Новизна полученных результатов и разработанных математических моделей подтверждается 5 патентами Российской Федерации.

Теоретические положения, математические модели и алгоритмы использованы при разработке САПР ТП, которые внедрены на ряде предприятий. Новизна разработанных алгоритмов и программ подтверждается регистрацией в Государственном фонде алгоритмов и программ двух компьютерных программ.

Реализация работы

Системы автоматизированного проектирования технологии сварки внедрены на ряде предприятий: ОАО «Уральский турбомоторный завод» (г. Екатеринбург), ПО «Пищемаш» (г. Красилов, Украина), ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат», ОАО ЛОЭЗ «Гидромаш» (г. Липецк). Расчетные ПР использовались при изготовлении металлоконструкций на предприятиях ОАО «Кислородмонтаж», ОАО «Боринское» (Липецкая обл.).

Системы автоматизированного проектирования технологических процессов сварки экспонировались на международных выставках СВАРКА-2002, СВАРКА-2003, СВАРКА-2004 (г. СПб, Ленэкспо), РОССВАРКА/WELDEX-2002, РОССВАРКА/WELDEX-2003, (г. Москва, Сокольники). САПР ТП «Autoweld» удостоена диплома международной выставки РОССВАРКА/WELDEX-2003.

Результаты исследований, учебная версия САПР, изданная книга используются в учебном процессе кафедры сварки ЛГТУ при подготовке инженеров по специальности 150107 «Металлургия сварочного производства» при чтении лекций, проведении лабораторных работ и практических занятий по курсам «Моделирование и оптимизация технологических систем», «САПР технологии сварки и наплавки», а также при курсовом и дипломном проектировании.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на Международных конференциях «V Международная школа математических методов в сварке» (г. Киев, 1988 г.), «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных технологиях» (Кацивели, Украина, 2002 г.), на девяти Всесоюзных и Всероссийских научно-технических конференциях, среди которых - «Компьютерные технологии в соединении материалов» (г. Тула, 2001 г.), «МАТИ – Сварка XXI века. Технология, оборудование и подготовка кадров в сварочном производстве» (г. Москва, 2003 г.), на одиннадцати научно-технических конференциях, среди которых - «САПР ТП сварки, пайки, литья и нанесения газотермических покрытий» (г. Москва, 1985 г.), «Математические методы в сварке» (г. Киев, 1986, 1987), «Применение математических методов и ЭВМ в сварке» (г. Ленинград, 1987 г.), «САПР и микропроцессорная техника в сварочном производстве» (г. Москва, 1991), на научных семинарах кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» Донского технического университета в 2005, 2009 г., кафедры «Оборудование и технология сварочного и литейного производства» Тульского государственного университета в 2007 г., кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» Волгоградского технического университета в 2007 г., кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» Воронежского технического университета в 2007 г., кафедры сварки Липецкого технического университета в 2002, 2008, 2011 гг., кафедры «Технология сварочного производства» «МАТИ» - РГТУ им. К.Э. Циолковского в 2008 г., кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2009 г., 2011 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 60 работ (23 по перечню ВАК), в том числе книга «Расчет и оптимизация параметров режима дуговой сварки металлов»; получено 5 патентов на изобретение, зарегистрированы 2 программы в Государственном фонде алгоритмов и программ. Результаты диссертации отражены также в десяти отчетах по выполненным научно-исследовательским темам.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и результатов работы, списка использованной литературы и приложения. Работа изложена на 411 страницах, содержит 151 рисунок, 41 таблицу. Список литературы содержит 337 наименований.

Основное содержание работы

Введение

Приведена формулировка проблемы, раскрыта актуальность темы работы, определены цель и задачи работы, показана ее научная новизна и практическая ценность, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Состояние вопроса, цель и задачи работы

Существующие методы разработки технологии сварки и ее документирование основаны, в основном, на ручных методах обработки и представления информации, эмпирическом опыте технологов-сварщиков; проводятся без применения вычислительной техники. Такое положение приводит к назначению неоптимальных параметров режима и как следствие – к большому количеству брака.

Стремительное развитие технических и программных средств, наделенных различными функциональными возможностями, способствует формированию новых принципов организации сварочного производства. Становится очевидным, что только использование современных компьютерных ИПИ/CALS технологий для комплексной автоматизации всех аспектов производства сварных конструкций, включая моделирование совокупности протекающих при сварке процессов и ТПП, позволит быстро находить оптимальные технологические решения для производства качественных конструкций при значительном снижении ресурсоемкости самого процесса разработки. Системы автоматизированного проектирования технологии решают трудоемкую задачу разработки оптимальной технологии сварки, являясь важнейшим звеном системы качества.

Имеющиеся на рынке программных продуктов системы, предназначенные для использования при технологической подготовке сварочного производства, не имеют в своем составе основных процедур – ПР не рассчитываются, а выбираются из таблиц, назначенные параметры не анализируются и не оптими-

зируются. Структура маршрута и последовательность операций определяются в диалоговом режиме, что требует высокой квалификации технолога-пользователя этой системы. Решение всех задач в таких САПР заменяется информационным поиском в базе данных. Программные проекты работают в отрыве от информационной системы предприятия.

Проблема разработки оптимальной технологии сварки неразрывно связана с расчетом оптимальных параметров режима сварки по заданным показателям качества сварного соединения.

Существенный вклад в разработку методик и зависимостей для расчета параметров режима сварки внесли В.П. Демянцевич, Е. Nauman, В.Е. Кривошея, А.М. Попков, И.Ф. Коринец, которые разработали алгоритмы, предназначенные для решения обратных задач технологии для некоторых сварных соединений из низкоуглеродистых сталей. Алгоритмы включают экспериментально-статистические зависимости между параметрами сварного шва (например, катет шва, глубина проплавления) и параметрами режима. Известные методики определения режима ограничены рамками отдельных типов сварных соединений из низкоуглеродистых сталей, часто применимы только для однопроходных соединений, не учитывают влияние зазора в стыке и вылета электрода на формирование швов.

Определение режимов сварки низко- и среднелегированных сталей является сложной задачей, при решении которой необходимо обеспечить качественное формирование шва и благоприятную металлографическую структуру ЗТВ. Применяемые в настоящее время имитационные методы предназначены для решения прямой технологической задачи - определения структуры металла по заданным параметрам режима сварки.

В работах В.А. Судника, Т. Debroy, U. Dilthey и др. исследователей развит метод построения математических моделей на микроуровне в виде систем дифференциальных уравнений с частными производными. Такие математические модели позволяют моделировать процесс формирования сварного шва, т.е. исследовать влияние параметров режима сварки на размеры форму сварного шва, решая прямую задачу технологии.

Расчет оптимальных параметров режима является сложной многопараметрической задачей, требующей рассмотрения взаимосвязанных процессов плавления основного и электродного металлов. Вопросы оптимизации параметров режима сварки рассмотрены в работах С.В. Дубовецкого и О.Г. Касаткина, Э.Л. Макарова и Э.А. Гладкова, В.А. Судника. За функцию цели принимают или качественные показатели сварных швов - их размеры, или экономические показатели производства, такие как технологическая себестоимость, производительность процесса, оцениваемая, например, штучным временем сварки. В.А. Судник с сотрудниками для поиска вектора оптимальных сварочных параметров проводит вычислительный эксперимент на математической модели с последующей статистической обработкой его результатов. В этом случае требуется значительное время на определение оптимальных сварочных параметров.

В промышленности широко применяются смеси с использованием Ar , CO_2 и O_2 . Однако в настоящее время не обобщено влияние состава защитной атмосферы на проплавление и формирование сварного шва, а также на плавление и перенос электродного металла. Известные сведения не позволяют получить физико-математические зависимости для расчета ПР. В частности, не известна средняя температура плазмы сварочной дуги в смесях защитных газов с плавящимся электродом и ее зависимость от состава смеси.

Важным фактором, сдерживающим рост производительности сварки, являются дефекты швов типа несплавления и подрезы. Единой точки зрения на механизм образования этих дефектов нет, а предложенные феноменологические модели не позволяют использовать имеющиеся представления для количественного определения области сварочных параметров с качественным формированием шва.

На основе анализа и обобщения литературных данных, производственного опыта и в соответствии с целью работы в главе сформулированы задачи работы, определены области и методы исследований.

Глава 2. Исследование и моделирование формирования сварных соединений в защитных газах

Приведены результаты экспериментальных исследований и моделирования плавления основного металла и формирования сварного шва при наплавке, при сварке с зазором. Исследовано явление образования подрезов и несплавлений, а также формирования структурных составляющих (феррита, карбидов, перлита, мартенсита) в конечной структуре ЗТВ.

С целью вывода выражения для расчета какого-либо размера шва, например, глубины проплавления h или ширины шва $e_{\text{ш}}$, получили критерии подобия (КП) из следующей функциональной зависимости, связывающей ПР сварки, представленных в форме эффективной мощности дуги q , и теплофизические свойства свариваемого материала (объемную теплоемкость c_V , теплопроводность λ , температуру плавления T)

$$h = \varphi(q, V_{\text{св}}, \lambda, c_V, T). \quad (1)$$

Установлено, что процесс описывают следующие КП: критерий Пекле $\pi_{1(h)} = \frac{h \cdot V_{\text{св}}}{a}$, критерий Н. Кристенсена $\pi_{\text{св}} = \frac{q \cdot V_{\text{св}}}{(T_{\text{н}} - T_0) \cdot \lambda \cdot a}$, критерий М.В. Кирпичева $\pi_{\text{к}} = \frac{q}{(T_{\text{н}} - T_0) \cdot \lambda \cdot d}$ и критерий $\pi_{23} = \frac{q^2 \cdot V_{\text{св}}}{((T_{\text{н}} - T_0) \cdot \lambda)^2 \cdot a \cdot d}$ (критерий давления дуги).

