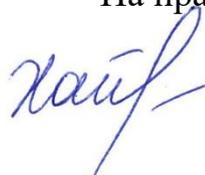


Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



**Хайбрахманов Радик Ульфатович**

**СНИЖЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ НА ОСНОВЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ**

2.5.8. Сварка, родственные процессы и технологии

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2023

Работа выполнена на кафедре технологии сварочного производства Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

Научный  
руководитель: доктор технических наук,  
**Коробов Юрий Станиславович**

Официальные  
оппоненты: **Трушников Дмитрий Николаевич,**  
доктор технических наук, доцент,  
ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет»,  
проректор по разработкам и инновациям;

**Огородникова Ольга Михайловна,**  
доктор технических наук, доцент,  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»,  
профессор кафедры электронного машиностроения;

**Худяков Артем Олегович,**  
кандидат технических наук,  
ООО «Роснефть – Башкирский научно-исследовательский и  
проектный институт нефти», г. Уфа,  
главный специалист отдела технологического анализа и  
мониторинга

Защита состоится 22 июня 2023 г. в 12:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.5.06.15 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»: *адрес объявления на сайте УрФУ:*

<https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=4727>.

Автореферат разослан \_\_\_\_ мая 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Фивейский Андрей Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Тонколистовые конструкции толщиной до 5 мм в авиационной, судостроительной промышленности, энергетике и других отраслях для изделий, требующих высокой относительной прочности, изготавливают из высокопрочных сталей мартенситно-бейнитного класса. Основные технологические проблемы при сварке таких конструкций возникают из-за высокой вероятности образования холодных трещин и появления местных дефектов искажения формы поверхности, формирующихся за счёт пластических деформаций, связанных с неравномерным нагревом и распределением расплавленного металла по высоте сечения шва. Для их предупреждения требуется решение ряда задач конструктивного, технологического и металлургического характера. В некоторых случаях сложно выбрать их рациональное соотношение. Например, увеличение жесткости при сборке снижает деформации конструкции, но увеличивает внутренние напряжения в сварных соединениях, а сварка в свободном состоянии приводит к высоким остаточным деформациям и т. д. Перебор вариантов соотношения параметров (внутренних напряжений и деформаций) путем натурного эксперимента требует высоких трудозатрат. Более экономично выполнить это посредством численного моделирования поведения сварных соединений с дальнейшей верификацией результатов в натурном эксперименте.

На российских предприятиях осознают данную проблему и занимаются ее решением. В частности, программные продукты для решения задач технологической механики (задачи пластической обработки металлов, сварки и термообработки, литья металлов) используют в базовых отраслях отечественной промышленности: атомной, авиа- и судостроительной. Однако в настоящее время инженерное программное обеспечение (ПО) для решения данной проблемы в основном зарубежной разработки. Основными производителями таких программных продуктов выступают компании ESI Group (Франция), Simufact (Германия), ANSYS (США) и ряд других зарубежных производителей.

Зарубежные пакеты компьютерного моделирования поведения сварных соединений основаны на процедурах конечно-элементного моделирования. Они позволяют решить обозначенные выше задачи, но имеют следующие недостатки:

- 1) Отсутствует специализированная методика по расчёту напряженно-деформированного состояния высокопрочных сталей.
- 2) Реализация граничных условий в виде закреплений сопровождается сложностью, связанной с неавтоматизированным вводом данных усилий закрепления, оказывающих влияние на сборку.

Представленная работа посвящена снижению уровня недопустимых остаточных деформаций до обеспечения требований, предъявляемых к тонколистовым конструкциям после сварки, изготовленным из высокопрочных сталей за счёт применения закрепления, отражающего адаптивный характер изменения напряжений и деформаций в зоне закрепления. Усилие закрепления оптимизируется на основе конечно-элементного моделирования тепловых полей, сварочных напряжений и деформаций, выполненного с применением оригинального ПО.

Актуальность диссертационной работы подтверждается её выполнением в рамках государственной поддержки программы «УМНИК» Фонда содействия инновациям №11995ГУ/2017.

**Степень разработанности проблемы исследования.** Значительный вклад в развитие численного моделирования сварных соединений внесли такие российские и зарубежные учёные как Н. Н. Рыкалин, В. А. Кархин, К. М. Гатовский, В. А. Винокуров,

С. А. Куркин, В. И. Махненко, Г. А. Николаев, А. Н. Серенко, М. Н. Крумбольдт, К. В. Багрянский, L. J. Segerlind, J. Goldak, J. B. Leblonde и др.

**Цели и задачи.** Целью работы является разработка конструктивно-технологического решения по снижению деформаций после сварки тонколистовых конструкций при повышении производительности и качества.

В соответствии с целью необходимо решить ряд основных задач:

- 1) Разработать физическую модель напряжённо-деформированного состояния.
- 2) Предложить способ изменения напряжённо-деформированного состояния на основе разработанной физической модели и реализовать путем конечно-элементного моделирования.
- 3) Разработать методику конструктивной реализации предложенного способа по снижению деформаций в тонколистовых конструкциях и выполнить её верификацию.
- 4) Внедрить результаты исследований в промышленное производство.

**Научная новизна.** Разработана физическая модель напряженно-деформированного состояния в зоне сварного соединения тонколистовых конструкций, изготовленных из высокопрочных сталей, основанная на учете напряжений при фазовых превращениях и термических напряжений в процессе дуговой сварки. На основе физической модели разработана конечно-элементная модель напряженно-деформированного состояния тонколистовых конструкций с применением адаптивной нагрузки:

- выполнено экспериментальное и теоретическое описание процесса изменения напряженно-деформированного состояния в зависимости от условий закрепления. Выполнен анализ влияния рассмотренного изменения на механические свойства сварного соединения;

- установлено рациональное соотношение остаточных сварочных напряжений и деформаций в тонколистовой обечайке на основе баланса упругих и пластических деформаций в зоне сварного шва;

- установлено распределение напряжений и деформаций при изменениях параметров геометрии свариваемых деталей. Усилие адаптивной нагрузки равно 500 и 900 Н приводит к скачкообразному повышению внутренних напряжений на 16-20% при толщинах конструкции 3 и 4 мм соответственно. Потеря устойчивости формы поверхности наступает при усилиях закрепления 300, 600 и 1100 Н для толщин 2, 3, 4 мм соответственно;

- предложена методика расчёта участков и усилий закрепления с адаптивной нагрузкой при сварке тонколистовой конструкции в зависимости от входных данных, характеризующих свойства материала, геометрию и технологические режимы.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Разработана методика проектирования сборочно-сварочного приспособления для изготовления сварной тонколистовой конструкции из высокопрочных сталей на основе оригинальной программы расчёта напряжённо-деформированного состояния.

Разработан адаптивный прижим для сборочно-сварочного приспособления, обеспечивающий качество сварного соединения тонколистовых конструкций при сохранении уровня деформаций, соответствующих интервалу требований, предъявляемых к детали. Внедрение разработки на ПАО «Машиностроительный завод имени М. И. Калинина, г. Екатеринбург» позволило снизить трудоемкость на 15-20% за счёт исключения операции термической калибровки.

**Методология и методы исследования.** Для численного моделирования использовано оригинальное ПО «Bazis», реализующее метод конечных элементов.

Экспериментальные исследования, связанные с анализом результатов механических испытаний сварного соединения и деформаций после механизированной

сварки в защитных газах неплавящимся электродом с подачей присадочной проволоки, выполнены по стандартным методикам на сертифицированном оборудовании, и включали в себя: рентгенографический контроль качества сварного соединения, механические испытания сварного соединения на статические растяжение и изгиб сварных образцов, оптическую микроскопию, измерение твердости.

Эксперименты выполнены в ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина». Результаты работы не противоречат общепринятым мировым представлениям о предмете исследования.

**Положения, выносимые на защиту:**

1 Оценка и анализ особенностей напряжённо-деформированного состояния сварных тонколистовых конструкций при локальной потере устойчивости формы в области сварного соединения.

2 Результаты определения рационального интервала усилий закрепления в области высокотемпературного воздействия на тонколистовой металл из высокопрочной стали на основе численного моделирования нелинейных процессов распространения тепла и распределения напряжений и деформаций с применением оригинального пакета конечно-элементного анализа.

3 Методика проектирования сборочно-сварочных приспособлений, с помощью которых можно изготавливать тонколистовые конструкции с достаточной по конструктивным требованиям точностью без трудоемкой операции термической калибровки.

