

Никифоров Роман Валентинович

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ НЕПЛАВЯЩИМСЯ  
ЭЛЕКТРОДОМ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
ТОНКОЛИСТОВЫХ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ  
С УЧЕТОМ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ИЗДЕЛИИ**

05.02.10 - Сварка, родственные процессы и технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва - 2014

Работа выполнена на кафедре оборудования и технологии сварочного производства ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Научный руководитель:

**АТРОЩЕНКО Валерий Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

**КИСЕЛЕВ Алексей Сергеевич,**  
доктор технических наук,  
НИЦ «Курчатовский институт»,  
ведущий научный сотрудник

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2061655

Никифоров Р.В. Разработка

**КОБЕРНИК Николай Владимирович,**  
кандидат технических наук,  
МГТУ им. Н.Э.Баумана, доцент

Ведущая организация: ОАО «Институт технологии и организации производства» (ОАО НИИТ), г. Уфа

Защита диссертации состоится «25» сентября 2014 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

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

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

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.141.01,  
доктор технических наук, доцент

А.В. Коновалов

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** В настоящее время одним из широко используемых процессов получения сварных изделий является аргодуговая сварка неплавящимся электродом (далее АрДС), характеризующаяся стабильным качеством получаемых сварных соединений и сравнительно высокой степенью автоматизации. Широкое применения АрДС получила в авиа- и двигателестроении для сварки тонколистовых коррозионно-стойких сталей аустенитного класса (корпуса наружные турбины низкого давления, смесителя и компенсатора, корпус воздуховоздушного теплообменника, выходной направляющий аппарат компрессора низкого давления и тд.), значительная часть из которых выполняется без присадочной проволоки на медной подкладке в соответствии с ГОСТ 14771-76.

При этом основными требованиями, предъявляемыми к сварным конструкциям, являются стабильность геометрических размеров и механических свойств сварного шва.

Наиболее важными параметрами для АрДС стыковых соединений на подкладке являются ширина сварного шва, ширина обратного валика, величина усиления шва и высота обратного валика, которые регламентированы ГОСТ 14771-76. И если первый и третий параметры в основном зависят от режимов сварки и геометрии электрода, то два остальных существенно зависят от размеров канавки в медной подкладке. Поэтому в качестве основных параметров сварного шва рассматривают ширину сварного шва и ширину обратного валика.

Несмотря на большой объем опубликованных данных по автоматической АрДС, полученных в результате научных исследований и производственного опыта, они в большинстве случаев не позволяют выбрать сочетание параметров режима сварки стыковых соединений на медной подкладке, удовлетворяющих одному из заданных производственных требований: максимальная производительность, минимальная ширина сварного шва, минимальное усиление сварного шва, минимальное отношение ширины шва к ширине обратного валика.

Учитывая то, что в динамично развивающемся авиационном двигателестроении окончательная отработка режима сварки во многих случаях выполняется уже на готовых дорогостоящих узлах ТРД, а не на технологических образцах, то актуальным вопросом является получение математической модели, которая обеспечит расчет (выбор) режимов сварки, исключая необходимость их экспериментальной корректировки и снизит затраты времени и средств на технологическую подготовку производства. Для совершенствования технологии автоматической АрДС и более эффективного применения на производстве данных, полученных по результатам экспериментальных исследований и численным моделировании сварки стыковых соединений на медной подкладке, возникает необходимость их

обобщения в виде закономерностей, которые могли бы служить справочным материалом для широкого круга специалистов и использоваться в сварочных компьютеризированных автоматах, робототехнических системах, микропроцессорных источниках питания для сварки.

**Цель работы** – совершенствование технологии автоматической АрДС без присадочной проволоки стыковых соединений на медной подкладке коррозионно-стойких сталей аустенитного класса толщиной от 1,5 до 3 мм путем создания компьютеризированной системы, позволяющей снизить трудоемкость технологической подготовки производства при проведении работ по экспериментальной корректировке режимов сварки новых изделий в производственных условиях.

### **Задачи исследований:**

1. Определение количественных зависимостей, связывающих основные параметры геометрии сварного шва для стыковых соединений из коррозионно-стойких сталей аустенитного класса толщиной от 1,5 до 3 мм с режимами автоматической АрДС без присадочной проволоки на медной подкладке.
2. Разработка математической модели, описывающей основные параметры геометрии сварного шва стыкового соединения при автоматической АрДС коррозионно-стойких сталей аустенитного класса толщиной от 1,5 до 3 мм с учетом теплоотдачи в медную подкладку.
3. Разработка компьютеризированной системы выбора режимов сварки на основе экспериментальных данных и результатов математического моделирования, позволяющая сформировать для автоматической АрДС без присадочной проволоки наилучшее сочетание параметров режима сварки стыковых соединений на медной подкладке, соответствующих ГОСТ 14771-76 «Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры» и удовлетворяющих заданному производственному требованию.
4. Разработка методики оценки влияния термдеформационного цикла АрДС стыковых соединений на величину остаточных деформаций сварной конструкции на основе разработанной модели сварки стыковых соединений тонколистовых материалов и рекомендаций по уменьшению остаточных деформаций при сварке на сборочно-сварочных приспособлениях с медной подкладкой.

