

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук
(ИПМех РАН)

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

(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
д.ф.-м.н., профессор Попов А.Л.

Москва - 2015

Оглавление

Введение. Технологические остаточные напряжения и методы их оценки	5
Глава 1. Совершенствование метода отверстий в определении остаточных напряжений.....	14
§ 1.1. Определение остаточных напряжений методом зондирующего отверстия.....	14
§ 1.2. Идея координатного метода.....	20
§ 1.3. Расчетно-теоретическая модель перемещений в окрестности сквозного отверстия пластины (задача Кирша).....	21
§ 1.3.1. Определение перемещений w при воздействии нагрузки вдоль оси x	21
§ 1.3.2. Определение перемещений w при воздействии нагрузки вдоль оси y	25
§ 1.3.3. Нормальные перемещения пластины при совместном действии нагрузок в ее плоскости	27
§ 1.4. Проявление знака перемещений с помощью дополнительных локализованных поперечных воздействий	29
§ 1.4.1. Перемещения вне зоны приложения поперечной локализованной нагрузки.....	30
§ 1.4.2. Перемещения внутри зоны приложения поперечной локализованной нагрузки.....	31
§ 1.4.3. Перемещения при надавливании в общей системе координат	33
§ 1.4.4. Численная реализация проявления знака перемещений в задаче Кирша	39

§ 1.5. Связь координат расположения интерференционных полос с напряжениями.....	47
§ 1.5.1. Зависимость положений линий уровня от материала.....	47
§ 1.5.2. Зависимость положений линий уровня от величины приложенной нагрузки.....	50
§ 1.5.3. Зависимость положений линий уровня от радиуса отверстия.....	59
§ 1.6. Анализ полученных результатов и выводы	59
Глава 2. Определение температурных следов на поверхности металла сварного соединения по термическому циклу.....	62
§ 2.1. Экспериментальные данные по распределению цветов побежалости.....	65
§ 2.2. Восстановление температурного поля на основе уравнения теплопроводности	69
§ 2.2.1. Трехмерное уравнение теплопроводности.....	72
§ 2.2.2. Математическое описание процесса нагрева.....	74
§ 2.2.3. Математическое описание процесса плавления и процесса затвердевания.....	79
§ 2.2.4. Математическое описание процесса охлаждения.....	85
§ 2.2.5. Технология нахождения положений экстремальных изотерм.....	87
§ 2.3. Математические модели термических циклов при контактно-стыковой сварке оплавлением	89
§ 2.3.1. Контактно-стыковая сварка оплавлением	89

§ 2.3.2. Восстановление стадии остывания термического цикла контактной стыковой сварки стержней по температурным следам.....	89
§ 2.3.3. Контактная стыковая сварка рельсов	95
Глава 3. Разработка метода оценки остаточных напряжений в сварном соединении по температурным следам	102
§ 3.1. Описание технологии метода на модели стыковой сварки стержней	103
§ 3.2. Определение остаточных напряжений после контактной стыковой сварки оплавлением стержней	107
§ 3.3. Использование температурных следов для неразрушающей диагностики остаточных напряжений в сварном соединении рельсов	112
§ 3.4. Определение остаточных напряжений после контактной стыковой сварки труб.....	119
Заключение	129
Список литературы	131
Приложение 1	137

Введение. Технологические остаточные напряжения и методы их оценки

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 [2]. 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.

Под технологическими напряжениями понимают напряжения, которые возникают в процессе изготовления деталей, и могут оставаться в них после изготовления. Технологические напряжения подразделяют на временные и остаточные. Временные напряжения появляются в деталях на стадии формования в результате действия внешних сил, тепло-, массо- и ионного обмена его с окружающей средой, одновременно протекающих в материале физических и химических процессов (кристаллизация, отверждение), сопровождающихся изменением объема. Они пропадают после завершения указанных выше процессов, либо преобразуются в остаточные напряжения. Остаточные напряжения остаются в деталях после прекращения воздействия внешних факторов, завершения в материале физических и химических процессов и сопровождают детали в течение всего срока их эксплуатации, улучшая или ухудшая эксплуатационные характеристики.

В технике много примеров разрушений, вызванных большими технологическими напряжениями. Так, остаточные напряжения в трубопроводах - это одна из главных причин их разрушения с серьезными экономическими и экологическими последствиями. В сущности, такие дорогостоящие разрушения и породили такую область науки как «остаточные технологические напряжения и способы их регулирования».

Данная область механики деформируемого твердого тела в настоящее время активно развивается и в ней имеется много интересных проблем, одна из них - разработка методов измерения остаточных напряжений. Над созданием таких методов активно работают ученые России, Украины, США, Германии, Венгрии, Англии и других стран [19, 33, 44, 52, 58].