**Степень достоверности** подтверждается использованием апробированных расчётных методов, наличием удовлетворительной сходимости между результатами моделирования напряженно-деформированного состояния с результатами лабораторных экспериментов. Применены современные методы исследования на сертифицированном оборудовании. Для решения задач работы применяли ПО «Bazis», основанное на методе конечных элементов, апробированное на предприятиях для расчетов напряженно-деформированного состояния сварных конструкций. Численное моделирование выполнено в объёме, позволяющем подтвердить воспроизводимость результатов.

Полученные результаты соответствуют современным представлениям науки в данной области.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы были представлены и обсуждались на следующих конференциях: 19-я международная выставка по сварке, резке и родственными технологиям «Сварка/Welding 2018» г. Екатеринбург; XXI областной конкурс научно-исследовательских работ студентов учреждений среднего и высшего образования Свердловской области «Научный Олимп» 2018 г, г. Екатеринбург; IX Уральская научно-практическая конференция «Сварка. Реновация. Триботехника» г. Нижний Тагил; международная конференция Сварка в России – 2019: «Современное состояние и перспективы» посвящается 100-летию со дня рождения Б. Е. Патона, г. Томск; международная научная конференция «Современные материалы и передовые производственные технологии – 2021» г. Санкт-Петербург; XV научно-промышленный форум «Техническое перевооружение машиностроительных предприятий России» 2022 г, г. Екатеринбург.

Работа отмечена:

- поощрительной премией XXI Областного конкурса научно-исследовательских работ «Научный Олимп» по направлению «Технические науки»;

- дипломом за II место в молодёжной секции международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы повышения эффективности сварочного производства в г. Санкт-Петербурге по теме работы «Снижение деформаций в

тонколистовых конструкциях из высокопрочных сталей на основе САЕ-анализа сварных соединений»;

- дипломом за 1 место на конкурсе инженерных компетенций проекта «Славим человека труда» Уральского федерального округа по направлению «Инженер –технолог по сварке».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, из них 5 статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 2 статьи, индексированные в базе данных Scopus, WoS; зарегистрирована программа для ЭВМ «Clamp» № 2019612921.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 160 наименований. Объем диссертации 142 страницы, включая 35 формул, 12 таблиц и 56 рисунков.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность предложенной темы исследования, сформулированы цель работы и задачи исследования, приведены методы исследования, отмечены научная новизна полученных результатов и практическая значимость работы.

**В первой главе** показаны основные технологические проблемы при сварке тонколистовых конструкций из высокопрочных сталей, связанные с потерей устойчивости формы и высокими остаточными напряжениями. Выполнен обзор и анализ методов для их предупреждения. Для отладки и оптимизации существующих технологических процессов сварки рассмотрены возможности численного моделирования на основе конечно-элементной модели. Описано современное ПО, выполняющее поэтапные расчёты напряжённо-деформированного состояния, решающее тепловую, металлургическую и механическую задачи, что позволяет снизить затраты на поиск решения, удовлетворяющего требованиям, предъявляемые к детали. Показаны существующие технологические решения по обеспечению стабильного качества сварки тонколистовых конструкций и их недостатки.

При сварке продольных швов обечаек возможно местное искривление прямолинейной образующей или изгиб трубы как обычной балки. Для тонкостенных обечаек более характерен первый случай. При этом происходит также уменьшение кривизны в зоне шва в поперечном сечении вследствие потери устойчивости под действием напряжений сжатия, уравнивающих растянутую зону шва (рисунок 1).

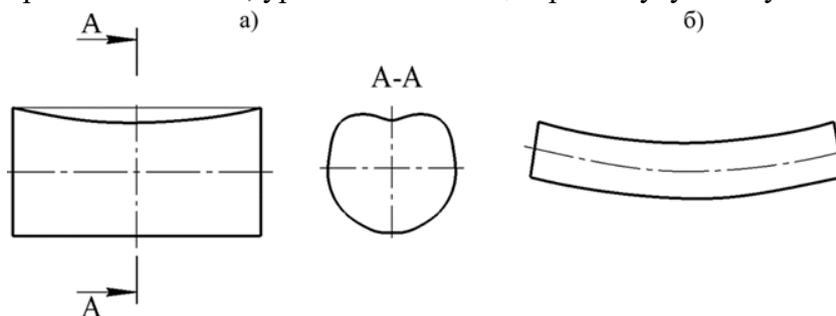


Рисунок 1 – Продольные и поперечные деформации после сварки продольного шва тонкостенной обечайки а) местное искривление прямолинейной образующей; б) изгиб трубы как обычной балки

Для снятия внутренних напряжений выполняют местный отпуск индукционным нагревом с последующей термической калибровкой, что обеспечивает геометрию обечайки в соответствии с требованиями к детали. Термическая калибровка отличается высокой трудоемкостью, составляющей 15-20 % от общего времени сварочных

операций. На основании вышеизложенного, в данной работе рассмотрена проблема высоких остаточных деформаций при сварке тонколистовой конструкции, которые приводят к повышению трудоемкости изготовления из-за последующих технологических операций по их снижению.

На основании обзора поставлена цель и определены задачи исследования.

**Во второй главе** разработана физическая модель напряжённо-деформированного состояния. На основе разработанной модели предложен способ изменения напряжённо-деформированного состояния, и выполнен численный эксперимент по оценке его реализации путем конечно-элементного анализа. Расчет температур и напряжённо-деформированного состояния в модели основан на решении системы дифференциальных уравнений теплового и механического равновесия. Фазовый состав металла при охлаждении оценивали по уравнению Авраами с применением диаграмм распада аустенита при непрерывном охлаждении.

Для достижения цели по снижению деформаций разработана физическая модель напряженно-деформированного состояния. На рисунке 2 приведены схема закрепления и усилия в детали при сварке. Усилие закрепления ( $P$ ) расположено на расстоянии ( $m$ ) от оси шва до участка закрепления. В период нагрева посредством теплового расширения в детали образуются усилия термического расширения ( $F_{терм.расш.}$ ), которым противодействуют силы трения ( $F_{тр}$ ) между прижимом, деталью и приспособлением.

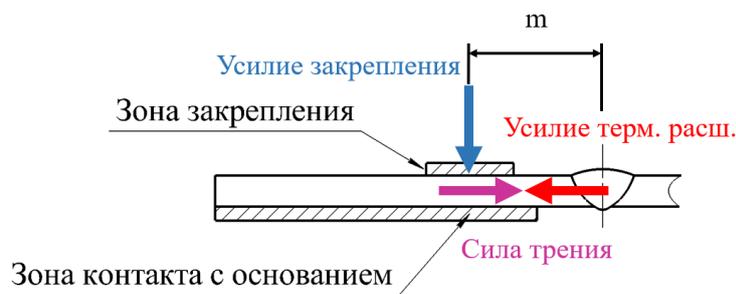


Рисунок 2 – Схема закрепления и усилия в детали при сварке

При превышении значений усилия термического расширения силы трения, закрепление не препятствует термическому расширению металла, что позволяет релаксировать напряжения, возникающие во время сварки в сварном соединении. При этом появляются деформации за пределом закрепления, как показано на рисунке 3.

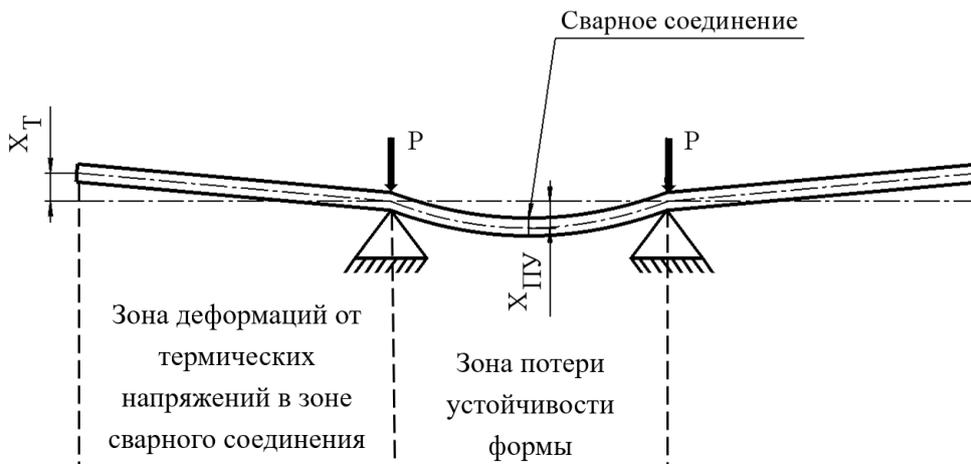


Рисунок 3 –  
Области деформаций

Начиная с предельного значения усилия закрепления, его можно рассматривать как жесткое, когда трение  $F_{тр} > F_{терм.расш.}$ , что исключает возможность проскальзывания детали из-под прижима. В таком случае наблюдается местная потеря устойчивости

формы на участке между закреплениями. Описанная схема позволит обеспечить рациональное соотношение внутренних напряжений и деформаций при сварке тонколистовых конструкций (адаптивный характер).