### **Методы исследования**

В работе применялись методы статистической обработки экспериментальных данных автоматической АрДС с использованием программ STATISTICA и MathCAD. Для определения ширины сварного шва и ширины обратного валика использовались методы цифровой фотосъемки с дальнейшей обработкой в системе КОМПАС 3D ver. 13. Численное моделирование осуществлялось с помощью конечно-элементного комплекса

ANSYS/Multiphysics ver. 14.0. Поперечная усадка сварного соединения измерялась по перемещению рисок, расположенных поперек сварного шва, с помощью инструментального микроскопа «БМИ-1Ц». Угловая деформация сварного соединения определялась измерительной головкой «Renishaw MP10» 5-координатного станка «Стерлитамак 500V5».

### **Научная новизна работы состоит в следующем:**

1. Установлены количественные зависимости основных параметров геометрии сварного шва стыкового соединения по ГОСТ 14771-76 «Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры» от режимов автоматической АрДС на медной подкладке тонколистовых коррозионно-стойких сталей аустенитного класса толщиной от 1,5 до 3,0 мм, позволяющие определять данные параметры без проведения предварительных экспериментов.
2. Получена математическая модель для численного расчета ширины сварного шва и ширины обратного валика, учитывающая теплоотдачу в медную подкладку, при автоматической АрДС стыкового соединения тонколистовых коррозионно-стойких сталей аустенитного класса толщиной от 1,5 до 3,0 мм, с применением комбинированного источника нагрева, представляющего собой сочетание линейного и поверхностного нормально-распределенного источников.
3. Разработана методика оценки влияния термдеформационного цикла АрДС стыковых соединений на медной подкладке на остаточные деформации тонколистовых конструкций из коррозионно-стойких сталей аустенитного класса с применением численных методов, позволяющая выработать рекомендации по уменьшению остаточных деформаций после сварки на приспособлениях с медной подкладкой.

### **Практическая ценность результатов работы**

Определены границы диапазонов варьирования сварочного тока  $I_{св}$  и скорости сварки  $V_{св}$  для автоматической АрДС без присадочной проволоки на медной подкладке стыковых швов с размерами, установленными ГОСТ 14771-76, из коррозионно-стойкой стали аустенитного класса толщинами 1,5-3,0 мм. Полученные зависимости геометрии стыкового шва от параметров режима автоматической АрДС внедрены в виде компьютеризированной базы данных сварочных источников питания, реализуемые компанией ООО «ШТОРМ-ЛОРХ» для современных роботизированных предприятий.

Разработана компьютеризированная система выбора режимов автоматической АрДС стыковых соединений на медной подкладке коррозионно-стойких сталей аустенитного класса толщиной от 1,5 до 3 мм, внедренная на предприятии ОАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение». В результате чего усовершенствована технология производства тонколистовых конструкций за счет снижения средств и времени при отработке режимов автоматической АрДС без присадочной проволоки новых изделий.

Получены рекомендации для проектирования сварочных приспособлений, позволяющие снизить величину остаточных деформаций на 26% по сравнению с базовыми сварочными приспособлениями после АрДС стыковых соединений пластин и цилиндрических оболочек с толщиной стенки от 1,5 мм.

#### **На защиту выносятся:**

1. Количественные зависимости основных параметров геометрии сварного шва стыкового соединения по ГОСТ 14771-76 «Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры» от режимов автоматической АрДС без присадочной проволоки на медной подкладке тонколистовых коррозионно-стойких сталей аустенитного класса толщиной от 1,5 до 3,0 мм.
2. Математическая модель с экспериментальными коэффициентами для численного расчета ширины сварного шва и ширины обратного валика сварного шва стыкового соединения при автоматической АрДС коррозионно-стойких сталей аустенитного класса толщиной от 1,5 до 3 мм.
3. Компьютеризированная система выбора наилучшего сочетания параметров режима автоматической АрДС без присадочной проволоки стыкового соединения коррозионно-стойких сталей толщиной от 1,5 до 3 мм, удовлетворяющих одному из заданных производственных требований.
4. Методика оценки влияния термдеформационного цикла АрДС стыковых соединений на медной подкладке на остаточные деформации тонколистовых конструкций из коррозионно-стойких сталей аустенитного класса и рекомендации по уменьшению остаточных деформаций на приспособлениях с медной подкладкой.

#### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Российских и международных конференциях: Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Мавлютовские чтения», г. Уфа, УГАТУ, в 2008, 2010 и 2012 г.; Всероссийской научно-практической конференции «Автоматизация и управление технологическими и производственными процессами», Уфа, УГАТУ, 2011г.; V Всероссийской научно-технической конференции молодых специалистов, г.Уфа, УМПО 2011г.; материалы ежемесячного научного журнала «Молодежный Вестник УГАТУ», г.Уфа, УГАТУ, 2012г.; семинар «Инновационные технологии сварки и пайки», г. Уфа, Министерство промышленности и инновационной политики республики Башкортостан, 2012г.