Полученные критерии использовали при выводе зависимостей размеров сварных швов от параметров режима. Они позволяют рассчитывать глубину проплавления и ширину шва по известным ПР, т.е. решать прямую задачу технологии, и имеют вид (рис. 1)

$$\pi_{1(h)} = e^{a_1} \cdot \pi_{23}^{a_2}, \quad (2)$$

где a_1, a_2 – экспериментально определяемые коэффициенты; для наплавки в CO_2 проволоками $d_3=1,2\dots2,0$ мм $a_1=-3,603, a_2=0,539$.

Зазор между кромками свариваемых деталей, несомненно, является важным технологическим фактором, влияющим на размеры сварочной ванны. Незнание реальной зависимости h от зазора в стыке b и ПР может приводить как к прожогам, так и к непроварам свариваемых кромок деталей.

Исследовали зависимость размеров шва при сварке с зазором h и e_u от ПР. Для планирования и обработки экспериментов использовали перечисленные выше КП, а также новый КП – критерий зазора

$$\pi_4 = \frac{(I_{\text{св}} \cdot U_{\text{д}} \cdot \eta_u)^2 \cdot V_{\text{св}}^2 \cdot b}{(T \cdot \lambda \cdot a)^2 \cdot d_3} \quad (3)$$

В ходе экспериментального исследования сварки в углекислом газе ПР сварки варьировали таким образом, что критерий π_{23} менялся от 3691 до 11637. Зазор в стыке b изменяли от 0 мм до 2,2 мм. Обработкой методами линейного регрессионного анализа экспериментальных данных, представленных в виде КП, получили формулу для расчета глубины проплавления при сварке в CO_2 с зазором в стыке

$$h_c = e^{-1,473} \cdot \left(\frac{I_{\text{св}} \cdot U_{\text{д}} \cdot \eta_u}{T \cdot \lambda} \right)^{0,67} \cdot \left(\frac{b}{d_3} \right)^{0,335} \cdot \frac{a^{0,33}}{V_{\text{св}}^{0,665}} \quad (4)$$

Рассмотрено влияние зазора в стыке на величину ширины шва. Показано, что между шириной шва, ПР и зазором существует зависимость

$$e_u = e^{-0,48} \cdot b^{-0,329} \cdot \left(\frac{I_{\text{св}} \cdot U_{\text{д}} \cdot \eta_u}{T \cdot \lambda} \right)^{0,416} \cdot \left(\frac{a}{V_{\text{св}}} \right)^{0,792} \cdot d_3^{-0,208} \quad (5)$$

Для изучения влияния защитной атмосферы на проплавление и формирование сварного шва исследовали сварку в газах CO_2 , Ar и наиболее часто применяемых на практике смесях Ar+25...30% CO_2 , Ar+5% O_2 и CO_2 +25...30% CO_2 . Анализ процесса сварки в смесях показал, что величина глубины проплавления определяется двумя факторами: параметрами режима, описываемыми критерием π_{23} , и свойствами плазмы сварочной дуги. Последние представлены полученным в работе КП

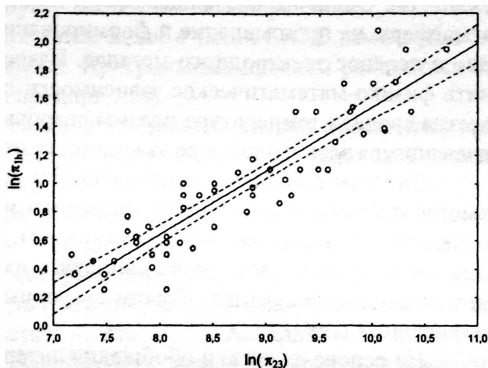


Рис. 1. Зависимость между логарифмами критериев и $\pi_{1(h)}$ и π_{23} : наплавка в углекислом газе, $d_3=1,6$ мм, $L_3=13\dots23$ мм

$$\pi_n = \frac{T_n \cdot \lambda \cdot \sigma_s}{\sqrt{H \cdot \sigma \cdot d_s^2}}, \quad (6)$$

который связывает такие свойства плазмы сварочной дуги как: средняя температура T_n , теплопроводность, теплоемкость H , транспортное сечение рассеяния на атомах и молекулах σ_s , а также поверхностное натяжение металла в газовой защитной среде σ .

Экспериментальные исследования влияния ПР сварки на глубину проплавления и ширину шва при сварке в CO_2 , аргоне, в смесях $\text{CO}_2+30\%\text{O}_2$ (рис. 2) и $\text{Ar}+30\%\text{CO}_2$, а также $\text{Ar}+5\%\text{O}_2$ позволили получить следующие выражения, связывающее размеры шва, ПР и состав защитных газов

$$\pi_{pe}(h) = e^{k_{1h}} \cdot \pi_{23}^{k_{2h}}, \quad (7)$$

$$\pi_{pe}(e_m) = e^{k_{1e}} \cdot \pi_{23}^{k_{2e}}, \quad (8)$$

где k_{1h} , k_{1e} – коэффициенты, учитывающие влияние свойств плазмы сварочной дуги, соответственно на глубину проплавления и ширину шва; k_{2h} , k_{2e} – коэффициенты, учитывающие влияние ПР на размеры шва.

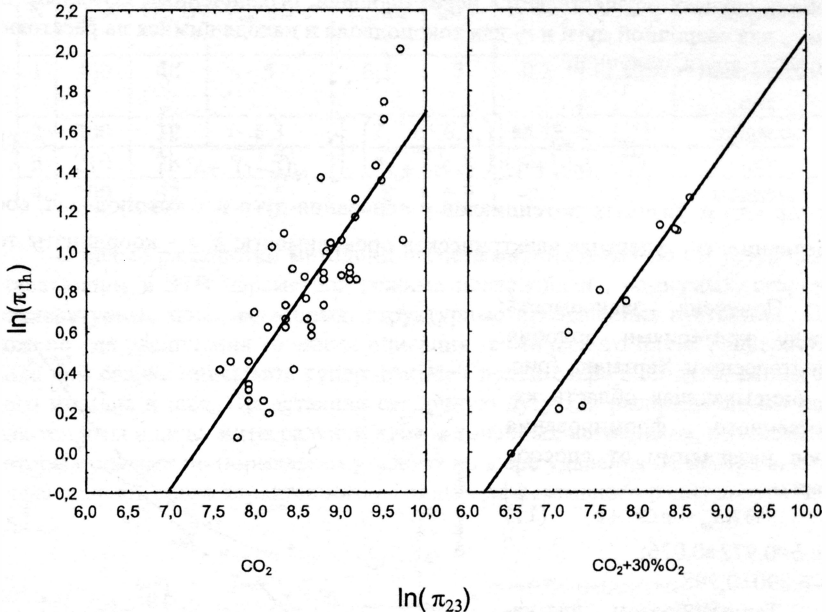


Рис. 2. Зависимость между логарифмами критериев и $\pi_1(h)$ и π_{23} : наплавка в углекислом газе (слева) и смеси $\text{CO}_2+30\%\text{O}_2$ (справа), $d_s=1,2$ мм, $L_s=13...20$ мм

Установлено, что k_{2h} слабо зависит от состава газовых смесей и изменяется в узких пределах: в случае применения смесей с углекислым газом - CO_2 , $\text{Ar}+30\%\text{CO}_2$ и $\text{CO}_2+30\%\text{CO}_2$ $k_{2h}=0,5...0,6$, при использовании аргона и смеси $\text{Ar}+5\%\text{O}_2$ $k_{2h}=0,7...0,8$. Коэффициент, учитывающий влияние свойств плазмы

сварочной дуги на h , находится в обратной квадратичной зависимости от свойств плазмы. Выражение для его расчета определили обработкой МНК экспериментальных данных

$$k_{1h} = -0,33 \cdot (\ln(\pi_n) + 35,5)^2 - 2,2 \quad (9)$$

С целью определения аналитического выражения для оценки условий качественного формирования сварных швов на форсированных режимах без образования подрезов и несплавов методами теории подобия проведен теоретический и экспериментальный анализ магнитогидродинамической обстановки в зоне сварочной дуги и ванны.

Показано, что магнитогидродинамические процессы в сварочной ванне могут быть описаны зависимостью между КП Хартмана и π_{Cr} . КП Хартмана является функцией напряженности магнитного поля H .

В работе решена задача расчета распределения H сварочного тока в изделии на основе вычисления взаимодействия потенциалов, приписываемых сварочной дуге и токоподводу. Принимая, что ввод электрического тока в изделие в обоих случаях осуществляется через площади, ограниченные активным пятном r_d для сварочной дуги и r_T для токоподвода и находящимися на расстоянии L друг от друга, получили

$$H = \frac{\sigma_r r_T \cdot \Delta\phi}{2h(r_d + r_T)} \left(\left(1 - \frac{r}{\sqrt{r^2 + h^2}} \right) + \left(1 - \frac{L-r}{\sqrt{(L-r)^2 + h^2}} \right) \right), \quad (10)$$

где $\Delta\phi = \phi_0 - \phi$ разность потенциалов у основания дуги и у токоподвода, соответственно; σ – удельная электрическая проводимость; h , r – координаты точки.