Коэффициент трения является переменной величиной, зависящей от шероховатости, температуры и т. д. Однако, в модели он принят постоянным согласно литературным рекомендациям для пары сталь-сталь.

Расстояние от оси шва до участка закрепления ( $m$ ), как показано на рисунке 2, задается как участок местной потери устойчивости вследствие нагрева при сварке. На основании итерационного сравнения критической температуры ( $T_{кр}$ ), при которой наблюдается потеря устойчивости формы, и термического цикла точки на пластине при сварке по условию  $T_{max} < T_{кр}$ , решается система уравнений

$$\begin{cases} T_{кр} = \frac{\pi^2}{\alpha \cdot \xi^2}, \\ \xi = \frac{vm}{i}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения;  $\xi$  – гибкость стержня;  $v$  – коэффициент приведенной длины;  $i$  – минимальный радиус инерции поперечного сечения.

Анализ напряжённо-деформированного состояния всей обечайки с продольным сварным соединением сложен для исследования. Для упрощения применена безмоментная теория, по которой для тонкостенных оболочек напряжения и деформации имеют локальный характер при  $R/\delta > 20$  ( $R$  – минимальный радиус кривизны оболочки;  $\delta$  – толщина оболочки).

Это упрощение позволяет заменить в расчете обечайку с продольным швом на пластины, свариваемые в стык, для которых выполняется соотношение  $a/\delta > 5$  ( $a$  – минимальный размер пластины в плоскости).

Основные положения для применения безмоментной теории заключаются в следующем:

- толщина стенки обечайки не должна превышать 5 мм;
- напряжения по толщине стенки оболочки распределены равномерно;
- отсутствие перепада толщины, при котором возникает изгибающий момент;
- нагрузки, оказывающие влияние на поверхность оболочки, направлены перпендикулярно ей и расположены симметрично относительно оси.

Расчет распределения температур основан на решении дифференциального уравнения теплового равновесия. Распределение температурных полей в общем виде описывается дифференциальным уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\gamma} \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_V, \quad (3)$$

где  $x, y, z$  – координаты точки по осям  $X, Y, Z$ ;  $T$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t$  – время, с;  $Q_V$  – внутренний источник тепла, Дж;  $\lambda = \sum_i \lambda_i(\varphi_i, T)$ ,  $c = \sum_i c_i(\varphi_i, T)$ ,  $\gamma = \sum_i \gamma_i(\varphi_i, T)$  – объемная суммарная теплопроводность Вт/(м $\cdot^{\circ}\text{C}$ ), теплоемкость, Дж/(кг $\cdot^{\circ}\text{C}$ ), и плотность, кг/м $^3$ , зависящие от структуры ( $\varphi$ ) и температуры ( $T$ ).

В качестве источника нагрева принят сферический подвижный источник нагрева, который имеет схожую точность с моделью двойного эллипсоида Голдака при сквозном проплавлении. При этом сферический источник нагрева проще в программной реализации. Сферический источник нагрева описывается следующим уравнением

$$Q_V = \frac{Q_{max}}{V} \cdot \exp\left(-\frac{R_{el}}{R}\right)^2, \quad (4)$$

где  $Q_{max}$  – максимальное значение вводимой энергии,  $V$  – объем источника нагрева,  $R_{el}$  – радиус от центра источника до элемента,  $R$  – радиус источника.

На основании решения тепловой задачи выполняется расчёт напряженно-деформированного состояния, основанный на уравнении механического равновесия, который для общего случая имеет вид

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{d\tau_{yx}}{dy} + \frac{d\tau_{zx}}{dz} + F_x = 0 \\ \frac{d\sigma_y}{dy} + \frac{d\tau_{xy}}{dx} + \frac{d\tau_{zy}}{dz} + F_y = 0, \\ \frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{d\tau_{xz}}{dx} + \frac{d\tau_{yz}}{dy} + F_z = 0 \end{cases} \quad (5)$$

где  $\sigma$  – тензор главных напряжений;  $\tau$  – тензор касательных напряжений;  $F$  – удельный вес.

При решении уравнения нестационарной теплопроводности (3) применено сочетание явных и неявных конечно-разностных схем численного решения по времени, что позволило обеспечить устойчивость, сходимость и высокую скорость решения.

Для моделирования структурных превращений необходимы диаграммы превращения аустенита при непрерывном охлаждении с  $C$ -образными кривыми. Они соответствуют определенной степени распада аустенита  $p$  (0, 10, 50, 90 или 100%) и показывают зависимость  $t(T)$  времени достижения этой степени  $p$  от температуры выдержки  $T$ . Для математического описания полученной зависимости  $p(t)$  используется уравнение Аврами

$$p = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{t_{50}}\right)^n \ln 2\right], \quad (6)$$

где  $t$  – время выдержки при заданной температуре;  $t_{50}$  – период полураспада аустенита;  $n$  – показатель степени Аврами.

При решении тепловой задачи учтено превращение феррита и/или перлита в аустенит. Преобразование начинается в точке  $Ac_1$  и заканчивается в точке  $Ac_3$ . В соответствии с литературными данными скрытая теплота для мартенситного превращения основного металла определена в 75,07 кДж/кг, а при аустенитном превращении для металла сварного шва 25,35 кДж/кг.

При расчёте в каждой ячейке входные значения механических свойств, в частности, предел текучести и коэффициент линейного расширения, задавали согласно решению тепловой задачи на предыдущем шаге.

Решение механической задачи выполнено по временным интервалам, используемым для решения уравнения (3), являясь серией расчётов уравнения (5). Нагрузку в уравнении (5) определяли, исходя из истории теплового нагружения. Результатом решения механической задачи является напряженно-деформированное состояние сварного соединения.

Компоненты тензора напряжений определяли в зависимости от приращения тензора деформаций и упругих констант, связывающих их согласно уравнению

$$\{\sigma\} = [D(E(T))]\{\Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon^{th} + \varepsilon_0^e\}, \quad (7)$$

где  $\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon^e + \Delta\varepsilon^p$  – тензор собственных деформаций;  $\Delta\varepsilon^{th}$  – деформации теплового расширения;  $\{\sigma\}, \{\varepsilon_0^e\}$  – тензор напряжений и начальных деформаций;  $[D(E(T))]$  – матрица упругих констант.

Деформации теплового расширения ( $\Delta\varepsilon^{th}$ ) рассчитывали по формуле

$$\Delta\varepsilon^{th} = \sum_i \alpha_i(\varphi_i, T)(T_n - T_k), \quad (8)$$

где  $\sum_i \alpha_i(\varphi_i, T)$  – температурный коэффициент линейного расширения;  $T_n, T_k$  – начальная и конечная температуры.

При расчёте механической задачи использована теория пластического течения Прандтля-Рейса. Переход материала в пластическое состояние соответствует условию

$$f(\sigma_{\text{экв}}) - \sigma_T \geq 0, \quad (9)$$

где  $\sigma_T = \sum_i \sigma_{T_i}(\varphi_i, T)$  – предел текучести материала.

Материал рассмотрен изотропным и упругопластическим. Упрочнение реализовано согласно модели пластического течения Мизеса

$$\sigma_{\text{экв.}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (10)$$

где  $\sigma_{1,2,3}$  – главные напряжения.

Влияние накопленных пластических деформаций на упрочнение определяли согласно данным, введенным с предыдущего шага расчёта по кривым сопротивления деформациям.

На рисунке 4 представлена схема реализации адаптивного прижима.