#### **Публикации**

По результатам исследований опубликовано 13 научных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения общим объемом 181 страница, включая 16 таблиц, 76 рисунков и списка цитируемой литературы из 145 наименований.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы, формулируется цель работы, научная новизна и практическая ценность. Приведены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен поиск в научной и справочной литературе рекомендуемых режимов АрДС тонколистовых конструкций из коррозионно-стойкой стали аустенитного класса. В литературе недостаточно широко представлены рекомендуемые режимы автоматической АрДС тонколистовых конструкций из стали аустенитного класса. Поэтому в производственных условиях приходится выполнять экспериментальную отработку технологии сварки новых изделий. Для сокращения объема экспериментов при формировании сварного шва с размерами, соответствующими ГОСТ 14771-76 «Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры», были рассмотрены математические модели процессов сварки, связывающие параметры режима автоматической АрДС с параметрами геометрии сварного шва, представленные в литературе.

Математические модели в большинстве случаев основаны на методах аналитического описания температурных полей, разработанных Н.Н. Рыкалиным, с использованием нескольких схем подвижных источников нагрева. Для упрощения количественного описания взаимосвязи параметров шва и режимов сварки Н.Н. Рыкалиным и А.И. Бекетовым были предложены безразмерные критерии, основанные на теории подобия. Для приблизительной оценки размеров параметров сварного шва можно использовать аналитическое решение для расчета температурных полей при сварке от комбинации нескольких подвижных источников нагрева с использованием экспериментально полученных поправочных коэффициентов. Такой метод использован в работах А.И. Акулова, Г.Н. Гусакова, Н.Н. Прохорова. В практике сварки для определения влияния параметров режима сварки на геометрию сварного шва нашли широкое применение статистические модели, представленные в работах Р.А. Цепенева, Г.А. Славина, Ю.С. Ищенко и др.

Повышение точности моделирования геометрии сварного шва возможно с применением конечно-элементных или конечно-разностных схем решения уравнения теплопроводности, представленных в работах Р.В. Логвинова, С.И. Полоскова, В.А. Ерофеева. Эти модели обладают рядом преимуществ: настройка точности результатов моделирования путем подбора оптимальной конечно-элементной сетки 3D-модели; теплофизические свойства материала и граничные условия теплоотдачи с выбранной поверхности задаются функцией от температуры и т.д.

При этом на распределение остаточных деформаций в свариваемом изделии влияют величина вводимой погонной энергии, конструкция сварочного приспособления и условия закрепления изделия.

В результате литературного обзора систем прогнозирования формирования сварного шва не было найдено в открытом доступе такой системы выбора режимов АрДС стыковых соединений, чтобы ее можно было использовать для получения количественных взаимосвязей параметров режимов автоматической АрДС и параметров сварного шва, выполненного на медной подкладке.

Рассмотрев преимущества и недостатки опубликованных работ по математическим моделям расчета размеров стыкового шва, было принято решение использовать конечно-элементную модель теплопередачи, учитывающую влияние теплоотдачи в медную подкладку на геометрию стыковых соединений при автоматической АрДС без присадочной проволоки. Для оценки влияния теплоотдачи в медную подкладку и условий закрепления изделия на остаточные деформации для разработки рекомендаций по их снижению, автором данной работы принято решение использовать численную термдеформационную модель на основе конечно-элементной модели теплопередачи.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований по определению диапазонов режимов АрДС стыковых соединений пластин размерами 100-50 мм на медной подкладке из тонколистовой коррозионно-стойкой стали аустенитного класса 12Х18Н10Т толщиной 1,5; 2,0 и 3,0 мм в состоянии поставки, обеспечивающие формирование шва с размерами, соответствующими ГОСТ 14771-76 «Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры». Для экспериментов использовалось типовое сварочное приспособление с пневмоприводом для сварки плоских тонколистовых образцов, состоящее из медной подкладки и латунных прижимов-клавиш. Давление зажимных клавиш на свариваемые пластины составляло 0,6 МПа. Для экспериментов применялись медные подкладки с шириной канавки 6 и 8 мм и глубиной 0,5 мм.

Основным критерием выбора крайних точек диапазонов режима являлась ширина обратного валика на соответствие ГОСТ 14771-76, в качестве недопустимых дефектов были приняты прожоги. Для каждой величины силы тока подбирались несколько скоростей, в диапазоне между которыми находилась допустимая величина ширины обратного валика. Размеры сварных швов измерялись в программе *КОМПАС 3D* по 9 точкам с интервалом 4 мм. На каждом режиме сваривали 3 образца. Измеренные значения параметров сварного шва обрабатывались в программе *STATISTICA*. В качестве среднего положения выборки использовалась медиана с квантилями 25% (Q25) и 75% (Q75). Доверительный интервал экспериментальных данных – 0,95. Зависимость ширины сварного шва от скорости сварки представлена на

Рисунке 1. Сплошными линиями показаны режимы сварки при длине межэлектродного промежутка 3 мм, пунктирными – 2 мм.

