

На правах рукописи

**МЕЛЬНИКОВ АНТОН ЮРЬЕВИЧ**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НОРМАТИВНЫХ РАЗМЕРОВ СВАРНОГО ШВА В  
ОБЛАСТИ ВЛИЯНИЯ ОТРАЖЕННОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА  
ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЗАДАЧИ**

05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2019

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», г.Екатеринбург

Научный руководитель: доктор технических наук

**ШОЛОХОВ Михаил Александрович**

УрФУ имени первого Президента России  
Б.Н.Ельцина, заведующий кафедрой

Официальные оппоненты: доктор технических наук, с.н.с.

**ДОРОНИН Юрий Викторович**

ООО «АЦГХ», главный инженер

кандидат технических наук

**КОРОЛЕВ Сергей Анатольевич**

МГТУ имени Н.Э.Баумана, доцент

Ведущая организация: **РГУ нефти и газа имени И.М.Губкина**

Защита состоится «26» сентября 2019 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: +7 (499) 267-09-63.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета  
к.т.н.



Прилуцкий М.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время, несмотря на широкое распространение дуговой сварки в защитных газах, возникает проблема обеспечения постоянства геометрических размеров сварного шва по всей длине, в том числе в концевых участках, являющихся, по данным статистики, наиболее дефектными. Известно, что в процессе сварки при приближении источника нагрева к кромке изделия тепловой поток, исходящий от источника нагрева, отражается от нее, дополнительно нагревая концевой участок соединения. Данная особенность приводит к изменению геометрических параметров шва и механических свойств соединения, в частности снижению пластичности металла в зоне термического влияния из-за роста зерна вследствие чрезмерно большого времени нахождения при высоких температурах.

Изменение параметров шва, вызванное перегревом концевой части соединения, наиболее ярко проявляется в зонах, где в силу конструктивных особенностей свариваемого изделия невозможно установить выводные планки, на которые выводится концевой участок шва. Зачастую это относится к случаям приварки ребер жесткости в пространственных конструкциях (например, отдельные модули пролетов мостов и др.). Эффект отражения теплового потока проявляется и в соединениях, где устанавливаются выводные планки, но в менее значительной степени. В этом случае также наблюдается изменение геометрии шва и механических свойств соединения (в особенности ударной вязкости).

Существующие методики расчета режимов сварки направлены на определение параметров процесса (сварочный ток, напряжение, скорость сварки) для квазистационарного состояния, где при движении источника нагрева не учитывается изменение теплового потока, то есть принимается, что распространение теплоты происходит без влияния конструктивных преград. В существующих методиках влияние границы изделия и, как следствие, перегрев концевой области соединения, никак не учитывается. В настоящей работе, выполнено решение данной задачи на основе создания алгоритма выбора параметров режима сварки в областях перегрева металла с учетом влияния отражения теплового потока от кромки (при нестационарном тепловом потоке) с целью обеспечения постоянства размеров и свойств сварного соединения. Особенностью данного алгоритма является то, что он направлен на управление параметрами режима сварки в областях влияния отраженного теплового потока (в конце шва) для получения однородных свойств соединения и не затрагивает расчет параметров в квазистационарном состоянии (в средней части шва). Поэтому, за основу расчета взята существующая методика расчета параметров

режима и скорректирована для области влияния границ изделия на распространение теплового потока.

В связи с вышесказанным диссертационная работа посвящена актуальной теме изучения процессов распространения теплоты в области влияния границ изделия на изменение процессов теплопереноса, и разработке на их основе алгоритма выбора параметров режима сварки, учитывающего явление перегрева конца соединения за счет отражения теплоты от кромки, для обеспечения постоянства геометрических размеров сварного шва.

**Степень разработанности темы исследования.** До настоящего времени проблеме обеспечения постоянства свойств концевых участков сварных швов, выполняемых при искажении квазистационарной тепловой картины отраженным тепловым потоком было уделено недостаточное внимание, как с теоретической, так и практической точек зрения.

С теоретической точки зрения данная проблемы была рассмотрена при моделировании тепловых процессов заданием адиабатических границ и введением фиктивных источников, которые учитывают возникновение отраженного потока при приближении к кромке изделия. По указанной тематике необходимо отметить научные работы исследователей Н.Н. Рыкалина, В.А. Кархина, К.М. Гатовского, Б.М. Березовского, J. Goldak.

С практической точки зрения данной проблеме были посвящены исследования по разработке методов выполнения концевых участков соединения, выполненные В.С. Дудко, В.Е. Дубновым, В.И. Стебловским, Ю.И. Антощенко, Ю.И. Райчуком, В.В. Лебедевым.

В целом, имеющиеся в литературе данные по влиянию отражения теплового потока от кромки на изменение свойств соединения отрывочны и не имеют систематического характера. Имеющиеся методы выполнения концевой части сварного шва зачастую сложно применимы на практике и направлены на решение рассматриваемой проблемы для конкретных условий (ограниченного круга материалов, толщин, геометрии изделия).

**Цель работы** – обеспечение нормативных размеров сварного шва при однодуговой и двухдуговой сварке плавящимся электродом в защитных газах на основе изменения параметров режима сварки в условиях влияния границ изделия.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1) Исследовать влияние процесса отражения теплоты от кромки на изменение термических циклов, структурного состава и механических свойств соединения (ударной вязкости).

2) Разработать математическую модель процесса теплопереноса, учитывающую явление отражение теплоты от кромки.

3) Выполнить численное решение разработанной математической модели методом конечных разностей.

4) Выполнить проверку адекватности разработанной математической модели на основе результатов экспериментального исследования.