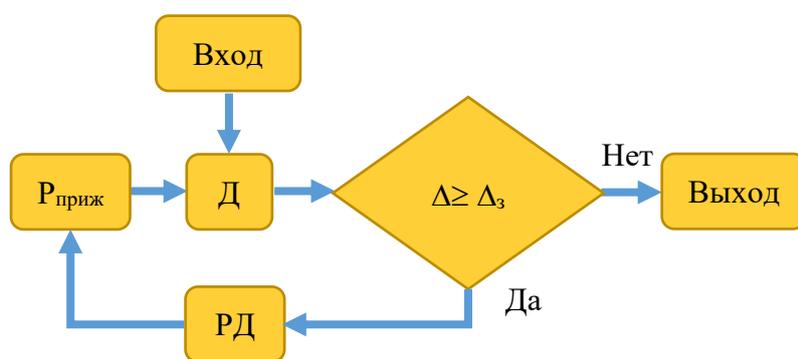


Рисунок 4 - Схема реализации адаптивного прижима: Р<sub>приж</sub> – усилие прижатия; Д – датчик измерения возмущения; РД – регулятор давления; Δ – фактическое перемещение; Δ<sub>з</sub> – заданное перемещение

В сборочно-сварочном приспособлении регулятор давления (РД) обеспечивает регулирование усилия закрепления. При сварке изменяются деформации в период нагрева, плавления и кристаллизации металла и т. д., которые фиксируются датчиком (Д). Возмущение сравнивается с заданным перемещением. При несоответствии условию регулятор давления изменяет усилие закрепления.

Описанная физическая модель применена для расчета напряжённо-деформированного состояния обечайки, изготавливаемой из высокопрочной тонколистовой стали 30ХГСА, рисунок 5. Согласно требованиям к обечайке, остаточные деформации, экспериментально измеряемые в зоне сварного соединения, должны быть менее 0,7 мм. В базовом варианте используется сборочно-сварочное приспособление при сварке продольного стыка. При этом, деформация обечайки составляет 0,9 мм, что превышает предъявляемые требования.

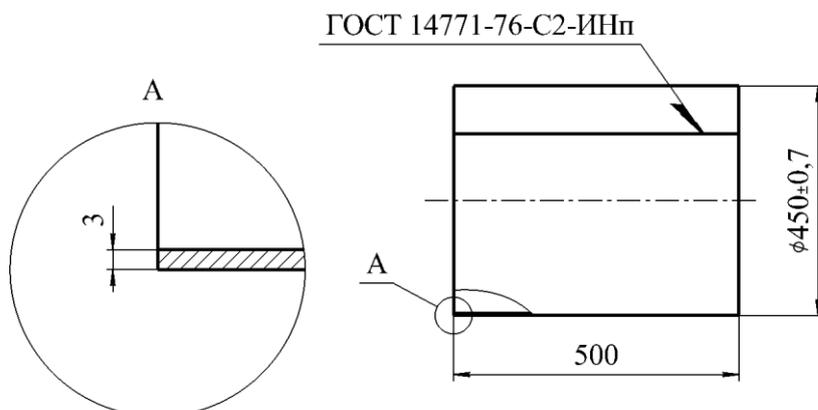


Рисунок 5 – Эскиз свариваемой детали

В натурном эксперименте образцы для испытаний сваривали и подвергали термической обработке на тех же режимах, использованных для обечайки. Для оценки

качества сварного соединения измеряли, согласно ГОСТ 6996–66, его механические свойства - предел прочности при статическом растяжении ( $\sigma_B$ ) и угол изгиба. Согласно требованиям к обечайке,  $\sigma_B \geq 0,9 [\sigma_B]$ , угол изгиба не менее 150 градусов.

Усилие закрепления, позволяющее свести деформации к нулю на время сварки, рассчитано по методике Севбо П.И. согласно уравнению

$$P = \frac{\delta^3 \operatorname{tg} \beta E}{4m^2}, \quad (11)$$

где  $\beta$  – угол поворота пластины относительно оси шва,  $E$  – модуль упругости,  $m$  – расстояние от оси стыка до прижима.

Однако, существующие подходы выбора усилия закрепления не всегда позволяют достичь такого уровня деформаций, внутренних напряжений и механических свойств сварного соединения, при которых выполняются требования, предъявляемые к обечайке. В таком случае технология изготовления тонколистовых конструкций предусматривает последующую релаксацию остаточных сварочных напряжений и деформаций различными способами (термической обработки, калибровки и др.).

Согласно уравнению (11) расчётное усилие закрепления составило 700 Н. Усилия закрепления заданы в диапазоне от 0 до 700 Н и разделены на три группы:

- первая группа: 0 Н имитирует сварку в свободном состоянии;
- вторая группа: 100-600 Н - сварка с адаптивным закреплением;
- третья группа: 700 Н – расчётное усилие закрепления по методике Севбо П.И.

Численные исследования с различными усилиями закрепления проведены на 8 образцах, их обозначения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Усилия закрепления, прикладываемые к образцам в начальный момент времени

Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8
Усилие закрепления ( $P$ ), Н	0	100	200	300	400	500	600	700

Согласно безмоментной теории в численном и натурном экспериментах приняты пластины размером 3x125x250 мм. Ширина пластин пересчитана с учётом исключения нагрева краёв пластин выше 100 °С, что может исказить температурные поля за счёт отраженного теплового потока. Оценка нагрева края пластины проведена аналитически, по методу Рыкалина Н. Н. Конечно-элементный анализ выполнен с использованием ПО «Bazis», разработанного с участием автора, в котором реализован оригинальный алгоритм решения тепловой и механической задач по уравнениям (3-10), создана база данных по теплофизическим характеристикам материалов, реализован вывод результатов расчетов в графическом и численном виде. Расчётная сетка по размерам пластин разработана в программе Visual Mesh.

Расчётная сетка, представленная на рисунке 6, включает 30600 объемных тетраэдрических элементов и 7140 узлов. Она построена с учетом геометрии исследуемого соединения. В околошовной зоне сетка более мелкая из-за высокого градиента решения.

Для решения тепловой и механической задач в расчетной сетке согласно рассчитанным данным приняты следующие граничные условия:

1) в зоне закрепления заданы силовое воздействие ( $P$ ) прижима и силы трения, возникающие от его действия между закреплением, пластиной и приспособлением, представлены на рисунке 7;

2) граничные условия 3-го рода: со стороны проплава на ширину канавки в 11 мм подвода защитного газа для поддува (задано согласно экспериментальным данным), принят участок конвективной теплоотдачи за счёт поддува ( $\alpha_1 = f_1(T)$ ); на участке контакта детали с зоной закрепления (металлическое основание и прижим) теплообмен осуществляется теплопроводностью ( $\lambda = f_2(T)$ ); на остальных участках происходит конвективный теплообмен с воздухом ( $\alpha_2 = f_3(T)$ ), как показано на рисунке 7.

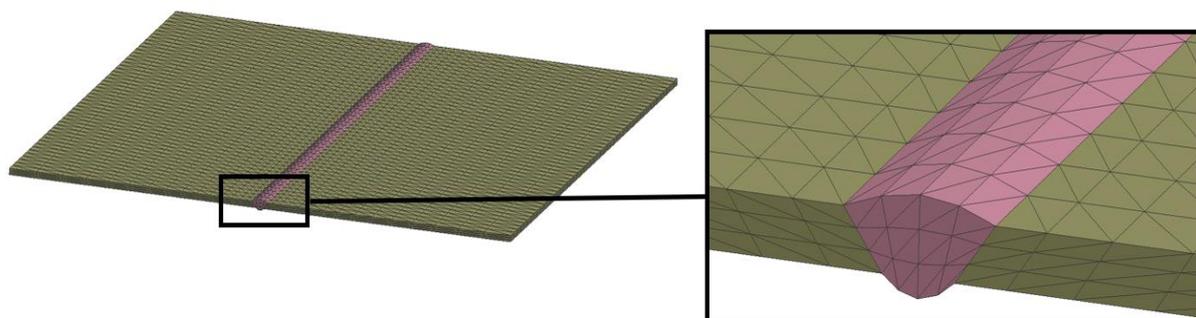


Рисунок 6 – Расчетная сетка

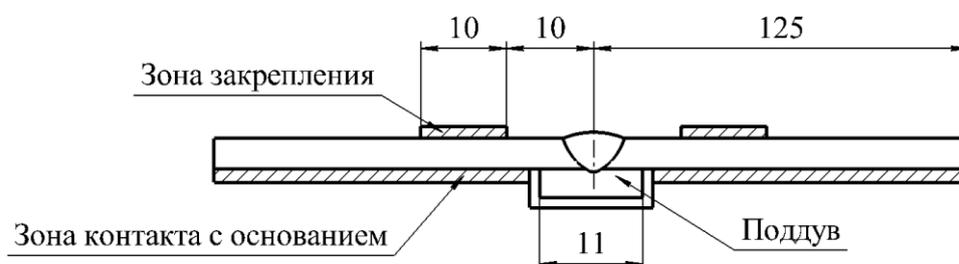


Рисунок 7 –  
Эскиз  
детали для  
описания  
граничных  
условий

Очевидно, что наличие прижимов и поддува корня сварного шва искажает температурные поля, ввиду большей локальной теплоотдачи в сравнении с воздухом. В расчетной сетке это учтено за счёт её разделения на три зоны теплообмена: теплоотдача в основание, конвективный теплообмен с воздухом и участок поддува. Значения теплоотдачи в основание и конвективного теплообмена с воздухом приняты согласно литературным источникам. Расчёт коэффициента конвективного теплообмена за счёт поддува выполнен по формуле

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}, \quad (12)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $Nu$  – число Нуссельта;  $l$  – характерный геометрический размер.

