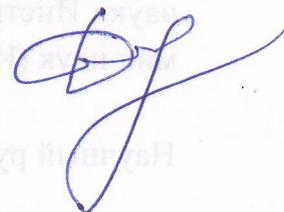


На правах рукописи



КУРОВ Дмитрий Андреевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРАДИЦИОННОГО И
РАЗРАБОТКА НОВОГО МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ
ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНОМ
СОЕДИНЕНИИ

Специальность: 01.02.04

Механика деформируемого твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Попов Александр Леонидович.

Официальные оппоненты: **Шарафутдинов Геннадий Зиатдинович**
доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института механики МГУ им. М.В. Ломоносова;

Андреев Владимир Игоревич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Сопротивление материалов» ФГБОУ ВПО "Московский государственный строительный университет" (национальный исследовательский университет).

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Защита состоится « 30 » сентября 2015 года в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО МАИ (НИУ) и на сайте http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=58612.

Автореферат разослан « » 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.125.05

Федотенков Г.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Напряжения, существующие в телах или конструкциях при отсутствии каких-либо внешних воздействий, например, силовых, а также тепловых и других в литературе называют, как правило, остаточными напряжениями. Исследования по проблематике остаточных напряжений и их влияния на прочность упругих тел и конструкций идут достаточно широко. Это является следствием многочисленных примеров разрушений, вызванных большими остаточными технологическими напряжениями.

К настоящему времени разработано достаточно много методов измерения остаточных напряжений, описание которых можно найти в монографиях, справочнике, и в других публикациях. Все известные методы измерений делятся на две большие группы: повреждающие и неповреждающие. Наиболее распространенный метод из повреждающих базируется на высверливании несквозного зондирующего отверстия в напряженном теле. Регистрация микроперемещений в окрестности этого отверстия, пропорциональных остаточному НДС, осуществляется различными способами, среди которых лидирующее положение занимает тензометрический способ. В настоящее время тензометрическое измерение НДС в окрестности несквозного зондирующего отверстия все больше заменяется более оперативными и бесконтактными оптическими методами, среди которых выделяется метод электронной спекл-интерферометрии. Определяемые по этому методу остаточные напряжения пропорциональны числу полос регистрируемой интерференционной картины. Недостатком данного подхода является относительно невысокая точность определения напряжений по числу полос, составляющая порядка 20-25 МПа для стальных образцов. Актуальная задача здесь – повышение точности определения остаточных напряжений по картине спекл-интерференционных полос.

На практике зачастую повреждающие воздействия с целью определения остаточных напряжений нежелательно, или просто недопустимо. В этих случаях используют косвенные неповреждающие методы измерения, основанные на

различных физических принципах, такие как рентгеновский, акустический, магнитошумовой и другие. Все они обладают определенными преимуществами и недостатками, требуют для своего применения сложную дорогостоящую аппаратуру. Актуальная задача здесь – создание простого, оперативного, и, по возможности, недорогого в применении неповреждающего метода диагностики остаточных напряжений.

Диссертация посвящена решению этих актуальных задач путем повышения точности спекл-интерферометрического метода определения остаточных напряжений и разработки нового неповреждающего безаппаратурного метода их диагностики.

Цель работы. Совершенствование известного метода оценки остаточных напряжений по спекл-интерферограмме поля микроперемещений в окрестности зондирующего отверстия и разработка нового неповреждающего метода диагностики остаточных сварочных напряжений на основе температурных следов, возникающих на металле сварного соединения после окончания сварки.

Научная новизна результатов состоит в следующем:

1. Выполнено усовершенствование метода зондирующего отверстия в определении остаточных напряжений, позволившее связать регистрируемые в окрестности отверстия перемещения с напряжениями в теле не только по числу интерференционных полос, пропорциональному уровню высвобождаемых перемещений, но и по координатам расположения полос относительно центра отверстия, что обеспечивает снижение погрешности оценки остаточных напряжений в несколько раз.

2. С использованием совместного аналитического решения задачи Кирша и задачи о действии нормальной нагрузки, распределённой в круге малого радиуса на поверхности упругого полупространства, теоретически обоснован метод деформации интерференционных полос при локальном надавливании в окрестности зондирующего отверстия, позволяющий выявить характер (растягивающий или сжимающий) действия главного остаточного напряжения.

3. Предложен новый неповреждающий метод диагностики остаточных сварочных напряжений по температурным следам (положениям максимальных изотерм), сохраняющимся на поверхности металла околошовной зоны длительное время после окончания сварки, осуществляемый без применения сложной измерительной аппаратуры, чем выгодно отличается от других методов неразрушающего контроля.

4. Разработан алгоритм определения положений температурных следов по термическому циклу сварки и его использование для определения кинетики сварочных напряжений в графо-аналитическом методе Николаева-Окерблома (К.М. Гатовский, 1981).

5. Проведена апробация метода температурных следов на примерах контактной стыковой сварки оплавлением металлических стержней, рельсов и труб, экспериментальные результаты по термическим циклам в которых приведены в работах (Кархин В.А. 2008, N.S. Tsai, T.W. Eagar, 1985 и др.).

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

7. Проведена верификация метода температурных следов с помощью стандартизованного метода зондирующего отверстия (ГОСТ Р 52891-2007 «Контроль остаточных технологических напряжений методом лазерной интерферометрии»), показавшая достаточную степень коррелированности результатов неповреждающего и повреждающего методов.

Практическая значимость работы заключается в создании нового неповреждающего метода оценки остаточных напряжений на основе температурных следов, отличающегося, в сравнении с другими неповреждающими методами, меньшей трудоёмкостью, а также экономической характеристикой: для получения исходной информации в методе температурных следов не требуется дорогостоящая измерительная аппаратура. Эти достоинства метода отмечены в Справке о внедрении от предприятия ЗАО «Псковэлектросвар», где на натур-

ных объектах – сварных соединениях стальных труб морских трубопроводов была проведена экспериментальная апробация метода температурных следов параллельно измерениям остаточных сварочных напряжений повреждающим методом зондирующего отверстия, показавшая достаточную степень коррелированности результатов.

Достоверность и обоснованность научных и практических результатов подтверждается строгой постановкой прямых задач теплопроводности и их аналитическими решениями на всех стадиях термического цикла сварки: нагрева, плавления, затвердевания и остывания сварного соединения, обеспечивающими решение обратной задачи реконструкции термического цикла по температурным следам, сравнением с результатами других авторов, использованием для связи восстановленного термического цикла с остаточными напряжениями известного и строго обоснованного графо-аналитического метода Николаева-Окерблома, а также сравнением с результатами измерений остаточных напряжений на одних и тех же объектах стандартизированным методом зондирующих отверстий.