5) На основе вычислительного эксперимента определить размеры области отражения теплоты и влияния параметров соединения и режимов сварки на ее изменение.

6) Разработать алгоритм выбора параметров режима, который позволит учитывать влияние границ изделия на изменение распределение теплоты в этой области.

7) Выполнить экспериментальную проверку и внедрение разработанного алгоритма.

#### **Научная новизна работы:**

1) Определено, что при существующих режимах (погонных энергиях) сварки в защитных газах увеличение размеров сварочной ванны в конце соединения за счет отражения теплоты от кромки составляет до 30%, а также определены количественные изменения размера зерна и ударной вязкости металла в ЗТВ.

2) Установлено, что двухдуговой процесс при существующих режимах сварки может являться эффективным инструментом снижения влияния перегрева концевой части соединения за счет распределенного введения теплоты в изделие и увеличенной по сравнению с однодуговым процессом скоростью сварки.

3) На основе результатов математического моделирования определены зависимости влияния толщины свариваемого металла и погонной энергии процесса на размеры области отражения теплоты при однопроходной однодуговой и двухдуговой сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Данные зависимости позволяют определить расстояние до кромки, начиная с которого необходимо изменять параметры режима для компенсации влияния кромки на размеры сварочной ванны.

4) Установлены зависимости изменения ширины шва в области отражения теплоты в зависимости от толщины свариваемого металла и погонной энергии процесса при однопроходной однодуговой и двухдуговой сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Полученные зависимости позволяют определить величину изменения ширины шва для последующей корректировки параметров режима сварки и устранения перегрева.

5) На основе модели теплопереноса и результатов вычислительного эксперимента разработан алгоритм выбора параметров режима сварки, позволяющий устранить (снизить) влияние перегрева на изменение свойств концевой части соединения. Корректировка погонной энергии процесса

осуществляется в зависимости от изменения ширины шва относительно нормируемого значения.

#### **Практическая значимость работы:**

1) для реализации алгоритма выбора параметров режима сварки был разработан программный комплекс, который позволил на основании исходных данных рассчитывать массив параметров режима сварки, который может быть передан исполнительным механизмам.

2) Разработанный алгоритм был успешно внедрен при однодуговой сварке на ООО «ОАЗИС» (ПАО «АВТОВАЗ») г. Новоуральск и двухдуговой сварке на АО «Борисовский завод мостовых металлоконструкций» п. Борисовка. Внедрение алгоритма позволило снизить долю брака при однодуговой сварке в семь раз (с 20% до 3%), а при двухдуговой – на 15-20%.

**Методология и методы диссертационного исследования.** Для достижения поставленной в данной работе цели была использована совокупность теоретических, вычислительных и экспериментальных методов исследования.

При анализе тепловых процессов, происходящих в концевых участках сварного соединения, были использованы методы математического моделирования. Решение тепловой задачи проводили методом конечных разностей.

Для экспериментального исследования влияния отражения теплоты от кромки на изменение геометрии и свойств соединения была скомпонована установка, включающая специальный стол, оснащенный флюсовой подушкой, самоходную тележку Trac RL Pro для перемещения горелок и два сварочных аппарата S 5 Pulse.

Регистрацию параметров сварки и запись термических циклов проводили с использованием регистратора AWR-725.

Исследование микроструктуры проводили на микроскопе ЛабоМет-2 ЛПО.

Исследование механических свойств соединения проводили с помощью маятникового копра ИО-5003-0,3-11.

Обработка результатов моделирования и эксперимента проводилась методами математической статистики.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1) Математическая модель теплопереноса при однодуговой и двухдуговой сварке, учитывающая искажение теплового поля вследствие отражения теплоты от кромки изделия.

3) Зависимости описывающие, размеры области отражения теплоты от кромки и изменения ширины шва в данной области при изменении толщины металла и погонной энергии процесса, полученные на основе вычислительного эксперимента.

4) Алгоритм выбора параметров режима сварки, позволяющий регулировать энергетические параметры процесса для обеспечения постоянства распределения теплоты и, как следствие, геометрических размеров шва по всей длине соединения.

**Степень достоверности результатов исследования.** Достоверность полученных результатов подтверждается удовлетворительным совпадением теоретических и экспериментальных значений геометрических размеров швов и сварочной ванны, структуры и их свойств, практической реализацией результатов исследований.

**Апробация работы.** Материалы диссертационной работы были доложены и обсуждены на: научно-практической конференции «ИНЖЕНЕРНАЯ МЫСЛЬ МАШИНОСТРОЕНИЯ БУДУЩЕГО» (Екатеринбург, 2012); международной конференции «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ» (Киев, 2013); девятнадцатой международной научно-практической конференции «ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИНДУСТРИИ И ЭКОНОМИКЕ» (Санкт-Петербург, 2015); XV научно-практической конференции «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ» (Екатеринбург, 2015); Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (Томск, 2015); научно-практической конференции с международным участием «СВАРКА И ДИАГНОСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ» (Екатеринбург, 2017).

**Публикации и патенты.** По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 7 работ в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, а также получено 2 патента.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 5 приложений. Материал изложен на 151 листе машинописного текста, содержит 87 рисунков, 24 таблицы. Список литературы содержит 97 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность выбранного направления исследований, определена его цель и задачи, сформулированы положения, определяющие научную новизну и практическую ценность диссертационной работы.

В **первой главе** на основе анализа литературных данных были рассмотрены основные проблемы обеспечения однородности механических свойств сварных соединений в области влияния границ изделия на процессы теплопереноса. Рассмотрены особенности разрушения концевых участков соединения, вызванные изменением теплового поля.

