

В диссертационный совет Д 212.125.05
при ФГБОУ ВПО "Московский авиаци-
онный институт (национальный иссле-
довательский университет)" МАИ
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Воло-
коламское шоссе, д. 4

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию Курова Дмитрия Андреевича "Со-
вершенствование традиционного и разработка нового методов диагностики
остаточных напряжений в сварном соединении", представленной на соиска-
ние ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 –
"Механика деформируемого твердого тела"**

Исследования по проблематике остаточных напряжений и их влиянию на прочность упругих тел и конструкций являются следствием многочисленных примеров разрушений, вызванных большими остаточными технологическими напряжениями. К настоящему времени разработано немало методов измерения остаточных напряжений, которые делятся на две основные группы: повреждающие, связанные с изъятием части материала из тела с напряжениями, и неповреждающие, основанные на различных физических принципах и требующих для своей реализации, как правило, применения сложной аппаратуры. Один из наиболее широко распространенных, повреждающих методов базируется на высверливании в теле с напряжениями несквозного отверстия и регистрации в его окрестности с помощью электронной спекл-интерферометрии поля микроперемещений, вызванных разгружающим действием отверстия. Определяемые остаточные напряжения пропорциональны числу полос регистрируемой интерференционной картины, совпадающих с расположением линий уровня микроперемещений. Недостатком данного метода является относительно невысокая точность определения напряжений по числу полос, ввиду дискретности измерений, составляющей от 20 до 40 МПа на полосу.

Диссертация посвящена актуальным темам: повышению точности спекл-интерферометрической регистрации остаточных напряжений в методе отверстия

и разработке нового, не требующего сложной аппаратуры, неповреждающего метода их диагностики.

Диссертация состоит из введения и трех глав.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель работы, научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость работы. Представлены обзор литературы, характеристика существующих повреждающих и неповреждающих методов оценки остаточных напряжений, перечислены представленные в работе результаты и кратко изложена структура диссертации.

В первой главе даётся описание определения остаточных напряжений методом зондирующего отверстия и ряда положений, на которых базируется этот метод, одним из которых является зависимость нормальных перемещений поверхности тела в области отверстия от величины остаточных напряжений. Принимается, что для регистрации этих перемещений используется спекл-интерферометрический метод и заданная им дискретность линий уровня перемещений (интерференционных полос). Величина остаточного напряжения определяется перемножением числа полос на коэффициент, определяющий цену полосы для данного материала, и размеры отверстия. В главе рассматривается развитие этого метода в направлении включения в качестве информационного параметра не только числа интерференционных полос, но и их расположения относительно зондирующего отверстия. На примере задачи Кирша автор провёл подробное исследование зависимостей положений линий уровня перемещений (координат полос) от величин главных остаточных напряжений для разных материалов, диаметров зондирующих отверстий и углов наблюдения, отличающихся от направления действия этих напряжений. В результате, выведенные им соотношения и номограммы позволяют при их практическом применении в несколько раз снизить дискретность определения остаточных напряжений и, что самое главное, - повысить точность определения наиболее опасных больших остаточных напряжений.

Помимо повышения точности определения величин остаточных напряжений, автор разработал и математическое обоснование определения их знака, что также является нетривиальной задачей, так как наблюдаемая в эксперименте картина линий уровня нормальных перемещений в окрестности отверстия представляет собой проекцию её пространственной формы на поверхность тела. В качестве одного из экспериментальных приёмов для определения знака остаточного напряжения используется дополнительное локализованное надавливание на поверхность тела после высверливания отверстия. Автор рассмотрел математическую модель совместного действия заданного напряжения в упругом полупространстве, ослабленном цилиндрическим отверстием, и локализованной в малом круге нормальной нагрузки на его поверхности, что позволило объяснить разный характер деформирования линий уровня нормальных перемещений в точках, находящихся на направлении действия напряжения, и на линии, перпендикулярной этому направлению. В результате полученных соотношений сформулированы рекомендации по расположению точки надавливания для лучшей идентификации знака напряжений по искажению формы интерференционных полос.

Во второй главе рассматриваются экспериментальные предпосылки, идея и математическое обоснование нового неразрушающего метода оценки остаточных напряжений в сварном соединении по температурным следам, сохраняющимся длительное время после окончания термического цикла сварки. Чтобы связать расположение температурных следов с остаточными напряжениями, были решены две задачи: математической реконструкции термического цикла сварки по температурным следам и разработки алгоритма определения остаточных сварочных напряжений по полученным температурным зависимостям.

В качестве исходных данных для математической модели реконструкции термического цикла сварки по температурным следам использовались координаты максимальных остаточных изотерм: расположения границ шва и цветов побежалости после сварки по отношению к оси шва. В диссертации рассматривались только соединения, выполненные методом контактно-стыковой сварки оплавлен-

нием, в которой все точки плоскостей, параллельных оси шва, соединяются одновременно. На основании этого в работе была исключена зависимость температуры от координат вдоль и по глубине шва, т.е. для описания температурного поля использовалась одномерная модель.

