

На правах рукописи

Павлов Николай Викторович

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА  
СВАРКИ С УПРАВЛЯЕМЫМ КАПЛЕПЕРЕНОСОМ ЭЛЕКТРОДНОГО  
МЕТАЛЛА В СМЕСИ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2012

Работа выполнена на кафедре «Сварочное производство» Юргинского технологического института (филиала) Томского политехнического университета.

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент  
**Зернин Евгений Александрович**

Официальные оппоненты:

**Шанчуров Сергей Михайлович,**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО Уральский  
государственный лесотехнический  
университет, зав. кафедрой энергетики

**Фивейский Андрей Михайлович,**  
кандидат технических наук, ФГАОУ  
ВПО «Уральский федеральный  
университет имени первого  
Президента России Б.Н.Ельцина»,  
доцент кафедры технологии  
сварочного производства

Ведущая организация

ООО «Кузбасский центр сварки и  
контроля», г. Кемерово

Защита состоится 27 декабря 2012 г. в 14-30 на заседании диссертационного совета Д 212.285.10 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19 в ауд. М-323.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УрФУ.

Автореферат разослан 26 ноября 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Е.Ю. Раскатов

## **ОБЩАЯ ХАРКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность работы.** В настоящее время важнейшим условием совершенствования и интенсификации сварочного производства является не только развитие теоретических основ сварки с использованием новейших достижений в различных областях фундаментальных и прикладных наук, но и создание высокоэффективных методов и средств моделирования и имитации сварочных процессов.

Применение математических методов и математического моделирования сварочных процессов превратилось в мощный инструмент исследований и познания процессов, происходящих в сложных технологических системах, позволяющих не только получить формализованное описание их основных закономерностей, но и эффективно управлять ими. Математическое моделирование позволяет оптимизировать условия протекания процесса образования сварного соединения, предотвратить появление недопустимых дефектов сварных швов, соединений, конструкций и одновременно повысить производительность сварочных операций.

Математическим моделированием процессов при сварке в разное время занимались Башенко В.В., Березовский Б.М., Гладков Э.А., Демченко В.Ф., Демченко Л.И., Патон Б.Е., Походня Н.К., Рыкалин Н.Н., Судник В.А., Фролов В.В., Чернышов Г.Г., и др.

Существующие в настоящий момент математические методы и модели в основном созданы для широко используемых и глубоко изученных способов сварки (ручная дуговая сварка, механизированная сварка и автоматизированная сварка под слоем флюса). Однако при производстве сварных металлоконструкций все более широкое применение находят способы сварки с управляемым каплепереносом электродного металла.

Этой проблеме посвящены работы: Брунова О.Г., Бучинского В.Н., Вагнера Ф.А., Воропая Н.М., Дудко Д.А., Дюргерова Н.Г., Зарубы И.И., Князькова А.Ф., Лебедева В.К., Патона Б.Е., Подолы Н.В., Потапьевского А.Г., Сагирова Х.Н., Сараева Ю.Н., Сидорука В.С., Шигаева Т.Г. и многих других.

Данный способ можно осуществить с помощью нестационарных импульсных процессов, которые реализуются двумя основными способами: 1) управление переносом электродного металла, основанный на импульсном питании сварочной дуги; 2) механическое программирование перехода капли в сварочную ванну при помощи импульсной подачи сварочной проволоки.

Разнообразие способов реализации первого направления дает возможность получить практически любые алгоритмы изменения энергетических характеристик сварочной дуги. Применение обратных связей в подобных устройствах позволяет оценивать энергетическое состояние объекта управления и перейти к созданию адаптивных импульсных систем стабилизации процесса сварки в защитных газах. Вместе с тем данное направление имеет и свои недостатки, к которым можно отнести:

- сложность схемотехнических решений;

- более высокая стоимость по сравнению со стандартным оборудованием;
- наличие большого количества управляемых полупроводниковых элементов в силовой части и блоке управления делает их чувствительными к действию электромагнитных возмущений, и к качеству питающего напряжения электрической цепи.

Отмеченные недостатки серьезным образом затрудняют использование указанного оборудования при проведении ремонтных и сварочно-монтажных работ.

Второе направление, основанное на механическом программировании перехода капли в сварочную ванну при помощи импульсной подачи сварочной проволоки.

Процесс сварки с управляемым каплепереносом электродного металла имеет следующие преимущества:

- управление процессами плавления, переноса и кристаллизации металла независимо от пространственного положения сварочной ванны при значительно меньших средних значениях основных технологических параметров;

- управление скоростью кристаллизации сварочной ванны вследствие нестационарного энергетического воздействия источника нагрева на сварочную ванну;

- уменьшение степени деформационных процессов в сварных конструкциях.

Дальнейшее совершенствование способов сварки с управляемым каплепереносом электродного металла заключается в использовании в качестве защитного газа смеси аргона и двуокиси углерода ( $\text{Ar}+\text{CO}_2$ ), активно применяемой на производстве.

Сварка в смеси газов положительно сказывается на технологических свойствах сварочной дуги (повышая стабильность ее горения), происходит снижение размеров брызг и уменьшение потерь на разбрызгивание, уменьшается выпуклость шва.

Все это делает актуальной работу по созданию и применению математических моделей для определения технологических параметров процесса сварки с управляемым каплепереносом электродного металла в смеси защитных газов.