Методы исследования. В работе для установления связи между температурными следами и полем остаточных напряжений использовались аналитические методы решения задач теплопроводности на разных стадиях термического цикла сварки: нагрева, плавления и затвердевания с учетом фазовых переходов и охлаждения с формированием температурных следов. Для установления связей между реконструированным термическим циклом и остаточными напряжениями использовался графо-аналитический метод Николаева-Окерблома, который был усовершенствован в работе; в исходной формулировке этот метод обеспечивал построение временной зависимости напряжения в выбранной точке на определенном расстоянии от оси сварного шва как в процессе сварки, так и после него, т.е., - остаточных напряжений. В диссертации этот метод был модернизирован в направлении определения только остаточных напряжений, но зато сразу для всего поля точек, включающего сварной шов и зону термовлияния, т.е. эпюры остаточных напряжений. С помощью стандартизированного

экспериментального метода зондирующего отверстия со спекл-интерферометрической регистрацией поля перемещений в окрестности отверстия была проведена верификация метода температурных следов при измерениях сварочных напряжений в стальных трубах морских трубопроводов.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработан усовершенствованный метод регистрации спекл-интерферометрической информации о поле микроперемещений в окрестности зондирующего отверстия, выполненного в теле с напряжениями. Этот метод связывает регистрируемые перемещения с напряжениями в теле не только по числу интерференционных полос, пропорциональному уровню перемещений, квантованному длиной полуволны лазера, но и по координатам их расположения относительно центра отверстия, что позволяет существенно снизить погрешность измерений по уровням напряжений внутри перепада высот нормальных перемещений поверхности тела между соседними спекл-интерференционными полосами.

2. Сформулирован и обоснован (теоретически и экспериментально) новый, не требующий дорогостоящей измерительной аппаратуры, неповреждающий метод определения остаточных сварочных напряжений по температурным следам, сохраняющимся на поверхности металла после окончания сварки. Установлена связь расположения температурных следов с предшествующим температурным циклом сварки на основе решения задач о нагреве, плавлении, затвердевании и остывании сварного соединения. По реконструированному температурному циклу сварки с помощью, модернизированного в работе, графо-аналитического метода Николаева-Окерблома, определена связь с остаточными сварочными напряжениями как в области сварного шва, так и в зоне термовлияния.

Апробация результатов работы.

Материалы диссертационной работы докладывались на X Международной конференции “Современные проблемы механики сплошной среды” (Россия, Ростов-на-Дону, 2006), III Российской научно-технической конференции

«Разрушение контроль и диагностика материалов и конструкций» (Россия, Екатеринбург, 2007), 8-ой Международной конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности» (Россия, Москва, 2009), IX Всероссийской научно-практической и учебно-методической конференции «Фундаментальные науки в современном строительстве» (Россия, Москва, 2012), XXI Международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Россия, Москва, 2015), и пяти международных молодежных научных конференциях «XXXIII Гагаринские чтения» (Россия, Москва, 2007), «XXXIV Гагаринские чтения» (Россия, Москва, 2008), «XXXV Гагаринские чтения» (Россия, Москва, 2009), «XXXVI Гагаринские чтения» (Россия, Москва, 2010) и «XXXVIII Гагаринские чтения» (Россия, Москва, 2012).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 9 статей в рецензируемых изданиях, в том числе 3 в журналах из перечня рекомендованного ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, состоящего из 61 наименования. Общий объем диссертации – 138 страниц, 74 рисунков и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

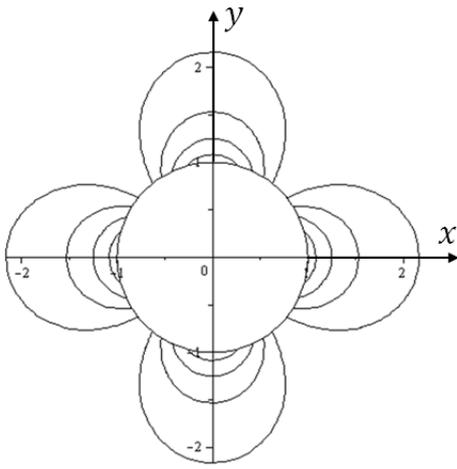
Во введении обоснована актуальность выбора темы диссертационной работы, сформулированы цель работы, научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость работы. Представлены обзор литературы, характеристика существующих повреждающих и неповреждающих методов оценки остаточных напряжений, перечислены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

В главе 1 «Совершенствование метода отверстий в определении остаточных напряжений» даётся описание определения остаточных напряжений методом зондирующего отверстия и ряда положений, на которых базируется

этот метод, одним из которых является зависимость перемещений в области зондирующего отверстия от величины остаточных напряжений. Одним из современных бесконтактных методов регистрации этих перемещений является спекл-интерферометрический метод. При наблюдении спекл-интерферометрической картины перемещений в окрестности зондирующего отверстия, определяется число интерференционных полос по осям симметрии картины, соответствующим главным осям остаточных напряжений, пропорциональное этим напряжениям. Величина остаточного напряжения определяется перемножением числа полос на коэффициент, определяющий цену полосы для данного материала и размеров отверстия. В главе рассматривается развитие этого метода в направлении включения в качестве информационного показателя не только числа интерференционных полос, но и их расположения (координат) внутри перепада высот в форме нормального перемещения поверхности между соседними полосами, квантованного длиной полуволны применяемого в измерительной системе лазера. Тем самым, снижается дискретность в определении величин остаточных напряжений.

Для отработки координатного метода определения остаточных напряжений рассмотрена расчетно-теоретическая модель для нормальных перемещений $W_x(r, \theta)$ в окрестности сквозного отверстия радиуса a в пластине толщиной h , нагруженной в своей плоскости вдали от отверстия постоянным полем напряжений S_x , ориентированным по оси x перпендикулярно оси отверстия, следующая из решения задачи Кирша. В случае, если отверстие выполняется в предварительно напряженном теле, выражение для нормального перемещения его поверхности имеет вид:

$$W_x(r, \theta) = \frac{S_x a^2 \nu h}{Er^2} \cos 2\theta \quad (1)$$



(E, ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала тела соответственно, r, θ – полярные координаты).

Линии уровня такого перемещения в безразмерных координатах $(r/a, \theta)$, как показано на Рис. 1, имеют вид:

На Рис. 2 показаны формы нормальных перемещений в окрестности зондирующего отверстия диаметром 6 мм для двух характерных материалов: алюминия (кривая 1) и стали – 2 при действии растягивающей нагрузки $S_x = 80$ МПа и $\theta = 0$. Горизонтальными штриховыми линиями отмечены уровни $N \frac{\lambda}{2}, N = 1, \dots, 5$, соответствующие положениям однотипных интерференционных полос при регистрации этих перемещений спекл-интерферометрическим методом ($\lambda = 0.64$ мкм – длина волны полупроводникового лазера). Исходя из