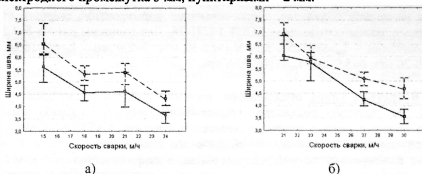


Рисунок 1. Зависимость параметров сварного шва от скорости сварки для толщины металла 1,5 мм и силы тока 105А (а) и 125А (б).

Определение эффективного КПД сварочной дуги осуществлялось с помощью метода калориметрирования в емкости с водой. В емкость наливалась жидкость объемом 100 мл, который определялся с помощью измерительной мензурки с ценой деления 1 мл.

В результате проведенных экспериментов было обнаружено, что зависимость ширины обратного валика шва от погонной энергии сварки имеет ярко выраженный линейный характер, что подтверждает большинство экспериментальных данных других авторов. Используя линейную аппроксимацию в среде пакета *MathCad*, получили графики, иллюстрирующие эту зависимость на Рисунке 2.

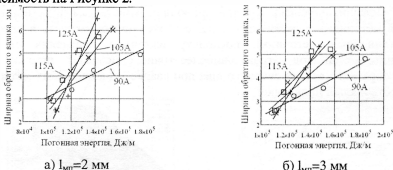


Рисунок 2. Зависимость ширины обратного валика от погонной энергии при сварке для толщины металла 1,5 мм.

Результаты статистической обработки измеренных параметров сварных швов послужили исходными данными для выбора величины экспериментальных коэффициентов численной модели теплопередачи.

В результате экспериментов были определены диапазоны режимов АрДС стыковых швов из тонколистовой коррозионно-стойкой стали аустенитного класса на медной подкладке, обеспечивающие формирование сварного шва с размерами, соответствующими ГОСТ 14771-76. Для толщины листов  $\delta=1,5$  мм они составили –  $I_{св}=90-125$  А при  $V_{св}=12-30$  м/ч;  $\delta=2,0$  мм -  $I_{св}=90-160$  А при  $V_{св}=10-26$  м/ч;  $\delta=3,0$  мм -  $I_{св}=170-225$  А при  $V_{св}=10-25$  м/ч.

В третьей главе представлена численная модель теплопередачи при АрДС на медной подкладке (термический анализ), разработанная с использованием метода конечных элементов в пакете ANSYS/Multiphysics, в которой изотерма плавления от подвижного комбинированного источника нагрева имитировала ширину сварного шва и ширину обратного валика. В рассматриваемой модели учитывались потери на излучение и конвекционный теплообмен с окружающей средой.

Для описания температурного поля  $T(x, y, z, t)$  в плоском образце использовали дифференциальное нелинейное уравнение теплопроводности:

$$c\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (1)$$

где  $\rho(T)$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C);  $c(T)$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C). Зависимости теплофизических свойств стали, меди и латуни ( $\rho(T)$ ,  $\lambda(T)$ ,  $c(T)$ ) рассматривались как функции от температуры в исследуемых диапазонах.

В расчетной схеме модели сквозного проплавления, представленной на Рисунке 3, тепловая мощность сварочной дуги для одной из свариваемых пластин частично вводилась через верхнюю поверхность пластины (нормально-круговой источник), а частично – через ее боковую поверхность в плоскости стыка (линейный источник), поскольку изотермы плавления от такой комбинации источников нагрева наиболее точно описывают ширину шва и ширину обратного валика сварного шва при сварке тонколистовых материалов на теплоотводящей подкладке.

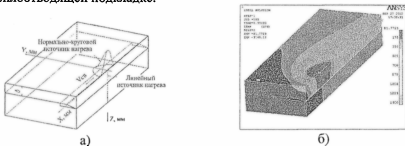


Рисунок 3. Схема ввода источников тепла (а) и результат ее реализации в пакете ANSYS (б).

Линейный тепловой источник задавался (Рисунок 3, а) по формуле:

$$q(x, t) = \frac{q_1}{4ah} \exp\left(-\frac{\Delta x}{a}\right)^2, \quad (2)$$

где  $a$  – размер конечного элемента, м;  $h$  – толщина стали, м;  $\Delta x = x_0 - V \cdot \text{time}$  – перемещение по оси ОХ.

Нормально-круговой источник нагрева на верхней поверхности рассчитывался по формуле:

$$q(x, y, t) = \frac{k}{\pi} q_2 \exp\left(-k(\Delta x^2 + y^2)\right), \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент сосредоточенности распределенного источника нагрева,  $\text{см}^{-2}$ . При этом  $q_{\Sigma} = q_1 + q_2$ , где  $q_{\Sigma}$  – эффективная мощность нагрева сварочной дугой, Вт.

В соответствии с методикой расчета контактной термической проводимости граничные условия контакта сталь-медь (медная подкладка) и сталь-латунь (прижимы) рассматривались как сумма термических проводимостей воздушной прослойки  $\alpha_{\text{воз}}$  между микровыступами контактируемых материалов и металлического контакта  $\alpha_M$ .