Влияние конвективного теплопереноса жидкой сварочной ванны приближенно учитывали завышением теплопроводности,  $\lambda = 0,17$  Вт/(мм·К) при температурах выше температуры плавления согласно рекомендациям Кархина В. А.

Начальная температура пластин и окружающего воздуха задана равной  $T_n = 20$  °С. Приняты режимы сварки:  $I_{св} = 155$  А,  $U_d = 16$  В,  $V_{св} = 0,12$  м/мин.

Области деформаций в стыковом соединении тонколистовой пластины при наличии закрепления вдоль шва можно разделить на две зоны. Согласно расчетам, при усилиях закрепления в диапазоне от 0 до 500 Н преобладают деформации  $X_T > X_{ПУ}$ , дальнейшее повышение усилия закрепления приводит к потере устойчивости формы в области между прижимами, и деформация в этой области становится больше, чем на краях пластины, т.е.  $X_T < X_{ПУ}$ . Деформации  $X_T$  и  $X_{ПУ}$  являются суммой продольных и поперечных деформаций, представленных на рисунке 3.

Изменение максимальных напряжений ( $\sigma$ ) и деформаций ( $\varepsilon$ ) в зависимости от усилия закрепления ( $P$ ) приведено на рисунке 8.

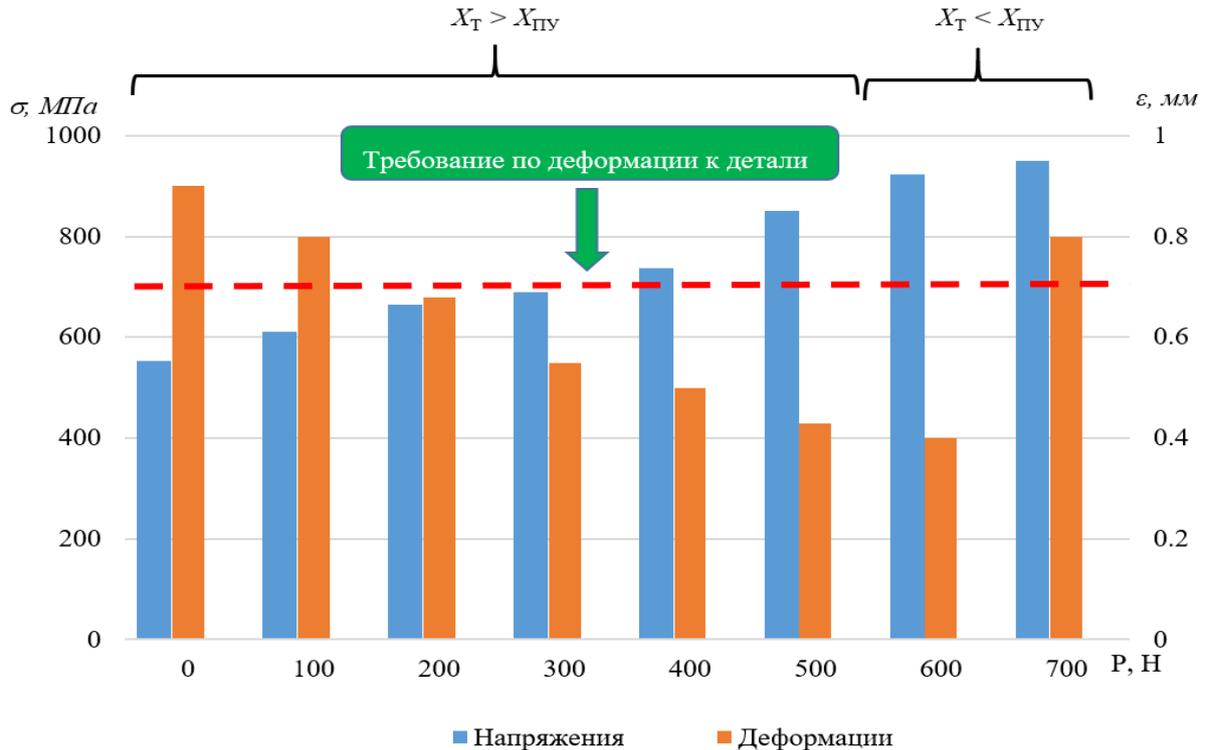


Рисунок 8 – Изменение максимальных напряжений ( $\sigma$ ) и деформаций ( $\varepsilon$ ) в зависимости от усилия закрепления ( $P$ )

Из рисунка 8 видно, что максимальное остаточное напряжение, равное 950 МПа, наблюдается в образце № 8 (700 Н), что соизмеримо с пределом прочности стали при температуре 20 °С. Такое остаточное напряжение снижает прочность сварного соединения и может привести к образованию холодных трещин. При усилии закрепления в начальный момент времени в интервале 300–600 Н деформации не превышают допустимого значения  $[\varepsilon] = 0,7$  мм, предъявляемого к обечайке. Начиная с усилия закрепления в 500 Н уровень остаточных напряжений повышается скачкообразно, что отрицательно сказывается на технологической прочности сборки. При усилиях 600-700 Н наблюдается местная потеря устойчивости формы, что сопровождается увеличением уровня остаточных деформаций. Удовлетворительная картина напряжённо-деформированного состояния получена при усилиях закрепления 300-400 Н. Допустимый уровень деформаций позволяет исключить из технологического цикла изготовления термическую калибровку. При этом уровень остаточных напряжений не превышает предельного значения, при котором нарушается местная устойчивость свободного от закрепления участка.

Аналогичный расчёт выполнен для тонколистовых пластин толщиной 2 и 4 мм при идентичных начальных и граничных условиях, приведенные на рисунках 9 и 10.

Характер изменения остаточных сварочных напряжений и деформаций для пластин толщиной 3 и 4 мм подобен, а для 2 мм смещен в область меньших усилий ввиду низкой жесткости пластин. Усилие адаптивной нагрузки равно 500 и 900 Н приводит к скачкообразному повышению внутренних напряжений на 16-20% при толщинах конструкции 3 и 4 мм соответственно. Потеря устойчивости формы поверхности наступает при усилиях закрепления 300, 600 и 1100 Н для толщин 2, 3, 4 мм соответственно. Расхождение областей потери устойчивости формы и остаточных напряжений, соизмеримых с пределом прочности, связаны с погонной энергией сварки и жесткостью самих пластин.

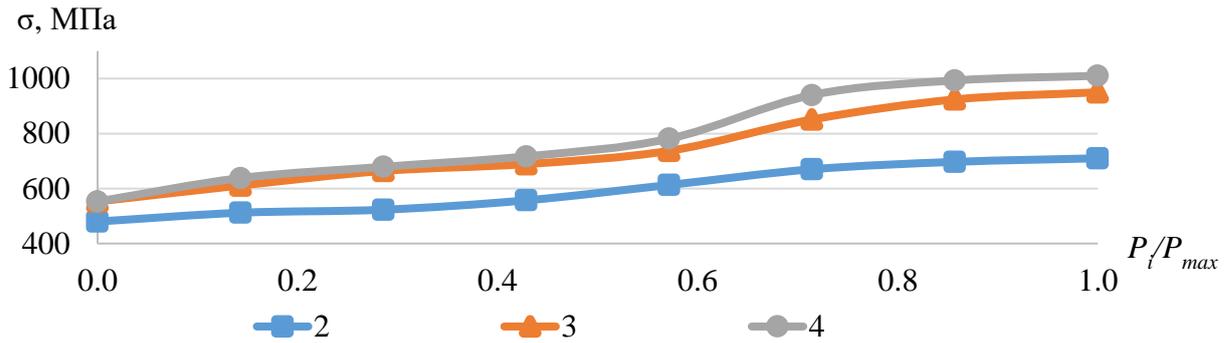


Рисунок 9 – Изменение максимальных напряжений в зависимости от отношения  $P_i/P_{max}$  для пластин толщиной 2, 3 и 4 мм