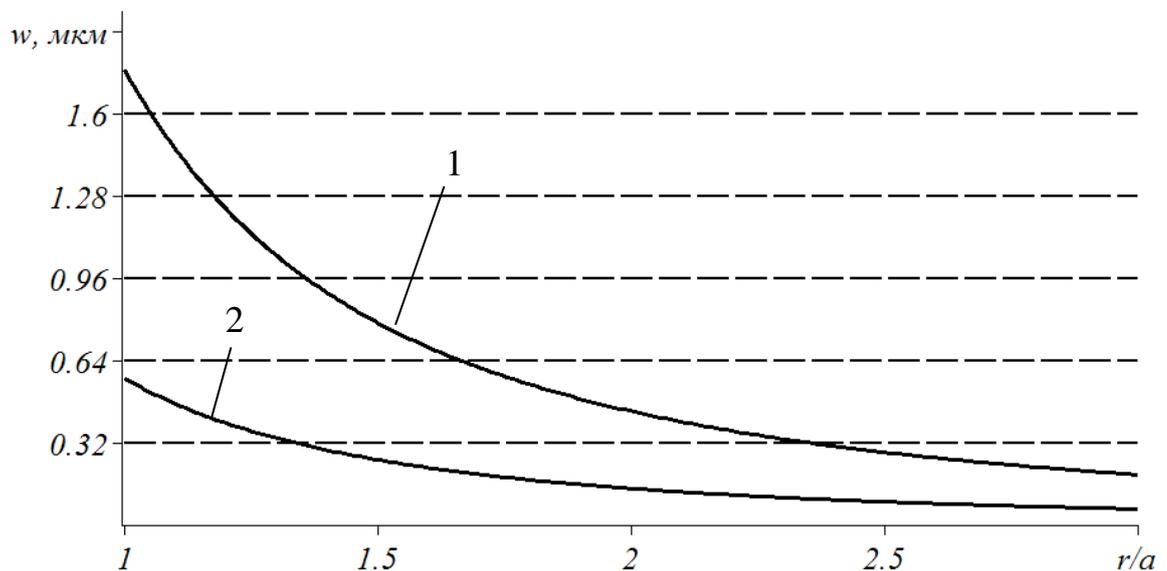


Рис. 2

числа линий уровня и величины растягивающей нагрузки, цена одной линии уровня (интерференционной полосы) составляет для алюминия 14.5 МПа, а для

стали – 45 МПа. Эти величины составляют исходную погрешность метода расчета напряжений по числу интерференционных полос.

При изменении напряжений в пределах 14.5 МПа для алюминия и 45 МПа для стали, число регистрируемых интерференционных полос не изменяется. Меняться будет их положение в пределах шага полос. Из графика на Рис. 2 для алюминия видно, что в пределах этого шага расстояние между первой и второй полосами по горизонтали составляет $0.67a$ или 2 мм. Учитывая что, точность выделения положения центров полос на современной регистрирующей аппаратуре составляет порядка 0.025 мм, можно заключить, что при учёте координаты полосы в пределах шага полос погрешность определения напряжения для алюминия снижается с 14.5 МПа до 0.5 МПа. Аналогичные рассуждения применительно к стали показывают, что использование координатного метода позволяет снизить погрешность определения напряжения до 2.5 МПа.

С использованием решения задачи Кирша оценено также влияние диаметра отверстия: с его увеличением, линии уровня отдаляются от отверстия, что может способствовать улучшению их распознавания, особенно при небольших уровнях действующих напряжений. В то же время высверливание зондирующих отверстий большого диаметра увеличивает поврежденность конструкции и может вывести часть линий уровня за область наблюдения интерферометра. Определенную ценность в уменьшении погрешности при оценке напряжений представляет также, выполненное в работе, координатное определение положения полос не только по направлениям главных напряжений, но и под некоторыми углами к ним, в особенности, - когда часть линий уровня по осям симметрии регистрируемого поля перемещений выходит за область наблюдения интерферометра.

Наряду с повышением точности определения напряжений, координатный метод обеспечивает и определение знака приложенных напряжений, так как наблюдаемая в эксперименте картина линий уровня представляет собой проекцию пространственной формы прогиба на плоскость пластины. Для этого используется дополнительное локализованное надавливание в окрестности отвер-

ствия, что позволяет проявить разный характер деформирования линий уровня нормальных перемещений в точках, находящихся на направлении приложенной нагрузки, и на линиях, перпендикулярных этому направлению.

Математическая модель эффекта такого воздействия на примере нормальной нагрузки q , приложенной к упругому полупространству, описывается выражениями:

$$w_{in}(r) = \frac{4qb(1-\nu^2)}{\pi E} E\left(\frac{1}{k}\right), \quad k = \frac{b}{r} \quad (2)$$

- внутри зоны надавливания $0 \leq r \leq b$;

$$w_{out}(r) = \frac{4q(1-\nu^2)}{\pi Er} \left[K(k)(b^2 - r^2) + r^2 E(k) \right] \quad (3)$$

- вне зоны надавливания $r \geq b$.

Здесь K и E - полные эллиптические интегралы Лежандра первого и второго рода соответственно.

На Рис. 3 показаны картины линий уровня в окрестности зондирующего отверстия, обозначенного как сплошной черный круг, при совместном действии определяемых растягивающих или сжимающих напряжений, показанных горизонтальными стрелками, и локального надавливания, обозначенного как сплошной серый круг, на горизонтальной оси (а, б), на вертикальной оси (в, г), и по диагонали к главным осям (д, е). Видно, что эффект надавливания проявляется в изменениях форм линий уровня нормальных перемещений в окрестности отверстия. При нажатии на оси растягивающих напряжений линии уровня, ориентированные по этой оси, прижимаются к отверстию, а по оси, перпендикулярной к направлению действия напряжений, - расширяются и удаляются от отверстия. При нажатии на оси сжимающих напряжений линии уровня, ориентированные по этой оси, расширяются и удаляются от отверстия, а по перпендикулярной оси - прижимаются к отверстию. При нажатии на оси, перпендику-

лярной к направлению действия напряжений, наблюдается обратный эффект, видимый на Рис. 3,в,г.