Получена зависимость между критериями подобия Кристенсена и Хартмана (рис. 3), описывающая область качественного формирования швов независимо от способа сварки

$$\ln Ha_{sp} = \ln Cr^b + c, \quad (11)$$

где $b=0,972 \pm 0,026$;
 $c=-6,890 \pm 0,298$.

Таким образом, для качественного формирования шва критерий Хартмана, рассчитанный для заданных параметров режима, выраженных критерием Кристенсена, должен быть больше критического значения критерия

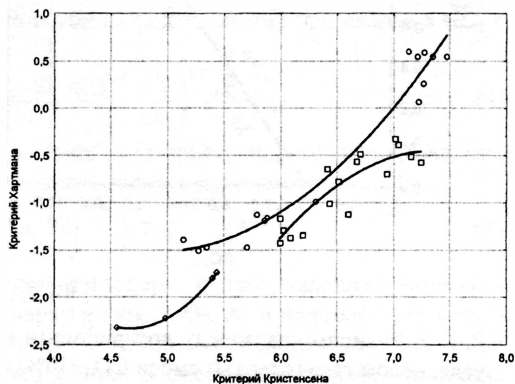


Рис. 3. Связь логарифмов критериев Хартмана и Кристенсена для различных дефектов: $\circ$ – подрезы (УП и Аф); $\square$ – несплавления (УП); $\diamond$ – неустойчивый процесс (УП)

Хартмана, рассчитанного по выражению (11).

Проверку полученного выражения провели с помощью данных работы японских исследователей, посвященной сварке в углекислом газе. В табл. приведены условия экспериментов и расчетные значения критериев Хартмана и Кристенсена ($\ln Ha_{\text{эксп}}$ - логарифмы значений критерия Хартмана, рассчитанные по экспериментальным данным).

Из таблицы видно, что дефектное формирование швов происходит при значениях $\ln Ha_{\text{эксп}}$ меньших, чем рассчитанное по полученному в работе выражению $\ln Ha_{\text{кр}}$. Наоборот, качественное формирование получено при $\ln Ha_{\text{эксп}}$ большем, чем $\ln Ha_{\text{кр}}$. Эти факты позволяют говорить о возможности применения полученного выражения для оценки вероятности образования при сварке подрезов и несплавлений по заданным параметрам режима.

Таблица

Проверка методики

N	I _{св} , А	U _д , В	V _{св} , см·с ⁻¹	ε _ш , мм	ln Cr	ln Ha _{кр}	ln Ha _{эксп}	Дефект
1	360	40	5	6,1	7	0,3	-1,529	несплавление
2	300	32	3,3	7	6,2	-0,42	-1,71	подрезы
3	210	23	1,7	6	4,8	-1,7	-1,5	нет
4	300	32	2,5	7,8	5,9	-0,7	-1,71	подрезы

С целью разработки методики расчета оптимальных по структурным составляющим в ЗТВ параметров режима исследовали, во-первых, сварочные температурные поля, во-вторых, структурные превращения аустенита. Предложено для увеличения точности описания термического цикла температурное поле при сварке описывать суперпозицией полей сварочной дуги, ванны жидкого металла и шва. Представили сварочную дугу как распределенный источник теплоты в виде интегральной суммы точечных источников, интенсивность которых спадает по нормальному закону по мере удаления от центра анодного пятна до некоторого характерного размера – эффективного радиуса дуги r_0 , где $T \leq T_{\text{кип}}$

$$T(x, y, z) = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \frac{q_{\max} A_1 \frac{r}{\sqrt{2\pi r_0}} e^{-\frac{r^2}{2r_0^2}}}{2\pi R(x + r \cos \varphi, y + r \sin \varphi, z) \lambda} e^{-r_a \frac{x + r \cos \varphi + R(x + r \cos \varphi, y + r \sin \varphi, z)}{2a}} dr d\varphi, \quad (12)$$

где $q_{\max}$ – наибольший тепловой поток с учетом потерь на нагрев и расплавление основного металла; A_1 – нормирующий множитель.

Приняли, что жидкий металл сварочной ванны с тепловой мощностью $q_{\max} = q_s$ является распределенным источником теплоты с радиусом $\frac{e_m}{2}$, расположенным на расстоянии $2r_0$ от центра сварочной дуги, тогда распределение

температуры $T_*(x+2r_0, y, z)$ от действия этого источника теплоты описывается уравнением (12).

Остывающий металл сварного шва с тепловой мощностью $q_{ш}$ представили источником теплоты, нормально распределенным по оси Y и подчиняющимся пуассоновскому распределению по оси X . Его температурное поле описали как

$$T(x, y, z) = \int_{-\frac{e_{ш}}{2}}^{\frac{e_{ш}}{2}} \int_{-L_{ш}}^{-L_{ш}-4r_0} \frac{q_{ш} A_2 \sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{2\pi} e_{ш}} e^{-\frac{y^2}{e_{ш}}} \cdot \frac{x^*}{e_{ш}} e^{-\frac{(x^*+4r_0)^2}{e_{ш}}} \frac{e^{-\frac{x+x^*+4r_0+R(x+x^*+4r_0, y+y^*, z)}{2a}}}{2\pi R(x+x^*+4r_0, y+y^*, z)\lambda} dx^* dy^*, \quad (13)$$

где A_2 – нормирующий множитель; $L_{ш} = 10e_{ш}$.

Для расчета структурных составляющих сплава околосварной зоны использовали уравнение Авраами, для которого приняли произведение константы скорости k и длительности превращения $k\tau^n$ для процессов распада аустенита, протекающих по диффузионному механизму (образование феррита, перлита и карбидов) и промежуточному (образование бейнита), в виде

$$k\tau^n = \exp \left(4\pi \cdot \int_0^{\tau_x} v_{ос} \left(\int_{\tau_{обр}}^{\tau_x} v_{пс}^{n-1} \cdot \tau^{n-2} d\tau \right) d\tau_{обр} \right), \quad (14)$$

где k – кинетический параметр, зависящий от свободной энергии и скорости образования новой фазы; τ – длительность превращения; $n \leq 4$; $v_{ос}$ – скорость образования центров новой фазы; $v_{пс}$ – скорость движения межфазной границы; τ_x – полное время превращения; $\tau_{обр}$ – момент образования центра новой фазы.

Скорость образования $v_{ос}$ и роста $v_{пс}$ центров новой фазы (зародышей) в аустените описали выражениями

$$v_{ос} = C'_1 \exp \left(-\frac{B}{RT(Ac - T)} \right), \quad (15)$$

$$v_{пс} = C''_1 \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right), \quad (16)$$

где Ac – соответствующая критическая температура; T – текущая температура исследуемой точки ЗТВ во время охлаждения; B – кинетический параметр, учитывающий энергию образования критического зародыша; C'_1 – константа скорости образования зародышей; C''_1 – константа скорости движения межфазной границы; Q – энергия активации движения межфазных границ.

Кинетический параметр B определяли исходя из $\left. \frac{\partial V}{\partial T} \right|_{T=T_n} = 0$ (T_n – температура минимальной устойчивости аустенита при соответствующем превраще-

нии). Параметр $C_2 = \ln(C'_1 + C''_1)$ определяли исходя из граничных условий $V(T_n, \tau_n) = V_n$, где V_n – инкубационная объемная доля новой фазы.

Возникающие в процессе бейнитного превращения существенные внутренние напряжения, которые препятствуют образованию новых зародышей, учитывали при расчете скоростей образования v_α и роста v_β , введением дополнительного члена. Последний включает текущее значение объемной доли бейнита.

Для расчета объемной доли мартенсита использовали соотношение

$$V_M = \exp \left(-C_M \exp \left(\frac{Q_M}{RT \cdot (Ac_3 - T)} \right) \right). \quad (17)$$

Энергию активации образования мартенсита Q_M рассчитывали как функцию температур начала M_n и конца M_k мартенситного превращения

$$Q_M = \frac{\ln \left(\frac{\ln(V_k)}{\ln(V_n)} \right)}{\frac{1}{RM_k (Ac_3 - M_k)} - \frac{1}{RM_n (Ac_3 - M_n)}}. \quad (18)$$

Константу C_M определяли аналогично C_2

$$C_M = \ln(-\ln(V_k)) + \frac{Q_M}{RM_n \cdot (Ac_3 - M_n)}. \quad (19)$$

Количество структурных составляющих (феррита Ф, карбидов К, перлита П, мартенсита М) в конечной структуре определяется по выражениям, аналогичным следующему

$$\Phi = \int_0^{\tau_1} \frac{d}{d\tau} (-\varepsilon_\Phi) \cdot \varepsilon_K \varepsilon_P \varepsilon_B \varepsilon_M d\tau, \quad (20)$$

где ε – относительная объемная доля структурной составляющей.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что предложенная модель описывает процессы нагрева и охлаждения пластин значительно более точно, нежели известные модели. Установлено, что экспериментально полученные значения

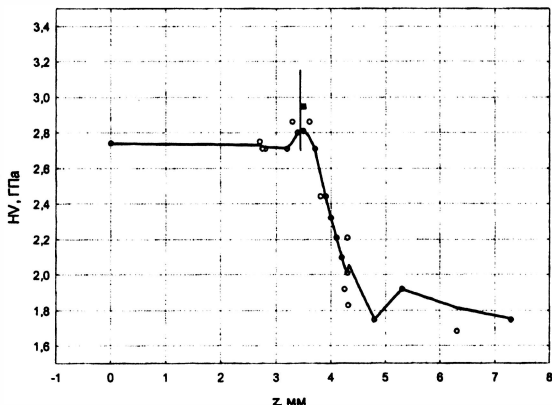


Рис. 4. Распределение твердости в шве и ЗТВ по глубине проплавления: сталь 12Х1М1Ф, глубина проплавления 3,0...3,3 мм, ■ – расчет, ○ – экспериментальные данные

твердости в заданных точках близки к расчетным и находятся в пределах ошибки измерения (рис. 4).

