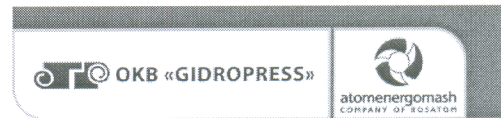


РОСАТОМ



Открытое акционерное общество
«Ордена Трудового Красного Знамени и
ордена труда ЧССР опытное
конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС»
(ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»)



Joint Stock Company
"Experimental and Design Organization
"GIDROPRESS" awarded the Order of the Red
Banner of Labour and CZSR Order of Labour"
(OKB "GIDROPRESS")

8 СЕН 2014 № 044/10-116/ 12702

На № 902-09-04 от 01/09/14

Отзыв ведущей организации

Ученому секретарю Московского
авиационного института
(национальный исследовательский
университет) МАИ
А.Н.Ульяшиной
МАИ, Волоколамское шоссе, д.4,
Москва, А-80, ГСП-3, 125 993
Факс:8-499-158-29-77

Направляем Вам отзыв ведущей организации ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» на диссертационную работу Мироновой Любови Ивановны «Исследование и оптимизация высокоградиентных термонапряженных состояний сочлененных оболочечных конструкций в технологических процессах энергетического машиностроения», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела».

Приложение. Отзыв на 9 листах – 2 экземпляра.

Ученый секретарь *НТС*
ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

В.П.Семишкин

Исполнитель Семишкин

Телефон 8 (495) 502-79-18

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный конструктор
ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»



В.А. Пиминов

« 09 » 09 2014г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» на диссертационную работу Мироновой Любови Ивановны «Исследование и оптимизация высокоградиентных термонапряженных состояний сочлененных оболочечных конструкций в технологических процессах энергетического машиностроения», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

Диссертационная работа Мироновой Любови Ивановны «Исследование и оптимизация высокоградиентных термонапряженных состояний сочлененных оболочечных конструкций в технологических процессах энергетического машиностроения» посвящена решению актуальных задач исследования и оптимизации термонапряженного состояния элементов оболочечных конструкций с учетом особенностей технологий изготовления, к которым можно отнести технологические процессы сварки, локального индукционного нагрева, а также механическую сборку многослойных конструкций.

Рассмотренные в диссертационной работе конструкции, а именно, тепловыделяющие элементы атомной техники, сосуды высокого давления энергетических аппаратов, корпусные конструкции энергетических установок, детали и узлы технологической оснастки металлургического производства и пр., имеют сложную оболочечную конструктивную форму. Особенностью таких конструкций является наличие сочлененных между собой оболочечных элементов: обечаек, сферических днищ, патрубков, штуцеров, трубопроводов и т.д. Совокупность неразъемных стыковых соединений и сопряженных деталей существенно влияет на прочность и несущую способность всего изделия в целом. Требования, предъявляемые к подобным конструкциям, включают в числе прочих вопросы обеспечения минимальных по величине температурных деформаций, стабильности формы и точности изготовления основных несущих элементов.

Тонкостенные конструкции, выполненные из оболочек вращения, в процессе изготовления, эксплуатации и ремонта подвергаются локальному нагреву. При этом возникающие температурные напряжения могут

достигать значительной величины, превышающие допустимые уровни напряжений. Развитие термопластических деформаций в зонах технологического влияния способствует возникновению трещин и может привести к потере устойчивости конструкции. Так, например, технологическому процессу сварки характерны локальное неоднородное высокоградиентное термонагружение, объемная деформация металла в зоне влияния, концентрация упругопластических напряжений в окрестностях сварного соединения, способствующих образованию технологических дефектов в виде трещин и усадочной пористости.

Поэтому исследование и оптимизация термонапряженных состояний сложных оболочечных конструкций с целью минимизации температурных напряжений и упругопластических деформаций на основе оптимизационных моделей, адаптированных к реальным условиям технологических процессов энергетического машиностроения, можно считать **актуальными** и важными задачами в создании высокотехнологичного энергетического оборудования. Полученные результаты и практические рекомендации автора, несомненно, способствуют развитию инновационных технологий сварочного и заготовительного производства в энергетическом машиностроении.