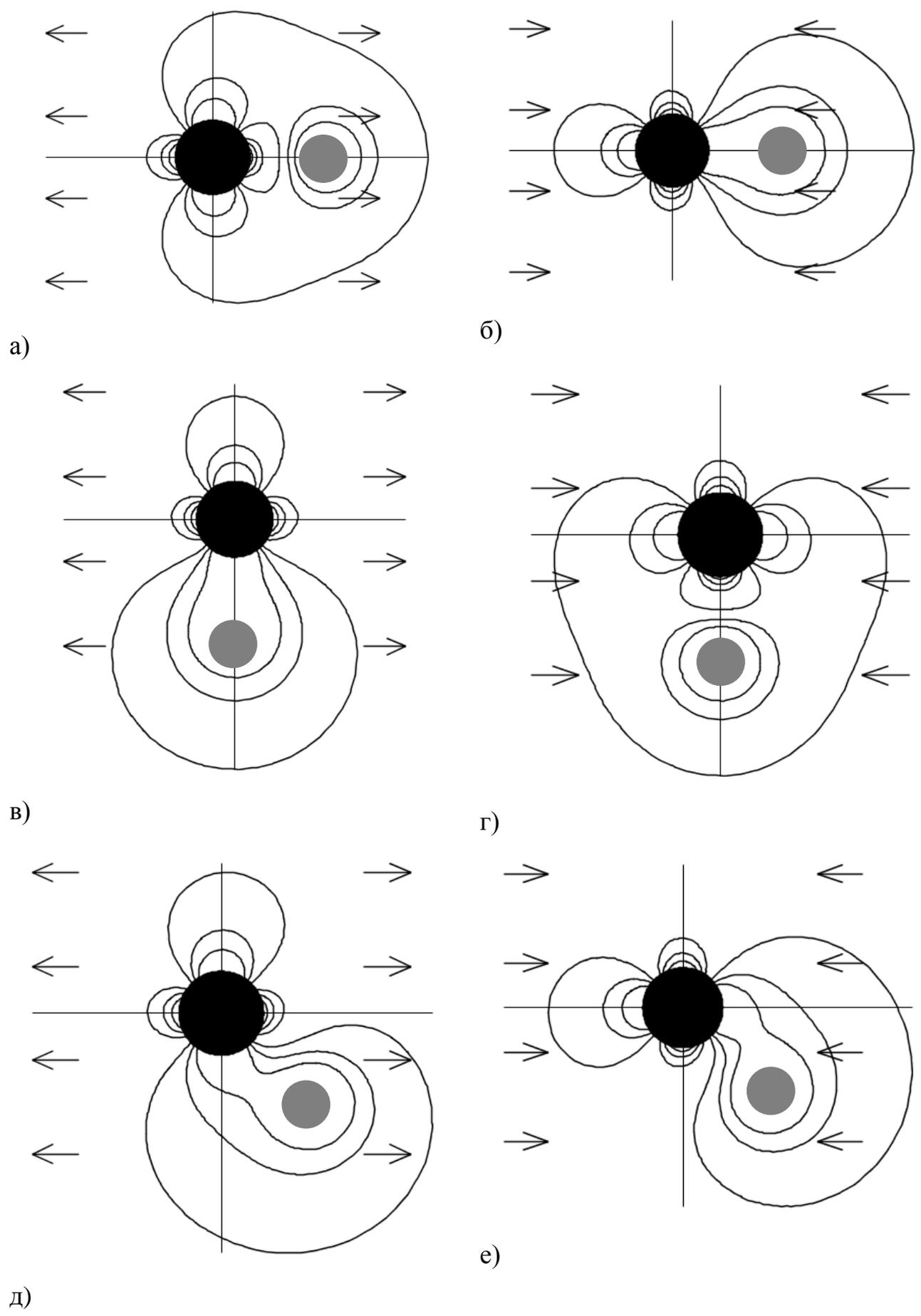


Рис. 3

Таким образом, локальное надавливание в окрестности зондирующего отверстия обеспечивает определение знака напряжений при регистрации поля перемещений в виде линий уровня, например методом электронной спекл-интерферометрии.

В качестве иллюстрации применения локального надавливания для определения знака напряжений на Рис. 4 показана спекл-интерферограмма, отображающая поле совместных перемещений, вызванных остаточными напряжениями в окрестности зондирующего отверстия и надавливанием; здесь видна корреляция эффекта надавливания с Рис. 3,а, показывающая, что в направлении горизонтальной оси действует растягивающее остаточное напряжение.



Рис. 4

В результате можно сделать вывод, что разработана теоретическая модель, обосновывающая экспериментальное определение знака действующих напряжений в методе зондирующего отверстия.

В главе 2 «Определение температурных следов на поверхности металла сварного соединения по термическому циклу» рассматриваются экспериментальные предпосылки, идея и математическое обоснование нового неразрушающего метода оценки остаточных напряжений в сварном соединении по температурным следам. 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 используются координаты расположения границ шва и цветов побежалости после сварки по отношению к оси шва (положения максимальных изотерм) В диссертации рассматривались, в основном, соединения, выполненные методом контактно-стыковой сварки оплавлением (КССО), широко применяемой при создании бесстыкового железнодорожного пути, сварки арматуры строительных конструкций, при соединении торцов стальных труб, в том числе, - большого диаметра для морских магистральных газопроводов и (Кучук-Яценко С.И., Хоменко В.И и др., 1986) в других конструкциях. Для описания температурного поля при сварке данного типа достаточно одномерной модели, так как все точки плоскостей, параллельных оси шва, соединяются одновременно; тем самым исключаются зависимости от координат вдоль и по глубине шва.

Для определения координат максимальных изотерм после остывания шва предполагается, что цвета побежалости образующиеся при нагреве зоны сварного соединения свыше определённой температуры, принимают окончательное положение только после стадии охлаждения. Поэтому необходимо рассмотрение всего термического цикла сварки, состоящего из четырех последовательных процессов: быстрый нагрев, плавление и затвердевание, остывание сварного шва и околошовной зоны. На схеме, представленной на Рис. 5, показана последовательность этих процессов, включая фазовые переходы.

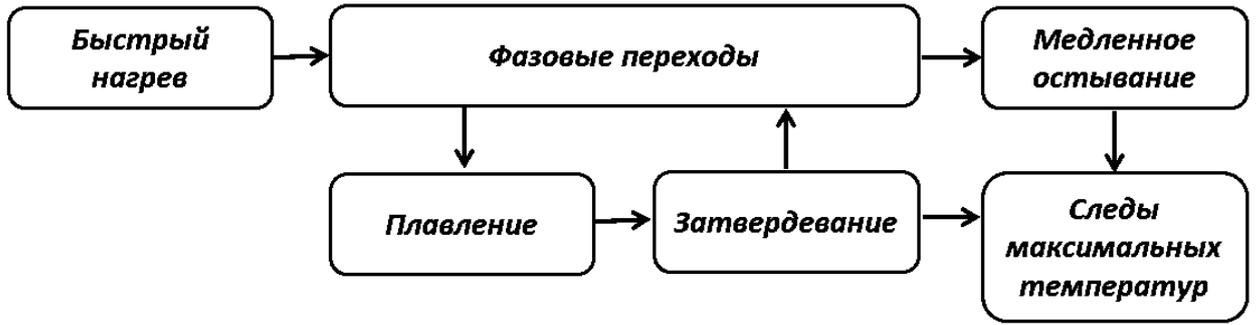


Рис. 5

Для математического описание процесса нагрева используется решение первой краевой задачи для уравнения теплопроводности, обеспечивающее форму локального нагрева зоны шва:

$$T_h(x, t) = \beta t \left(1 - 2 \frac{|x|}{\ell} \right) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\beta \ell^2 \left(e^{-\left(\frac{2\pi m}{\ell} \right)^2 a^2 t} - 1 \right) \sin \frac{2\pi m}{\ell} |x|}{2\pi^3 m^3 a^2} \quad (4)$$

где a^2 - коэффициент температуропроводности, ℓ - длина сваренной детали, β - скорость нагрева, x - координата, перпендикулярная шву с началом в его центре.

Так как для последующих стадий термического цикла – плавления и затвердевания используется только координатная функция окончания нагрева, то она вместо ряда может быть аппроксимирована более простым выражением через дополнительную функцию ошибок:

$$T_a = T_m \Phi^* \left(\frac{x}{2a\sqrt{t_h}} \right) \quad (5)$$

где T_m – температура плавления материала, t_h – аппроксимирующий параметр.