Глава 3. Исследование и моделирование влияния сварочной дуги на плавление и перенос электродного металла в защитных газах

В главе приводятся результаты исследований средней температуры плазмы дуги, областей переноса электродного металла, коэффициента расплавления и потерь электродной проволоки.

С целью обобщения влияния состава защитной атмосферы на формирование сварных швов с помощью выражений (7)-(9) согласно критерия подобия (6) необходимо знание средней температуры плазмы. Оценку средней температуры плазмы провели по методу относительных интенсивностей спектральных линий: искали связь между относительной интенсивностью спектральных линий I в виде $\log\left(\frac{I\lambda^3}{gf}\right)$, где λ – длина волны спектральной линии, g – статистический

вес нижнего уровня, f – сила осциллятора для эмиссионной линии, и энергией верхних уровней E . Для измерения интенсивности спектральных линий и их длины волны использовали установку, включающую спектрограф ДФС-452 и многоканальный оптический регистратор спектра на приборах с зарядовой связью.

Установлено, что при токах 130...140 А температура плазмы промышленной сварочной дуги, образованной CO_2 с проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2мм, составляет $9000 \pm 200\text{K}$. Температура плазмы дуги, образованной аргоном, при тех же условиях имеет температуру $8300 \pm 500\text{K}$.

Добавляемые к аргону углекислый газ (до 20%) и кислород (до 15%), снижают температуру плазмы сварочной дуги. Добавка кислорода к углекислому газу также снижает температуру плазмы (рис. 5).

Установлено, что снижение температуры во всех исследованных случаях составляет ~40K на каждый объемный % примеси. При 40% CO_2 в смеси падения температуры плазмы не происходит по срав-

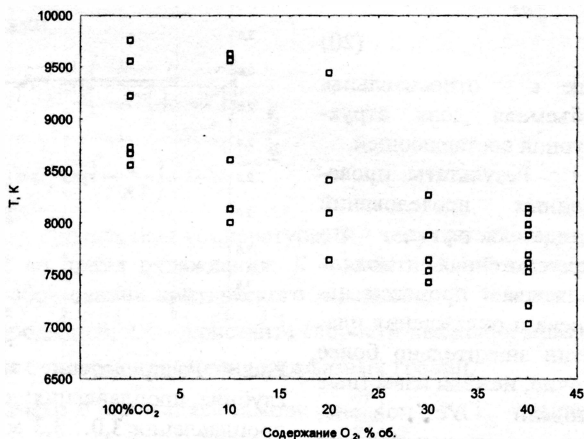


Рис. 5. Влияние содержания кислорода в смеси $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ на температуру плазмы

нению с плазмой смеси $Ar+20\%CO_2$.

Установлено, что имеет место обратно пропорциональное влияние сечения рассеяния электронов на атомах и молекулах $\sqrt{\sigma_i}$ на электронную, а учитывая квазинейтральность низкотемпературной плазмы сварочной дуги, - на среднюю температуру плазмы сварочных дуг, горящих в смесях газов. Величина σ_i кислорода, углекислого и угарного газов выше, чем аргона, а σ_i кислорода выше, чем углекислого газа, поэтому электронная температура и, следовательно, температура смеси CO_2+O_2 снижается с ростом содержания кислорода, аналогично объясняется снижение температуры смеси $Ar+CO_2$ и $Ar+O_2$ с ростом содержания CO_2 и O_2 соответственно.

С целью расчета площади наплавленного металла и высоты выпуклости сварных швов проведены теоретические и экспериментальные исследования скорости плавления низкоуглеродистой электродной проволоки. Получено выражение для расчета коэффициента расплавления электродной проволоки

$$\alpha_p = k_1 \cdot I_{ca}^{k_2} \cdot \left(\frac{L_2}{d^2} \right)^{k_3}, \quad (21)$$

где k_i - эмпирические коэффициенты. В случае сварки в углекислом газе на обратной полярности $k_1=0,616$, $k_2=0,37$, $k_3=0,32$.

Автором были проведены эксперименты для нахождения оптимального соотношения между сварочным током и напряжением на дуге при сварке в углекислом газе, аргоне и смеси $Ar+5\%$.

Для сварки в углекислом газе функцией цели приняли сумму критериев - потери электродного металла на угар и разбрызгивание ψ_n и оптимальное соотношение размеров валика шва - ширины шва e_m и высоты выпуклости g , выражаемого безразмерным комплексом в виде коэффициента формы валика $\psi_s = \frac{e_m}{g}$.

Получено соотношение $U\partial = f(I_{ca})$, которое обеспечивает потери электродного металла не более 10% и коэффициент формы валика $\psi_s = \frac{e_m}{g} = 6...8$.

Для случая сварки смеси $Ar+5\%O_2$ по данным автора и работы А.В.Чичкань, В.И. Ульянова и В.Н. Бучинского получены

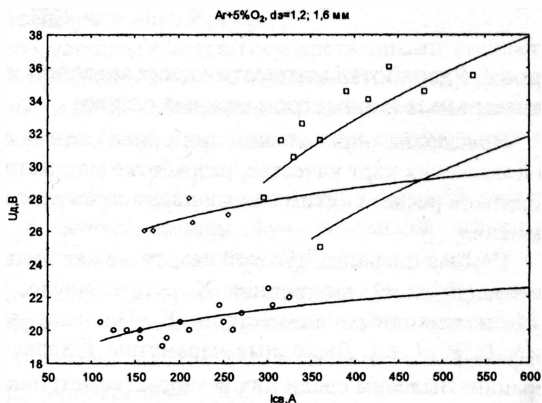


Рис. 6. Области переноса электродного металла при сварке в смеси $Ar+5\%O_2$: проволока Св-08Г2С, $d=1,2$ и $d=1,6$ мм: $\circ$ - перенос короткими замыканиями, $\diamond$ - капельный перенос без коротких замыканий, $\square$ - струйный перенос, Δ - погруженная дуга

математические описания границ областей переноса электродного металла (рис. 6). Предложены выражения $U\partial = f(I_{\alpha}, d_s)$, позволяющие назначать соотношение между силой сварочного тока и напряжением на дуге, обеспечивающее заданный вид переноса электродного металла.

При сварке плавящимся электродом в аргоне часто применяют струйный перенос электродного металла, который характеризуется силой критического тока $I_{кр}$. Получены соотношения $U\partial = f(I_{\alpha}, I_{кр})$ с эмпирически определенными коэффициентами, описывающие границы области капельного без коротких замыканий и струйного переноса. На основании анализа величин, характеризующих струйный перенос электродного металла, получены КП, описывающие связь между плотностью металла электродной проволоки γ , его температурой плавления $T_{пл}$, скрытой теплотой плавления H и удельным электрическим сопротивлением ρ ; а также размерами электрода L_s , d_s и поверхностным натяжением σ металла в газовой среде

$$\pi_3 = \frac{I^2 \rho}{\sqrt{H \cdot L_s^2} \cdot \sigma}, \quad (22)$$

$$\pi_{12} = \frac{4L_s^2 \cdot \gamma H}{\pi d_s^2 \cdot \sigma}. \quad (23)$$

Экспериментально определены коэффициенты уравнения, связывающего указанные критерии при сварке в аргоне проволоками Св-08Г2С, Св-06Х18Н9Т, а также из алюминиевых сплавов и меди. После преобразования регрессионной зависимости получили выражения для расчета силы критического тока. Например, для Св-08Г2С выражение имеет вид

$$I_{кр} = \sqrt{e^{12,801} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_s^2}{4 \cdot \gamma} \right)^{0,741} \cdot \frac{\sigma^{1,741}}{\rho \cdot L_s^{0,223} \cdot H^{0,241}}}. \quad (24)$$

Глава 4. Разработка математических моделей и алгоритмов расчета оптимальных параметров режима сварки

Посвящена определению критериев оптимальности и использованию их для построения карт качества, разработке математических моделей, методов и алгоритмов расчета оптимальных параметров режима в допустимой области их изменения.

Каждая операция дуговой сварки может быть описана взаимосвязью векторов внешних Q , внутренних X , в том числе, управляемых параметров P , $P \subset X$, и выходных параметров Y . Приняли за управляемые параметры $P = \{I_{\alpha}, U_{\alpha}, V_{\alpha}, d_s, L_s\}$. Выходные параметры Y характеризуют свойства продукта операции. Выделим среди них векторы геометрических G , структурных S и механических M свойств $Y = \{G, S, M\}$. Вектор M задается механическими свойствами $M = \{\sigma_b, \sigma_T, \delta, \psi, KCU, HB \dots\}$. Вектор геометрических свойств G сварного соединения задается геометрическими размерами сварного соединения $G = \{h, e_w, g, \dots\}$. Структурный состав ЗТВ – мартенсит, бейнит, феррит, перлит и

аустенит – составляет вектор $S = \{M, B, \Phi, P, A\}$. Соответствие выходных параметров техническим требованиям (ТТ) определяет качество изделия

$$G \subset TT_G, S \subset TT_S, M \subset TT_M. \quad (25)$$

TT_G для вектора геометрических свойств G является соответствующий государственный или отраслевой стандарт. Тогда имеет место функциональная зависимость

$$Y = f(X, Q). \quad (26)$$

Очевидно, что для любой технологической операции существует множество таких функциональных зависимостей, которые обеспечивают выполнение равенства $Y = TT \pm \Delta$ в пределах допустимых отклонений Δ и области работоспособности РД пространства управляемых параметров, т.е. $P \subset PD$.