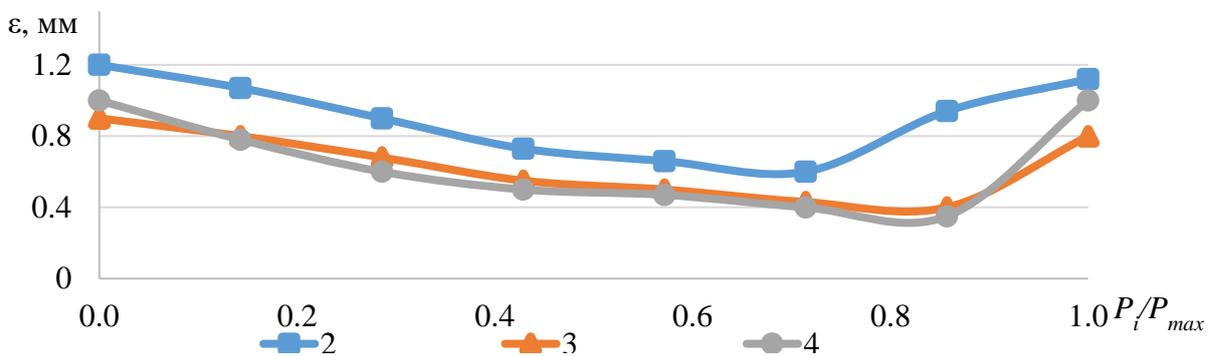


Рисунок 10 – Изменение максимальных деформаций в зависимости от отношения  $P_i/P_{max}$  для пластин толщиной 2, 3 и 4 мм

**В третьей главе** выполнена проверка численных расчетов путем натурного эксперимента: разработана и реализована методика проведения эксперимента по определению усилия прижатия пластин и деформаций деталей в сварочном приспособлении, и выполнен контроль качества сварных соединений на основе анализа результатов механических испытаний, радиографического контроля и металлографических исследований сварных образцов.

Сварка выполнена на 6 пластинах (3 образцах) из стали 30ХГСА размерами 3x125x250 мм. Образцы сварены механизированной сваркой в защитных газах неплавящимся электродом с подачей присадочной проволоки на прямой полярности на типовых режимах данной толщины и марки стали: ток 155 А, напряжение 13 В, скорость сварки 0,12 м/мин, скорость подачи проволоки 0,28 м/мин, расход газа для сварки 11-12 л/мин, в поддув 3 л/мин, газ для сварки и поддува - аргон высшего сорта по ГОСТ 10157–2016. На каждой пластине на расстоянии 20 мм от кромки штангенциркулем нанесены риски для последующей оценки усадки образца в поперечном направлении, как показано на рисунке 11. Для измерения термического цикла сварки посредством бесконтактного инфракрасного пирометра на всех образцах кернением отмечена одна и та же точка А согласно рисунку 11. Замеры температуры выполнены с разрывом по времени равным 5 с.

Сборка и сварка плоских пластин были выполнены в сборочно-сварочном приспособлении, обеспечивающем защиту корня сварного соединения за счёт поддува и позиционирование стыка пластин по центру канавки. Прижатие свариваемых образцов во время сварки осуществлялось согласно предложенной схеме закрепления.

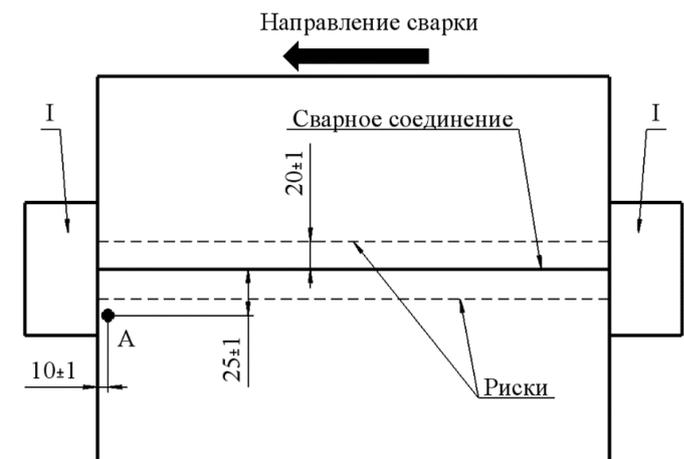


Рисунок 11 – Место измерения термического цикла сварки: А – точка замера температурного цикла; I – выводные планки

Температура окружающего воздуха до сварки составила  $20^{\circ}\text{C}$ . Сварка образцов выполнена на одинаковых режимах, но с различными усилиями каждого прижима: 0 (сварка в свободном состоянии), 300 (применение адаптивного закрепления) и 600 Н (жесткое закрепление), что соответствует образцам №1, 4 и 7. Образцы сварены после остывания приспособления до температуры  $20^{\circ}\text{C}$  для исключения погрешности, связанной с остаточным нагревом оснастки после сварки предыдущего образца. По окончании сварочных работ выполнен визуально-измерительный контроль качества сварных соединений на отсутствие дефектов сварки (соответствие конструктивных элементов сварного соединения требованиям ГОСТ 14771–76, отсутствие наплывов, непровара, подрезов, прожога, трещин и т. д.). Радиографический контроль по ГОСТ 7512–82 при классе чувствительности 3 показал отсутствие внутренних дефектов сварки (пор, несплавлений, трещин и т. д.).

Расчетный и фактический температурные циклы представлены на графике, рисунок 12. Отклонение расчётных и фактических значений составило не более 15%.

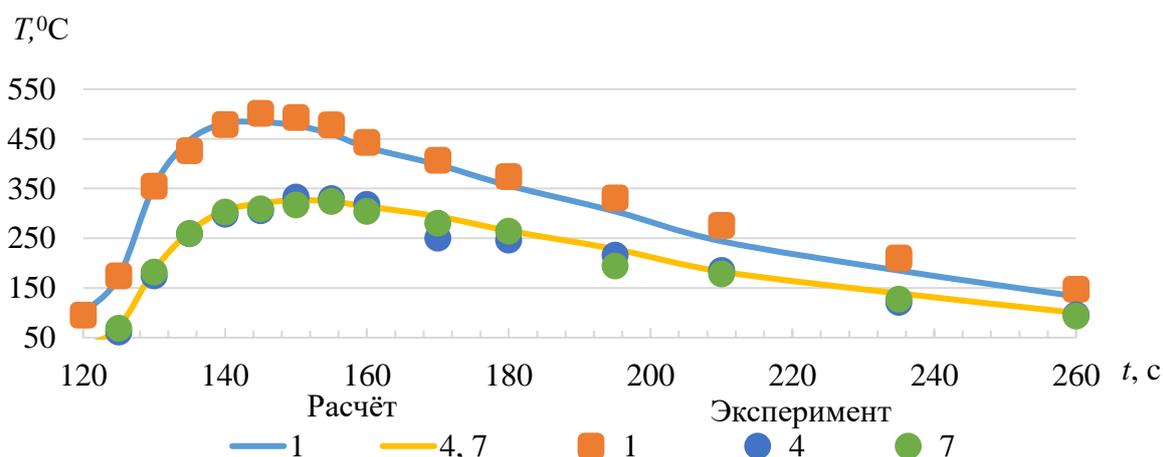


Рисунок 12 – Расчетные и фактические температурные циклы для образцов

Зафиксированы поперечная усадка образцов по рискам (см. рисунок 11) и деформации (см. рисунок 3). Результаты измерений приведены в таблице 2. Максимальная поперечная усадка в 1 мм зафиксирована в образце №1. На диаметре изделия  $\varnothing 450$  мм усадка в 1 мм практически не окажет влияния на геометрию обечайки. Точность сборки зависит от деформаций  $X_T$  и  $X_{ПУ}$  (см. рисунок 3). Сравнение результатов расчётных и экспериментальных деформаций приведено на рисунке 13.