Проверка расчетной методики определения проводимости теплового контакта осуществлялась путем записи термических циклов с термопар в медной подкладке и латунных прижимах с последующим их сравнением с термическими циклами узлов конечно-элементной сетки медной подкладки при расчете контактной термической задачи. Термические циклы снимались с помощью цифрового 4-х канального измерителя температуры CENTER 309.

На Рисунке 4 сплошными линиями показаны термические циклы, полученные в результате экспериментов, пунктирными – с узлов численной модели теплопередачи при АрДС (режима сварки  $I_{\text{св}}=115\text{А}$ ,  $V_{\text{св}}=12\text{ м/ч}$ ,  $l_{\text{мп}}=3\text{ мм}$ ).

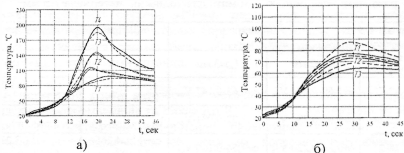


Рисунок 4. Термические циклы, снятые с термопар, установленных в медной подкладке (а) и прижиме (б).

В результате сопоставления экспериментальных термических циклов с расчетными, было установлено, что термическая проводимость, рассчитанная по теплопроводности воздушной прослойки между микронеровностями

шероховатостей поверхностей, отражает реальные условия сварки с погрешностью 5-7%.

Обработка результатов численных экспериментов показала, что зависимость ширины шва от коэффициента сосредоточенности нормально-кругового источника, график которой представлен на Рисунке 5, близка к линейной в исследованных диапазонах режима сварки.

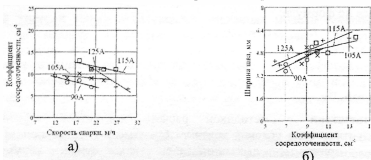


Рисунок 5. Зависимости коэффициента сосредоточенности нормально-кругового источника от скорости сварки (а) и ширины шва от коэффициента сосредоточенности (б) для толщины пластины 1,5 мм;  $l_{\text{мп}}=3\text{мм}$ .

Полученные в результате моделирования значения коэффициентов сосредоточенности линейно аппроксимировали в среде пакета *MathCad* по методу наименьших квадратов. Конечные формулы для вычисления параметров геометрии сварного шва представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Количественные взаимосвязи параметров геометрии стыкового шва с режимами сварочного автомата для толщины материала 1,5 мм

| Сила тока<br>$I_{\text{св}}, \text{A}$ | Диапазон скоростей сварки<br>$V_{\text{св}}, \text{м/ч}$ | Ширина шва $e$ , мм                 |                                     | Ширина обратного валика $e_1$ , мм                     |                                                       |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|                                        |                                                          | $l_{\text{мп}}=2 \text{ мм}$        | $l_{\text{мп}}=3 \text{ мм}$        | $l_{\text{мп}}=2 \text{ мм}$                           | $l_{\text{мп}}=3 \text{ мм}$                          |
| 90                                     | 12-21                                                    | $e=5,69-0,044 \cdot V_{\text{св}}$  | $e=6,63-0,147 \cdot V_{\text{св}}$  | $e_1=k^1 \cdot (0,397+2,656 \cdot 10^{-5} \cdot q_n)$  | $e_1=k^1 \cdot (0,398+2,752 \cdot 10^{-5} \cdot q_n)$ |
| 105                                    | 15-24                                                    | $e=9,95-0,234 \cdot V_{\text{св}}$  | $e=5,22-0,031 \cdot V_{\text{св}}$  | $e_1=k^1 \cdot (4,674+7,013 \cdot 10^{-5} \cdot q_n)$  | $e_1=k^1 \cdot (2,272+4,594 \cdot 10^{-5} \cdot q_n)$ |
| 115                                    | 18-27                                                    | $e=9,24-0,220 \cdot V_{\text{св}}$  | $e=7,56-0,103 \cdot V_{\text{св}}$  | $e_1=k^1 \cdot (-4,765+7,5 \cdot 10^{-5} \cdot q_n)$   | $e_1=k^1 \cdot (-3,22+5,633 \cdot 10^{-5} \cdot q_n)$ |
| 125                                    | 21-30                                                    | $e=12,04-0,297 \cdot V_{\text{св}}$ | $e=11,88-0,277 \cdot V_{\text{св}}$ | $e_1=k^1 \cdot (10,781+1,228 \cdot 10^{-4} \cdot q_n)$ | $e_1=k^1 \cdot (6,826+8,248 \cdot 10^{-5} \cdot q_n)$ |

где  $k^1$  - поправочный коэффициент, корректирующий расчет ширины обратного валика шва с учетом особенностей контакта свариваемого образца и

подкладки;  $l_{\text{мп}}$  – длина межэлектродного промежутка, мм;  $q_n$  – погонная энергия, Дж/м.

В результате компьютерного моделирования получены количественные взаимосвязи режимов автоматической АрДС и ширины сварного шва при аргодуговой сварке с полным проплавлением неплавящимся электродом без присадочной проволоки коррозионно-стойких сталей аустенитного класса толщиной от 1,5 до 3,0 мм с учетом геометрии подкладки и величины шероховатости свариваемого листового материала.