Введя функционалы $\Phi_1(P)$ и $\Phi_2(Y)$, определяющие, соответственно, технологию и ее результат, можно сформулировать задачу нахождения оптимальной технологии следующим образом

$$\begin{aligned} \Phi_2(Y) \rightarrow \min(\max), \\ \text{при условии } P \subset PD. \end{aligned} \quad (27)$$

где $\Phi_2(Y)$ – функция цели (ФЦ), а условие – ограничение на область изменения управляемых параметров.

В случае i -того сечения функционалов $\Phi_1(P)$ и $\Phi_2(Y)$ имеем

$$\begin{aligned} f_0(G, S, P) \rightarrow \min(\max), \\ f_i(P) = 0, f_i(P) \leq 0. \end{aligned} \quad (28)$$

Качество сварных конструкций имеет два аспекта – соответствие размеров сварного соединения требованиям конструкторской документации, ТТ, а также отсутствие разного рода дефектов, таких как подрезы, прожоги, непровары, горячие и холодные трещины и некоторые др.

Соответствие размеров устанавливается государственными стандартами на сварные соединения. Полученные в работе зависимости между размерами сварного шва и параметрами режима использованы для построения расчетных областей качества сварных соединений и выбора по ним оптимальных параметров режима сварки.

С применением теории ошибок показано, что полученные критериальные выражения вида (4), (5) с использованием функциональной зависимости $U\delta = f(I_{\text{св}})$, а также выражение для расчета высоты выпуклости g с применением полученных в работе зависимостей – для расчета ширины шва e_m (5), для расчета коэффициента расплавления электродной проволоки (21), выражения для расчета ее потерь на угар и разбрызгивание Ψ_n , а также значения коэффициента полноты выпуклости μ_b и поперечной усадки Δb

$$g = \frac{\alpha_p I_{\text{св}} (1 - \Psi_n)}{\gamma V_{\text{св}} \mu_b e_m} - \frac{h(b - \Delta b)}{\mu_b e_m} \quad (29)$$

позволяют с учетом дисперсии параметров режима достаточно точно рассчитывать размеры шва при сварке в защитных газах.

Рассматривали частные критерии оптимальности G для стыковых однопроходных соединений ГОСТ 14771 при сварке в углекислом газе в нижнем положении – по глубине проплавления, ширине шва и высоте выпуклости, которые в общем виде записываются как

$$\Delta G_i = G_i^{ГОСТ} - (G_i \pm \delta G_i), \quad (30)$$

где $G_i^{ГОСТ}$ – значение размера шва, заданное стандартом или ТУ, G_i – рассчитанное значение размера шва по (4), (5) или (29), δG_i – доверительный интервал расчетной величины G_i при заданной доверительной вероятности определяется ее дисперсией. Последнюю определяли методами теории ошибок.

На рис. 7 приведена область формирования шва соединений С2 ГОСТ 14771 $s=4$ мм в координатах $I_{св}(A)-V_{св}$ (см/с), оцениваемая по частному критерию глубина проплавления с 95%-ной доверительной вероятностью, на котором прожог отражается отрицательными значениями Δh , непровар – положительными Δh , а качественное соединение С2 по этому критерию будет формироваться в диапазоне режимов, ограниченном функциями $\Delta h = 0$. Пресечение областей качества каждого из частных критериев оптимальности дает область качественного формирования.

В работе применены комплексные КО, связывающие размеры шва. Среди них выделяются технологические критерии, например, коэффициенты формы проплавления, формы валика (выпуклости), перекрытия корня шва. Такой подход позволяет разрабатывать оптимальные режимы сварки как по геометрическим размерам, определяемым государственными стандартами на сварные соединения, так и по таким показателям, как концентрация напряжений, свариваемость и потери присадочного металла.

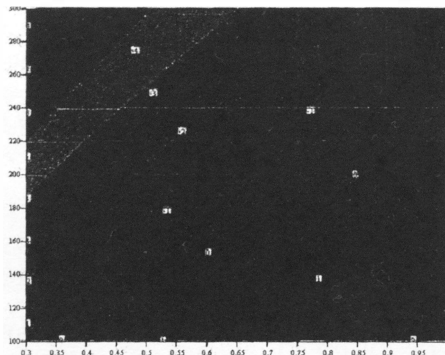


Рис. 7. Область $I_{св}-V_{св}$ формирования соединения С2 по частному критерию глубины проплавления при доверительной вероятности 95%: $s=4$ мм, $b=1$ мм, $d=1,2$ мм, ---- - расчет по $\Delta h = s - (h + \delta h)$, сплошная линия - по $-\Delta h = s - (h - \delta h)$

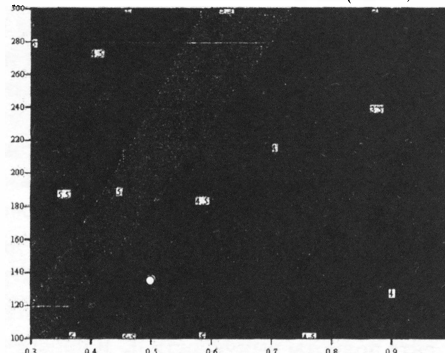


Рис. 8. Область $I_{св}-V_{св}$ формирования соединения С2 по ККО формы проплавления и формы выпуклости при доверительной вероятности 95%: $s=4$ мм, $b=1$ мм, $d=1,2$ мм, ---- - расчет ψ_{np} , сплошная линия - ψ_s

Вторая методика использует комплексные критерии оптимальности (ККО), такие как коэффициенты формы проплавления и формы выпуклости. Построение областей формирования швов по каждому из них ведется с использованием выражений (4), (5) и (29), с учетом дисперсии параметров режима на заданном уровне доверительной вероятности (рис. 8). Пресечение областей качества каждого из ККО дает область качественного формирования по двум критериям. Принимая для соединений С2 диапазоны изменения ККО $2 \leq \psi_{\text{пр}} \leq 5$ и $5 \leq \psi_{\text{в}} \leq 12$, можно определить область режимов, обеспечивающих качественное формирование. Совместное применение перечисленных ККО обеспечивает более быстрое определение оптимальных параметров режима, чем при использовании ЧКО. Экспериментальное исследование полученных оптимальных параметров режима было выполнено для точки, отмеченной на рис. 8 кружком.

Экспериментальная проверка полученных с помощью разработанных методик оптимальных параметров режима показала хорошее совпадение рассчитанных ККО и ЧКО с экспериментальными значениями, что позволяет рекомендовать разработанные критериальные выражения и методики построения областей режимов качественного формирования для практического применения.

В работе показано, что технологические задачи, возникающие при подготовке производства сварных конструкций, могут быть сформулированы как математические задачи нелинейного программирования, в которых ФЦ и ограничения являются нелинейными относительно ПР сварки. В соответствии с классической теорией оптимизации, предполагая, что функции вида $f_0(G, S, P)$ непрерывны и дифференцируемы, использовали метод множителей Лагранжа для расчета оптимальных параметров режима сварки.

Применение методики показано, в частности, на распространенной при сварке и наплавке задаче получения качественного шва при минимальном времени процесса. Постановка задачи оптимизации при сварке: найти минимальное время заполнения разделки кромок сварного соединения при наличии некоторого набора ограничений. В качестве последних могут выступать требования обеспечения заданных h или скорости охлаждения ω , или формы проплавления и т.п. Причем перечисленные ограничения должны быть учтены как раздельно, так и в совокупности. За оптимизируемую величину приняли основное время сварки или наплавки, т.е. время горения дуги.

Математический формализм указанной задачи - минимизировать основное время при сварке соединений с разделкой кромок при обеспечении заданной глубины проплавления предыдущего слоя h . Дальнейшие рассуждения распространяются также на операцию наплавки. Рассматривая сварное соединение с разделкой кромок длиной L площадью поперечного сечения F , заполняемое за N проходов, получили ФЦ вида $t = \frac{F \eta L}{\alpha_p N}$. Ограничение на глубину

проплавления h установили в виде равенства аналогичному (4). Видно, что оп-

тимизируемая функция $t = \frac{F\gamma L}{\alpha_p N}$ и ограничение являются функцией одних и тех

же управляемых переменных, а именно – I_{ce} , U_d , V_{ce} , d_s .