Остаточное напряженное состояние, сохраняющееся длительное время в материале или конструкции после технологических операций, является внутренним самоуравновешенным состоянием изделия, никак не проявляющим себя внешне. Поэтому оно труднодоступно для измерения. Для измерения таких напряжений надо заставить их как-то проявить себя в готовом материале или конструкции.

Современное состояние исследований остаточных напряжённо-деформированных состояний упругих тел характеризуется наличием нескольких основных методов, сгруппированных по принципу большей или меньшей повреждаемости исследуемого тела при их реализации. Среди повреждающих методов выделяется метод высверливания зондирующего отверстия.

История метода высверливания зондирующего отверстия началась с пионерской работы Матара 1934 года [56]. Он использовал механический экстензометр для измерения перемещений вокруг отверстия, высверленного в напряженной пластине. В 1950 году Соете и Ванкромбруг значительно улучшили точность таких измерений, используя тензометрические датчики вместо механического экстензометра [60]. В 1951 году Милбрадтом был впервые применен метод кольцевой проточки, который уменьшал концентрацию напряжений при высверливании в сравнении с методом высверливания лунки [57]. В 1956 году Келси опубликовал результаты исследования изменения остаточного напряжения с учетом глубины высверленной лунки [53], став при этом первым в использовании глухих отверстий вместо сквозных. В это же время активные теоретические и экспериментальные исследования по проблематике остаточных напряжений велись и в нашей стране такими учеными как И.А. Биргер [2], А.Ю. Ишлинский [17], В.А. Винокуров [5], Н.О. Окерблом [30]. Современное

представление метода высверливания лунки для определения остаточных напряжений отражено в работах А.А. Поздеева [33], Г.Н. Чернышева [44], Л.М. Лобанова [19], А.А. Антонова [16], А.Л. Попова [7], И.А. Разумовского [36], А.А. Апалькова [24], Нельсона [58], Кобаяши [51], Рендлера и Вигнесса [59], и др.

Метод отверстия обладает двумя основными преимуществами: прост в исполнении и, вследствие малости диаметра и глубины отверстия, часто может быть отнесен к числу неразрушающих или слегка повреждающих методов.

К настоящему времени разработано достаточно много методов измерения микроперемещений, возникающих при высверливании зондирующего отверстия в теле с остаточными напряжениями, описание которых можно найти в монографиях [2, 44], справочнике [52], и в других публикациях. Наиболее распространенный метод – тензометрический [15, 45, 51]. Этот метод в сочетании с методом отверстий состоит в следующем: тензодатчиками измеряют в некоторых точках в окрестности отверстия деформации возмущенного напряженно-деформированного состояния и по этим измерениям по специальной методике восстанавливают остаточные напряжения, существовавшие в данной точке до создания отверстия [60]. По этой методике разработан известный стандарт США [46].

Тензометрический метод имеет определенные недостатки, которые не позволяют его использование как метода оперативной диагностики остаточных напряжений. Это связано с длительным интервалом времени приклейки тензодатчиков вблизи будущего отверстия и обеспечения их сохранности в процессе высверливания отверстий.

Недостатки тензометрического метода исключены в методах бесконтактного измерения параметров возмущенного напряженно-деформированного состояния с помощью голографической и спекл-интерферометрии [44]. Дополнительным преимуществом оптических методов является возможность регистрации всего поля микроперемещений в окрестности зондирующего отверстия с

выделением главных направлений тензора деформаций и напряжений по конфигурации спекл-интерферометрических полос на интерферограмме.

В силу этих преимуществ в настоящее время метод электронной спекл-интерферометрии занял лидирующее положение. Он позволяет быстро и с высокой точностью измерять перемещения возмущенного деформированного состояния в окрестности отверстия. Для определения по измеряемым перемещениям тех напряжений, которые существовали в теле и обусловили деформации в окрестности отверстия, необходимо знание закономерностей, связывающих эти напряжения с измеряемыми перемещениями. Для создания удобной методики измерения остаточных напряжений, пригодной в широком диапазоне встречающихся на практике случаев, потребовалось решение целого спектра задач [44]. В результате была разработана методика измерения остаточных напряжений по числу интерференционных полос, наводимых при возмущении напряженного тела зондирующим отверстием с ценой полосы составляющей 40 МПа для стали и 20 МПа для алюминия. В диссертации выполнено развитие этого метода путем включения в информационные параметры не только числа, но и расположения (координат) интерференционных полос при одном и том же числе полос. Тем самым удалось значительно уменьшить шаг в определении напряжений, доведя его до 2.5 МПа для стали и 0.5 МПа для алюминия.