Рассмотрены основные методы выполнения концевой части соединения, приведена их классификация, определены особенности и недостатки существующих методов. По данной тематике необходимо отметить работы, выполненные В.С. Дудко, В.Е. Дубновым, В.И. Стебловским, Ю.И. Антощенко, Ю.И. Райчуком, В.В. Лебедевым. На основе обзора литературы также обосновано, что двухдуговая сварка является эффективным инструментом регулирования термического цикла и может быть использована для минимизации влияния эффекта перегрева за счет отражения теплоты от кромки.

Выполнен анализ основных методов исследования тепловых процессов и особенностей формирования шва. Отмечено, что применение численных методов исследования имеет значительные преимущества и широкие возможности.

Проведенный обзор литературных данных позволил сформулировать цель и определить основные задачи исследований.

**Вторая глава** посвящена исследованию влияния эффекта отражения теплового поля от кромки изделия на изменение температуры нагрева концевой части, структуры металла зоны термического влияния, и геометрических размеров шва и механических свойств соединения.

На основании проведенных экспериментов было выявлено, что тепловые процессы в концевой части сварного соединения значительно отличаются от стационарной картины, наблюдаемой в средней части шва. Процессы отражения теплового потока от торцевой кромки свариваемых пластин способствуют перегреву зоны соединения в конце образца. Перегрев при однодуговой сварке более выраженный (повышение максимальных температур нагрева к концу образца на 20-35 %), в сравнении с двухдуговой сваркой, где увеличение максимальных температур нагрева к концу образца достигает только 10-20 %.

Измерение геометрических параметров сварных швов показало, что влияние отражения теплового потока от края свариваемого изделия, проявляется только при однодуговой сварке, где увеличение ширины шва достигает 28 % и снижение высоты усиления до 48 %. В то же время при двухдуговой сварке ширина шва к концу образца незначительно уменьшается (на 8-10 %), а высота усиления увеличивается (на 10 %).

Проведенные исследования показали, что процессы отражения теплоты оказывают существенное влияние на изменение размеров зоны термического влияния, а также размеров зерна в зоне перегрева. При однодуговой сварке в концевых участках соединения ширина зоны термического влияния увеличивается на 33 %, а ширина зоны перегрева – 104 %. Диаметр зерна в зоне перегрева при этом возрастает до 55 %.

При двухдуговой сварке влияние отражения теплоты от кромки менее выражено и имеет разнонаправленный характер. Ширина ЗТВ в конце образца

увеличивается с 9 до 12 мм, но ширина зоны перегрева увеличивается уже не так значительно с 2,0 до 2,5 мм. Диаметр зерна в зоне перегрева при двухдуговой сварке к концу образца несколько уменьшается, в пределах 10 %.

Перегрев концевой части соединения отраженным от кромки тепловым потоком приводит также к снижению ударной вязкости при движении от середины к краю (снижение составляет до 40 %), что подтверждает тесную связь между размерами зерна и механическими свойствами соединения. При двухдуговой сварке изменение ударной вязкости имеет также, как и изменение размера зерна менее выраженный характер. Изменение при этом значительно менее существенное 10-17 %.

Результаты экспериментальных исследований показали необходимость разработки численной модели процессов распространения теплоты для дальнейшего исследования влияния эффекта отражения теплового потока и определения области его наиболее существенного влияния, как при однодуговой, так и при двухдуговой сварке, а также для разработки алгоритмов управления параметрами для снижения его воздействия.

В **третье главе** была разработана математическая модель теплопереноса, учитывающая перегрев концевой части соединения, за счет отражения теплового потока от кромки.

При расчете температуры при сварке учитывали изменение теплофизических свойств материала. Зависимости теплофизических свойств материала  $c(T)$ ,  $\rho(T)$ ,  $\lambda(T)$  от температуры для исследуемых сталей брали из справочной литературы.

Движущийся сварочный источник нагрева моделировали поверхностью солидуса сварочной ванны (2), которую задавали в форме двойного эллипсоида (Рисунок 1) размерами  $a_f$ ,  $a_b$ ,  $e/2$  и  $c$ .

$$T_s(x, y, z) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{x'^2}{a_f^2} + \frac{y'^2}{b^2} + \frac{z'^2}{c^2} = 1, x' \geq 0 \\ \frac{x'^2}{a_b^2} + \frac{y'^2}{b^2} + \frac{z'^2}{c^2} = 1, x' < 0 \end{array} \right\} \quad (1)$$

Для учета отражения теплового потока от кромки вводили фиктивную пластину (рисунок 1), размеры и свойства которой были идентичными параметрам реальной пластины.

По поверхности фиктивной пластины в противоположном от основного источника направлении перемещался фиктивный источник эквивалентной мощности. Скорость перемещения реального и фиктивного источников, а также расстояние от них до границы реальной пластины одинаковое.

Для решения тепловой задачи выбрали численный класс методов решения, а именно метод конечных разностей.

При решении уравнения теплопроводности для разрабатываемой задачи методом конечных разностей приняли шаг сетки по осям X, Z и Y равномерным.