На практике на управляемые переменные U_d и V_{ce} накладываются технологические ограничения. Связь между I_{ce} и U_d устанавливали по полученной в работе зависимости. Скорость сварки ограничивается с одной стороны минимально возможным значением $V_{ce\min}$, обеспечиваемой оборудованием или сварщиком при полуавтоматической сварке, или вероятностью образования дефектов шва типа наплывы, с другой – максимально возможным значением $V_{ce\max}$, обеспечиваемой оборудованием или сварщиком, или вероятностью образования дефектов шва типа подрезы и несплавления

$$V_{ce\min} < V_{ce} < V_{ce\max} \quad (31)$$

Аналогично, на силу сварочного тока накладывают ограничения, связанные с устойчивостью горения дуги, формированием шва и техническим возможностям сварочного оборудования

$$I_{ce\min} < I_{ce} < I_{ce\max} \quad (32)$$

После преобразования ограничений вида (31-32) к виду равенств с помощью избыточных переменных i и v поставленная задача принимает вид

$$\begin{aligned} Nt &= \frac{S\gamma L}{I_{ce}^{1,32} d_s^{-0,44} I_{ce}^{1,32}} \rightarrow \min \\ \text{при условии} \\ e^{-3,676} a^{0,451} \left(\frac{\eta}{T\lambda} \right)^{1,098} \left(\frac{I_{ce} U_d}{\sqrt{d_s}} \right)^{1,098} V^{-0,451} - h &= 0 \\ I_{ce\max} - I_{ce} - i_1^2 &= 0 \\ I_{ce} - I_{ce\min} - i_2^2 &= 0 \\ V_{ce} - V_{ce\min} - v_2^2 &= 0 \\ V_{ce\max} - V_{ce} - v_1^2 &= 0 \end{aligned} \quad (33)$$

В случае невозможности свертки вектора КО разработана ФЦ, которая в общем виде представляется средствами исчисления предикатов и логики первого порядка

$$K_{np1} \wedge K_{s1} \wedge K_{np2} \wedge K_{s2} \wedge K_{пк} \wedge K_{п} \rightarrow \Phi, \quad (34)$$

где $K_{np1,2}$, $K_{s1,2}$, $K_{пк1,2}$, $K_{п}$ – предикаты, представляющие с первой и второй стороны соединения ККО – коэффициенты формы проплавления, формы выпуклости, перекрытия корня шва и дополнительный ЧКО – коэффициент потерь электродного металла на разбрызгивание, Φ – высказывание «шов качественный»; $\wedge$ – логическая связка «и».

Полученная логическая формула принимает значение «истина», если каждый предикат, входящий в нее, истинен. Из полученной логической формулы следует, что достигнут экстремум функции цели, если при текущих значениях размеров шва и потерях на разбрызгивание формула истинна. Для реализации поисковой оптимизации определены управляемые параметры, наложены ограничения на область их изменения и разработаны алгоритмы.

Математические модели в этом случае имеют вид системы уравнений, среди которых выражения вида (4), $U\delta = f(I_{cs}, d_s)$ и

$$F_n = \frac{\alpha_p \cdot I_{cs} \cdot (1 - \psi_n)}{\gamma \cdot V_{cs}}, \quad (35)$$

где α_p задается по (21), ψ_n – по выражению, полученному в работе.

Формирование систем с различным числом уравнений необходимо в тех случаях, когда известны какие-либо ПР. Например, при технологической подготовке производства часто назначают d_s по толщине свариваемого металла или катету, поэтому для расчета I_{cs}, U_δ, V_{cs} требуется система трех уравнений. В случае полуавтоматической (механизированной) сварки можно принять $V_{cs} = 7 \dots 8$ м/ч, а для определения I_{cs}, U_δ при заданном диаметре электродной проволоки d_s потребуется система двух уравнений, однако всегда требуется выражение вида $U\delta = f(I_{cs}, d_s)$.

Для алгоритмизации расчета режима типы соединений, соответствующие ГОСТ 14771-76, а также нестандартные разбили на две группы. К первой группе отнесли типы соединений, расчет которых ведут с использованием как исходного параметра F_n : это угловые швы типа Т, Н, а также корневые проходы многопроходных соединений. Вторую группу образуют стыковые сварные соединения без разделки кромок: С2, С4 – С6, С7 ГОСТ 14771-76. Исходной величиной для расчета ПР в этом случае является h , которая задается по геометрическим размерам соединения.

Разработана модель для расчета параметров режима сварки на весу. Статическое равновесие шва в этом случае определяется равенством нулю суммы давлений, действующих на свободную поверхность сварочной ванны: гидростатического давления гравитационных сил, давления Лапласа сил поверхностного натяжения, давления дуги (электродинамических сил).

Рассматривали двумерную задачу – ввели декартовы координаты: ось Х расположена в плоскости, перпендикулярной вектору скорости сварки, и совпадает с нижней плоскостью сварного соединения. Ось Y расположена в той же плоскости и совпадает с осью симметрии шва. Задав шись кривыми, описывающими форму верхней и нижней поверхностей шва $y_i(x)$, где $i=1$ – со стороны дуги (верхняя), 2 – со стороны корня шва (нижняя), определили требования к уравнениям поверхностей, вытекающие из геометрии шва соединения С2

$$y_1\left(\pm \frac{e_w}{2}\right) = s, y_2\left(\pm \frac{e_w}{2}\right) = 0, \frac{\partial y_i(0)}{\partial x} = 0, \quad (36)$$

$$\int_0^{\frac{e_w}{2}} y_1(x) - \int_0^{\frac{e_w}{2}} y_2(x) = \frac{e_w \cdot s}{2}, \quad (37)$$

$$e_w \cdot s = \frac{1}{\gamma \cdot H} \cdot \eta_{np} \cdot \frac{I_{cs} \cdot U_\delta}{V_{cs}}. \quad (38)$$

В случае расчета сварки плавящимся электродом модель дополнена равенством (35), определяющим площадь наплавки F_n .

Накладывая на ПР технологические ограничения прямые (31) – (32) и функциональные вида $U\partial = f(I_{ca}, d_s)$, получили математическую модель в виде системы уравнений и неравенств, включающей зависимости (40) – (42) и уравнение, вытекающее из равенства нулю равнодействующей сил, приложенных к ванне жидкого металла

$$\int_0^{\frac{x_n}{2}} \left(\sigma K_1 + \sigma K_2 - \frac{(P_{cm} + P_{дин})e^{-k_s x^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy_1(x)}{dx}\right)^2}} - g\gamma(y_1(x) - y_2(x)) \right), \quad (39)$$

где $K_{1,2}$ – кривизна соответственно верхней и нижней поверхности; P_{cm} – максимальное избыточное давление по оси дуги, создаваемое статической силой; $P_{дин}$ – давление, вызванного газодинамической силой.

Разработан алгоритм расчета параметров режима корневого прохода многопроходных соединений, который основан на учете количества тепла, необходимого для расплавления известной площади основного металла сварного соединения F_{np} , и количества электродного металла, необходимого для образования известной площади наплавки F_n .

Поиск оптимальных значений ПР ведут в итерационном режиме изменяя значения управляемых параметров: зазора в стыке b , глубины проплавления h и вылета электрода, до тех пор, пока ФЦ вида (34) не будет истинной. Изменение управляемых параметров происходит в допустимых областях, ограниченных или физической осуществимостью процесса сварки, или технологией. Фотографии макрошлифов некоторых контрольных соединений, выполненных на рассчитанных режимах приведены на рис.9.

Наиболее простой и эффективный способ снижения склонности металла сборочно-сварочной единицы (ССЕ) к холодным трещинам состоит в регулировании термического цикла путем определения оптимальных параметров режима сварки и температуры предварительного подогрева. Это положение позволяет принять ПР в качестве управляемых параметров.

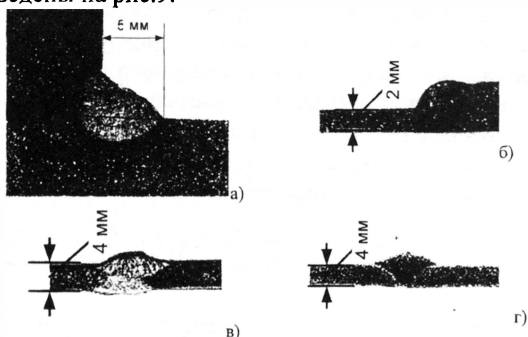


Рис.9. Внешний вид структуры контрольных соединений ГОСТ 14771: а) тип Н1, увеличено; б) тип Н1, увеличено; в) соединение типа С7, г) тип С2

Требования обеспечения заданных механических свойств ЗТВ свели к требованию обеспечения заданного структурного состава металла.

Тогда оптимизационная задача технологии сварки низколегированных сталей может быть сформулирована следующим образом: минимизировать содержание мартенсита в структуре металла ЗТВ при обеспечении заданных размеров шва и исключении других дефектов.

Таким образом, при расчете параметров режима стыковых соединений без разделки кромок минимальное содержание мартенсита принимаем за глобальный критерий оптимальности, глубина проплавления h служит условием связи. В случае расчета параметров режима углового шва без разделки кромок минимальное содержание мартенсита принимаем за глобальный критерий оптимальности, а катет шва служит условием связи.

Учитывая, что доля мартенсита зависит от химического состава свариваемой стали X и термического цикла, который в свою очередь зависит от параметров режима P , размеров свариваемой ССЭ и положения дуги как источника теплоты на ССЭ, задаваемых вектором G_n , за функцию цели принимаем величину объемной доли мартенсита, определяемую функционалом, который необходимо минимизировать

$$V_M = F(T(P, G_n), f(X, T, \tau)) \quad (40)$$

при условии, что

$$F(P) - h = 0, I_{св\min} < I_{св} < I_{св\max}, V_{св\min} < V_{св} < V_{св\max}, U_d = a_1 \cdot J_{св}^{a_2}. \quad (41)$$

Здесь $T(P, G_n)$ - функция, определяющая температурное поле в свариваемом изделии; $f(X, T, \tau)$ - функция структурного состава ЗТВ, зависящая от химического состава свариваемого металла и изменения температурного поля во времени.