Использование метода отверстия не всегда допускается при эксплуатации ответственных элементов конструкции. В связи с этим широкое развитие получили неразрушающие физические методы измерения: рентгеновский метод [2], акустический [32, 49], магнитошумовой [4, 12] и другие. В Табл. В.1 приведена классификация методов неразрушающего контроля.

Табл. В.1 – Классификация методов неразрушающего контроля

Вид контроля	Классификация методов неразрушающего контроля		
	по характеру взаимодействия физических полей с контролируемым объектом	по первичному информативному параметру	по способу получения первичной информации
Магнитный	Магнитный	Коэрцитивной силы Намагниченности Остаточной индукции Магнитной проницаемости Напряженности Эффекта Баркгаузена	Магнитопорошковый Индукционный Феррозондовый Эффекта Холла Магнитографический Пондеромоторный Магниторезисторный
Электрический	Электрический Трибоэлектрический Термоэлектрический	Электорпотенциальный Электроемкостный	Электростатический порошковый Электропараметрический Электроискровой Рекомбинационного излучения Экзоэлектронной эмиссии Шумовой Контактной разности потенциалов
Вихретоковый	Прошедшего излучения Отраженного излучения	Амплитудный Фазовый Частотный Спектральный Многочастотный	Трансформаторный Параметрический
Радиоволновой	Прошедшего излучения Отраженного излучения Рассеянного излучения Резонансный	Амплитудный Фазовый Частотный Временной Поляризационный Геометрический	Детекторный (диодный) Термисторный Интерференционный Голографический Жидких кристаллов Термобумаг Термолюминофоров Фотоуправляемых полупроводниковых пластин Калориметрический
Тепловой	Тепловой контактный Конвективный Собственного излучения	Термометрический Теплометрический	Пирометрический Жидких кристаллов Термокрасок Термобумаг Термолюминофоров Термозависимых параметров Оптический интерференционный Калориметрический Болометрический
Оптический	Прошедшего излучения Отраженного излучения Рассеянного излучения Индукцированного излучения	Амплитудный Фазовый Временной Частотный Поляризационный Геометрический Спектральный	Интерференционный Нефелометрический Голографический Рефрактометрический Рефлексометрический Визуально-оптический

Вид контроля	Классификация методов неразрушающего контроля		
	по характеру взаимодействия физических полей с контролируемым объектом	по первичному информативному параметру	по способу получения первичной информации
Радиационный Рентгеновский Нейтронный	Прошедшего излучения Рассеянного излучения Активационного анализа Характеристического излучения Автоэмиссионный	Плотности потока энергии Спектральный	Сцинтилляционный Ионизационный Вторичных электронов Радиографический Радиоскопический
Акустический Ультразвуковой	Прошедшего излучения Отраженного излучения (эхо-метод) Резонансный Импедансный Свободных колебаний Акустико-эмиссионный	Амплитудный Фазовый Временной Частотный Спектральный	Пьезоэлектрический Электромагнитно-акустический Микрофонный Порошковый
Проникающими веществами (Капиллярных и Течеискания)	Молекулярный	Жидкостный Газовый	Яркостный (ахроматический) Цветной (хроматический) Люминесцентный Люминесцентно-цветной Фильтрующих частиц Масс-спектрометрический Пузырьковый Манометрический Галогенный Радиоактивный Катарометрический Высокочастотного разряда Химический Остаточных устойчивых деформаций Акустический

Однако область применения этих методов имеет свои ограничения. Например, рентгеновский метод неприспособлен к таким материалам, как стекло. Этим же недостатком обладает магнитошумовой метод, при помощи которого нельзя измерять напряжения в нержавеющей стали, в алюминиевых сплавах и т.д. Предложенный в диссертации метод температурных следов относится к группе неразрушающих методов, но выделяется из них отсутствием необходимости применения сложной измерительной аппаратуры.

Основой решения проблемы остаточных напряжений является экспериментальный подход, хотя некоторые задачи были решены теоретически и с помощью численных методов [1, 2, 5, 6, 17, 20, 30, 33, 55].

Из сделанного обзора предшествующих работ вытекает актуальность темы диссертации, состоящей в совершенствовании традиционного метода диа-

гностики остаточных напряжений в сварном соединении, под которым понимается метод отверстия, в направлении повышения точности определения остаточных напряжений по интерферограмме микроперемещений в окрестности отверстия, и разработке нового, простого, оперативного и недорогого в применении неповреждающего метода диагностики остаточных напряжений.

Работа состоит из трех глав.

В первой главе 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.