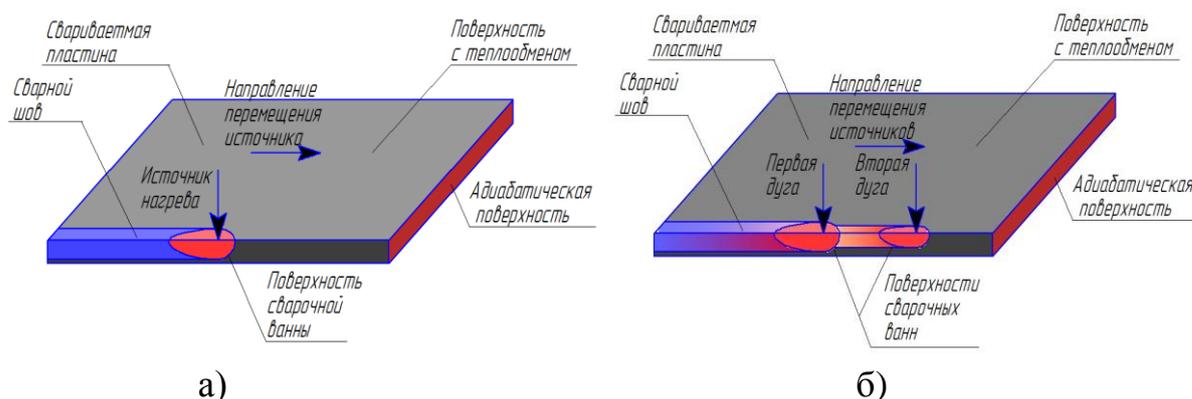


Рисунок 1. Схема задания краевых условий при расчете температуры: а) при однодуговой сварке; б) при двухдуговой сварке

Для обеспечения безусловной устойчивости решения вне зависимости от шага по времени и координате выбрали неявную схему для определения температуры.

При описании нагрева и охлаждения изделия в процессе сварки был использован метод разделения переменных, а в качестве метода решения сеточных уравнений бы выбран метод прогонки.

В данной работе уравнение теплопереноса и теплового баланса для рассматриваемой конечно-разностной сетки вдоль осей координат было преобразовано к следующему виду:

$$A_x \cdot T_{n+1}^j + B_x \cdot T_n^j + C_x \cdot T_{n-1}^j + D_x = 0 \quad (2)$$

В общем случае коэффициенты для данного уравнения выглядят следующим образом:

$$A_x = 2\Delta\tau\lambda_{n+1/2}h_{n-1} \quad (3)$$

$$B_x = h_n h_{n-1} c\rho(h_n + h_{n-1}) + 2\Delta\tau\lambda_{n+1/2}h_{n-1} + 2\Delta\tau\lambda_{n-1/2}h_n + h_n h_{n-1} \alpha_{vn}(h_n + h_{n-1}) \quad (4)$$

$$C_x = 2\Delta\tau\lambda_{n-1/2}h_n \quad (5)$$

$$D_x = h_n h_{n-1} c\rho(h_n + h_{n-1})T_n^{j-1} + \Delta\tau h_n h_{n-1} q_{vn}^j (h_n + h_{n-1}) \quad (6)$$

Схема разбиения рассматриваемого соединения по осям координат представлена на Рисунке 2.

Для расчета температурного поля по разработанной числовой модели был создан программный комплекс. Комплекс включает в себя следующие модули:

Модуль 1. Исходные данные для расчета

Модуль 2. Параметры счета

Модуль 3. Расчет температурного поля и сохранение результатов расчета

В конце расчета температуры по программе формируется файл массива данных, который содержит координаты точек, моменты времени и температуру в этих точках.

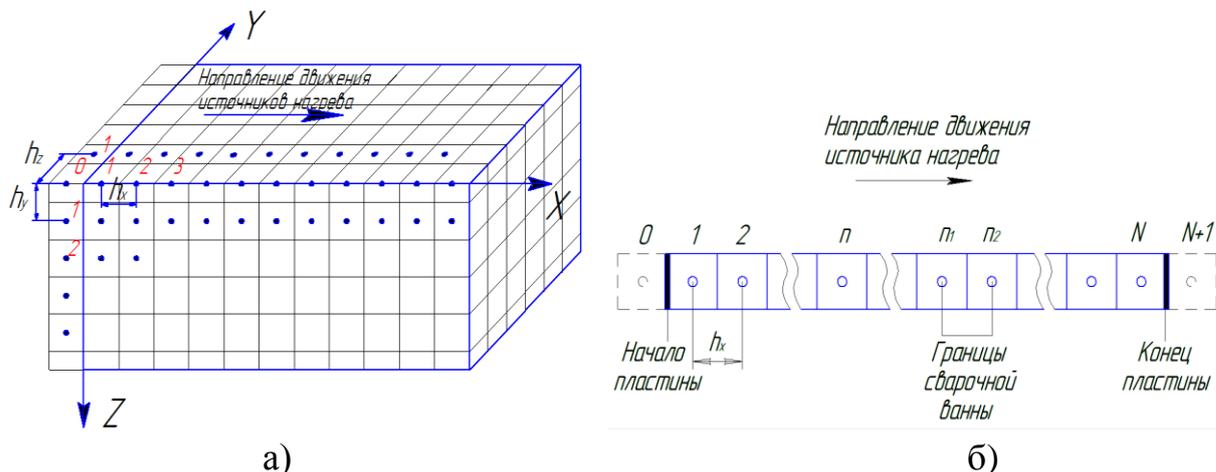


Рисунок 2. Схема разбиения изделия вдоль осей координат: а) общая схема б) вдоль оси X

В результате расчета теплового поля  $T=f(x,y,z,t)$  по разработанной модели определяются границы (координаты) поверхности солидуса, фактически определяются координаты линии ширины шва  $e$  как функции от координаты  $x$ .

Определяется граница начала влияния отраженного теплового потока на ширину шва  $\Delta = e_{i+1}(x) - e_i(x) > norm$ .