В случае расчета режима сварки углового шва с катетом k условие связи принимает вид

$$\sqrt{\frac{\alpha_p J_{св}}{\gamma V_{св}}} - k = 0. \quad (42)$$

В качестве функции $T(P, G_n)$ приняли зависимости (12)-(13), функция $f_s(X, T, \tau)$ представлена уравнениями (14)-(19), что позволило реализовать нахождение условного экстремума функционала (40) с помощью алгоритма поисковой оптимизации.

Глава 5. Разработка систем автоматизированного проектирования технологии сварки

Посвящена разработке методик и алгоритмов синтеза структуры технологического процесса изготовления сварных конструкций и определения последовательности сборки сварных деталей машин; дается оценка экономической целесообразности применения САПР ТП, сформулированы принципы создания САПР ТП и цели ее работы, приводится пример функционирования разработанной САПР ТП.

Синтез структуры технологического процесса, т.е. состава операций и их последовательности, это один из наиболее важных и сложных вопросов технологических САПР. Формализацию процесса определения маршрута изготовления изделия, последовательности сборки и сварки с выделением подузлов проводили с помощью теории графов.

Для синтеза структуры ТП применен метод, основанный на понятии ИЛИ-дерева и предназначенный для создания частной структуры из общей. Общую структуру образует заранее составленное ИЛИ-дерево, а частные структуры образуются путями от корневой вершины через вершины типа ИЛИ к висячим узлам (листьям). Альтернативные варианты реализации каждой части маршрута порождают вершину типа ИЛИ.

Разработан также алгоритм формирования маршрута изготовления ССЕ с использованием бинарных отношений между технологическими операциями. В результате анализа бинарных отношений формируют матрицу, которая является матрицей смежности вершин орграфа. Далее, применяя известный алгоритм Фаулкса, определяют маршрут изготовления ССЕ.

В работе предлагается решение задачи определения последовательности сборки с использованием графовых моделей сварных конструкций. При разработке указанных моделей на данном этапе работы не рассматривали вопрос влияния последовательности сборки на деформацию сварной конструкции.

Установлено, что в рассмотренных графах локальная степень графа в вершине показывает количество сварных соединений между данной деталью, замещенной вершиной α , и остальными деталями ССЕ. Анализ полученных графов, значений их локальной степени и известной технологии сварки позволил сформулировать правила, дающие возможность определить базу сборки и последовательность сборки деталей машин.

Показано, что предлагаемые методики расчета ПР, являющиеся математическим обеспечением САПР ТП, обеспечивают в 1,3...1,8 раза более производительные процессы, чем известные. Кроме того, расход сварочной проволоки при использовании рассчитанных режимов ниже в 1,5...1,8 раза. Сравнение рассчитанного расхода сварочной проволоки с нормативами показало, что расчетные режимы позволяют экономить от 20 до 40% проволоки. Это говорит об экономической целесообразности применения САПР ТП на производстве.

Сформулированы принципы создания САПР ТП и цели ее работы. При разработке САПР ставили целями ее применения: повышение качества сварных конструкций; повышение производительности труда, как в сфере производства, так и в сфере ТПП; сокращение потерь сварочных материалов; повышение качества ТПП.

Для достижения поставленных целей в основу работы САПР положены следующие принципы.

Все задачи САПР ТП решаются математическими методами с минимальным привлечением опыта инженера-технолога в диалоговом режиме.

САПР ТП должна обеспечить решение обратной задачи технологии – расчет оптимальных ПР по свойствам сварного соединения с ограничениями

технологического и технического характера. Источником исходных данных для системы являются чертеж ССЕ и ТТ. Результат работы САПР ТП – технология изготовления ССЕ с оптимальными параметрами режима сварки.

При создании САПР ТП необходимо применять компьютерную технологию «клиент-сервер», что позволяет в полной мере использовать высокую производительность ЭВМ, низкий сетевой трафик, встроенные средства безопасности и целостности данных. Модель вычислений «клиент-сервер» позволяет также организовать одновременную работу с САПР над одним проектом нескольких пользователей, что обеспечивает включение САПР в информационную среду предприятия и доступ к результатам проектирования технологии из других подсистем, например, материального снабжения, нормирования и заработной платы.

Как правило, на предприятиях применяют различные способы дуговой сварки, поэтому необходимо разрабатывать универсальные САПР ТП. Свойство универсальности призвано обеспечить применение САПР ТП для разработки ТД изготовления стальных конструкций широкой номенклатуры по способам сварки, типам соединений и материалам.

В зависимости от традиций предприятия и условий производства комплект ТД может включать различные виды технологических документов. В связи с этим разрабатываемые САПР ТП должны быть многофункциональными. Свойство многофункциональности дает возможность применять их для разработки операционных, маршрутных и маршрутно-операционных карт, а также для моделирования различных производственных ситуаций.

Очевидно, что разработка САПР ТП только сварочных операций нецелесообразна. Для реального производства сварных конструкций применяются операции многих переделов, поэтому для охвата всего производственного цикла необходимы комплексные САПР ТП. Для обеспечения комплексности САПР ТП должны иметь средства разработки технологии изготовления сварных конструкций с применением заготовительных операций, механообработки, термообработки, сборки, контроля, сварки и наплавки и др.

Создание операционной технологии с помощью САПР ТП состоит из следующих шагов. На первом этапе идентифицируют разрабатываемый ТП путем описания сборочного узла: наименование, агрегат, заказчик, номер чертежа, фамилия разработчика ТП и некоторые др. Каждому разрабатываемому ТП присваивается уникальный номер.

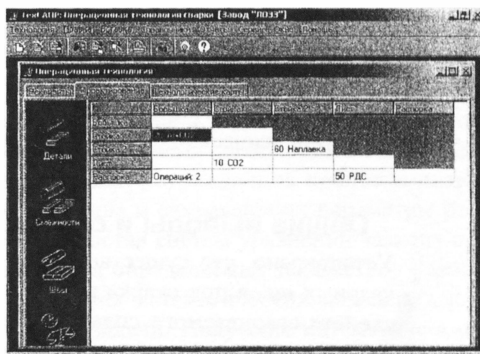


Рис. 10. Экран работы САПР ТП на этапе определения связей между деталями

На втором этапе описывают детали, входящие в узел (наименование, номер по чертежу, номер чертежа, марка стали, вес). Первый и второй этапы могут быть осуществлены как средствами САПР, так и средствами связанных с ней систем (например, конструкторских) путем передачи известных данных.

Определение связей между деталями и формирование матрицы смежности осуществляют на третьем этапе (рис. 10). Здесь для сварочных операций задают способ сварки, определяют стандарт сварного соединения и его тип (рис. 11); в случае нестандартного соединения относят его к подобному стандартному и задают размеры подготовленных кромок и сварного шва. На основе данных о способе сварки и марках применяемых в ССЕ сталей система автоматически подбирает сварочные материалы. Затем рассчитывают ПР.

По параметрам режима и размерам шва рассчитывают нормы расхода сварочных материалов, нормы времени. Оборудование автоматически подбирается из базы данных заданного цеха-исполнителя текущей операции. Переходы и инструмент автоматически определяются и заносятся в генерируемый технологический документ.

Сгенерированный технологический документ сохраняется в электронном архиве и может использоваться как ТП-аналог для разработки новых ТП. Архив также используют для создания производственных отчетов, включая ведомости расхода материалов.

Разработанные САПР ТП применялись при ТПП изделий на различных предприятиях. Применение САПР позволяет повысить технологическую дисциплину и качество сварных конструкций, а также сократить сроки и повысить качество технологической подготовки производства.

Общие выводы и основные результаты работы

1. Установлено, что существенными параметрами процесса формирования сварных швов при сварке в защитных газах в нижнем положении кроме свойств свариваемого сплава (теплопроводности, температуропроводности, температуры плавления) и свойств источника теплоты (мощности его теплового потока, диаметра пятна нагрева, оцениваемого диаметром электродной проволоки, и скорости его перемещения), являются свойства плазмы сварочной дуги: ее средняя температура, теплосодержание, теплопроводность и транспортное сечение рассеяния электронов на атомах и

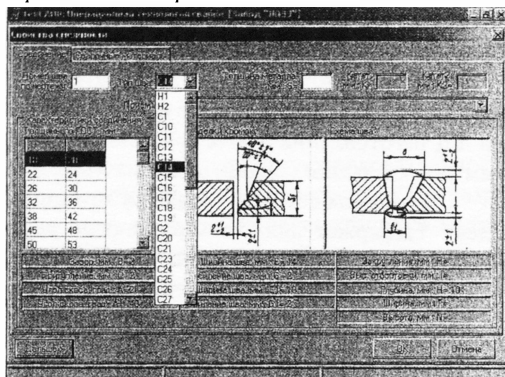


Рис. 11. Экран назначения типа соединения сварного шва

молекулах. Получены критерии подобия, содержащие перечисленные существенные параметры, и аналитические выражения с экспериментально определенными коэффициентами, связывающие критерии подобия и позволяющие решать прямую задачу – рассчитывать размеры сварного шва при наплавке и сварке с зазором по заданным параметрам режима, зазору и составу газовой защиты.

