

В диссертационный совет Д 212.125.05  
при ФГБОУ ВПО  
«Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский  
университет)»  
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,  
Волоколамское шоссе, д.4.

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента 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**

На отзыв представлена диссертационная работа, состоящая из введения, семи глав, списка литературы из 182 наименований и двух приложений. Диссертация изложена на 322 страницах, содержит 33 таблицы и 111 рисунков. Автореферат, изданный на правах рукописи, содержит 43 страницы. Материалы, изложенные в автореферате, достаточно полно отражают содержание диссертации Мироновой Л.И.

Диссертационная работа Мироновой Л.И. выполнена на основании значительного объёма теоретических и практических исследований, проведённых непосредственно автором или при его участии в творческом коллективе.

Диссертационная работа Мироновой Любови Ивановны посвящена проблемам обеспечения работоспособности, надежности и долговечности элементов конструкций энергетического оборудования. Объект диссертационного исследования – сочлененные оболочечные конструкции, широко используемые в энергетическом машиностроении. Среди них выделены: сосуды высокого давления, многослойные конструкции, элементы трубных соединений, детали и узлы технологической оснастки металлургического производства. Технология изготовления подобных конструкций из материалов, обладающих высокими конструкционными прочностными свойствами, включает многие операции, протекающие под действием высоких температур. К числу последних относятся такие безальтернативные методы изготовления как сварка и термообработка (индукционный нагрев и пр.). Структурные превращения материалов вследствие локальных интенсивных тепловых воздействий приводят к возникновению неоднородных высокоградиентных термонапряженных состояний в зонах технологического влияния. Существующие проблемы выбора конструкционного материала для энергетических установок

включают ряд вопросов выполнения технических требований, важным из которых является обладание материалом технологическими свойствами, позволяющими применить его для изготовления той или иной детали, используемой в узле или конструкции. При этом следует учитывать жесткие требования к деформативности ответственных конструкций энергетического машиностроения, исключающих развитие пластических деформаций вследствие действия локальных источников тепла высокой интенсивности. Анализ термонапряженного состояния, обусловленного термосиловыми факторами влияния еще в процессе изготовления конструкции, требует разработки новых адекватных математических моделей и уточненных методов расчета.

В связи с этим решение проблемы качества изготовления сборных металлических конструкций с минимальными остаточными напряженными состояниями, обусловленными особенностями протекания высокотемпературных операций в процессе изготовления, становится особенно важным в обосновании прочности и надежности энергетических объектов.

Кроме этого, в механике деформируемого твердого тела накоплен богатый опыт по решению оптимизационных проблем для простейших одномерных элементов конструкций по геометрическим параметрам. Существующие подходы и методы не всегда могут быть адаптированы к действительным условиям нагружения реальных конструкций, при этом технологические проблемы с точки зрения механики деформируемого твердого тела рассматриваются не очень часто. Поэтому разработка оптимизационных моделей и методов оптимизации с учетом особенностей конструктивной формы и механических характеристик материалов, которые количественно и качественно характеризуют работоспособность данного элемента в тех или иных условиях, на этапах жизненного цикла «проектирование и изготовление», является актуальной задачей создания конкурентоспособной техники в энергетическом машиностроении. Отсюда вытекает **актуальность** темы диссертационной работы.

**Научная новизна** работы Мироновой Л.И. состоит в новых подходах в обосновании методов исследования и построении расчетных адекватных моделей. Предложен и развит расчётно-феноменологический метод, который позволил оценить и провести оптимизацию высокоградиентных термонапряженных состояний сочлененных оболочечных конструкций, подверженных действию термосиловых факторов, сопоставимых реальным условиям нагружения в технологиях изготовления.

Используемый в работе вариационный метод исчисления является одним из универсальных численно-аналитических подходов решения краевых и оптимизационных задач механики деформируемого твердого тела. В качестве критерия предельного упругого состояния автор принимает условие минимума упругой энергии оболочки. Такой подход привлекателен для расчетов экстремальных параметров, как в стационарных, так и динамических процессах механики. Однако для решения экстремальной

температурной задачи и определения полей напряжений и деформаций, соответствующих искомым температурным экстремалам, он недостаточно развит. Автор обоснована сущность вариационной постановки задачи нахождения температурных экстремалей, взятых в качестве критериального параметра, характеризующего предельное упругое состояние конструкции. Реализация такого подхода осуществлена как на аналоговом, так и численном методах решения.

