

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

д. т. н. профессор

 В.К. Драгунов

3 сентября 2015 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» на диссертационную работу Курова Дмитрия Андреевича "Совершенствование традиционного и разработка новых методов диагностики остаточных напряжений в сварном соединении", представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 - механика деформируемого твёрдого тела

Актуальность темы диссертации

Исследования остаточных напряжений и их влияния на прочность материалов и конструкций активно ведутся во многих промышленно развитых странах, что обусловлено непрекращающимися примерами техногенных аварий и катастроф, в значительной мере связанных с высоким уровнем остаточных технологических напряжений. К настоящему времени разработано немало методов измерения остаточных напряжений, которые разделяются на повреждающие и неповреждающие. Наиболее распространённый из повреждающих методов базируется на создании зондирующего отверстия в напряжённом теле с тензометрической, либо спекл-интерферометрической регистрацией высвобождаемого в его окрестности поля микроперемещений, пропорциональных остаточному НДС. Предпочтительным при этом является, стандартизированный в РФ, спекл-интерферометрический метод, обеспечивающий наблюдение полного поля нормальных перемещений поверхности тела в окрестности отверстия и определение главных остаточных напряжений по числу и ориентации полос регистрируемой интерференционной картины. Наряду с преимуществами, этот метод обладает рядом недостатков, прежде всего, - значительной погрешностью в определении напряжений, связанной с дискретностью шага полос интерферограммы. Актуальная задача здесь – повышение точности определения остаточных напряжений по картине спекл-интерференционных полос.

На практике, в высоком приоритете находятся и неповреждающие методы измерения остаточных напряжений, базирующиеся на различных физических принципах, такие как рентгеновский, акустический, магнитошумовой и др. Все они обладают определёнными преимуществами и недостатками, а также

требуют применения сложной дорогостоящей аппаратуры. Актуальная задача здесь – создание простого, оперативного, и, по возможности, недорогого в применении неповреждающего метода диагностики остаточных напряжений.

Тема диссертации Д.А.Курова посвящена решению актуальных задач: повышению точности спекл-интерферометрического метода определения остаточных напряжений и разработке нового неповреждающего безаппаратурного метода их диагностики.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, основных результатов и выводов по работе, списка используемой литературы и приложения. Общий объем составляет 138 страниц машинописного текста.

Во **введении** обоснована актуальность выбора темы диссертации, сформулированы цели работы, заявлены научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость работы. Представлен обзор литературы по тематике работы с характеристикой существующих повреждающих и неповреждающих методов оценки остаточных напряжений, изложена структура диссертации и кратко перечислены полученные результаты.

В **первой главе** дано описание метода определения остаточных напряжений с помощью зондирующего отверстия в сочетании со спекл-интерферометрической регистрацией высвобождаемого в его окрестности поля микроперемещений на поверхности тела. Выдвинуто предложение по повышению точности метода путём включения в информационные показатели не только числа и ориентации интерференционных полос, характеризующих форму, высвобожденного отверстием, нормального перемещения поверхности тела, но и их относительного расположения относительно центра отверстия. Выполнен всесторонний анализ этого предложения на модели задачи Кирша, на основе которого сформулированы конкретные рекомендации, позволяющие существенно снизить степень дискретности в определении величин остаточных напряжений, что представляется особенно важным при определении больших остаточных напряжений, приближающихся к пределу текучести материала. Здесь же представлена и оригинальная композиция решения задачи Кирша с решением задачи о нормальной локальной нагрузке, приложенной к поверхности упругого полупространства, позволившая математически обосновать и оптимизировать метод локального надавливания, применяемый в экспериментах для определения знака остаточных напряжений.