Таблица 2 - Результаты деформации образцов

№ обр.	Усилие закрепления, Н	Поперечная усадка, мм	Деформации, мм
1	0	1	1 ( $X_T$ )
4	300	0,35	0,6 ( $X_T$ )
7	600	0,1	0,5 ( $X_{ПУ}$ )

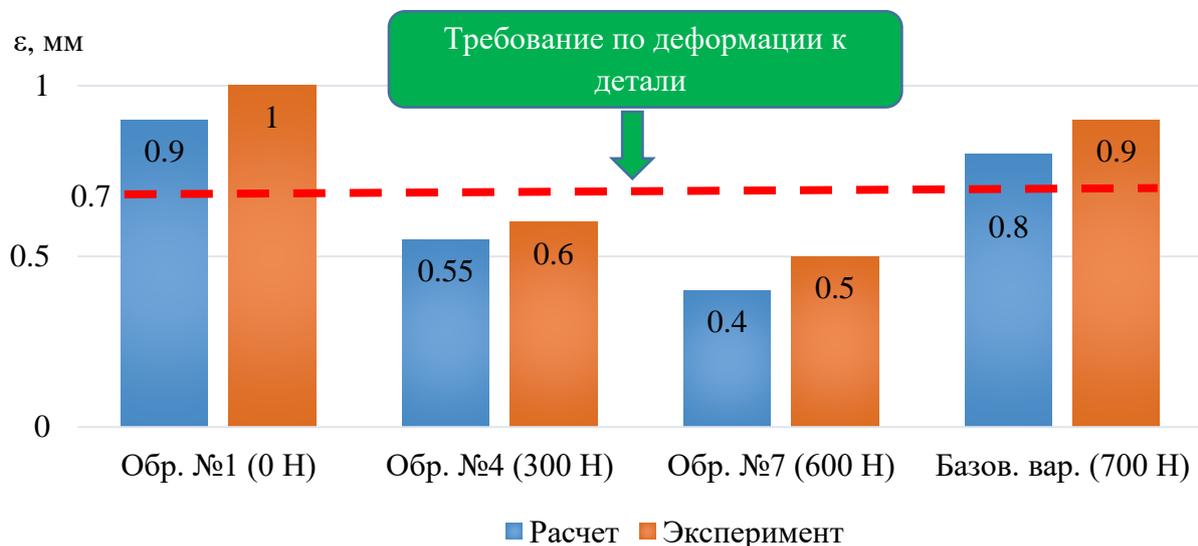


Рисунок 13 – Результаты расчётных и экспериментальных деформаций

Согласно рисунку 13 отклонение составило не более 20%. В образцах №4 и 7 деформации не превышают 0,7 мм, что соответствует требованию, предъявляемому к обечайке. Усредненные значения временного сопротивления при статическом растяжении и угла изгиба приведены на рисунке 14.

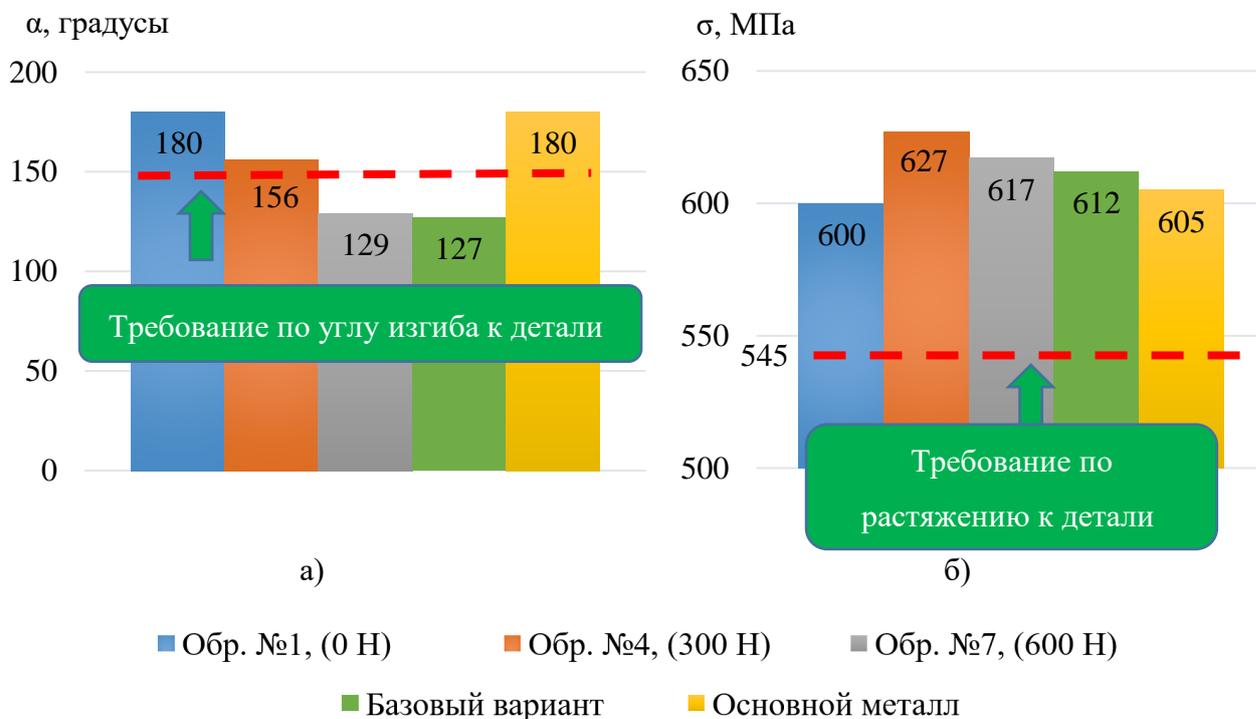


Рисунок 14 – Усредненные результаты испытаний на а) статический изгиб в градусах; б) растяжение в МПа

Результаты механических испытаний образцов №1 и 4 соответствуют требованиям, предъявляемым к обечайке до выполнения термической обработки (угол изгиба не ниже  $150^0$ , временное сопротивление на разрыв не ниже 0,9 от временного сопротивления на разрыв основного металла).

Применение адаптивного закрепления позволило увеличить угол изгиба по сравнению с жестким закреплением на 28%, а временное сопротивление на разрыв получено выше, чем у остальных образцов. На основании исследования образец №4 с адаптивной нагрузкой соответствует всем требованиям, предъявляемым к обечайке, без дополнительных технологических операций.

**В четвертой главе** описаны разработанная методика проектирования сварочного приспособления и необходимые исходные данные; формирование модели адаптивного закрепления; спроектировано новое приспособление по предложенной методике.

Разработанная методика применима для тонколистовых равнотолщинных обечаек ( $1 < \delta < 5$ ) из высокопрочных сталей с соотношением  $R/\delta > 20$ , для которых применима безмоментная теория. Упомянутые конструкции применяются в авиационном, судостроительном производствах, нефтегазовой сфере и др. областях. Методика использована для проектирования сборочно-сварочного приспособления для сварки встык тонкостенных обечаек  $\varnothing 450$  мм из высокопрочной стали мартенситно-бейнитного класса толщиной 3 мм. В методику входит оригинальный программный модуль «Сlamp», интегрированный в ПО «Bazis», в котором задаются теплофизические и механические свойства свариваемых материалов, толщина, геометрия свариваемой конструкции, погонная энергия сварки и усилие закрепления. На основании введенных данных формируется модель закрепления, применяемая при решении механической задачи.

Адаптивные прижимы в сборочно-сварочном приспособлении обеспечивают согласование по обратным связям упругости прижимов и уровню напряжений в сварном соединении в интервале значений, близком к пределу прочности. Это позволяет уменьшить воздействие на деталь во время сварки, что снижает вероятность образования холодных трещин.

Адаптивные прижимы стали основным элементом спроектированного приспособления для сборки, сварки обечаек и пластин из высокопрочных сталей толщиной 3 мм, приведенного на рисунке 15.



Рисунок 15 – Приспособление, спроектированное по предложенной методике

В новом сборочно-сварочном приспособлении сварены: три образца и три обечайки. В таблице 3 приведены результаты механических испытаний и фактических

деформаций обечаек после сварки, которые удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям. Снижение деформаций составило 35,5 %.

Таким образом, предложенное и научно-обоснованное техническое решение позволило снизить трудоемкость изготовления на 15–20% за счёт исключения последующей операции термической калибровки при сохранении качества сварного соединения.

Таблица 3 – Усредненные результаты механических испытаний и фактических деформаций

Параметры	Требования	Базовый вариант	Эксперимент
Испытание на разрыв, МПа	545	612	610
Угол изгиба, град	150	127	163
Деформации, мм	0,7	0,9	0,58

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Разработана физическая модель напряжённо-деформированного состояния тонколистовых конструкций в зоне сварного соединения, учитывающая напряжения при фазовых превращениях и термические напряжения, возникающие в процессе дуговой сварки. В модели обеспечено рациональное соотношение остаточных сварочных напряжений и деформаций в тонколистовой обечайке на основе баланса упругих и пластических деформаций в зоне сварного шва. Предложено снижение уровня остаточных сварочных деформаций путем закрепления области сварного соединения с адаптивной нагрузкой.