2. Экспериментально определены закономерности изменения температуры плазмы сварочной дуги смесей $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ (содержание O_2 до 40%), $\text{Ar} + \text{CO}_2$ (содержание CO_2 до 40%) и $\text{Ar} + \text{O}_2$ (содержание O_2 до 15%). Установлено, что имеет место обратно пропорциональное влияние сечения рассеяния электронов на атомах и молекулах $\sqrt{\sigma_s}$ на электронную, а учитывая квазинейтральность низкотемпературной плазмы сварочной дуги, - на среднюю температуру плазмы сварочных дуг, горящих в смесях газов. Величина σ_s кислорода, углекислого и угарного газов выше, чем аргона, а σ_s кислорода выше, чем углекислого газа, поэтому электронная температура и, следовательно, температура смеси $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ снижается с ростом содержания кислорода, аналогично объясняется снижение температуры смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$ и $\text{Ar} + \text{O}_2$ с ростом содержания CO_2 и O_2 соответственно. Снижение температуры во всех случаях составляет ~40K на каждый объемный процент примеси. При 40% CO_2 в смеси падения температуры плазмы не происходит по сравнению с плазмой смеси $\text{Ar} + 20\%\text{CO}_2$.
3. Установлено, что существенными параметрами процесса образования струйного переноса электродного металла при сварке в аргоне являются свойства сплава анода: его поверхностное натяжение в газовой среде, плотность; удельное электрическое сопротивление и скрытая теплота плавления, а также его размеры – диаметр и длина вылета. Получены критерии подобия, содержащие перечисленные существенные параметры, и аналитическое выражение с экспериментально определенными коэффициентами, связывающее критерии подобия и позволяющее рассчитывать силу критического тока для различных материалов электродной проволоки и ее размеров.
4. Установлено, что для решения обратной задачи – расчета оптимальных параметров режима дуговой сварки плавлением - необходимы математические модели в виде системы уравнений, отражающих процессы плавления основного и электродного металла и связывающих параметры режима с критериями оптимальности. Состав систем уравнений зависит от типа свариваемого соединения и числа определяемых параметров режима. Разработана методика формирования математических моделей, дающих возможность решения обратной задачи. Получены математические модели, включающие зависимости формирования швов и плавления электрода от параметров режима и позволяющие рассчитывать оптимальные параметры режима сварки сварных соединений ГОСТ 14771 в нижнем положении по заданным критериям оптимальности.

5. Установлено, что технологические задачи, возникающие при подготовке производства сварных конструкций, формулируются как математические задачи нелинейного программирования, в которых функция цели и ограничения являются нелинейными относительно параметров режима. За функцию цели принимают какой-либо критерий оптимальности в виде функции многих переменных, среди которых – параметры режима сварки. Остальные критерии оптимальности используют как условия связи. На параметры режима накладывают ограничения в виде неравенств, описывая таким образом допустимую область их изменения. Алгоритм решения основан на методе множителей Лагранжа.
6. Разработана методика формирования критериев оптимальности сварных соединений ГОСТ 14771 из углеродистых и низколегированных сталей. Установлено, что качество сварного соединения описывается набором из частных критериев оптимальности (ЧКО), комплексных критериев оптимальности (ККО), а также дополнительными частными критериями – содержанием мартенситных структур в ЗТВ и потерь электродного металла на разбрызгивание. Частные критерии оптимальности такие, как глубина проплавления, ширина шва, высота усиления и ККО перекрытия корня шва позволяют оценить по заданным параметрам режима вероятность таких дефектов, как непровары и прожоги, а также определить величину отклонения от стандартных размеров сварного шва. Комплексные критерии оптимальности (коэффициенты формы проплавления, формы выпуклости) позволяют оптимизировать форму проплавления, снизить вероятность образования горячих трещин, а также снизить концентрацию напряжений в месте перехода основного металла к выпуклости. Дополнительный частный критерий оптимальности – содержание мартенсита в структуре – дает возможность снизить склонность сварного соединения к холодным трещинам. Дополнительный критерий оптимальности - коэффициент потерь электродного металла на разбрызгивание при сварке с использованием тиристорных источников питания позволяет снизить потери электродного металла путем выбора области сварочных токов с минимальными заданными потерями.
7. Разработан метод прогнозирования структуры ЗТВ при сварке однопроходных соединений, базирующийся на полученных в работе аналитических выражениях, определяющих скорость образования центров новой фазы и скорость движения межфазной границы с коэффициентами, определяемыми по диаграммам распада аустенита. Установлено, что точность расчета термического цикла в ЗТВ при дуговой сварке плавлением повышается путем учета выделения теплоты жидким металлом сварочной ванны и кристаллизующимся металлом, прилегающим к хвостовой части сварочной ванны, ранее полученной ими от сварочной дуги.
8. Анализом экспериментально полученных зависимостей между критериями подобия Хартмана и давления дуги установлено, что магнитное поле сварочного тока существенно влияет на устойчивость движения жидкого

металла сварочной ванны. Показано, что энергия магнитного поля в случае образования несплавлений и подрезов не превышает, а при качественном формировании превышает кинетическую энергию движущегося потока металла. Область образования дефектов формирования шва типа подрезы и несплавления швов независимо от способа сварки и параметров режима описывается функцией критериев Хартмана и Кристенсена. Получено аналитическое описание распределения напряженности магнитного поля в свариваемом изделии и формула для расчетного определения параметров режима сварки, обеспечивающих качественное формирование сварных швов в форсированной области.

9. Разработаны методики расчета оптимальных параметров режима сварки соединений с подготовкой кромок по ГОСТ 14771-76, основанные на математических моделях в виде систем уравнений и функции цели, включающей критерии оптимальности, которые определяют качество сварного соединения. Алгоритм реализует итерационный метод поиска оптимума функции цели, за которую принят комплекс критериев оптимальности.
10. Разработана методика расчета оптимальных параметров режима сварки углеродистых и низколегированных сталей, обеспечивающих минимальное содержание закалочных структур в ЗТВ при соответствии размеров шва требуемым. Алгоритм реализует итерационный метод поиска оптимума функции цели, за которую принято допустимое содержание мартенситных структур в зоне термического влияния. Уравнением связи используют заданные размеры шва, например глубину проплавления, как функцию параметров режима.
11. Разработано математическое и информационное обеспечение систем автоматизированного проектирования технологии. Разработаны алгоритмы структурного синтеза – определения состава и последовательности технологических операций и эмпирические правила, основанные на анализе свойств графов сварных деталей машин и пригодные для автоматизированного проектирования последовательности сборки и сварки деталей машин. Разработанные структура, алгоритмы реализованы в системах автоматизированного проектирования технологии сварки, в которые включены модули параметрического синтеза, анализа и оптимизации, а также структурного синтеза. Разработанные системы автоматизированного проектирования технологии сварки внедрены и используются при технологической подготовке сварочного производства, а также в учебном процессе при подготовке инженеров и магистров.

Основное содержание диссертации отражено в работах

1. Бабкин А.С. Расчет и оптимизация параметров режима дуговой сварки металлов: Монография. – Липецк: ЛГТУ, 2003. – 216 с.

2. Бабкин А.С. Методы решения задач в технологических САПР сварочного производства // Сварочное производство. – 1996. - №4. – С.20-23.
3. Бабкин А.С., Епифанцев Л.Т. Методики расчета оптимальных параметров режима сварки // Сварочное производство. – 2004. - №2. – С. 3-6.
4. Бабкин А.С. Применение теории подобия и размерности для описания процессов, происходящих при сварке // Сварочное производство. – 2005. - №7. – С.6-13.
5. Бабкин А.С. Уточнение коэффициентов и постоянных величин при расчете режимов сварки и наплавки в углекислом газе // Сварочное производство. – 2005. - №3. – С.7-9.
6. Бабкин А.С. Влияние зазора и параметров режима сварки на размеры шва // Сварочное производство. – 2005. - №11. – С.3-9.
7. Коробейников С.Н., Бабкин А.С. Исследование и моделирование формирования структуры ЗТВ низколегированных сталей // Сварочное производство. – 2009.- №11. – С. 3-9.
8. Коробейников С.Н., Бабкин А.С. Алгоритм расчета оптимальных параметров режима сварки низколегированных сталей // Сварочное производство. – 2009.- №12.- С. 13-15.
9. Бабкин А.С., Голубев В.А., Рошупкин В.Н. Исследование влияние состава газовых смесей на температуру плазмы сварочной дуги // Сварочное производство. – 2008. - №7. – С.3-9.
10. Бабкин А.С. Расчет величины критического тока при сварке в аргоне // Автоматизация и современные технологии. – 2005. - № 8. – С.16-22.
11. Бабкин А.С. Разработка САПР комплекса технологических документов сборки-сварки с применением СУБД реляционного типа // Сварочное производство. – 1996. - №1. – С. 24-26.
12. Кривошея В.Е., Бабкин А.С. Проектирование в диалоговом режиме на ЭВМ технологических процессов сварки в углекислом газе // Автоматическая сварка. – 1990. - №1. – С. 62-65.
13. Бабкин А.С., Костин А.А. САПР технологии сварки и наплавки, интегрированная в АСУ предприятия // Сварочное производство. – 2002. - №10. – С. 27-31.
14. Бабкин А.С. САПР маршрутной технологии изготовления изделий из конструкционной стали // Автоматизация и современные технологии – 2005. - №1. – С.16-21.
15. Бабкин А.С. Экспертные системы как средство повышения интеллекта САПР сварочного производства // Сварочное производство. – 1997. - №2. – С.27-29.