Диссертация изложена на 322 листах машинописного текста, состоит из введения, семи глав и списка литературы из 182 наименований и двух приложений, в которых представлены программные операторы вычислений, а также акты и справки внедрения результатов проведенных исследований с предприятий: **1.** ОАО «ИНЦ ТЕМП» г. Москва, 2014г. **2.** ОАО «ПЭМЗ спецмаш», г. Подольск Московской области, 2014г. **3.** ЗАО «Опыт» ОАО «Машиностроительный завод «Зио – Подольск» г. Подольск Московской области, 2013г. **4.** ООО «Инструмент» г. Подольск Московской области, 2013г. **5.** ООО «Компания Корд» Подольский район, поселок Львовский Московской области, 2013г.

Во **введении** обосновывается важность и актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель диссертации и новизна проведенных исследований. Приведено краткое изложение содержания диссертации по главам.

В **первой главе** изложены вопросы необходимости исследования термонапряженных состояний конструкций в форме корпусных сборок, узлов и деталей энергетических аппаратов, многие из которых имеют оболочечную форму, сочлененную различными элементами: штуцерами, патрубками, трубными пучками, многослойными стенками и т.д. Присущее им неоднородное высокоградиентное термонагружение существенно влияет на термонапряженное состояние конструкций энергетического машиностроения.

Для исследования и оценки пограничных состояний элементов конструкций в переходных процессах из упругого в упругопластическое, которые характерны для зон технологического влияния и обусловлены высокоградиентными локальными температурными воздействиями,

предложен расчетно-феноменологический метод на основе феноменологической модели в виде «линейки» зон переходных процессов и оценочных критериев НДС. Такой подход, по мнению автора, позволяет определять НДС сочлененных оболочечных конструкций, исходя как из упругой, так и упругопластической стадии работы, рассматривая несвязанные и связанные задачи термоупругости.

Во **второй главе** диссертационной работы приведены научные основы исследования термонапряженных состояний оболочечных конструкций, подверженных действию температурного поля. Рассмотрены основные вариационные принципы решения статической и квазистатической термоупругой задачи. Отмечены их преимущества и недостатки. Сформулирован уточненный метод, в котором в качестве критерия предельного упругого состояния принимается условие минимума упругой энергии оболочки. Принимается, что экстремальному значению упругой энергии оболочки соответствует переходной процесс из упругого в упругопластическое состояние. Сформулированы подходы к определению экстремального температурного параметра и соответствующего ему предельного упругого состояния конструкции оболочечного типа. На этой основе строятся расчетные модели для исследования экстремальной температурной задачи.

В **третьей главе** приведено теоретическое обоснование расчетных моделей и методов исследования экстремальных температурных полей и соответствующих им термонапряженных состояний оболочечных конструкций в переходных процессах из упругого состояния в упругопластическое. Для решения такого типа задач используется математический аппарат теории экстремальных задач.

В качестве примера рассмотрена бесконечная тонкая оболочка, свободная от усилий на торцах, находящаяся под воздействием заданного температурного поля. На основе минимизации функционала упругой энергии оболочки с учетом ранее полученных решений Бураком Я.И., Григолюком Э.И., Подстригачем Я.С. разработан метод теоретического исследования экстремальных температурных полей и построены новые модели для определения параметров высокоградиентных термонапряженных состояний сочлененных оболочечных конструкций, адаптированные к технологическим процессам в энергетическом машиностроении.

Выполнены решения температурной задачи применительно к различным условиям локального нагрева цилиндрической оболочки и построены графики температурных экстремалей в зависимости от координаты образующей поверхности, испытывающей локальное температурное воздействие.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена исследованию термонапряженных состояний сочлененных конструкций оболочечного типа с физико-механическими и геометрическими неоднородностями в условиях действия высокоградиентных температурных полей. Такими

конструкциями являются сосуды высокого давления, состоящие из обечаек, сферических днищ и патрубков, соединение которых производится при помощи сварки. Для исследования термонапряженного состояния в условиях локального термонагружения предложена расчетная модель, соответствующая конструкции, образованной пересечением двух тонкостенных цилиндров вращения. Сингулярность параметров внешней формы в местах пересечения элементов преодолена путем выполнения условий сопряжения поверхностей двух цилиндрических оболочек третьей. Это позволило выделить область исследования, где выполняются условия непрерывности, дифференцируемости функций и вариаций отображения.