Вторая и третья главы посвящены разработке нового неразрушающего метода оценки остаточных напряжений в сварном соединении по температурным следам, длительное время сохраняющимся на поверхности соединения после сварки. В качестве таких следов, названных в диссертации "линиями максимальных изотерм", могут выступать границы шва и цвета побежалости (естественные изотермы), а также границы зон проплавления предварительно нанесённых на поверхности будущего соединения меток термокарандашами или другими термоиндикаторами (искусственные изотермы). Чтобы связать расположение температурных следов с остаточными напряжениями, потребовалось решение двух основных задач: математической реконструкции термического цикла сварки, приводящего к экспериментально наблюдаемому расположению

температурных следов, и - определения остаточных сварочных напряжений по полученным температурным зависимостям. Ввиду сложности поставленных задач, автор на всех этапах рассмотрения термического цикла сварки: быстрого нагрева под действием локального источника, фазовых переходов при плавлении и затвердевании и медленного остывания использовал одномерные модели теплопроводности и аналитические решения по этим моделям. При выборе одномерных моделей автор обратил внимание на то, что с их помощью не только существенно упрощается решение исходной задачи теплопроводности, но и адекватно описывается термический цикл такого распространённого типа сварки, как контактно-стыковая сварка оплавлением. Данная технология широко применяется при сварке рельсов, арматуры строительных конструкций, соединениях торцов труб, в том числе, - большого диаметра для морских магистральных газопроводов. Все точки плоскости, проходящей через ось будущего шва, соединяются при такой сварке одновременно; тем самым исключаются зависимости температуры от координат вдоль и по глубине шва. В результате, на основе решений известных одномерных задач теплопроводности и фазового перехода построена аналитическая модель термического цикла контактно-стыковой сварки оплавлением, позволяющая определить координаты расположения максимальных изотерм, соответствующих характерным цветам побежалости. Адекватность разработанной аналитической модели термического цикла контактно-стыковой сварки и алгоритма определения положений максимальных изотерм была проверена путём сравнения с результатами численных решений температурных задач для сварки данного типа, выполненных другими авторами.

В качестве основы для определения остаточных напряжений по полученным температурным зависимостям автором был принят достаточно известный и отработанный графо-аналитический метод Николаева-Окерблома. Однако, в своём первоначальном варианте этот метод позволял по изменению температуры отдельной точки сварного соединения определить кинетику изменения НДС точки в термическом цикле сварки через построение четырёх взаимосвязанных графических зависимостей. Для упрощения построения эпюр остаточных напряжений автор предложил модификацию графо-аналитического метода путём замены совокупности зависимостей температуры от времени для отдельных координатных точек на температурную кривую, аппроксимирующую значения температур в местах расположения максимальных изотерм. Это дало возможность построения эпюры остаточных напряжений в всей области сварного шва и в зоне термовлияния, опираясь всего на четыре графические зависимости, что может быть классифицировано как серьёзный научный и прикладной результаты работы. В диссертации приведён пример использования модифицированного графо-аналитического метода в случае контактно-стыковой сварки рельсов. Выполнена также верификация получаемых результатов сравнением с результатами измерений остаточных напряжений стандартизированным методом зондирующего отверстия в сварных соединениях труб на предприятии ООО "Псковэлектросвар".

Научная новизна и практическая значимость полученных в работе результатов

Основными полученными в работе результатами, обладающими научной новизной являются:

1. Разработка координатного метода в спекл-интерферометрической регистрации поля микроперемещений, высвобождаемого при сверлении зондирующего отверстия в теле с напряжениями.

2. Теоретическое обоснование и оптимизация экспериментального метода деформации интерференционных полос при локальном надавливании в окрестности зондирующего отверстия, позволяющего выявить знаки главных остаточных напряжений.

3. Разработка нового неповреждающего метода диагностики остаточных сварочных напряжений по температурным следам на поверхности металла околошовной зоны, не требующего применения сложной измерительной аппаратуры, включающий:

3.1. Алгоритм определения положений температурных следов (максимальных изотерм) по термическому циклу сварки;

3.2. Модификация графо-аналитического метода Николаева-Окерблома, позволяющая строить эпюру остаточных напряжений в области сварного шва и зоне термовлияния по кривой максимальных изотерм, минуя этап исследования кинетики напряжений в температурном цикле сварки.

Практическая значимость полученных в работе результатов заключается в следующем:

1. Использование координатного метода в спекл-интерферометрической регистрации поля микроперемещений, образующегося при сверлении зондирующего отверстия в теле с напряжениями, позволяет в несколько раз снизить степень дискретности в определении величин остаточных напряжений, что особенно важно при определении больших остаточных напряжений, близких к пределу текучести материала тела.