**Цель работы:** Получение качественного сварного соединения, за счет применения методов математического моделирования при определении технологических параметров процесса сварки с управляемым каплепереносом электродного металла в смеси газов ( $\text{Ar}+\text{CO}_2$ ).

**Для достижения поставленной цели сформулированы задачи работы:**

1. На основании исследования кинетики плавления и переноса электродного металла в условиях импульсно-дугового воздействия дать количественную оценку влияния параметров режима сварки и защитной газовой среды на получение стабильного управляемого переноса электродного металла.

2. Разработать адаптированные математические модели тепловых полей с учетом изменения длины дуги за один период каплепереноса электродного металла.

3. Разработать математическую модель изменения формы сварного соединения на основе детерминировано-статистического моделирования, устанавливающую зависимость размеров шва и наплавленного металла от величины зазора, параметров режима сварки и частоты подачи электродной проволоки.

4. Разработать алгоритм работы автоматизированной системы позволяющей проектировать специализированные приложения для расчета основных технологических параметров процесса сварки.

**Методы исследования.** Расчетные эксперименты выполняли на ЭВМ с использованием математического пакета MatLab и программ собственной разработки в среде Delphi. Видеофиксацию процесса переноса электродного металла осуществляли с помощью цифровой скоростной видеокамеры «Видео-Спринт» (максимальная скорость съемки 50000 кадров в секунду), регистрацию температурных полей осуществляли тепловизиционной аппаратурой (тепловизор ThermaCAM P65HS с частотой 1 кад/сек (формат кадра 320×240 элементов, температурная чувствительность  $-0,05^{\circ}\text{C}$ )). Параметры процесса сварки определяли цифровым регистратором «AWR54». Для исследования химического анализа использовали последовательный рентгенофлуоресцентный спектрометр LabCenter XRF-1800. Измерение механических испытаний производили в соответствии с требованиями ГОСТа 6996-66. Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием известных положений классических и прикладных наук, корректностью математических моделей и их адекватностью известным критериям оценки изучаемых процессов, сходимостью теоретических и экспериментальных данных, а также проверкой на производстве.

#### **Научная новизна работы.**

1. Выявлена зависимость влияния состава защитной газовой среды и импульсно-дугового воздействия на стабильность процесса каплепереноса электродного металла. Установлены граничные условия состава защитной газовой среды, которые позволяют расширить пределы регулирования энергетических параметров процесса сварки с управляемым каплепереносом электродного металла в смеси газов.

2. Созданы научно-обоснованные технические и технологические решения в области импульсно-дуговых технологий в смесях защитных газов, основанные на применении новых подходов к принципам математического моделирования основных технологических параметров процесса сварки.

3. В результате установленных особенностей воздействия энергетических параметров процесса сварки на образование капли электродного металла получены зависимости, позволяющие качественно и количественно оценить закономерности изменения распределения температурных полей на

поверхности изделия и скорости охлаждения на оси шва при сварке с управляемым каплепереносом электродного металла в смеси газов.

4. Разработан алгоритм работы автоматизированной системы, осуществляющей расчет основных технологических параметров процесса сварки. Впервые предложено осуществлять расчет на основе адаптированных математических моделей и алгоритмов расчета формы шва, изменения тепловых полей и скорости охлаждения зон сварного соединения для процессов сварки с управляемым каплепереносом электродного металла в смеси газов.

#### **Практическая значимость.**

Созданная методика для расчета основных технологических параметров сварки позволяет использовать ее:

- при создании источников питания с синергетическим управлением, обеспечивая оптимальный режим сварки, и поддерживать его в режиме реального времени в течение всего цикла формирования сварного шва;
- при проектировании технологических процессов сборки и сварки металлоконструкций.

Отдельные разделы диссертационной работы выполнялись в рамках программ и НИР:

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

2. Грант РФФИ. Проект 11-08-98052-р\_сибирь\_а «Управление тепловыми, кристаллизационными и металлургическими процессами, протекающими в сварочной ванне при импульсном воздействии на энергетические параметры механизированной сварки в защитных газах».

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

Результаты работы внедрены на ООО «Юргинский машзавод» (г.Юрга), экономический эффект составил 9800 руб. на одно рабочее место инженера-технолога в год.

Результаты диссертационных исследований используются в учебном процессе студентами ЮТИ ТПУ специальности 150202 «Оборудование и технология сварочного производства» по дисциплинам «Технология и оборудование сварки плавлением», «Теория сварочных процессов», «Методология научных исследований», при выполнении выпускных квалификационных работ.

**Апробация работы.** Результаты работы заслушивались на конференции-конкурсе «Технологии Microsoft в теории и практике программирования» (г. Новосибирск, 2007, 2008); Всероссийской научно-практической конференции «Научная сессия ТУСУР-2007» (г. Томск, 2007); Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии и экономика в

машиностроении» (г. Юрга, 2007-2011); XIV Международной научно-практической конференции «Современная техника и технологии» (г. Томск, 2008).

Результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических семинарах кафедр «Сварочного производства» ЮТИ ТПУ, г. Юрга, 2010; «Металлургия и технология сварочного производства» СибГИУ, г. Новокузнецк, 2010; «Механизация и автоматизация сварочного производства» ДонГТУ, г. Ростов на Дону, 2011.