На основе полученных количественных взаимосвязей параметров режима сварки и геометрии сварного шва стыковых соединений из листового материала, полученных в 3 главе, разработана компьютеризированная система «Расчет параметров геометрии стыковых соединений при АрДС тонколистовых коррозионно-стойких сталей на медной подкладке», позволяющая сформировать сочетание параметров режима АрДС новых изделий без проведения работ по экспериментальной корректировке режимов сварки в производственных условиях с погрешностью не более 15%, достаточной для инженерных расчетов. Входными параметрами компьютеризированной системы для выбора режимов сварки, обеспечивающих размеры шва в соответствии с ГОСТ 14771-76, являются толщина листового материала из коррозионно-стойкой стали аустенитного класса (1,5 - 3,0 мм); ширина канавки в медной подкладке (6 – 8 мм); шероховатость поверхности листового материала и медной подкладки ( $R_a=0,63 - 5,0$  мкм). Значения параметров режима сварки для значений толщины листов, отличающихся от 1,5; 2,0 и 3,0 мм, определяются линейной интерполяцией. По результатам численного моделирования в системе формируется сочетание параметров режима сварки стыковых соединений на медной подкладке, удовлетворяющих производственному требованию: сила сварочного тока  $I_{\text{св}}$ , скорость сварки  $V_{\text{св}}$ , величина межэлектродного промежутка  $l_{\text{мп}}$ ; и размеров - ширины шва и ширины обратного валика. Полученная математическая модель реализована в компьютеризированной системе «Расчет параметров геометрии стыковых соединений при АрДС тонколистовых коррозионно-стойких сталей на медной подкладке» и является частью базы данных для управления сварочными инверторными источниками питания.

В четвертой главе разработана методика численного моделирования влияния термометформационного цикла АрДС стыковых соединений на медной подкладке на остаточные деформации продольных и кольцевых швов тонкостенных цилиндрических оболочек из коррозионно-стойких сталей аустенитного класса и даны рекомендации по уменьшению остаточных деформаций после сварки на приспособлениях с медной подкладкой.

Определение сварочных деформаций осуществлялось решением термометформационной задачи с использованием кривенного метода, то есть решение задач термического и механического (деформационного) анализом выполнялось раздельно. Распределение температуры для всех узлов конечных

элементов было получено на первом этапе и после чего использовалось как нагрузка на узлы для определения остаточных деформаций на втором. При этом тепловой тип элементов был преобразован в механический тип элементов на втором шаге в соответствии с принятыми в пакете ANSYS/Multiphysics процедурами.

При моделировании остаточных деформаций в конструкциях в качестве первого приближения рассматривалось полученное аргонодуговой сваркой стыковое соединение тонколистовых пластин одинаковой толщины с прижимом к медной подкладке. Режимы сварки для сравнения с экспериментальными данными соответствовали минимально и максимально вводимой погонной энергии в исследуемых диапазонах варьирования параметров режима сварки. Для толщины листов  $\delta=1,5$  мм они составили –  $I_{св}=115A$  при  $V_{св}=18$  и  $27$  м/ч;  $\delta=2,0$  мм -  $I_{св}=140A$  при  $V_{св}=16$  и  $25$  м/ч;  $\delta=3,0$  мм -  $I_{св}=210A$  при  $V_{св}=14$  и  $20$  м/ч.

Распределение относительных перемещений узлов по оси OX, соответствующее поперечной усадке пластины, и угловые деформации при АрДС плоских образцов толщиной 3,0 мм показаны на Рисунке 6. Контурной линией показана исходная форма пластины перед сваркой. 3D-модель сварной пластины была построена с помощью функции Extrude («вытянуть») из 2D-модели в плоскости XOY. Эта операция была необходима для того, чтобы использовать окна плотности сетки для уменьшения размеров конечных элементов в области сварного шва.

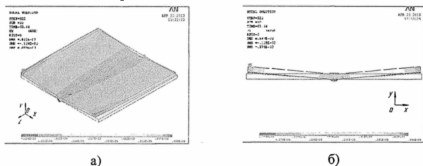


Рисунок 6. Распределение относительных перемещений узлов по оси OX (а) и угловая деформация  $\beta$  пластины (б). Масштабный коэффициент  $\times 8$ .

В результате численного моделирования напряженно-деформированного состояния образцов установлено, что при АрДС плоских образцов толщиной 3,0 мм на медной подкладке на распределение остаточных деформаций при фиксированном усилии прижимов оказывает влияние ширина канавки. При ее уменьшении с 8 до 6 мм угловая деформация снижается с  $1,04^\circ$  до  $0,8^\circ$  на режиме с  $q_n=383$  кДж/м за счет более интенсивной теплоотдачи в подкладку. Для пластин с толщинами 1,5 и 2,0 мм на режимах с  $q_n=156$  кДж/м и  $234$  кДж/м соответственно, угловая деформация сварных пластин при изменении ширины

канавки с 8 до 6 мм практически не изменяется, поскольку для тонких листов при соотношениях ширины шва и ширины обратного валика, близких к единице, поперечные деформации примерно одинаковы по высоте сварного соединения.