2) Разработана конечно-элементная модель изменения напряжённо-деформированного состояния после сварки стыкового сварного соединения в тонколистовых конструкциях из высокопрочных сталей толщиной 3 мм, учитывающая изменения условий закрепления, с указанием задаваемых начальных и граничных условий. Модель реализована в ПО «Bazis» с последующим решением тепловой, металлургической и механической задач. Отклонение по точности расчетов от экспериментальных данных не превысило 15 %, что достаточно для практического применения.

3) На основании расчетов исследовано распределение остаточных напряжений и деформаций:

- выявлено, что картина напряжённо-деформированного состояния изменяется нелинейно и зависит от условий закрепления области стыкового соединения;

- определен интервал усилий закрепления, при котором и деформации и остаточные напряжения не превышают допустимых значений;

- при усилиях закрепления 600–700 Н наблюдается потеря устойчивости формы в области зоны термического влияния, а также остаточные напряжения соизмеримы с пределом прочности стали, что отрицательно сказывается на технологической прочности обечайки;

- выявлено, что при усилиях закрепления в интервале 300–400 Н наблюдается удовлетворительная картина напряженно-деформированного состояния. Допустимый уровень деформаций позволяет исключить из технологического цикла изготовления термическую калибровку. При этом уровень остаточных напряжений не превышает предельного значения, при котором нарушается местная устойчивость свободного от закрепления участка.

4) На основе физической модели определен рациональный интервал усилий закрепления в зоне сварного соединения для минимизации деформаций в тонколистовых конструкциях. Установлена зависимость напряженно-деформированного состояния от

усилия закрепления и геометрии свариваемых деталей. Характер изменения остаточных сварочных напряжений и деформаций для пластин толщиной 3 и 4 мм подобен, а для 2 мм смещен в область меньших усилий ввиду низкой жесткости пластин. Усилие адаптивной нагрузки равное 500 и 900 Н приводит к скачкообразному повышению внутренних напряжений на 16-20% при толщинах конструкции 3 и 4 мм соответственно. Потеря устойчивости формы поверхности наступает при усилиях закрепления 300, 600 и 1100 Н для толщин 2, 3, 4 мм соответственно.

5) Разработана методика проектирования конструктивной реализации адаптивной нагрузки по снижению деформаций в тонколистовых конструкциях. Методика включает программный модуль «Clamp» и алгоритм взаимодействия конструктора и инженера-технолога. По результатам расчётов определяются усилия и участки закрепления.

б) Согласно предложенной методике, разработано новое сборочно-сварочное приспособление, обеспечивающее геометрические требования, предъявляемые к обечайке и механические свойства сварных соединений образцов. После сварки партии обечаек деформации снизились на 35,5%. По результатам опытных работ принято решение об исключении операции термической калибровки из технологии изготовления, что снижает трудоемкость изготовления на 15–20%. Результаты работы проверены на конкретных обечайках и реализованы в виде методики расчета сборочно-сварочного приспособления на ПАО «Машиностроителей завод имени М. И. Калинина, г. Екатеринбург».

### ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

- Оценка и прогнозирование напряжённо-деформированного состояния при сварке титановых и алюминиевых сплавов с применением адаптивного закрепления.
- Разработка программного модуля автоматического проектирования сварочного приспособления на основании результатов расчёта с применением библиотеки готовых прижимов.

### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:*

1. Биленко Г. А. Компьютерное моделирование при разработке технологии сварки тонкостенных деталей из высокопрочных сталей / Г. А. Биленко, **Р. У. Хайбрахманов**, Ю. С. Коробов // *Металлург.* – 2017. - №4. – С. 25-29. 0,380 п. л. / 0,120 п. л.

Bilenko G. A. Computer simulation in developing the technology of welding high-tensile steel sheets / G. A. Bilenko, R. U. Khaibrakhmanov, Yu. S. Korobov // *Metallurgist.* – 2017. – V. 61, №3-4 – P. 265-270. 0,300 п. л. / 0,100 п. л. (Scopus, WoS)

2. Хайбрахманов Р. У. Снижение деформаций в тонколистовых конструкциях из высокопрочных сталей на основе CAE-анализа сварных соединений / **Р. У. Хайбрахманов**, Ю. С. Коробов, Д. Л. Ярошевич // *Вестник концерна ВКО «Алмаз-Антей».* – 2018. - №4. – С. 67–72. 0,370 п. л. / 0,200 п. л.

3. Khaybrakhmanov R. U. Reducing the distortion in thin-sheet structures made from high-strength steel based on CAE-welded joint analysis / **R. U. Khaibrakhmanov**, Yu. S. Korobov, G. A. Bilenko // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* – 2019. – Vol. 681, №1 – 0/2023. 0,300 п. л. / 0,100 п. л. (Scopus)

4. Хайбрахманов Р. У. Применение компьютерного моделирования для анализа деформаций в сварных тонколистовых конструкциях из высокопрочных сталей / **Р. У.**

**Хайбрахманов, Ю. С.** Коробов, Г. А. Биленко // Сварочное производство. – 2022. – №6. – С. 13-17. 0,300 п. л. / 0,150 п. л.

5. Биленко Г. А. Оценка точности расчетов напряжённно-деформированного состояния конструкций после сварки и наплавки, выполненных методом конечных элементов в ПО «Vazis»/ Г. А. Биленко, Ю. С. Коробов, **Р. У. Хайбрахманов** [и др.] // Сварка и диагностика. – 2022. – №6. – С. 27-31. 0,550 п. л. / 0,170 п. л.

**Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ:**

6. Stamp: свидетельство о гос. Регистрации программы для ЭВМ №2019612921 Российская Федерация. Программа для формирования модели адаптивного прижима / **Р. У. Хайбрахманов**, Ю. С. Коробов, Г. А. Биленко. – №2019611622 от 04.03.2019. – 1с.

**Публикации в других изданиях:**

7. Биленко Г. А. Компьютерные инженерные расчёты сварочных напряжений и деформаций в ПО VAZIS / Г. А. Биленко, Ю. С. Коробов, **Р. У. Хайбрахманов** [и др.] // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». – 2023. – №1. – С. 13-22. 0,600 п. л. / 0,200 п. л.

8. Биленко Г. А. Использование вычислительных методов для разработки сварочной оснастки детали летательного аппарата выполненной из сплава ВТ6 / Г. А. Биленко, **Р. У. Хайбрахманов**, Ю. С. Коробов // Сварка и диагностика: сборник докладов 15 международной научно-технической конференции в рамках Международного форума «Сварка, диагностика и контроль». Екатеринбург. – 2015. – С. 200-205. 0,200 п. л. / 0,075 п. л.

9. Хайбрахманов Р. У. Компьютерный анализ влияния схемы фиксации в сварочной оснастке на остаточные деформации детали / **Р. У. Хайбрахманов**, Ю. С. Коробов, Биленко Г. А. // Сварка и диагностика: сборник докладов международного форума. Екатеринбург. – 2016. – С. 290–295. 0,150 п. л. / 0,050 п. л.

10. Хайбрахманов Р. У. Снижение деформаций в тонколистовых конструкциях из высокопрочных сталей на основе САЕ-анализа сварных соединений / **Р. У. Хайбрахманов**, Ю. С. Коробов // Сборник статей участников XXI Областного конкурса научно-исследовательских работ «Научный Олимп» по направлению «Технические науки». – 2018. – С. 126-132. 0,200 п. л. / 0,100 п. л.

11. Хайбрахманов Р. У. Компьютерное моделирование деформаций в тонколистовых конструкциях из высокопрочных сталей / **Р. У. Хайбрахманов**, Ю. С. Коробов // Сварка. Реновация. Триботехника: материалы IX Уральской научно-практической конференции. Нижний Тагил. – 2019. – С. 242–243. 0,200 п. л. / 0,100 п. л.

12. Биленко Г. А. Программный пакет Vazis для САЕ-расчётов сварочных напряжений и деформаций / Г. А. Биленко, **Р. У. Хайбрахманов**, Ю. С. Коробов [и др.] // СМППТ-2021 : сборник тезисов международной научной конференции. – 2021. – С. 156-159. 0,150 п. л. / 0,050 п. л.