Для оценки адекватности разработанной модели выполнялась сварка контрольных образцов с записью термических циклов нагрева и охлаждения, также производилось сравнение теоретических и экспериментальных размеров сварочной ванны.

По результатам анализа полученных экспериментальных величин температуры и сравнения их с результатами моделирования отклонение величин при расчёте температуры для однодуговой сварки (Рисунок 3а) не превышало 8 %. Отклонение теоретических величин температуры от экспериментальных при двухдуговой сварке (Рисунок 3б) не превышало 10 %.

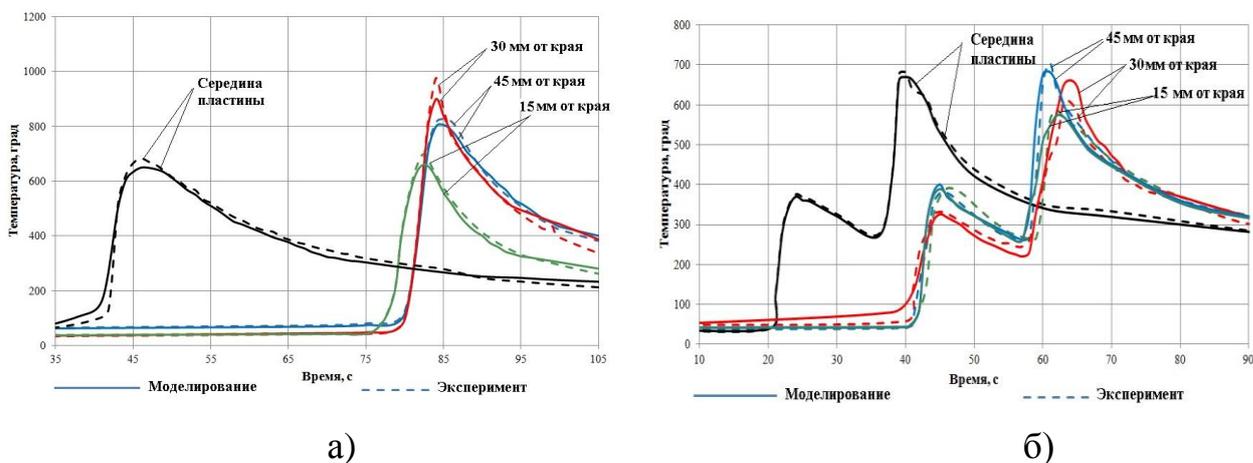


Рисунок 3. Расчетные и экспериментальные термические циклы при: а) однодуговой сварке; б) двухдуговой сварке

Сравнение экспериментальных и теоретических размеров сварочной ванны показало, что отклонение реальной длины сварочной ванны от расчетной составляют не более 8 %, отклонения ширины ванны не более 10 %, а отклонения глубины реальной и теоретической ванны составляют не более 7 %. Выполненное сравнение экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования показало, что при полученной погрешности опытных данных результаты определения температуры нагрева металла и размеров сварочной ванны при однодуговой и двухдуговой сварке удовлетворяет критерию Фишера при доверительной вероятности 0,95.

На основе разработанной математической модели теплопереноса был проведен вычислительный эксперимент по исследованию влияния толщины свариваемого металла и погонной энергии процесса на размеры области влияния отражения теплоты и изменение ширины шва в данной области.

По результатам вычислительного эксперимента были получены регрессионные уравнения для определения длины области перегрева в зависимости от толщины металла и погонной энергии:

$$1) \text{ для однодуговой сварки } L_{omp} = 0,00178 \cdot q - 2,99728 \cdot s + 43,35669 \quad (7)$$

2) для двухдуговой сварки:

$$\text{- первая дуга } L_{omp1} = 0,0025 \cdot q - 1,7881 \cdot s + 27,5673 \quad (8)$$

$$\text{- вторая дуга } L_{omp2} = 0,0021 \cdot q - 1,4708 \cdot s + 36,5543 \quad (9)$$

На основе результатов эксперимента были получены регрессионные уравнения для определения ширины шва в области перегрева в зависимости от расстояния от кромки изделия от толщины металла и погонной энергии:

$$1) \text{ для однодуговой сварки } e = 12,675 + 1,357 \cdot s - 0,0036 \cdot q - 0,1279 \cdot l \quad (10)$$

2) для двухдуговой сварки:

$$\text{- первая дуга } e_1 = 15,324 + 1,682 \cdot s - 0,0112 \cdot q - 0,0312 \cdot l \quad (11)$$

$$\text{- вторая дуга } e_2 = 14,896 + 1,512 \cdot s - 0,0053 \cdot q - 0,0271 \cdot l \quad (12)$$

Полученные результаты свидетельствуют о пригодности разработанной математической модели теплопереноса и адекватности получаемых с помощью нее данных как для однодуговой, так и для двухдуговой сварки. Полученная модель позволяет адекватно оценивать распределение температуры в квазистационарном состоянии и в области изменения тепловой картины вследствие влияния отражения теплового потока от границ свариваемого тела.

**Четвертая глава** посвящена разработке алгоритма выбора параметров режима сварки в условиях искажения теплового поля вследствие отражения теплоты от кромки и его практической реализации.

Работа созданного алгоритма включает следующие этапы:

Этап 1. Ввод исходных данных для проведения расчета;

Этап 2. Задание параметров численной модели расчета;

Этап 3. Расчет температурного поля по разработанной модели методом конечных разностей;

Этап 4. Разбиение изделия по оси шва на сетку элементов и определение координат точек с температурой солидуса в элементах разбиения.