Разработанная система автоматизированного проектирования технологического процесса сборки и сварки металлоконструкций неоднократно отмечена дипломами различных степеней на международных выставках – ярмарках таких как «Экспо-Сибирь», «XIV Сибирский промышленный форум» и др.

**Публикации по теме диссертации.** По теме диссертационной работы опубликовано 32 работы в отечественных и зарубежных изданиях (в том числе 5 в изданиях, рекомендованных ВАК), получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня используемой литературы и приложения. Материал изложен на 116 листах машинописного текста, содержит 29 рисунков, 5 таблиц. Список литературы содержит 105 наименований, из них 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

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

## ***ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ***

**В первой главе** на основе проведенного анализа развивающихся способов сварки плавящимся электродом в защитных газах сделан вывод, что актуальным становится применение способов с управляемым каплепереносом электродного металла при использовании в качестве защитной среды смеси газов ( $Ar+CO_2$ ).

Сформулированы основная цель и задачи работы.

**Вторая глава** посвящена методам проведения исследования, теоретическому и экспериментальному исследованию влияния состава защитной газовой среды и импульсно-дугового воздействия на стабильность процесса каплепереноса электродного металла в сварочную ванну. Выполнен анализ сил, действующих на каплю электродного металла при сварке в условия импульсного воздействия.

Установлено, что получение качественного сварного соединения без образования пор при сварке с управляемым каплепереносом электродного металла в смеси защитных газов ( $Ar+CO_2$ ) возможно на соотношениях от 50% до 80% аргона в общем объеме.

Экспериментально было установлено, что наименьшие потери электродного металла на угар и разбрызгивание достигаются при содержании 70%Ar + 30%CO<sub>2</sub> и не превышает 2% (рис. 1).

Основываясь на данных описанных в работе Новожилова Н.М. полученное соотношение обусловлено, тем что добавление к аргону углекислого газа до 70%Ar + 30%CO<sub>2</sub> сопровождается уменьшением размера электродных капель и соответствующим увеличением их количества. Повышение содержания углекислого газа в аргоне сверх этого предела при одних условиях сопровождается резким, а при других условиях плавным уменьшением количества капель, образующихся в единицу времени.

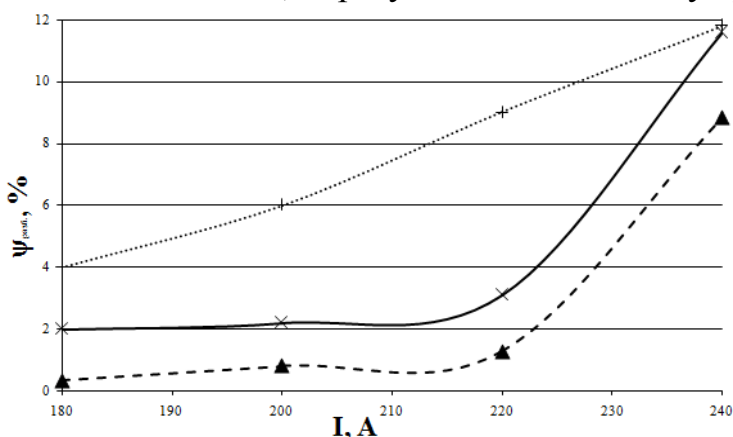


Рис. 1 График зависимости величины разбрызгивания ( $\Psi_{разб.}$ ) от величины среднего значения тока

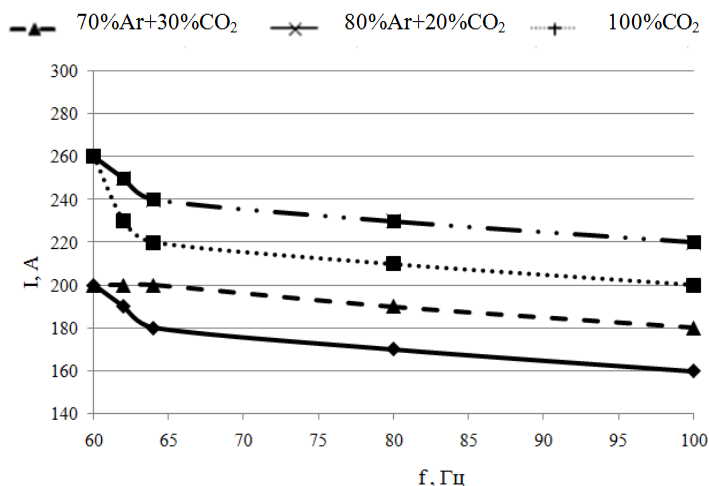


Рис. 2 Влияние частоты переноса электродного металла ( $f$ ) и вылета электродной проволоки ( $l$ ) на величину среднего значения сварочного тока

Определение стабильного диапазона регулирования энергетических параметров процесса сварки для смеси газов Ar(70%±3%) + CO<sub>2</sub>(30%±3%) в сравнение с CO<sub>2</sub> показало (рис. 2), что происходит расширение области стабильного протекания процесса на 10%.

На основе кадров скоростной видеосъемки было установлено, что в процессе сварки при управляемом каплепереносе электродного металла в смеси газов не происходит смещения капли на боковую поверхность электрода (рис. 3), что вызвано увеличением площади активного пятна и расширением столба дуги.