Разработанная методика численного моделирования влияния термдеформационного цикла АрДС стыковых соединений на медной подкладке на остаточные деформации тонколистовых конструкций была опробована на сварном узле корпуса наружного опоры турбины низкого давления авиадвигателя АЛ-31Ф. Корпус имеет продольный сварной шов обечайки с наружным диаметром 834 мм с толщиной стенки 1,5 мм и кольцевой шов обечайки и фланца. Распределение относительных перемещений узлов 3D-модели по оси ОХ стыкового сварного шва обечайки, соответствующее продольной усадке обечайки, представлено на Рисунке 7.

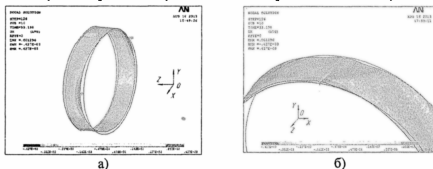


Рисунок 7. Распределение относительных перемещений узлов обечайки по оси ОХ (а) и перемещения в зоне стыкового шва (б).  
Масштабный коэффициент х25.

Распределение радиальных перемещений узлов 3D-модели по оси ОУ кольцевого шва обечайки и фланца корпуса наружного опоры турбины, соответствующее продольной усадке обечайки, представлено на Рисунке 8. Размер конечных элементов в области шва – 0,375 мм.

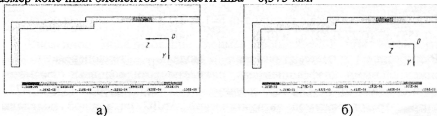


Рисунок 8. Радиальные перемещения узлов половины 3D-модели по оси ОУ для режимов сварки с  $q_n=156$  кДж/м (а) и  $q_n=111$  кДж/м (б).

По результатам численного моделирования было установлено, что для сварочного приспособления, предназначенного для АрДС тонколистовой цилиндрической обечайки с толщиной стенки 1,5 мм и фланца из коррозионно-

стойкой стали аустенитного класса, целесообразно использовать секторные разжимы с как можно большей зоной контакта внутренней стенки обечайки и медной подкладки. При этом поперечная усадка свариваемого изделия в приспособлении не зависит от вводимой погонной энергии и повышается с 0,0573 до 0,146 мм при увеличении осевого поджатия в 2 раза. Следовательно, необходимо ограничивать усилие поджатия ориентируясь на назначенные припуски на механическую обработку деталей изделия.

Использование предложенной численной термдеформационной модели позволяет прогнозировать остаточные деформации тонкостенных сварных конструкций и обечаек с жесткими допусками на отклонение геометрических размеров и добиться их минимизации, подобрав наиболее рациональную схему закрепления в приспособлении, конструкцию и величину разжатия концентрических секторов и осевого поджатия свариваемого изделия на стадии проектирования сварочного приспособления.

### Общие выводы и результаты работы

1. Экспериментально определены границы диапазонов варьирования сварочного тока  $I_{св}$  и скорости сварки  $V_{св}$  для автоматической АрДС на медной подкладке стыковых швов с размерами, установленными ГОСТ 14771-76, из коррозионно-стойкой стали аустенитного класса толщинами 1,5-3,0 мм. Для листов с толщинами 1,5; 2,0 и 3,0 мм они составили:  $I_{св}=90-125A$  при  $V_{св}=12-30$  м/ч,  $I_{св}=90-160A$  при  $V_{св}=10-26$  м/ч и  $I_{св}=170-225A$  при  $V_{св}=10-25$  м/ч соответственно.

2. При исследовании контактной теплопередачи в медную подкладку установлено, что термическая проводимость, рассчитанная по теплопроводности воздушной прослойки между микронеровностями шероховатостей поверхностей, отражает реальные условия сварки с погрешностью 5-7%. Определена величина теплоотдачи в медную подкладку для максимальной и минимальной погонных энергий  $q_n$  в исследуемых диапазонах варьирования параметров режимов АрДС коррозионно-стойких сталей аустенитного класса с толщинами  $\delta=1,5; 2,0$  и 3,0 мм, которая составляет  $-(0,31-0,355) \cdot q_n$ ,  $(0,27-0,32) \cdot q_n$  и  $(0,21-0,24) \cdot q_n$  соответственно.

3. Разработана математическая модель теплопередачи с экспериментальными коэффициентами, связывающими основные параметры геометрии сварного шва стыкового соединения, соответствующие ГОСТ 14771-76, с параметрами режимов автоматической АрДС на медной подкладке коррозионно-стойких сталей аустенитного класса толщиной от 1,5 до 3 мм.

4. Разработана методика оценки влияния термдеформационного цикла автоматической АрДС стыковых соединений на остаточные деформации сварной конструкции при АрДС плоских образцов и кольцевых швов тонкостенных оболочек на основе разработанной модели сварки встык тонколистовых материалов в пакете ANSYS/Multiphysics, позволяющая

получить рекомендации по уменьшению остаточных деформаций при сварке на сборочно-сварочных приспособлениях с медной подкладкой.