Длина сварного соединения  $L$  разбивается по его оси на  $n$  – количество элементов с одинаковым шагом  $\Delta x$ . Количество шагов разбиения  $n$  определяется по следующей зависимости:

$$n = \frac{L}{\Delta x} \quad (13)$$

Затем формируется массив координат точек с температурой солидуса  $M = \{x_i; y_i\}$ , при  $(T = T_{sol}) \rightarrow e_i(x)$ , где  $e_i$  – ширина шва по координате  $x$ ;  $e_i = 2y_i$ .

Этап 5. Формирование массива погонных энергий и соответствующих им координат

Выполняется циклическое сравнение действительной ширины шва в каждом элементе разбиения с нормируемой величиной:

$$\Delta_i = |e_i(x) - e_{норм}| > \Delta_{норм} \quad (14)$$

В случае превышения нормируемого значения производится корректировка погонной энергии процесса:

$$q_{корр} = q_{норм} \frac{e_{норм}}{e_i(x)} \quad (15)$$

При окончании выполнения циклов вычислений формируется массив величин координат и соответствующих им мощностей дуги  $\Omega = \{x_i; Q_{корр}\}$ .

Этап 6. Формирование функции управления током и напряжением на основании массива  $\Omega$ .

Для однодуговой сварки  $\begin{cases} I = f(x) \\ U = f(x) \end{cases}$ , при условии  $q(x) = \frac{\eta \cdot I(x) \cdot U(x)}{V_{св}}$

Для двухдуговой сварки  $\begin{cases} I_1 = f_1(x); U_1 = f_1(x) \\ I_2 = f_2(x); U_2 = f_2(x) \end{cases}$ , при условии  $\begin{cases} q_1(x) = \frac{\eta \cdot I_1(x) \cdot U_1(x)}{V_{св}} \\ q_2(x) = \frac{\eta \cdot I_2(x) \cdot U_2(x)}{V_{св}} \end{cases}$

Определяется функция управления параметрами режима сварки, которая передается на исполнительные механизмы (робот или автомат).

Этап 7. Системой управления исполнительного механизма формируется программа сварки на основе функции выбора параметров режима, где каждой координате  $x$  соответствуют рассчитанные значения  $I$  и  $U$ . Выполняется сварка.

Результаты применения алгоритма выбора режима сварки при тестовой сварке, выполненной на роботизированном комплексе, показаны на рисунке 11. Применение алгоритма позволило обеспечить требуемые параметры сварного соединения: ширину шва, глубину проплавления, термический цикл сварки, постоянную (неизменную) структуру ЗТВ по всей длине, в том числе и в концевой части шва.

Для увеличения качества сварки и повышения производительности данный алгоритм был внедрен при однодуговой сварке патрубков трубы приемной с нейтрализатором для автомобилей марки Лада.

Согласно разработанной модели была определена функция выбора параметров процесса (вводимой тепловой мощностью) в соответствии с функцией цели для обеспечения заданных размеров шва (Рисунок 4).

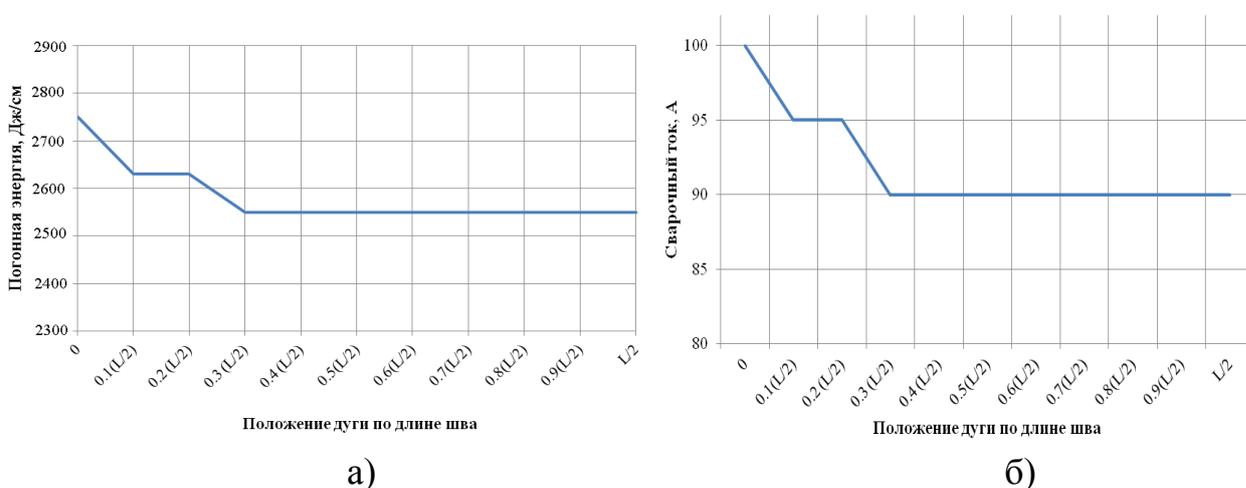


Рисунок 4. Распределение погонной энергии по длине: а) для первой половины шва; б) для второй половины шва;  $L$  – общая длина шва

Внедрение данной роботизированной сварочной установки, оснащенной алгоритмом выбора режима сварки, позволило снизить количество брака при изготовлении изделий с 20 до 3 % и увеличить производительность сварки в 1,5 раза, что подтверждено актом внедрения.

Разработанный в данной работе алгоритм был также успешно внедрен при автоматической двухдуговой сварке в защитных газах сложных пространственных строительных конструкций для соединений, в которых невозможно установить выводные планки.