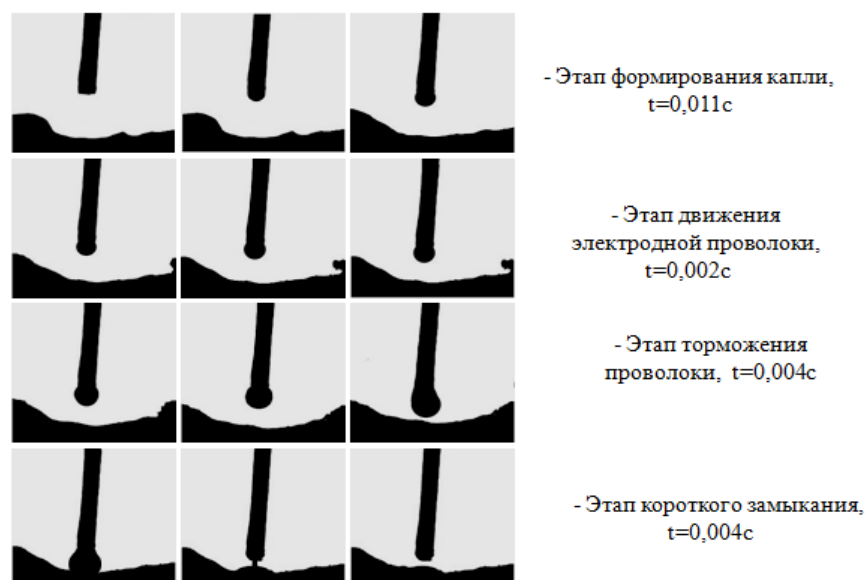


Рис. 3 Этапы переноса электродного металла в сварочную ванну (скорость съемки 1500 кадр/с)

В третьей главе проведена разработка и адаптация математических моделей технологических параметров для импульсно-дуговых процессов сварки в смеси газов (изменения объема капли расплавленного металла, распределения температурных полей на поверхности изделия, скорости охлаждения на оси шва при заданной температуре и математическая модель геометрических размеров шва).

Данная последовательность обусловлена этапами образования сварного соединения:

- образование капли электродного металла и ее перенос в сварочную ванну;
- нагрев и охлаждение поверхности свариваемого материала;
- формирование геометрических параметров сварного шва.

На первоначальном этапе для всех разрабатываемых моделей и алгоритмов расчета были определены входные параметры, оказывающие существенное воздействие на искомые значения (среднее значение тока  $I$ , напряжение на дуге  $U_d$ , скорость сварки  $V_{св}$ , частота переноса электродного металла  $f$ ).

Определение величины изменения объема капли расплавленного металла следует рассматривать на основе сил, действующих на каплю в процессе каплепереноса электродного металла.

$$F_{эд} + F_d = F_p + F_{nn}, \quad H, \quad (1)$$

где  $F_{эд}$  – электродинамическая сила,  $H$ ;  $F_d$  – динамическая сила,  $H$ , которая является суммой силы тяжести и силы инерции, полученной при движении капли, равная  $F_d = m(g \pm a_T)$ , где  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $F_p$  – сила давления плазменных потоков,  $H$ ;  $F_{nn}$  – сила поверхностного натяжения,  $H$ .

Значения указанных выше сил общеизвестны. Введя их в выражение (1) определяется масса капли, которую возможно перенести в сварочную ванную:

$$m = \frac{2\pi\sigma R_1 + \frac{AI^2}{S} - \frac{\mu\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}}{g}, \text{ кг}, \quad (2)$$

где  $\mu, \mu_0$  – абсолютная и относительная магнитная проницаемость стали, Гн/м;  $R_2$  – радиус столба дуги, м;  $R_1$  – радиус электрода, м;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;  $A$  – коэффициент, зависящий от материала электрода и параметров приэлектродных областей,  $A=0,963 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{А}^2$ , (данное значение определено экспериментально для сварки с управляемым каплепереносом электродного металла в смеси газов ( $\text{Ar}+\text{CO}_2$ )).

Разделив полученную зависимость (2) на плотность металла, определяется критический объем капли, способный перейти в сварочную ванну при сварке с короткими замыканиями:

$$V = \frac{2\pi\sigma R_1 + \frac{AI^2}{S} - \frac{\mu\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}}{\rho g}, \text{ м}^3, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность металла, кг/м<sup>3</sup>.

Вследствие высокой сложности и многофакторности полученной физической зависимости (3) был использован метод многофакторного планирования эксперимента и с помощью него получена линейная мультипликативная регрессионная модель, описывающая зависимость изменения величины объема капли от входных параметров режима процесса сварки:

$$V = 0.015 \times I^{0.03} \times U^{8.33} \times V_{\text{св}}^{0.17} \times f^{0.1}, \text{ м}^3. \quad (4)$$

Сравнение экспериментальных и расчетных значений показало адекватность модели при 8%-ом уровне значимости (по критерию Фишера).

На следующем этапе осуществлялась адаптация существующих математических моделей распределения температурных полей на поверхности изделия и скорости охлаждения на оси шва при заданной температуре, созданные Рыкалиным Н.Н. для процессов стационарного движения электродной проволоки.