Сравнение этой функции с рядом (4) в момент окончания нагрева приведено на Рис. 6, где скорость нагрева задана равной 1500 град/сек, что соответствует реальной скорости достижения температуры плавления при сварке металлических изделий (сплошной линией показана точная функция распределения температуры в момент окончания нагрева, штриховой – аппроксимирующая функция).

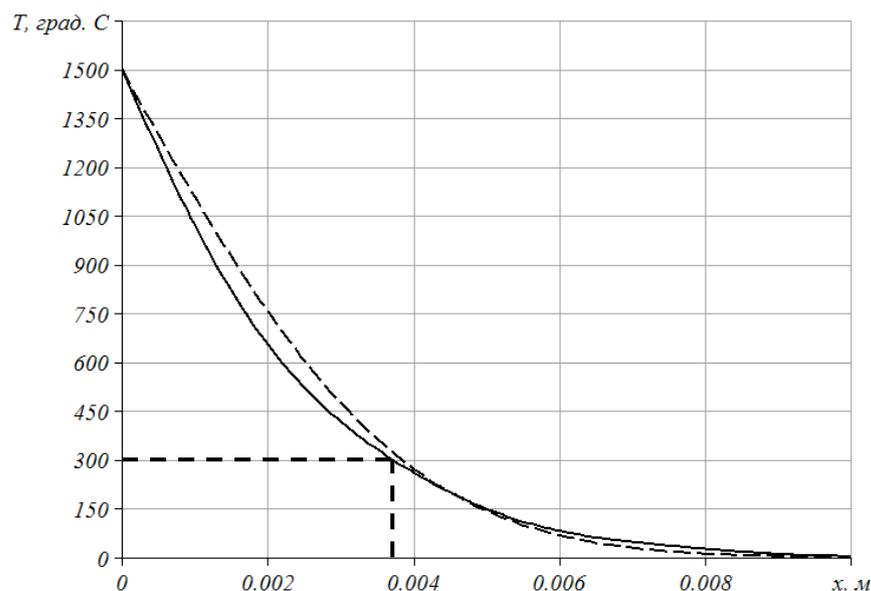


Рис. 6

Прямыми штриховыми линиями на Рис. 6 отмечено положение максимальной изотермы 300 °С для случая сварки стальных деталей.

Математическое описание процесса фазового перехода сводится к решению уравнений задачи Стефана

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial t} &= a_1^2 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, & 0 < x < \xi \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} &= a_2^2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, & \xi < x \end{aligned} \quad (6)$$

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=\xi} - \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=\xi} = \pm \gamma \rho \frac{d\xi}{dt}$$

где $T_j(x, t)$, λ_j $j = 1, 2$ - функции температуры и коэффициенты теплопроводности в жидкой и твёрдой фазах соответственно, γ - скрытая теплота плавления, ρ - плотность материала, $x = \xi(t)$ - положение границы раздела фаз.

Границы окончания процессов нагрева, плавления и затвердевания представлены на Рис. 7

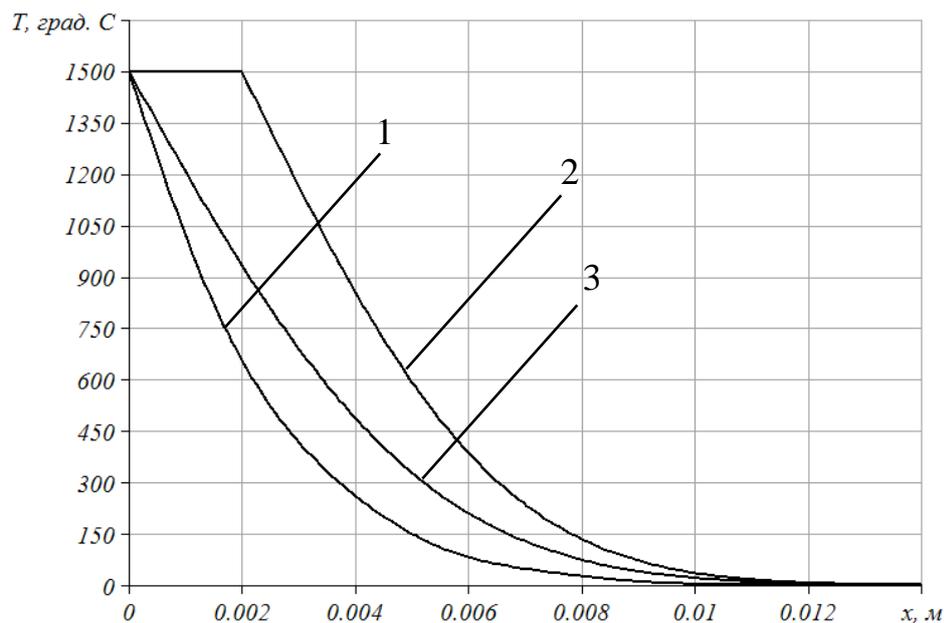


Рис. 7

Здесь, через 1 – 3 обозначены кривые распределения температур в моменты окончания нагрева, плавления и затвердевания при сварке стальных труб большого диаметра.

Для описания процесса остывания при температурах ниже температуры фазового перехода используется решение уравнения теплопроводности

$$T_c(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n e^{-\left(\frac{\pi(2n+1)}{\ell}\right)^2 a^2 t} \cos\left(\frac{\pi(2n+1)}{\ell} x\right)$$

$$C_n = \frac{2}{\ell} \int_{-l/2}^{l/2} \varphi(\xi) \cos\left(\frac{\pi(2n+1)}{\ell} \xi\right) d\xi \quad (7)$$

$$\varphi(x) = T_m \Phi^* \left(\frac{x}{2a\sqrt{t_f}} \right)$$

(t_f - момент окончания процесса затвердевания), по которому также определяются следы максимальных изотерм, сохраняющихся в виде цветов побежалости на поверхности сварного соединения.

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 T_{max} , используются условия в виде двух уравнений:

$$T_c(x, t) = T_{max}, \quad \frac{\partial T_c(x, t)}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

Решение этих уравнений дает значение максимального удаления определенной температурной зоны от центра сварного шва.

Графическое представление решения системы уравнений для уровня $T_{max} = 300^\circ\text{C}$ представлено на Рис. 8.