Для реализации данной технологии был разработан двухдуговой сварочный автомат (трактор) АДФГ-502 ШТОРМ, конструктивные особенности которого были защищены патентом.

В соответствии с разработанной в данной работе моделью была определена функция управления параметрами процесса (вводимой тепловой мощностью) для

двухдуговой сварки в соответствии с функцией цели для обеспечения требуемых нормативных размеров шва (Рисунок 5).

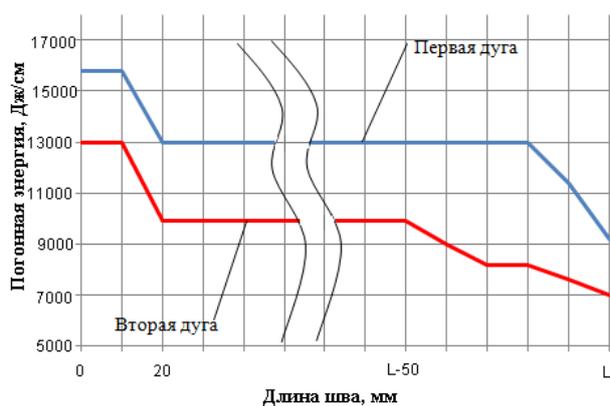


Рисунок 5. Распределение погонной энергии на первой и второй дуге по длине шва

области эффективного применения разработанного алгоритма выбора режима для однодуговой и двухдуговой сварки низколегированных сталей при толщинах материала от 2 до 14 мм (рисунок 6).

Внедрение в производство сварочных автоматов АДФГ-502 ШТОРМ позволило повысить производительность процесса сварки в 1,5-2,0 раза в сравнении с применением однодуговых процессов, а также снизить количество брака на 15-20 %. Результаты внедрения отражены в Акте внедрения.

На основании экспериментальных и теоретических исследований удалось определить

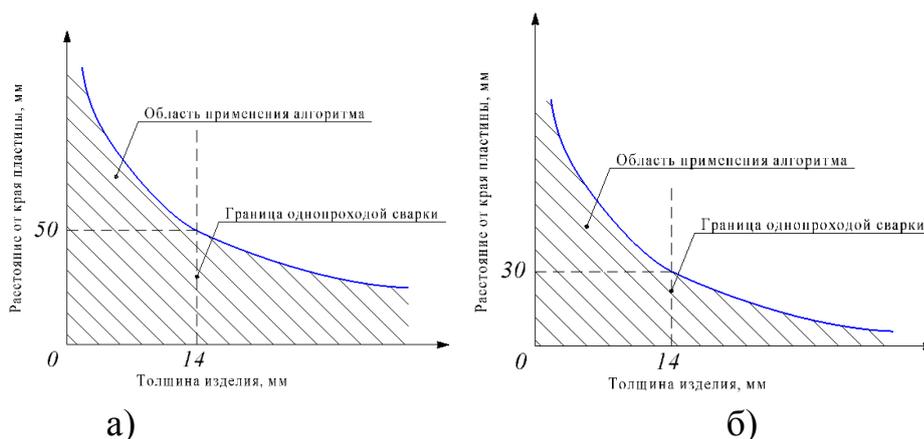


Рисунок 6. Области эффективного применения алгоритма выбора режима: а) при однодуговой сварке; б) при двухдуговой сварке

Алгоритм выбора режима сварки наиболее эффективно применять при однопроходной сварке, то есть при отсутствии дополнительной термообработки последующими проходами, для толщин свариваемых элементов до 14 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам выполнения диссертационной работы можно сформулировать следующие выводы, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

1. Экспериментальные исследования влияния отражения теплоты на изменение характеристик соединения показали, что при однодуговой сварке происходит значительный перегрев конца соединения на 20-35% , приводящий к изменению ширины шва на 15-20%, увеличению ширины зоны термического

влияния на 30%, увеличению размера зерна на участке перегрева до 55% и, как следствие, к снижению ударной вязкости на 40%.

2. При двухдуговой сварке перегрев конца соединения составляет не более 10%, изменения геометрии шва обнаружено не было, ширина зоны термического влияния увеличивается с 8 до 12 мм (до 33%). Диаметр зерна на участке перегрева растет на 10%, что приводит к меньшему, чем при однодуговой сварке снижению ударной вязкости на 10-17%.

3. Разработана математическая модель процесса теплопереноса, которая позволила помимо учета изменения теплофизических свойств соединения и распределенности источника нагрева, также описывать отражение теплоты от кромки.

4. Оценка точности расчета по разработанной математической модели теплопереноса методом конечных разностей с неявной схемой определения температуры показала, что погрешность моделирования при однодуговой сварке составляет 12 %, а при двухдуговой сварке - 15 %. Проверка адекватности моделирования по критерию Фишера дала положительные результаты при доверительной вероятности 0,95.

5. На основе данных вычислительного эксперимента было исследовано влияние толщины свариваемого металла и погонной энергии сварки на размеры области влияния отраженного потока теплоты для низколегированных конструкционных сталей. Статистическая обработка результатов эксперимента позволила определить регрессионные уравнения зависимости длины области перегрева от погонной энергии процесса и толщины металла, также регрессионные уравнения изменения ширины шва в области перегрева. Удалось установить, что длина области перегрева при однодуговой сварки составляет в среднем от 30 до 60 мм. При двухдуговой сварке: на первой дуге от 20 до 35 мм, на второй дуге от 25 до 50 мм.

6. На основе результатов моделирования был разработан алгоритм выбора режима сварки и определены области его эффективного применения для низколегированных сталей при толщине свариваемых элементов от 2 до 14 мм. Применение алгоритма позволило обеспечить стабильность геометрических размеров и механических свойств (ударной вязкости) шва и по всей длине сварного соединения.