Вследствие того, что в процессе сварки с управляемым каплепереносом электродного металла происходит постоянное изменение длины дуги и соответственно силы тока, амплитуда тока за один период каплепереноса изменяется в пределах от 64 до 368А. На основании этого среднее значение определяется в зависимости от длительности каждого из двух периодов:

1. Периода короткого замыкания, при котором действует сварочный ток  $I_1$ ;
2. Период образования капли электродного металла, при котором действует сварочный ток  $I_2$ .

Тогда эффективная тепловая мощность сварочной дуги определяется:

$$q = \eta U \left( \frac{(I_1 \cdot t_1) + (I_2 \cdot t_2)}{t_y} \right), \text{ Вт}, \quad (5)$$

где  $t_1$  – длительность сварочного тока при коротком замыкании, с;  $t_2$  – длительность сварочного тока в период образования капли электродного

металла,  $s$ ;  $t_{ц}$  – длительность цикла сварки;  $\eta$  – эффективный к.п.д. нагрева изделия сварочной дугой.

На основе выражения (5) алгоритмы расчета распределения температурных полей на поверхности изделия ( $T$ ) и скорости охлаждения на оси шва при заданной температуре ( $\omega(T)$ ) будут выглядеть следующим образом:

$$T = \frac{\left( \frac{(I_1 \cdot t_1) + (I_2 \cdot t_2)}{t_{ц}} \right) \cdot U_d \cdot \eta}{2\pi\delta\lambda} \cdot e^{\frac{V_{CB} \cdot x}{2a}} K_0 \left( r \cdot \sqrt{\frac{V_{CB}^2}{4a^2} + \frac{b}{a}} \right), K, \quad (6)$$

$$\omega(T) = -2\pi\lambda c\rho \frac{(T - T_H)^3}{\left[ \frac{\left( \frac{(I_1 \cdot t_1) + (I_2 \cdot t_2)}{t_{ц}} \right) \cdot U_d \cdot \eta}{V_{CB} \cdot \delta} \right]^2}, K/c. \quad (7)$$

Сравнение экспериментальных и расчетных значений распределения температурных полей на поверхности изделия (рис. 4) показало адекватность модели при 8% уровне значимости, а погрешность расчета скорости охлаждения на оси шва при заданной температуре составила 7%.

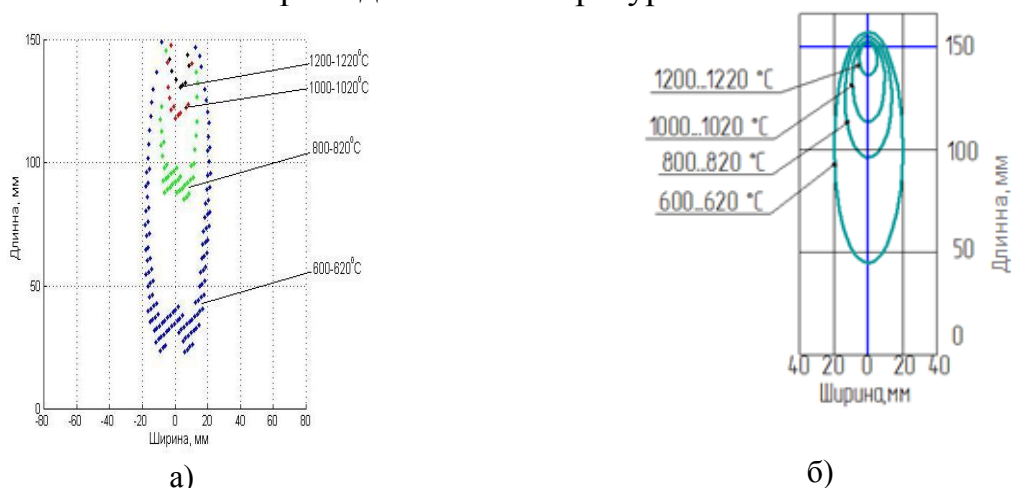


Рис. 4 Графики экспериментальных (а) и расчетных значений (б) распределения температуры на поверхности изделия

Для получения зависимостей изменения геометрических размеров шва применялся метод (И.Ф. Коринец и Цзи Чжень Чун) детерминировано-статистического моделирования, при котором зависимость размеров шва от параметров сварки и величины зазора представляются в виде произведения степенных функций, а коэффициенты определяются в результате статистической обработки экспериментальных данных.

Однако, указанный метод дает большое расхождение с экспериментальными данными, так как был разработан для механизированной сварки в углекислом газе со стационарным движением электродной проволоки.

Для процессов сварки с управляемым каплепереносом электродного металла в смеси газов, математическая модель должна устанавливать

зависимость размеров шва и наплавленного валика от величины зазора, параметров режима сварки и частоты переноса электродного металла.

Параметры удельной теплоемкости, плотности и температуры плавления свариваемого металла приведены к усредненному значению и приняты как постоянные (согласно теории Н.Н. Рыкалина).

С учетом импульсно-дугового воздействия на процесс сварки и использования смеси газов, а также приняв указанные допущения, зависимость геометрических размеров шва представляется в виде показательных функций:

$$h = 0,0034 \times \frac{I^{0,942} \times U_{\text{д}}^{0,045} \times f^{0,29} \times 1,373^b}{V_{\text{св}}^{0,09}}, \text{ мм}, \quad (8)$$

$$e = 0,015 \times \frac{I^{0,697} \times U_{\text{д}}^{0,41} \times f^{0,298} \times 0,69^b}{V_{\text{св}}^{0,134}}, \text{ мм}, \quad (9)$$

$$g = 0,025 \times \frac{I^{0,95} \times f^{0,123} \times 0,616^b}{U_{\text{д}}^{0,23} \times V_{\text{св}}^{0,154}}, \text{ мм}, \quad (10)$$

где  $b$  – величина зазора, мм;  $h$  – глубина проплавления, мм;  $e$  – ширина шва, мм;  $g$  – усиление шва, мм.