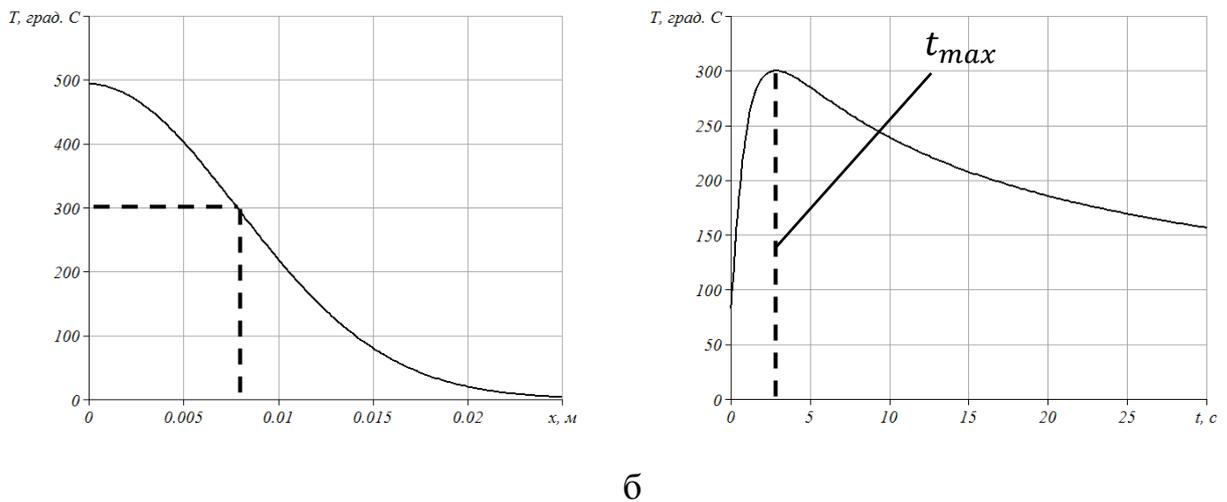


Рис. 8

На Рис. 8,а изображена кривая распределения температуры по оси x в момент времени t_{max} с выделенным штриховыми линиями уровнем 300°C , а на Рис. 8,б - кривая распределения температуры по времени для некоторой точки x_{max} , соответствующей достижению выбранной изотермой 300°C максимального удаления от центра шва. До этого момента времени температурный уровень в 300°C отодвигался от центра шва. После него при дальнейшем остывании уровень в 300°C возвращается к центру шва. Полученные в результате значения x_{max} , t_{max} используются затем в качестве исходных данных для решения обратной задачи о реконструкции термического цикла сварки.

В качестве модельного температурного цикла, реконструкцию которого можно осуществить по температурным следам, использовались результаты

численного и аналитического решений температурной задачи соединения контактной стыковой сваркой оплавлением двух одинаковых стержней. Стадия охлаждения при такой сварке может быть описана аналитическим выражением (Кархин В.А. и др., 2008):

$$T(x,t) = T_0 + \frac{1}{2} T_c F(x,t), \quad T_c = (T_b - T_0) e^{-\frac{vd}{a^2}}$$

$$F(x,t) = e^{-\frac{x^2}{4a^2t}} \left[e^{\frac{(2vt-x)^2}{4a^2t}} \Phi^* \left(\frac{2vt-x}{2a\sqrt{t}} \right) + e^{\frac{(2vt+x)^2}{4a^2t}} \Phi^* \left(\frac{2vt+x}{2a\sqrt{t}} \right) \right] \quad (9)$$

Здесь: v - скорость сварки - скорость изменения длины вылета (расстояния от торца заготовки до внутреннего края электрода стыковой машины, измеренное до начала сварки) каждого из свариваемых стержней в процессе сварки, полагаемая при нагреве постоянной; T_0 - температура стержня перед началом нагрева; d - величина смещения торца стержня при осадке; T_b - температура, поддерживаемая в центре шва при расплавлении стержней.

Распределение температуры в процессе остывания в виде функций времени на некоторых расстояниях от центра шва представлено на графиках Рис. 9

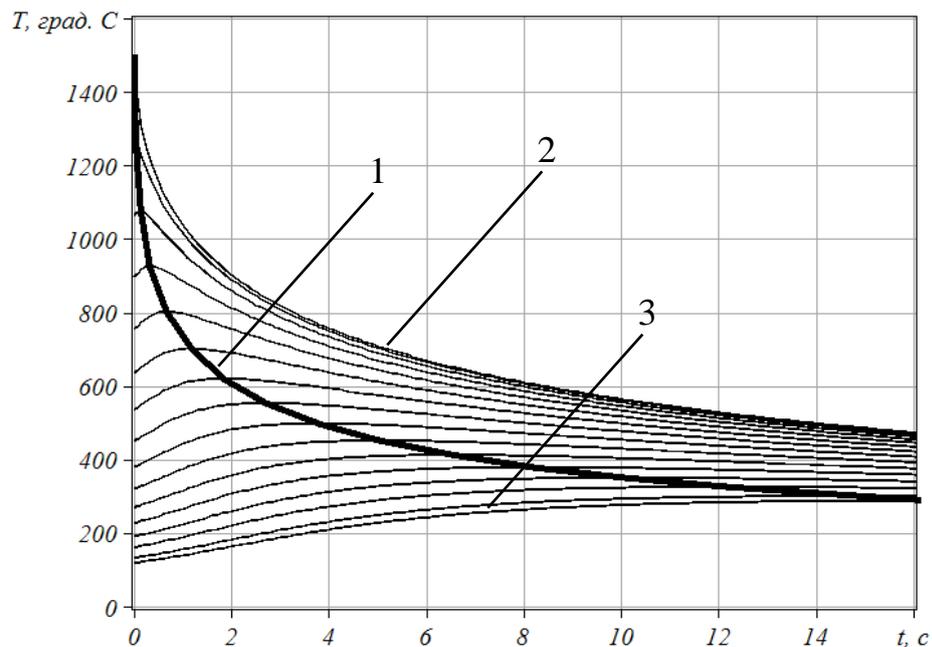


Рис. 9

Здесь отчетливо видны максимумы температур, через которые проведена функция $T_{max}(x)$ (кривая 1), достигнутые во времени на выбранных расстояниях от центра шва на интервале от 0.2 мм (кривая 2) до 15 мм (кривая 3).

Базируясь на данной модели, можно описать контактную стыковую сварку рельсов (N.S. Tsai, T.W. Eagar, 1985). Возникающее при таком типе сварки температурное поле, по определению, - одномерное, что облегчает решение обратной задачи восстановления температурного цикла сварки по характерным следам максимальных изотерм. С использованием подхода, аналогичного описанному выше, получены графики распределения температуры в процессе остывания на различных расстояниях от центра шва (Рис. 10):

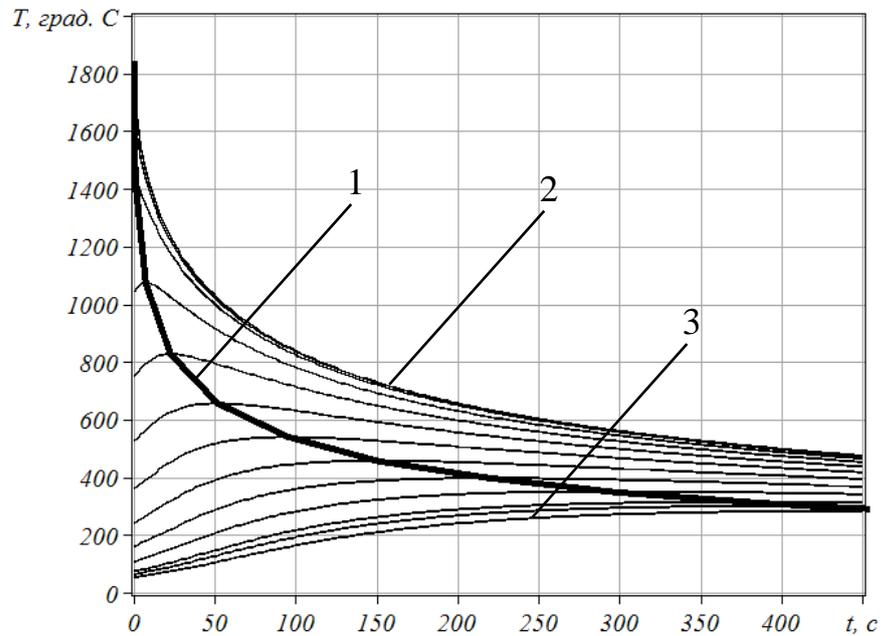


Рис. 10

Определённый из них набор значений максимальных температур, рассматриваемый на интервале от центра шва (кривая 2) до $x = 10$ см (кривая 3), и соответствующих им координат аппроксимируется графиком $T_{max}(x)$ (кривая 1) с помощью функции

