

## ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора технических наук, доцента Трушников Дмитрия Николаевича на диссертационную работу Хайбрахманова Радика Ульфатовича на тему: «Снижение деформаций стальных тонкостенных конструкций при дуговой сварке на основе моделирования напряжений и деформаций», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.8 - Сварка, родственные процессы и технологии

### **Структура и содержание диссертации.**

На отзыв представлены: диссертация, состоящая из введения, 4 глав, общих выводов, включающая 142 страницы машинописного текста, 56 рисунков, 12 таблиц и библиографический список из 160 наименований отечественных и зарубежных источников, а также автореферат объёмом 20 страниц, содержащий 15 рисунков и 3 таблицы.

Во введении обоснована актуальность работы, сформирована научная новизна, показана практическая значимость полученных результатов, сформированы основные положения, выносимые на защиту, представлен список опубликованных работ, описаны структура и содержание диссертации.

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, которое позволяет снизить затраты на поиск решения, удовлетворяющего предъявляемым требованиям. Показаны существующие технологические решения по обеспечению стабильного качества сварки тонколистовых конструкций и их недостатки. На основании проведенного анализа поставлены цель и задачи работы.

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 определён по уравнению Авраами с применением диаграмм распада аустенита при непрерывном охлаждении.

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

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

В заключении представлены основные выводы и результаты работы. Степень достоверности результатов проведённых исследований обеспечена объемом численных и экспериментальных данных, повторяемостью результатов экспериментальных исследований.

#### **Оценка актуальности работы.**

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 указанных 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 таких как внутренние напряжения и деформации путем натурального эксперимента требует высоких трудозатрат. Изучению этих вопросов посвящена диссертационная работа, поэтому актуальность решаемой проблемы не вызывает сомнений.



## **Оценка научной новизны.**

Автором диссертационной работы на основе достаточного объема исследований, обобщений, анализа результатов численных и натурных экспериментов решена актуальная научно-техническая задача, направленная на снижение деформаций в тонколистовых конструкциях при повышении производительности и качества. К основным результатам диссертации, обладающим существенной новизной, следует отнести следующие:

1. 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.

2. 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 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;

- 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.

**Оценка обоснованности и достоверности научных положений выводов и заключений.**

Результаты работы базируются на проведённых исследованиях, обеспечены объёмом численных и экспериментальных данных и использованием корректных методов обработки, повторяемостью результатов экспериментальных исследований. Использовано



современное сертифицированное исследовательское оборудование. Результаты работы не противоречат общепринятым мировым представлениям о предмете исследования.

#### **Ценность диссертационной работы для науки и практики.**

Анализ содержания диссертационной работы позволяет отметить те положения, которые определяют её научно-практическую ценность.

1. Разработана методика проектирования сборочно-сварочного приспособления для изготовления сварной тонколистовой конструкции из высокопрочных сталей на основе оригинальной программы расчёта напряжённо-деформированного состояния.

2. 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.

Основные результаты широко апробированы на международных и всероссийских научных конференциях и подробно изложены в 12 публикациях, из которых 5 размещены в центральных периодических рецензируемых научно-технических журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Автореферат адекватно отражает содержание и включает все положения диссертационного исследования и основные выводы.

В то же время, по автореферату и диссертации имеется замечание и вопрос:

1. Каким образом учитывается процесс заполнения сварочным кромок наплавленным металлом в разработанной конечно-элементной модели?

2. Не описана как учитывает в разработанной модели начальное напряженно-деформированное состояние.

Вместе с тем, приведенное выше замечание и вопрос не снижают общего положительного впечатления о рассматриваемой работе.

#### **Заключение**

1. Диссертационная работа Хайбрахманова Радика Ульфатовича «Снижение деформаций стальных тонкостенных конструкций при дуговой сварке на основе моделирования напряжений и деформаций» является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит

значительный вклад в развитие снижения деформаций в тонколистовых конструкциях из высокопрочных сталей.

2. Считаю, что представленная к защите работа по своей актуальности, научной новизне, научно-техническому уровню и практической значимости полностью соответствует критериям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней в УрФУ, отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.8 - Сварка, родственные процессы и технологии, а её автор - Хайбрахманов Радик Ульфатович заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент, доктор технических наук, доцент,

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», проректор по разработкам и инновациям

≥ 1

Трушников Дмитрий Николаевич

Почтовый адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29

Телефон: +7 (342) 219-80-87

Адрес электронной почты: trushnikov@pstu.ru

Подпись Трушникова Дмитрия Николаевича

подтверждаю,

Учёный секретарь Учёного совета Пермского

национального исследовательского политехнического

университета,

кандидат исторических наук, доцент



Макаревич В.И.