Разработана расчетная модель для оценки температурных напряжений, возникающих в конструкции с резким изменением геометрической формы при действии точечного теплового источника. Приведена качественная оценка и анализ возникающих температурных напряжений в реальной сочлененной оболочечной конструкции. Полученные решения базируются на граничных условиях, корректно адаптированных к условиям теплового нагрева, присущего технологическому процессу сварки.

Исследованы многослойные оболочечные конструкции и разработана математическая модель для определения термонапряженного состояния структурных элементов, которое может возникать в процессе изготовления и сборки конструкции в целом. С целью исключения появления пластических деформаций в многослойной конструкции рассмотрена задача упругопластического состояния многослойного цилиндра. Получены условия переходного процесса из упругого в упругопластическое состояние и формула предела пластического сопротивления внутреннего слоя.

Разработана расчетная модель и приведены результаты исследования упругопластического состояния цилиндра при локальном нагреве поверхности движущимся источником тепла постоянной интенсивности. Решение задачи сведено к задаче о пластическом кольце, позволяющей определять деформации и границы перехода пластической зоны в упругую. Полученные соотношения являются условиями для определения оптимального значения толщины слоя в пределах упругой стадии работы оболочечной конструкции.

Пятая глава диссертационной работы посвящена исследованию термонапряженного состояния сварной алюминиевой конструкции сосуда высокого давления. Определены деформации и перемещения в зонах технологического влияния продольных и кольцевых сварных швах. Показано, что упругопластические и пластические деформации, обусловленные действием неоднородного высокотемпературного поля в процессе сварки, сконцентрированы в узкой полосе сварного шва, которые после остывания конструкции переходят в остаточные деформации. В качестве границы, выше которой появляются остаточные напряжения,

берется значение предела текучести материала. Приведены соотношения между эффективной тепловой мощностью дуги источника и температурными усилиями, обусловленными высокоградиентными температурными полями, позволяющие выявить зависимость между параметрами сварки и максимальными уровнями температурных напряжений. На их основе в дальнейшем проведена оптимизация технологического процесса сварки с целью получения сварной конструкции с минимальным уровнем остаточного напряженного состояния.

Шестая глава диссертационной работы посвящена разработке теоретических и практических методов оптимизации высокоградиентных термонапряженных состояний сочлененных оболочечных конструкций в технологических процессах энергетического машиностроения.

Приведено математическое обоснование алгоритмов решения оптимизационной задачи, которые могут быть построены на основе методов поточечного проектирования и градиента с проекцией. разработаны расчетные оптимизационные модели термонапряженных состояний для натуральных сочлененных оболочечных конструкций, адаптированные к реальным условиям технологических процессов изготовления. Отмечено, что особенности технологии сварки приводят к необходимости свести оценочные параметры критериальной системы качества к единому критерию – пределу текучести материала.

Приведены конкретные примеры практической реализации разрабатываемых методов оптимизации. В качестве одного из них представлена оптимальная сварная конструкция трубопровода с кронштейном. Анализ термонапряженного состояния проводился на основе построения и нагружения твердотельной модели в программном комплексе ANSYS. По результатам проведенного исследования даны практические рекомендации по оптимизации термонапряженного состояния в зонах технологического влияния, которые позволили значительно снизить уровень деформаций и нестабильность формы конструкции.

Разработан оценочный инструментарий в виде системы критериев качества, позволяющий проводить оценку факторов влияния, приводящих конструкцию к переходным процессам из упругого в упругопластическое состояние. Дано математическое обоснование построения весовых функций оценочного инструментария. Формализованные подходы в решении данной задачи реализованы как на математическом аппарате теории экстремальных задач, так и в спектральном представлении оценочной функции путем применения преобразования Лапласа.