Сравнение расчетных данных с экспериментальными показало, что погрешность при определении глубины проплавления и ширины шва составила 6%, усиления шва – 9%.

Важной характеристикой для определения работоспособности сварных соединений и стойкости против образования трещин является площадь наплавленного металла. При определении данной величины, был использован регрессионный метод моделирования, в результате чего была получена зависимость:

$$F_{\text{пр}} = \frac{I^{0,044} \times U_{\text{д}}^{2,077}}{V_{\text{св}}^{0,984} \times f^{0,681}}, \text{ мм}. \quad (11)$$

Сравнение расчетных данных с экспериментальными показало, что погрешность составляет 8%.

**В четвертой главе** представлены результаты механических испытаний, химического и микроструктурного анализа образцов, выполненных сваркой с управляемым каплепереносом электродного металла в смеси газов, а также описана работа созданного компьютерного приложения.

Исследование механических свойств, химического и микроструктурного анализа образцов производили на пластинах из стали 12X18H10T толщиной 4мм, сварочной проволокой Св-12X18H10Т.

Оценка химического состава сварного шва проводилась с использованием последовательного рентгенофлуоресцентного спектрометра LabCenter XRF-1800.

Пробы для исследования производились в двух точках в основном металле и металле шва. Диаметр точек равен 3мм. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты химического анализа сварных образцов из стали 12X18H10T

№ образца	Химические элементы							
	C, %	Si, %	Mn, %	S, %	P, %	Cr, %	Ni, %	Ti, %
1	0,11	0,67	0,38	0,017	0,018	17,5	10,4	0,6
2	0,10	0,65	0,37	0,018	0,017	17,6	10,3	0,6

Механические свойства сварных соединений представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты механических испытаний сварных образцов из стали 12X18H10T

Способ сварки	Испытания на растяжение	
	Временное сопротивление, $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести, $\sigma_T$ , МПа
Сварка в Ar 100%, образец «1»	$\frac{561 \div 589}{575}$	$\frac{217 \div 229}{223}$
Сварка в смеси газов Ar+CO <sub>2</sub> , образец «2»	$\frac{563 \div 591}{577}$	$\frac{214 \div 236}{225}$

Полученные результаты химического анализа и механических свойств наплавленного металла свидетельствуют о несущественном расхождении указанных свойств при рассматриваемых способах сварки.

Проведенные металлографические исследования двух способов показали (рис. 5) схожесть полученных результатов.

На внешней поверхности наплавленного металла у всех образцов наблюдается зона мелкодисперсных беспорядочно ориентированных дендритов. Во внутренних областях наплавленного металла у всех образцов ярко выраженное дендритное строение. Здесь дендриты более грубые, чем у поверхности, и ориентированы в основном перпендикулярно к поверхности сплавления с основным металлом. Междендритные промежутки также травятся сильнее. Грубое строение участка неполного расплавления у образца «1» (рис. 5), где междендритные промежутки, наиболее широкие. У образца «2» на участке неполного расплавления наблюдаются значительные по размерам сильно травящиеся области (рис. 5). Такие области могут захватывать не только междендритные промежутки, но и сами дендриты. (рис. 5). В целом у образца «2» наблюдается более плавный переход от основного металла к металлу шва.

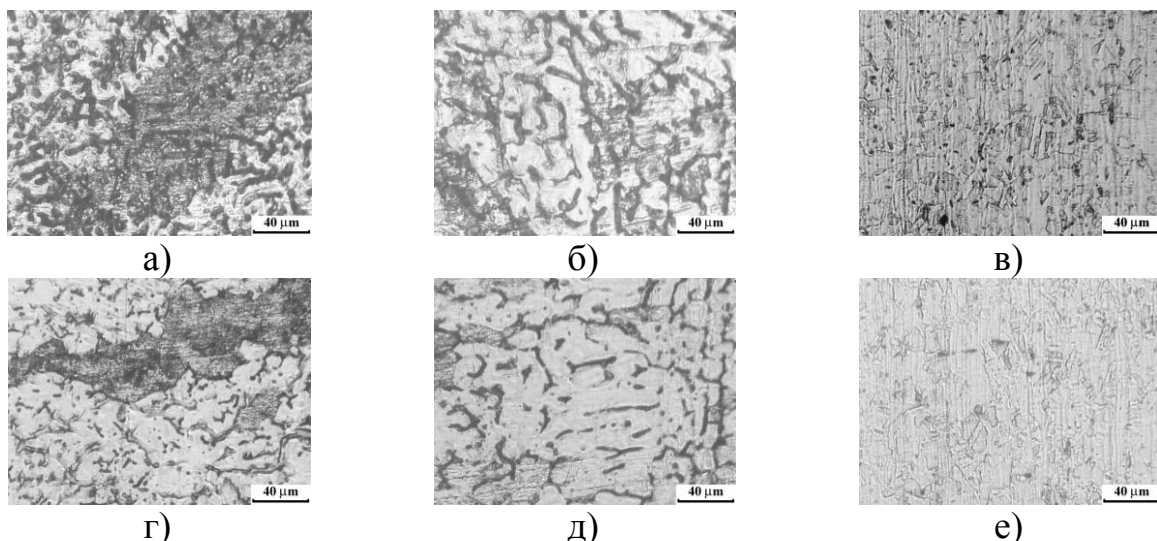


Рис. 5 Микроструктура образцов: а, б, в) образец №1 ( $\times 250$ ); г, д, е) образец №2 ( $\times 250$ ); а, г) наплавленный металл; б, д) участок неполного расплавления; в, е) основной металл