2. Разработанный в диссертации новый неповреждающий метод диагностики остаточных сварочных напряжений по температурным следам, является в перспективе наиболее оперативным и экономически выгодным неразрушающим методом диагностики остаточных напряжений, не требующим для своей реализации применения дорогостоящей измерительной аппаратуры. Подтверждением практической значимости разработанного метода является Справка о внедрении, полученная на предприятии ООО "Псковэлектросвар", в которой отмечается, что «Применение неповреждающего метода температурных следов обеспечивает снижение трудоёмкости и сокращение сроков получения результатов в диагностике остаточных сварочных напряжений при сохранении достаточных уровней точности их определения, что является весьма важным для разработки оптимальных режимов сварки».

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений

Достоверность и обоснованность научных и практических результатов подтверждается строгой постановкой и аналитическими решениями задачи Кирша, служащей модельной задачей для отработки координатного метода, а также – задач теплопроводности на всех стадиях термического цикла сварки: нагрева, плавления, затвердевания и остывания сварного соединения, сравнением с результатами других авторов, использованием для связи восстановленного термического цикла с остаточными напряжениями известного и ранее обоснованного графо-аналитического метода, сравнением с результатами измерений остаточных напряжений на одних и тех же объектах методом температурных следов и стандартизированным методом зондирующего отверстия, показавшим достаточную степень коррелированности результатов.

Подтверждения опубликованных основных результатов диссертации в научной печати

По теме диссертации опубликовано 14 научных работах, включая 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 1 статью в сборнике научных трудов, 10 тезисов докладов на российских и международных конференциях. Упомянутые работы в достаточной полноте отражают основные результаты диссертации.

Замечания по работе

1. Рассмотрение координатного метода выполнено только для одноосного напряжённого состояния. В то же время, реально измеряемые остаточные напряжённые состояния в сварных соединениях, как правило, - двухосные.

2. Аналогичное замечание относится и к теоретическому обоснованию метода локального надавливания. Непонятен вид деформации линий уровня нормальных перемещений поверхности тела в окрестности зондирующего отверстия и её расшифровка при двухосном напряжённом состоянии.

3. Апробация нового неразрушающего метода температурных следов была проведена путём сопоставления результатов измерений остаточных напряжений с результатами метода зондирующего отверстия в случае контактно-стыковой сварки труб большого диаметра. При этом было продемонстрировано согласование полученных результатов по продольным напряжениям, ориентированным по окружности шва. О возможности измерения методом температурных следов второй компоненты остаточного НДС, фиксирующейся при спекл-интерферометрической регистрации в методе зондирующего отверстия, в диссертации не говорится.

Общая характеристика диссертационной работы

Отмеченные замечания не влияют на общую оценку представленной работы. Д.А.Куровым была проведена подробная исследовательская и аналитическая работа, благодаря которой получен ряд новых научных результатов. Диссертация Д.А.Курова является законченной научно-квалификационной работой

высокого уровня на актуальную тему.

Автореферат содержит краткое изложение всех основных результатов диссертационной работы. Расхождения между толкованием, терминологией и выводами в автореферате и диссертации отсутствуют.

Опубликованные работы достаточно полно отражают основные результаты диссертации.

Считаем, что данная диссертационная работа полностью отвечает «Положению о порядке присуждения учёных степеней», а её автор - Дмитрий Андреевич Куров заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 - механика деформируемого твёрдого тела.

Работа обсуждена на заседании Кафедры динамики и прочности машин им. В.В.Болотина НИУ «МЭИ» 31 августа 2015 г. (протокол № 1).

Заведующий Кафедрой динамики и прочности машин

им. В.В. Болотина

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

кандидат технических наук, доцент

111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14

тел.:+7 (495) 362-77-00

<http://www.mpei.ru>

KuznetsovSF@mpei.ru



Кузнецов

Сергей
Федорович

31.08.2015

Ученый секретарь Кафедры динамики и прочности машин

им. В.В. Болотина

кандидат технических наук, доцент

NovikovaOV@mpei.ru



Новикова
Ольга Ва-
лерьевна

31.08.2015