7. Промышленное внедрение разработанного алгоритма в сварочных роботизированных комплексах позволило снизить долю брака при однодуговой сварке до 3%, а при двухдуговом процессе – на 15-20%. Повышение производительности при однодуговой сварке кольцевых швов составило до 50 %, при двухдуговой сварке конструкций без выводных планок – до 50-100 %.

**Перспективы дальнейшей разработки темы** заключаются в следующем:

- исследование условий формирования и разработка алгоритма выбора режима сварки в начальной части сварного соединения, где происходят процессы теплонасыщения;

- использование полученных результатов при подготовке бакалавров и магистров по направлению 150700 «Машиностроение».

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

**Патенты и статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах,**

**определенных ВАК:**

1. Патент на полезную модель №139365 (РФ) Двухдуговой сварочный автомат / М.А. Шолохов, А.М. Фивейский, А.В. Матушкин, А.Ю. Мельников; заявл. 08.03.2013; опубл. 17.03.2014. Бюлл. № 11.

2. Патент на полезную модель № 144972 (РФ) Устройство позиционирования сварочной горелки /М.А. Шолохов, А.М. Фивейский, А.В. Матушкин, А.Ю. Мельников; заявл. 25.04.2014; опубл. 10.09.2014. Бюлл. № 25.

3. Опыт внедрения роботов в сварочное производство / А.Ю. Мельников [и др.] // Сварка и диагностика. 2014. № 4. С. 41-43 (0,38 п.л./0,23 п.л.).

4. Шолохов М.А., Мельников А.Ю., Гончаров С.Н. Пути повышения производительности сварки корпусных конструкций специальной техники // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 5. С.10-14 (0,61 п.л./0,32 п.л.).

5. Шолохов М.А., Мельников А.Ю., Разиков М.Н. Особенности термомодеформационных процессов при сварке и высокопрочных сталей с различной формой разделки кромок Сварочное производство. 2015. № 9. С. 7-12 (1,05 п.л./0,38 п.л.).

6. Инженерная методика расчета параметров режима двухдуговой сварки угловых швов / А.Ю. Мельников [и др.] // Сварка и Диагностика. 2016 г. №3. С. 46-49 (0,50 п.л./0,32 п.л.).

7. Мельников А.Ю. Технологические проблемы применения двухдуговой сварки при производстве пространственных мостовых конструкций // Сварка и Диагностика. 2017. № 3. С. 56-59 (0,50 п.л./0,38 п.л.).

8. Шолохов М.А., Мельников А.Ю., Бузорина Д.С. Исследование влияния отраженного теплового потока на изменение характеристик концевой части сварного шва // Сварка и Диагностика. 2018. № 5. С. 30-37 (1,0 п.л./0,53 п.л.).

9. Шолохов М.А., Мельников А.Ю., Бузорина Д.С. Совершенствование расчета процессов распространения тепла в условиях влияния границ изделия // Сварка и Диагностика. 2018. № 6. С. 33-39 (0,50 п.л./0,38 п.л.).

### **Публикации в других изданиях:**

1. Шолохов М.А., Фивейский А.М., Мельников А.Ю. Двухдуговая сварка и ее практическая реализация // Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее: Тезисы стендовых докладов. Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины. Киев. 2013. С. 110 (0,12 п.л./0,05 п.л.).

2. Шолохов, М.А. Перспективные направления повышения производительности сварки корпусов специальной техники / Шолохов М.А., Мельников А.Ю., Бузорина Д.С., Разиков М.Н. // Проблемы развития высоких технологий. Том 2. Сборник статей девятнадцатой международной научно-практической конференции «Высокие технологии в индустрии и экономике» (20-22 мая 2015) – Санкт-Петербург – 121-123 (0,54 п.л./0,30 п.л.).

3. Инженерная методика расчета параметров режима двухдуговой сварки угловых швов / А. Ю. Мельников [и др.] // Сварка и диагностика: сборник докладов международного форума (Екатеринбург, 24-25 ноября 2015 г.). Екатеринбург: УрФУ. 2015. С. 270-278 (0,58 п.л./0,32 п.л.).

4. Шолохов М.А., Мельников А.Ю., Фивейский А.М. Влияние специфических особенностей двухдуговой сварки на свойства сварных соединений // Обработка материалов: современные проблемы и пути решения: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов/ Юргинский технологический институт. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. С. 47-51 (0,46 п.л./0,27 п.л.).

5. Мельников А.Ю., Фивейский А.М., Шолохов М.А. Особенности выбора параметров режима при двухдуговой сварке угловых швов // Обработка материалов: современные проблемы и пути решения: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов/ Юргинский технологический институт. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. С. 52-56 (0,54 п.л./0,32 п.л.).

6. Melnikov A.U., Fiveyskiy A.M., Sholokhov M.A. Specifics of mode parameters choice under twin arc welding of fillet welds // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. № 125. P. 1-6 (0,58 п.л./0,31 п.л.).

7. Sholokhov M.A., Melnikov A.U., Fiveyskiy A.M. Influence of Specific Features of Twin Arc Welding on Properties of Weld Joints // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. № 125. P. 1-6 (0,60 п.л./0,34 п.л.).

8. Sholokhov M.A., Melnikov A.U., Razikov M.N. Special features of thermal and deformation processes in welding high-strength steels with different edge preparation // Welding International. 2016 VOL. 30 № 7. P. 712–716 (0,62 п.л./0,38 п.л.).