Для систематизации расчетов основных технологических параметров процесса сварки с управляемым каплепереносом электродного металла было создано компьютерное приложение «САПРТП», разработанное в среде Delphi. Алгоритм работы компьютерного приложения «САПРТП» представлен на рис. 6.

Расчет производится на основе полученных математических зависимостей:

- для модуля «Моделирование формы шва» – используются детерминировано-статистические модели формы шва, представленные в выражениях (8)-(11);
- для модуля «Алгоритм расчета распределения теплоты» – используется адаптированный алгоритм расчета распределения температурных полей на поверхности изделия, представленный в выражение 6;
- для модуля «Алгоритм расчета скорости охлаждения» – используется адаптированный алгоритм расчета скорости охлаждения на оси шва при заданной температуре, представленный в выражение 7;
- для модуля «Моделирование изменения объема капли» – используется физическая зависимость определения объема капли, способную перейти в сварочную ванну, представленная в выражение 3, либо по выбору пользователя упрощенная регрессионная зависимость (4).

Работа в приложении начинается с создания нового проекта. Одновременно с добавлением элемента «проект» создается отдельная база данных (БД) с набором шаблонных таблиц.

Приложение разделено на несколько основных модулей отвечающих за входные данные, их расчет и отображение.

Входные данные поступают из основного модуля «САПРТП», а при необходимости и из стандартных данных. На следующем этапе осуществляется контроль полноты вводимой информации «Системой оценки и проверки данных». После чего через «Систему переоценки» (осуществляющей отбор необходимой информации для корректной работы модулей, их выборка и сортировка в необходимой последовательности) осуществляется

взаимодействие входных данных с подключаемыми модулями, выполняющими расчет основных технологических параметров процесса.

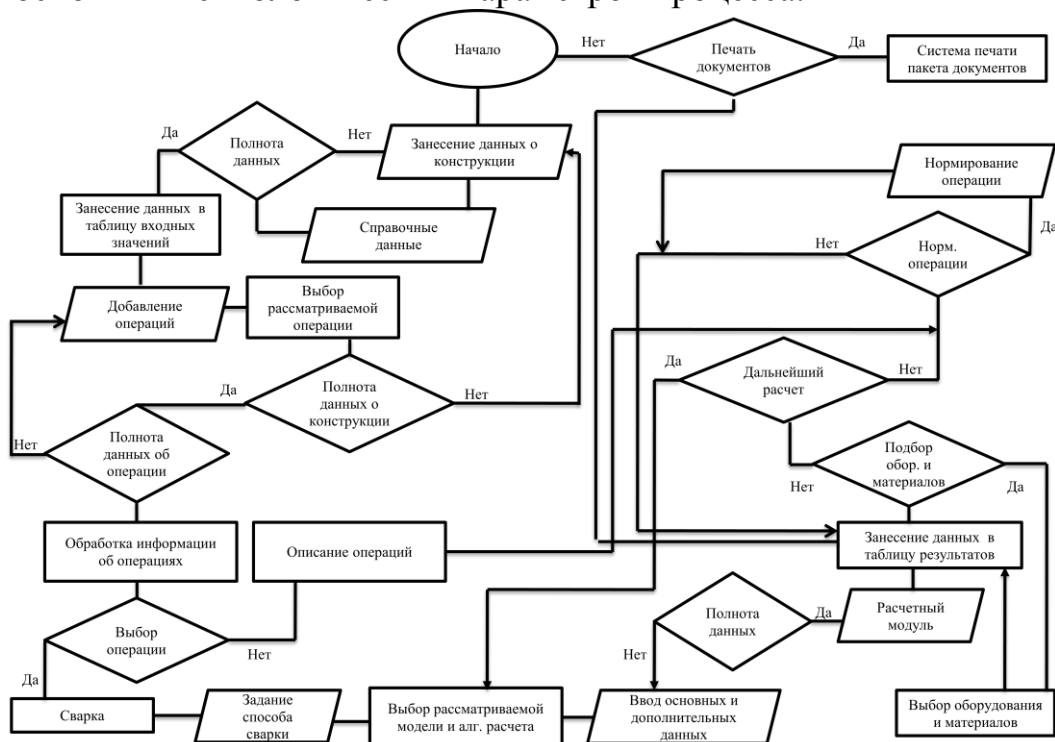


Рис. 6 Алгоритм работы системы автоматизированного проектирования технологического процесса сборки и сварки металлоконструкций

Первоначально для каждого из расчетных модулей происходит выбор необходимых параметров для расчета и построения модели. Данное ограничение позволяет избежать внесения избыточной информации, не используемой при расчете.