Седьмая глава диссертационной работы посвящена разработке экспериментальных методов исследования термонапряженного состояния сварных конструкций. Экспериментально определены остаточные температурные напряжения в натурной трубной сварной конструкции на основе механического и металлографического методов исследования.

Корректность проведения экспериментов при анализе термонапряженного состояния натурной сварной конструкции обеспечиваются тестовыми примерами ранее разработанных расчетных моделей, которые имеют аналитическое решение.

Проведенные экспериментальные исследования показали хорошее совпадение экспериментальных данных с расчетными значениями остаточных напряжений. Анализ полученных данных разработанного метода позволяет с приемлемой точностью в инженерной практике оптимизировать конструкцию и режимы сварки, при которых уровень остаточных напряжений может быть значительно снижен.

К основным научным результатам, полученным автором, следует отнести:

- дано теоретическое обоснование расчетно-экспериментальных методов исследования высокоградиентных термонапряженных состояний сочлененных оболочечных конструкций в технологических процессах энергетического машиностроения на основе энергетических методов термоупругости, теории экстремальных задач и вариационных принципов механики деформируемого твердого тела;

- разработана феноменологическая модель предельных состояний и переходных процессов из упругого в упруго-пластическое состояние, на основе которой проведено математическое моделирование высокоградиентных термонапряженных состояний сочлененных конструкций, подверженных действию неоднородных температурных полей в процессе изготовления;

- разработаны математические модели и получены аналитические решения в экстремальных задачах для исследования высокоградиентных температурных полей, действие которых может приводить к предельным состояниям оболочечных конструкций в переходных процессах из упругого – в упругопластическое;

- разработаны математические модели определения параметров термонапряженного состояния при сварке сочлененных конструкций сложной геометрической формы с переменными физико-механическими свойствами, нагружаемых локальными высокоградиентными температурными полями;

- разработаны методы и алгоритмы оптимизации термонапряженных состояний сочлененных конструкций оболочечного типа на основе системы критериев качества, выбора оптимальной конструктивной формы и оптимального управления параметрами технологических процессов изготовления и математически обосновано построение оценочных весовых функций;

- проведены экспериментальные исследования остаточных температурных напряжений на образцах натурной сварной конструкции с учетом особенностей технологического процесса сварки.

- разработаны методики экспериментального исследования остаточных напряжений в реальных сварных оболочечных конструкциях и новые технические средства для проведения экспериментов.

- на основе разработанных методов проведено исследование натурной сварной алюминиевой конструкции сосуда высокого давления и даны практические рекомендации по оптимизации высокоградиентных термонапряженных состояний, локализованных в зонах термического влияния продольных и кольцевых сварных швов.

Научная новизна результатов представленной работы заключается в том, что:

- теоретическое обоснование разработанных новых математических моделей и принятых подходов механики деформируемого твердого тела позволяет исследовать высокоградиентные термонапряженные состояния сочлененных оболочечных конструкций;

- универсальный подход к определению экстремальных температурных полей, получаемых на основе минимизации функционала упругой энергии деформации оболочки в пространстве перемещений, позволяет использовать единую методику решения температурной задачи; такой подход с точки зрения математического формализма дает широкие возможности сочетать основные положения теории экстремальных задач и механики деформируемого тела для анализа предельных переходных процессов оболочечных конструкций, находящихся под локальными высокоградиентными температурными воздействиями;

- разработанные новые оптимизационные модели позволяют оптимизировать термонапряженные состояния конструкций энергетического машиностроения с учетом особенностей технологических процессов изготовления;

- разработанные экспериментальные методы исследования остаточных термонапряженных состояний сварных конструкций оболочечного типа, основанные на корреляции металлографических и механических методов определения остаточных напряжений, позволяет верифицировать предложенные модели и методы в исследовании действительных высокоградиентных термонапряженных состояний сочлененных оболочечных конструкций энергетического машиностроения.