Для определения координат максимальных изотерм после остывания шва предполагалось, что цвета побежалости, образующиеся при нагреве зоны сварного соединения выше определённой температуры, принимают окончательное положение только после стадии охлаждения. В соответствии с этим был рассмотрен термический цикл сварки, состоящий из четырех последовательных процессов: быстрый нагрев, плавление и затвердевание, остывание сварного шва и околошовной зоны.

Для математического описания процесса нагрева в работе используется традиционное решение первой краевой задачи для уравнения теплопроводности, обеспечивающее форму локального нагрева зоны шва. Математическое описание процесса фазового перехода сводится к решению уравнений задачи Стефана. Для описания процесса остывания при температурах за температурой фазового перехода используется решение уравнения теплопроводности в виде ряда Фурье, по которому также определяются следы максимальных изотерм, сохраняющихся в виде цветов побежалости на поверхности сварного соединения. Здесь автор применил оригинальный творческий подход, так как при нахождении положений экстремальных изотерм дополнительными неизвестными, кроме их координат, являются моменты времени, на которых достигаются соответствующие максимумы температуры при остывании шва. Для определения этих неизвестных, соответствующих конкретному значению максимальной температуры, им были введены условия в виде двух уравнений, решение которых дало значение максимального удаления определенного температурного уровня от центра сварного шва. Проверка разработанной модели связи температурных следов с термическим циклом сварки выполнялась с помощью результатов численного и аналитического реше-

ний температурной задачи соединения контактной стыковой сваркой оплавлением тонких стержней и рельсов.

В третьей главе рассматривается использование координатно-временного распределения температуры в термическом цикле сварки для получения кинетики НДС в соответствии с графо-аналитическим методом Николаева-Окерблома. Ввиду того, что целью этой части работы являлось получение распределения остаточных напряжений в шве и зоне термовлияния, исходный вариант метода Николаева - Окерблома был модифицирован автором путем замены совокупности зависимостей температуры от времени для отдельных координатных точек на температурную кривую, проведенную через координаты максимальных изотерм, соответствующих расположению температурных следов, что дало возможность построения эпюры остаточных напряжений в области сварного шва и в зоне термовлияния, минуя этап исследования кинетики напряжений в температурном цикле сварки. Этот результат может быть отнесён к одному из ключевых достижений диссертации.

В качестве примера использования модифицированного таким образом графо-аналитического метода, представлена технология получения эпюры остаточных напряжений в случае рассмотренной выше контактно-стыковой сварки рельсов.

Описанная методика позволяет строить эпюры остаточных сварочных напряжений непосредственно по расположению температурных следов без применения дополнительных математических преобразований и инструментальных ресурсов, что придает ей значительные практические преимущества перед другими методами. Достоверность получаемых при этом результатов подтверждена сравнением с результатами измерений остаточных напряжений на одних и тех же объектах стандартизированным методом зондирующего отверстия.

По работе имеется и ряд замечаний:

1. Координатный метод, повышающий точность определения остаточных напряжений при спекл-интерферометрической регистрации поля перемещений в окрестности зондирующего отверстия, представлен только для сквозного отверстия; поэтому не ясно, насколько полученные результаты могут быть использованы при измерениях с несквозным отверстием.

2. На примере контактной стыковой сварки оплавлением рельсов рассматриваются только этапы нагрева и остывания. Отсутствует анализ влияния фазового перехода на положения максимальных остаточных изотерм.

3. Отсутствует также анализ возможности применения метода температурных следов для определения остаточных напряжений при других, не менее распространённых, чем контактно-стыковая, видах сварки.

4. На стр. 16 приведена гипотеза «...границы тела, в котором измеряются напряжения, удалены от отверстия на достаточно большое расстояние и их влиянием на возмущенно-деформированное состояние можно пренебречь. На практике такое удаление можно считать обеспеченным, если размеры тела превосходят два или более диаметра отверстия». Как показывает задача Кирша, это расстояние должно быть существенно больше, чем два диаметра.

Следует отметить, что диссертация написана хорошим языком, иллюстрации выполнены качественно и достаточно полно отражают содержание.

В целом, диссертация Д.А.Курова выполнена на высоком научном уровне и удовлетворяет всем требованиям ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по техническим наукам.

Основное содержание диссертации и ее результатов отражено в 14 работах, из которых 9 - в рецензируемых изданиях, в том числе 3 - в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Куров Д.А. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – "Механика деформируемого твердого тела".

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор,
действительный член Российской академии архитектуры и строительных наук, заведующий кафедрой «Сопротивление материалов» ФГБОУ ВО Национального исследовательского Московского государственного строительного университета



Андреев Владимир Игоревич

129337, г. Москва, Прохлава шоссе, д. 26

Тел.: +7 (499) 183-55-57, E-mail: asv@mgsu.ru