На следующем этапе происходит обработка данных, расчет и построение модели для определяемого параметра процесса через систему «Вывод данных».

Если полученный результат удовлетворяет пользователя и не противоречит ограничениям, прописанным на основе ГОСТа, предоставляется возможность печати полученных результатов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований установлено, что для сварки с управляемым каплепереносом электродного металла рациональным соотношением газов в двухкомпонентной смеси Ar и CO<sub>2</sub> является 70%+30% соответственно. При полученном соотношении потери электродного металла на угар и разбрызгивание не превышают 2%. Диапазон регулирования по току составляет 160 – 260А.

2. Разработана математическая модель изменения объема капли, основанная на исследованиях кинетики плавления и переноса электродного металла. Установлено, что для рассматриваемого диапазона тока объем капли, который возможно перенести в сварочную ванну, изменяется от 0,945 до 1,521 мм<sup>3</sup>. Сравнение экспериментальных и расчетных значений показало адекватность модели при 8% уровне значимости (по критерию Фишера).

3. Получены адаптированные алгоритмы расчета распределения температурных полей на поверхности изделия и скорости охлаждения на оси шва при заданной температуре учитывающие процесс изменения длины дуги за один период каплепереноса электродного. Сравнение экспериментальных и расчетных значений распределения температурных полей на поверхности изделия показало адекватность модели при 8% уровне значимости, а погрешность расчета скорости охлаждения на оси шва при заданной температуре составила 7%.

4. Разработана математическая модель формы шва, устанавливающая зависимость размеров шва (глубины проплавления ( $h$ ), ширины шва ( $e$ ), усиления шва ( $g$ ) и площади наплавленного металла ( $F_{np}$ )) от величины зазора ( $b$ ), параметров режима сварки (среднее значение тока ( $I$ ), напряжение на дуге ( $U_d$ ), скорость сварки ( $V_{cs}$ )) и частоты переноса электродного металла ( $f$ ). Сравнение расчетных данных с экспериментальными показало, что погрешность при определении глубины проплавления и ширины шва составила 6%, усиления шва – 9%.

5. Предложенные расчетные зависимости используются в разработанной автоматизированной системе, позволяющей на стадии конструкторско-технологического проектирования осуществлять расчет основных технологических параметров, производить оценку соответствия полученных значений нормативно-технической документации и получать типовой технологический процесс сборки и сварки металлоконструкций.

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

1. Павлов Н.В., Крюков А.В., Зернин Е.А. Сварка с импульсной подачей проволоки в смеси газов // Сварочное производство. –2010.–№4. С. 27–28.

2. Павлов Н.В., Крюков А.В., Зернин Е.А., Сапожков С.Б. Автоматизация процесса проектирования технологического процесса сборки сварки металлоконструкций «САПР ТП» // Сварочное производство. –2010. –№2. С. 43–44.

3. Павлов Н.В., Крюков А.В., Зернин Е.А. Распределение температурных полей при сварке в смеси газов с импульсной подачей электродной проволоки // Сварочное производство. –2011. –№1. С. 35–36.

4. Павлов Н.В., Крюков А.В., Зернин Е.А. Детерминированно-статистическая модель формы шва // Сварка и диагностика. –2011. –№6. С. 31–35.

5. Моделирование тепловых полей при сварке. Свидетельство №2010612255 о государственной регистрации программы для ЭВМ / Павлов Н.В., Крюков А.В., Чинахов Д.А. от 25.03.2010г.

6. Моделирование процессов управляемого каплепереноса электродного металла. Свидетельство № 2011616056 о государственной регистрации программы для ЭВМ / Павлов Н.В., Крюков А.В., Домнина Е.Г., Зернин Е.А. от 03.08.2011.



7. Павлов Н.В., Крюков А.В., Зернин Е.А. Сварка плавящимся электродом с импульсной подачей электродной проволоки легированных сталей // Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13-18 сентября 2010 г. В 4-х томах. Машиностроение и техносфера XXI века – Донецк: ДонНТУ, 2010, Т.3. С. 12–15.

8. Павлов Н.В., Крюков А.В., Зернин Е.А. Детерминированно-статистическая модель формы шва при сварке с импульсной подачей электродной проволоки в смеси газов. // Материалы трудов V Международной научно-технической конференции Современные проблемы машиностроения;. Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010, С. 377–381.

9. Крюков А.В., Павлов Н.В., Зернин Е.А. Влияния концентрации газовой среды на объем капли при сварке с импульсной подачей электродной проволоки. // Сварка и родственные технологии: Материалы VI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов / Институт Электросварки им. Е.О. Патона, ИЭС им. Е.О. Патона. – Киев, 2011, с. 57.

10. Павлов Н.В., Крюков А.В., Зернин Е.А. Особенности сварки с импульсной подачей проволоки хромоникелевых аустенитных сталей. // Машиностроение – традиции и инновации: сборник трудов Всероссийской молодежной конференции / Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – Юрга, 2011, с. 69–72.

Подписано в печать 20.11.2012 Формат 60×84/16  
Печать оперативная. Усл. п.л. 1,0. Тираж 100 экз.  
Заказ №1531

ИПЛ ЮТИ ТПУ. Лицензия ПЛД № 44-55 от 04.12.97  
Ризограф ЮТИ ТПУ. 652050, Юрга, ул. Московская, 17