Использование основных положений методов механики деформируемого твердого тела, в частности, теории термоупругости, и апробированных методов и пакетов математического моделирования, разработанных алгоритмов компьютерной проверки и корректность экспериментальных методов определения температурных напряжений с применением современной аппаратуры в достаточно полной мере подтверждают обоснованность и **достоверность результатов** диссертационной работы.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в использовании разработанных методов и моделей, адаптированных к

реальным условиям технологических процессов энергетического машиностроения, оптимизировать высокоградиентные термонапряженные состояния сочлененных оболочечных конструкций в жизненном цикле «проектирование – изготовление – эксплуатация». Проведенные исследования могут найти применение в разработке перспективных энергетических конструкций с повышенными эксплуатационными свойствами. Новизна и оригинальность разработанных технических средств нагружения и измерения перемещений подтверждены патентом на изобретение №2453823 от 20.06.2012.

Результаты диссертационной работы Мироновой Л.И. рекомендуются к внедрению при разработке энергетических конструкций в проектных организациях и предприятиях г. Москвы и Российской Федерации.

Диссертация прошла апробацию на научных конференциях и семинарах.

Содержание автореферата соответствует содержанию и выводам диссертации и дает достаточно полное представление о работе в целом.

Замечания по материалам диссертации и автореферата:

1. Неверное утверждение (таблица 1.3), что «возникающие напряжения в процессе эксплуатации не должны превышать предел текучести». В нормативных документах отсутствует ограничение на местные (локальные) напряжения с точки зрения превышения предела текучести. Ограничены величины общих и местных мембранных и общих изгибных напряжений, вызываемых действием механических нагрузок. Местные приведенные напряжения ограничиваются косвенным образом через механизм усталости, который может привести к предельному состоянию - образованию макротрещины. Пластические же деформации в тонкостенных и не совсем тонкостенных конструкциях могут привести к изменению формы, например, к уменьшению проходного сечения.

2. В диссертации с недостаточной степенью раскрыт физический смысл «экстремального температурного параметра». В несвязанной постановке задачи термоупругости функционал упругой энергии деформирования строится на пространстве перемещений (так называемое Гильбертово пространство), который зависит от вида температурного поля. Если вид температурного поля заранее известен и поле описывается некоторой функцией, то мы имеем «экстремальную температурную функцию» тем более, что на л.118 речь идет о «семействе экстремальных температурных полей».

3. На стр. 153 неверно утверждается, что сжимающие остаточные напряжения на внутренней поверхности в местах стыка оболочек способствуют зарождению и развитию трещин.

4. Имеется также ряд редакционных замечаний:

4.1. В приведенном графике рис. 3.5 параграфа 3.3 (стр. 120) не указана величина на оси абсцисс, приведено только ее числовое значение.

4.2. В таблицах 3.4, 3.5 параграфа 3.6 (стр. 131, 132) с математической точки зрения было бы корректно выразить параметр t в радианах.

4.3. В разработанной методике экспериментального определения температурных напряжений в гл. 7 (табл. 7.7, стр. 283) отсутствуют пояснения к расчету полных напряжений.

Эти неточности не влияют на восприятие материала диссертации, а указанные замечания не снижают качества диссертационной работы.

Диссертация Мироновой Любови Ивановны «Исследование и оптимизация высокоградиентных термонапряженных состояний сочлененных оболочечных конструкций в технологических процессах энергетического машиностроения» является законченной научно-квалификационной работой. Диссертация соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертационным работам на соискание учёной степени доктора технических наук, а её автор Миронова Л.И. заслуживает присуждения ей учёной степени доктора технических наук по специальности 01.02.04 - Механика деформируемого твёрдого тела.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании НТС ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Протокол № 3/14 от 04.09.2014г.

Отзыв подготовлен:

Начальник
отдела прочности

Л.А.Лякишев

Заместитель директора по науке,
д.т.н., профессор

А.С.Зубченко

Ученый секретарь НТС,
д.т.н.

В.П.Семишкин