При проведении численной реализации данного метода определения НДС также было произведено сравнение численных, аналитических и экспериментальных результатов, в которых рассматривались перемещения возмущенно-деформированных состояний пластины с последующим анализом полученных результатов, на основании которых были сделаны выводы о точности доработанного метода определения НДС.

Во второй главе рассмотрены экспериментальные предпосылки, идея и математическое обоснование нового неразрушающего метода оценки остаточных напряжений в сварном соединении по температурным следам, длительное время сохраняющихся на металле сварного соединения после окончания сварки. В качестве таких следов рассматриваются границы сварного шва и цвета побежалости, характеризующие уровни максимально достигнутых температур на удалении от шва. Чтобы связать расположение температурных следов с остаточными напряжениями, была выполнена математическая реконструкция термического цикла сварки по температурным следам.

Для определения координатно-временных зависимостей в области сварного шва решается обратная задача для термического цикла сварки, состоящего из четырех последовательных этапов: нагрев, плавление, затвердевание и остывание. Для математического описания этих процессов было использовано одномерное уравнение теплопроводности (этапы нагрева и остывания) с представлением результата в виде рядов Фурье. Для задачи фазового перехода (плавление – затвердевание) была рассмотрена задача Стефана с условиями, описанными в [41]. Решение этих задач дало возможность восстановления распределения температуры сварного цикла в любой момент времени с последующим использованием стадии остывания для определения остаточных напряжений.

В третьей главе определяется связь полученных температурных зависимостей с остаточными сварочными напряжениями.

При остывании, в области сварного шва формируются локальные остаточные напряжения. Перечисленные выше неразрушающие методы используют различные диагностические параметры для определения по ним остаточных напряжений и, зачастую требуют наличия сложной громоздкой аппаратуры для их реализации. По сравнению с другими неразрушающими методами оценки остаточных напряжений (см. Табл. В.1), предложенный метод опирается на наглядные температурные следы в виде цветов побежалости, длительное время сохраняющиеся после сварки, для измерения положения которых достаточно

наличие обычной метрической линейки. По расположению этих следов восстанавливаются координатно-временные зависимости распределения температуры в процессе сварки, а по ним – остаточные напряжения.

Для связи полученных зависимостей распределения температуры в процессе сварки в области сварного шва с остаточными напряжениями используется графо-аналитический метод Николаева-Окерблома [6, 7, 10, 35]. В исходной формулировке этот метод обеспечивает 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 зону сварного шва и область термовлияния.

Приведены примеры применения метода на контактно стыковой сварке оплавлением, широко применяемый для соединения стержней, рельсов и труб большого диаметра (морских трубопроводов) [22]. В последнем случае выполнена также верификация метода путем параллельного измерения остаточных напряжений методом температурных следов и стандартизированным методом отверстия [13].

Глава 1. Совершенствование метода отверстий в определении остаточных напряжений

§ 1.1. Определение остаточных напряжений методом зондирующего отверстия

В измерительной практике широко используется способ проявления напряжений, «замороженных» в теле, при помощи создания малого несквозного отверстия, когда в окрестности отверстия создается локальное возмущенное деформированное состояние. По измерению параметров этого состояния определяют исходные напряжения в теле.

Существует несколько методов измерения параметров возмущенного деформированного состояния тела в окрестности зондирующего отверстия. Наиболее распространенным является метод измерения деформаций тензодатчиками [46]. Следует также отметить методы на основе интерферограмм перемещений поверхности, оптических датчиков и оптически чувствительных покрытий, лаковых покрытий и др. [44, 52].

Для одной из гипотез, на которых базируется методика расчета остаточных напряжений, зависимость остаточного напряжения σ_{xx} принимается в виде [44]:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{xx}^0 + \sigma_{xx}^1 \left(1 - 2 \frac{z}{h} \right), \quad (1.1)$$

где

- σ_{xx}^0 - составляющее постоянное остаточное напряжение «замороженное» в теле»;
- $\sigma_{xx}^1 \left(1 - 2 \frac{z}{h} \right)$ - составляющее остаточное напряжение переменное по глубине отверстия;
- z - координата, отсчитываемая в глубь тела по нормали к его поверхности;

h - глубина зондирующего отверстия.

Коэффициент 2 при линейном слагаемом отражает интегральную по глубине отверстия самоуравновешенность этого слагаемого (Рис. 1.1).