В континуальном приближении построены новые математические модели определения полей температурных напряжений и деформаций в местах сочленения элементов конструкций, характерных резкому изменению контура, геометрической неоднородности с температурно зависимыми физико-механическими свойствами материалов.

На основе поиска общности закономерностей, в качестве которой принято уравнение механики сплошной изотропной среды в перемещениях, формализована оптимизационная задача и разработан оценочный инструментарий предельного состояния конструкции, обусловленного высокоградиентным тепловым воздействием. Предложенные подходы реализованы на теории экстремальных задач и спектральном представлении оценочной функции путем преобразования Лапласа.

Автор предложил и реализовал оригинальный экспериментальный метод определения остаточных напряжений в сварных соединениях оболочечных конструкций, базирующийся на корреляции металлографических и механических методов исследования. Такой подход позволил верифицировать предложенные расчетные модели и методы в исследовании действительных высокоградиентных термонапряженных состояний сочлененных оболочечных конструкций энергетического машиностроения.

В диссертации получены следующие **важные научные результаты**.

На основе решения экстремальной температурной задачи построены расчетные модели определения высокоградиентных температурных полей и соответствующих им параметров термонапряженного состояния сочлененных оболочечных конструкций с учетом реальных условий термонагружения в технологических процессах энергетического машиностроения.

Проведены теоретические исследования остаточного напряженного состояния сварного сосуда высокого давления. Исследованы температуры и определен градиент температур в зонах термического влияния, сопоставимых им термических напряжений с учетом технологических и механических свойств конструкционных материалов. Определен характер распределения температурных напряжений для ряда свариваемых материалов: алюминиевых, медных и титановых сплавов в зависимости от изменения толщины стенки и соотношения геометрических параметров цилиндрической оболочки.

Проведен анализ остаточного напряженного состояния и деформационных свойств реальной конструкции алюминиевого бака в зонах

сварных соединений обечайки с днищем. Определены прогибы в продольных и кольцевых швах с учетом количественного вклада каждого фактора влияния на размерную нестабильность сварной конструкции, к которым отнесены особенности наложения сварного шва, режимы технологического процесса сварки и условия закрепления заготовок.

Выявлена зависимость между назначаемым параметром погонной удельной энергии сварки и расчетной интенсивностью погонной температурной нагрузки. Полученное соотношение позволило оптимизировать термонапряженные состояния сварных элементов по уровню температурных напряжений с учетом особенностей конструкции и режимов технологии сварки.

Проведен сравнительный анализ пространственного расположения структурных элементов (обечаек, штуцеров, отводных коллекторов) относительно несущих конструкций (корпусов, крышек) и выявлены закономерности влияния конструктивной формы на термонапряженное состояние цельной сварной конструкции.

На основе предложенной системы критериев качества разработаны алгоритмы и методы оптимизации высокоградиентных термонапряженных состояний сочлененных оболочечных конструкций в технологических процессах энергетического машиностроения. Проведена оптимизация ряда сварных конструкций, выполненных из конструкционных материалов – алюминиевого сплава АМг6 и стали 30ХГСА, по конструктивным параметрам, минимальному слою наплавленного металла, уровням остаточных напряжений и пластических деформаций.

Математически обоснован и разработан оценочный инструментарий предельных термонапряженных состояний элементов конструкций путем введения априорных весовых коэффициентов для каждого из критериев системы качества.

На основе разработанных и реализованных экспериментальных методов исследования остаточных термонапряженных состояний сварных конструкций оболочечного типа верифицированы предложенные расчетные модели, корректно адаптированные к реальным условиям технологических процессов энергетического машиностроения.

Методами механических и металлографических исследований трубной алюминиевой конструкции экспериментально установлены зависимости уровней остаточных напряжений от степени тепловложения в сварное угловое соединение. Отмечено влияние особенностей наложения сварного шва и способа его формирования. Выявлено, что в зонах с повышенным уровнем остаточных напряжений усадочная пористость и концентрация усадочных раковин увеличивается.