$$T_{max}(x) = a_1 + a_2 e^{-b_1 x^2} + a_3 x \Phi^*(b_2 x), \quad \Phi^*(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (10)$$

коэффициенты которой a_i ($i = 1,2,3$) и b_j ($j = 1,2$) определяются методом наименьших квадратов.

Полученная функция (10) может напрямую использоваться для оценки величины остаточных напряжений.

В главе 3 «Разработка метода оценки остаточных напряжений в сварном соединении по температурным следам» рассматривается координатно-временное распределение температуры в термическом цикле сварки для получения кинетики НДС в соответствии с графо-аналитическим методом Николаева-Окерблома. Ввиду того, что целью работы является получение распределения остаточных напряжений в шве и зоне термовлияния, исходный вариант метода Николаева Окерблома был модифицирован путем замены совокупности зависимостей температуры от времени для отдельных координатных точек на температурную кривую (10), 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.

Аппроксимирующие функции типа (10), описывающие положения координат максимальных изотерм, содержат достаточную информацию для определения остаточных напряжений с помощью графо-аналитического метода Николаева-Окерблома. В соответствие этому методу определяется кинетика напряжений и деформаций в точках элементарной полоски, параллельной сварному шву. Из рассмотрения технологии метода следует, что, если ставить задачу нахождения только остаточного напряжения на различных расстояниях от центра шва, то получаемая графическая зависимость $\sigma_x(t)$ содержит избыточную информацию. Для определения остаточного напряжения в выбранной точке координатной оси достаточно знание только максимальной температуры, достигнутой в термическом цикле сварки в этой точке, которая идентифицируется соответствующим температурным следом – границей шва или определенным цве-

том побежалости. Этот вывод существенно упрощает реализацию метода Николаева-Окерблома.

В качестве примера использования упрощённого таким образом метода Николаева-Окерблома, на Рис. 11 представлена технология получения эпюры остаточных напряжений в случае рассмотренной выше контактно стыковой сварки рельсов. Здесь, характерные точки аппроксимирующей зависимости $T_{max}(x)$ из Рис. 10 отображены в квадранте II. Эти точки проектируются на схематизированную дилатометрическую прямую в квадранте III, а затем - на диаграмму растяжения-сжатия $\sigma_x(\varepsilon_x)$, изображённую в квадранте IV. Последующие горизонтальные проекции этих точек с оси напряжений в квадрант I создают на пересечении с вертикальными проекциями соответствующих точек графика $T_{max}(x)$ точки эпюры остаточных сварочных напряжений $\sigma_{ост}(x)$, в масштабах, перенесённых с горизонтальной оси графика $T_{max}(x)$ и вертикальной оси диаграммы $\sigma_x(\varepsilon_x)$.

Описанная методика позволяет строить эпюры остаточных сварных напряжений непосредственно по расположению температурных следов без применения дополнительных математических преобразований.