5. Разработана компьютеризированная система выбора режимов сварки «Расчет параметров геометрии стыковых соединений при аргонодуговой сварке тонколистовых коррозионно-стойких сталей на медной подкладке», формирующая наилучшее сочетание параметров режима сварки, удовлетворяющих заданному производственному требованию, и позволяющая, в результате этого, усовершенствовать технологию автоматической АрДС без присадочной проволоки стыковых соединений на медной подкладке. Система внедрена на предприятии ОАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение».

6. База данных, используемая в основе компьютеризированной системы выбора режимов сварки, применяется для управления программируемых сварочных источников питания, реализуемых компанией ООО «ШТОРМ-ЛОРХ», в качестве запрограммированных заданий для сварки тонколистовой нержавеющей стали (функция Tiptronic) сварочными инверторами серии Lorch DC с суммарным расчетным экономическим эффектом в 3,4 млн. рублей.

### **Основные публикации по теме диссертации**

#### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Определение влияния теплоотвода в медную подкладку на проплавление тонколистовых материалов при аргонодуговой сварке / Р.В. Никифоров [и др.] // Известия Самарского Научного Центра Российской Академии Наук: Ежегодный научный журнал «Актуальные проблемы машиностроения» / Самарский научный центр РАН. Самара. 2012. Т.14, №1(2). С. 349-353.

2. Медведев А.Ю., Никифоров Р.В., Супов А.В. Определение составляющих энергетического баланса при линейной сварке трением // Известия Самарского Научного Центра Российской Академии Наук: Ежегодный научный журнал «Актуальные проблемы машиностроения» / Самарский научный центр РАН. Самара. 2012. Т.14, №1(2). С. 392-396.

3. Численное моделирование формы проплавления при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом на медной подкладке / Р.В. Никифоров [и др.] // Вестник УГАТУ. 2012. Т.16, №8 (53). С. 89-93.

4. Влияние геометрии лантанированного вольфрамового катода на стабильность глубины проплавления при сварке в аргоне / Р.В. Никифоров [и др.] // Сварочное производство. 2012. № 2. С. 29-33.

5. Energy Balance of the Linear Friction Welding Process / R. Nikiforov [et al.] // Journal of Engineering Science and Technology. 2012. Vol.5 (3). P. 20-24.

1. Экспериментальное определение предельных токовых нагрузок для лантанированных вольфрамовых электродов / Р.В. Никифоров [и др.] // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция: сборник трудов. Уфа, 2008. Т.2. С. 148-149.
2. Атрошенко В.В., Никифоров Р.В. Исследование формирования сварных швов при аргонодуговой сварке и разработка математических моделей для управления сварочным оборудованием // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция: сборник трудов. Уфа, 2010. Т.2. С.142-145.
3. Никифоров Р.В. Анализ применимости математических моделей к расчету геометрических параметров шва при аргонодуговой сварке // Автоматизация и управление технологическими и производственными процессами: Материалы Всероссийской научно-практической конференции – Уфа, 2011. С.323-326.
4. Никифоров Р.В. Анализ применимости математических моделей к расчету геометрических параметров шва при аргонодуговой сварке // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция, посвященная 85-летию со дня рождения член-корр. РАН, д.т.н., профессора Р.Р. Мавлютова: Сб. тр. в 5 т. – Уфа. УГАТУ. 2011. Т5. С.119-121.
5. Бычков В.М., Никифоров Р.В. Моделирование температурного поля при электронно-лучевой сварке с применением пакета ANSYS // 5 Всероссийская научно-исследовательская конференция молодых специалистов. Материалы конференции. – Уфа. УМПО. 2011. С.12-16.
6. Селиванов А.С., Никифоров Р.В. О возможности моделирования подвижного нормально-кругового источника на поверхности плоского слоя в модуле ANSYS/MECHANICAL // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция, посвященная 85-летию со дня рождения член-корр. РАН, д.т.н., профессора Р.Р. Мавлютова: Сб. тр. в 5 т. Уфа. УГАТУ. 2011. Т5. С.124-126.
7. Бычков В.М., Никифоров Р.В. Обобщение литературных данных по режимам и анализ их применимости к моделированию аргонодуговой сварки // Молодежный Вестник УГАТУ: Ежемесячный научный журнал. 2012. №2(3). С.16-21.
8. Бычков В.М., Никифоров Р.В. Моделирование формы проплавления при электронно-лучевой сварке с применением пакета ANSYS // Молодежный Вестник УГАТУ: Ежемесячный научный журнал. 2012. №2(3). С.22-29.
9. Бычков В.М., Галимханов В.Р., Никифоров Р.В. Разработка основ локальной термообработки сварных соединений лопаток блиска авиационного двигателя // Актуальные проблемы науки и техники: Восьмая Всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых: сборник трудов. Уфа, 2013. Т.2. С.58-61.