#### **Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.**

Достоверность результатов работы достигается за счет строгого соответствия краевых задач термоупругости и вариационных методов их решения с использованием основных положений механики деформируемого твердого тела, корректно адаптированных к реальным условиям теплового



нагрузки в процессе изготовления конструкций; согласованностью теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными автором и другими исследователями, работающими в данной области; проведением экспериментов с использованием современных методов и методик; компьютерным моделированием и математической обработкой полученных данных.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.** В работе приведены десять основных выводов, вытекающих из теоретического обоснования разработанных адекватных моделей в предложенных методах исследования и оптимизации высокоградиентных термонапряженных состояний сочлененных оболочечных конструкций в технологических процессах энергетического машиностроения. Рассмотренные схемы позволяют добиться высокоточных результатов при сокращении вычислительных затрат по сравнению с методами других авторов. Полученные решения сравниваются с результатами других авторов. Практические рекомендации по оптимизации высокоградиентных термонапряженных состояний сочлененных оболочечных конструкций нашли свое применение на промышленных предприятиях, что подтверждено актами внедрения.

Анализ работы позволяет отметить новизну, достоверность и обоснованность приведенных в работе положений, выводов и рекомендаций.

#### **Замечания по диссертационной работе:**

1. При рассмотрении функционала (глава II, стр. 91) в выражении (2.67) первое слагаемое является функцией от переменной, записанной в виде  $1/2 a(v, v)$ , в то время как дальнейшее раскрытие сущности этой функции определяет ее как функцию от двух переменных  $a(u, v)$ . К тому же, приведенные формулы прокомментированы частично, что затрудняет прочтение пункта.

2. В приведенных формулах главы III, стр. 126 (3.54), (3.55) введена новая функция  $\theta(\beta)$ , которая не прокомментирована должным уровнем.

3. Разработанные адекватные расчетные модели в главе V позволяют определить параметры термонапряженного состояния активной зоны сварного соединения в каждом конкретном случае, а именно распределение температуры при сварке и характер деформирования сварного соединения. Автору при этом следовало бы оценить деформационную способность сварных соединений в интервале температур  $20 \div 100^\circ\text{C}$ , близких к условиям хранения доэксплуатационного периода конструкции, на основе имеющихся методик испытаний на релаксацию и ползучесть имитаторов зон сварных соединений, так как операции «вылеживания» изделий сопровождаются процессами релаксации и способствуют снижению уровней остаточных напряжений.

4. С точки зрения количественного вклада каждого фактора влияния на размерную нестабильность сварных соединений не учтены процессы, сопровождающиеся эффектами микропластического деформирования дислокационного характера. Автору следовало бы провести анализ

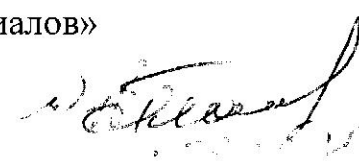
возникающих напряжений 1 рода в зонах метастабильных фазоструктурных образованиях и возможных как положительных, так и отрицательных их воздействий на общее напряженно-деформируемое состояние сварного соединения в целом.

5. Проведенные металлографические исследования сварного соединения показали наличие микроскопических трещин, пор и некоторых других дефектов структуры, размеры и концентрация которых значительно больше в зонах с повышенным остаточным состоянием. Автор связывает это обстоятельство с особенностями конструктивной формы, видом сварного шва и способом наложения валика. Между тем, во многих случаях подобные металлографические исследования позволяют выявить дефекты такие как: пережог металла, наличие окислов по границам зерен, засоренность неметаллическими включениями, связанные с техникой наложения сварного шва. Какие либо пояснения по этому вопросу в диссертации отсутствуют.

Сделанные замечания не влияют на положительную оценку работы. Диссертационная работа в целом представляет собой завершенное исследование, посвященное решению актуальной проблемы, апробирована на научных конференциях и симпозиумах различного уровня, включая международные.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор Миронова Л.И. заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Технология конструкционных материалов»  
ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный  
Государственный технический университет (МАДИ)»,



Белашова Ирина Станиславовна

Подпись Белашовой Ирины Станиславовны заверяю



125319, Москва, Ленинградский проспект, 64  
тел. 8(499) 155-0371