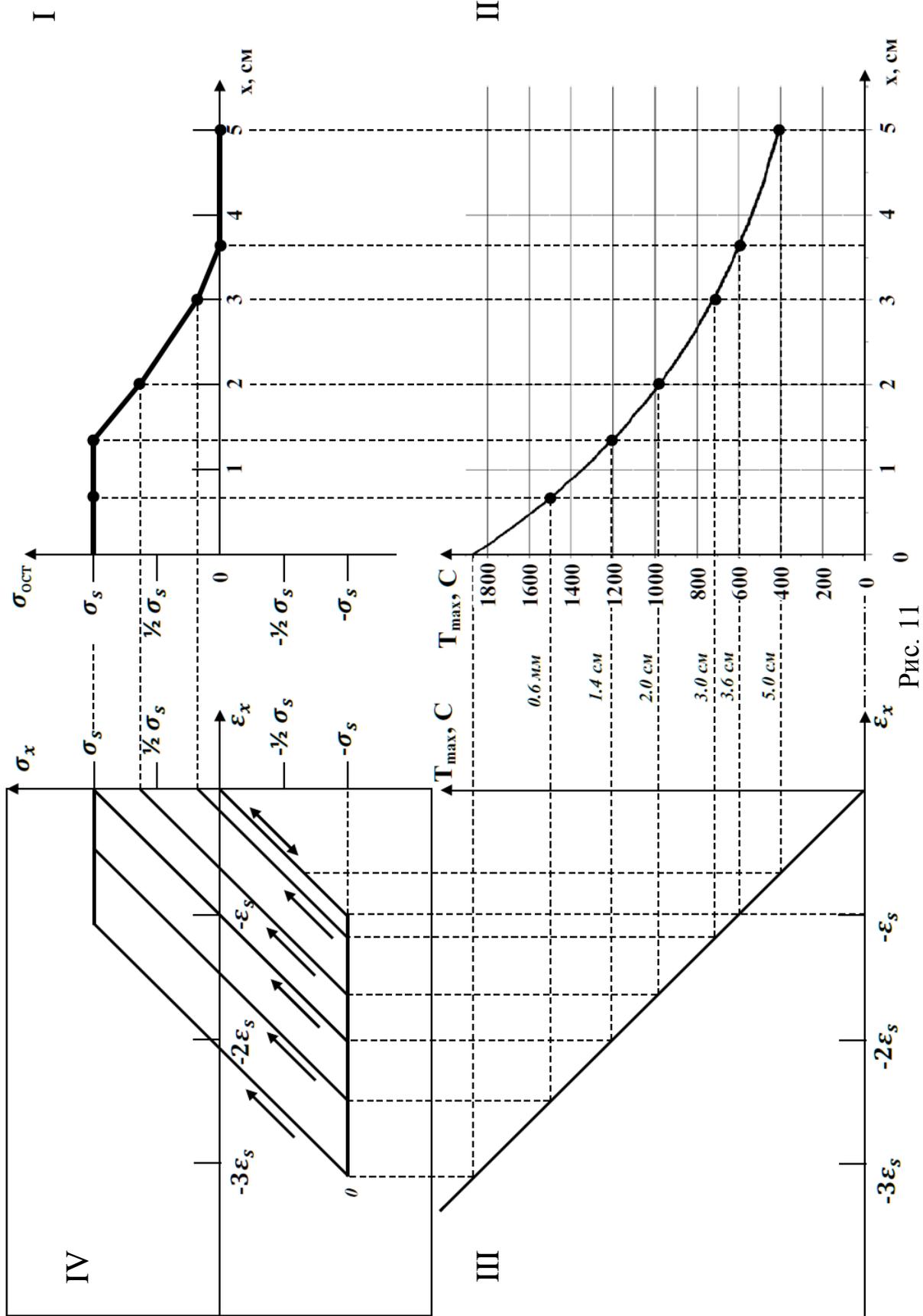


Рис. 11

Основные результаты и выводы

1. Разработан усовершенствованный метод отверстий в определении остаточных напряжений путём включения в качестве информационного показателя не только числа интерференционных полос спекл-интерферометрической картины перемещений в окрестности зондирующего отверстия, но и их расположения (координат) внутри шага полос - перепада высот в форме нормального перемещения поверхности между соседними полосами, квантованного длиной полуволны применяемого в измерительной системе лазера. В результате удалось существенно снизить погрешность в определении величин остаточных напряжений. В частности, для деталей из алюминия при учёте координаты полосы в пределах шага полос погрешность определения напряжения снижается с 14.5 МПа до 0.5 МПа, а для стальных деталей – с 45 МПа до 2.5 МПа.

2. Теоретически обоснован метод деформации интерференционных полос при локальном надавливании в окрестности зондирующего отверстия, позволяющий выявить характер (растягивающий или сжимающий) действия главного остаточного напряжения.

3. Сформулирован новый неповреждающий метод определения остаточных сварочных напряжений по температурным следам, длительное время сохраняющимся на металле сварного соединения после окончания сварки.

4. Разработана математическая модель, устанавливающая связь между расположением температурных следов и температурным циклом сварки исходя из последовательности решений задач о нагреве, плавлении, затвердевании и остывании сварного соединения.

5. На основе графо-аналитического метода Николаева-Окерблома и аппроксимирующей кривой для максимально достигнутых температур, проходящей через координаты расположения температурных следов, разработан простой алгоритм построения эпюры остаточных напряжений в зоне сварного шва и области термовлияния.

6. Проведена экспериментальная апробация метода температурных следов в ЗАО «Псковэлектросвар» на натуральных объектах – сварных соединени-

ях стальных труб морских трубопроводов, где выполнены параллельные измерения остаточных сварочных напряжений этим методом и методом зондирующего отверстия, показавшая достаточную степень коррелированности результатов неповреждающего и повреждающего методов. Получена Справка о внедрении метода температурных следов от этого предприятия.

Публикации по теме диссертации

1. Куров Д.А. Неразрушающий метод определения остаточных напряжений в сварном соединении пластиковых стержней / Р.В. Гольдштейн, В.М. Козинцев, Д.А. Куров, А.В. Подлесных, А.Л. Попов // Труды X международной конференции «Современные проблемы механики сплошной среды», 5–9 декабря 2006 г. Ростов-на-Дону. - Ростов-на-Дону: Изд. ООО «ЦВВР», 2007. – Т2, с. 132-136.
2. Гольдштейн Р.В., Козинцев В.М., Куров Д.А., Подлесных А.В., Попов А.Л. Определение остаточных напряжений в процессе их формирования / III Российская научно-техническая конференция «Разрушение контроль и диагностика материалов и конструкций» 24-26 апреля, Екатеринбург, Россия, 2007 г. – с. 69.
3. Куров Д.А. Влияние изгиба на определение остаточных напряжений методом отверстия / Международная молодежная научная конференция «XXXIII Гагаринские чтения» 3-7 апреля, Москва, Россия, 2007 г. – с. 124-125
4. Куров Д.А. Определение сварочных напряжений по измерениям температуры шва / Международная молодежная научная конференция «XXXIV Гагаринские чтения» 1-5 апреля, Москва, Россия, 2008 г. // Научные труды Международной молодежной научной конференции в 8 томах. – М.: МАТИ, 2008. – Т1, с. 154-156.
5. Гольдштейн Р.В. Спекл-интерферометрическое исследование остаточных напряжений в сварных соединениях труб, изготовленных по разным технологиям / Р.В. Гольдштейн, В.М. Козинцев, Д.А. Куров, П.Р. Нечипо-

- ренко, И.Л. Пермяков, А.В. Подлесных, А.Л. Попов, Д.А. Челюбеев // Космонавтика и ракетостроение. - 2009. - №1 (54). - с. 94-102.
6. Гольдштейн Р.В. Исследование остаточных напряжений методом электронной спекл-интерферометрии / Р.В. Гольдштейн, А.Л. Попов, В.М. Козинцев, Д.А. Куров, А.В. Подлесных, Д.А. Челюбеев // Актуальные проблемы механики.: Механика деформ. тверд. тела. Сб. тр./ отв. ред. Р.В. Гольдштейн; ИПМех РАН.- М.: Наука, 2009.- с. 479-494.
 7. Куров Д.А. Неразрушающая диагностика сварочных напряжений по измерениям температуры при остывании шва / 8-я Международная конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности» 18-20 марта, Москва, Россия, 2009 г. – с. 92-93.
 8. Куров Д.А. Метод определения сварочных напряжений по цветам побежалости / Международная молодежная научная конференция «XXXV Гагаринские чтения» 7-11 апреля, Москва, Россия, 2009 г. – Секция №3, с. 50-52.
 9. Куров Д.А. Оценка остаточных напряжений по термоупругому изгибу и цветам побежалости в области сварного соединения стальных пластин / Международная молодежная научная конференция «XXXVI Гагаринские чтения» 6-10 апреля, Москва, Россия, 2010 г. - с. 100-101
 10. Гольдштейн Р.В. Разработка метода определения сварочных напряжений по цветам побежалости / Р.В. Гольдштейн, В.М. Козинцев, Д.А. Куров, А.Л. Попов, Д.А. Челюбеев // Вестник ПГТУ. – 2010. – Механика №2. - с. 48-60.
 11. Куров Д.А. Оценка остаточных напряжений в сварном соединении рельсов методом температурных следов / Международная молодежная научная конференция «XXXVIII Гагаринские чтения» 10-14 апреля, Москва, Россия, 2012 г. - с. 55-57.
 12. Попов А.Л. Использование температурных следов для неразрушающей диагностики остаточных напряжений в сварном соединении / А.Л. Попов, Д.А. Куров // Вестник МГСУ. – 2012. - №8. - с. 143-146.

13. Гольдштейн Р.В. Восстановление термического цикла сварки и определение остаточных напряжений по следам изотерм / Р.В. Гольдштейн, В.М. Козинцев, Д.А. Куров, А.Л. Попов, Д.А. Челюбеев // Механика твердого тела. - 2013. - №1 - с. 106-112.
14. Куров Д.А. Математическая модель локального надавливания для определения характера действия главного остаточного напряжения в методе зондирующего отверстия / В.М. Козинцев, Д.А. Куров, А.Л. Попов // В сборнике: Материалы XXI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. - Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – М. - 2015. - с. 153-156.