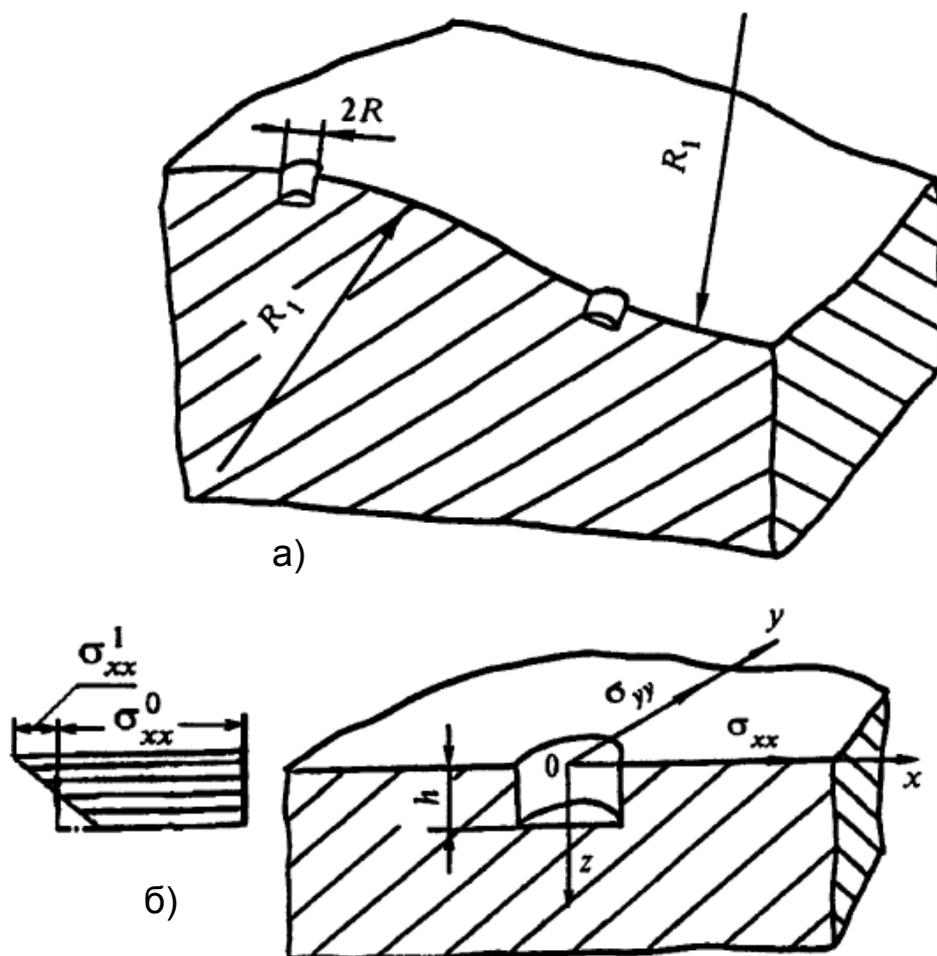


Рис. 1.1 - Свойства зондирующего отверстия

Такую зависимость вполне можно допустить до определенной, часто небольшой, глубины зондирующего отверстия. При двухосном напряженном состоянии зависимость вида (1.1) принимается для обеих компонент главных напряжений.

Для другой гипотезы характерно, что в пределах диаметра зондирующего отверстия остаточные напряжения в любом сечении, параллельном поверхности тела, сохраняют постоянные значения. Для обеспечения приемлемой точности измерений следует выбрать такой диаметр отверстия, чтобы на его месте до высверливания выполнялась эта гипотеза.

Следующие гипотезы касаются состояния поверхности и исследуемого объекта в целом. Предполагается, что в окрестности отверстия, на которой осуществляются измерения перемещений, поверхность тела плоская и тело в целом можно аппроксимировать бесконечным полупространством или цилиндром больших по сравнению с отверстием размеров. Данная гипотеза предполагает также выбирать соответствующие диаметр и глубину возмущающего отверстия.

Последняя гипотеза предполагает, что 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. При отверстиях диаметром 2 мм удаление должно быть порядка 4 мм и более.

Указанные гипотезы нужны практически для любых методов измерений. Следует также отметить, что экспериментальная тарировка и аттестация методов измерения напряжений осуществляется обычно на плоских образцах, а пользоваться результатами тарировки приходится на реальных объектах с различными формами и границами.

В качестве примера рассмотрим эталонную задачу для упругого полупространства из материала типа алюминия, в котором имеется постоянное остаточное напряжение $\sigma_{xx}^0 = 10$ МПа, $\sigma_{xx}^1 = 0$. Пусть в нем созданы отверстия диаметром 2 мм, но разной глубины: 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 и 2,0 мм; модуль упругости материала $E = 70$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$. Ставится задача: построить возмущенные напряженно-деформированные состояния в полупространстве с указанными отверстиями. Такая задача аналитически не решается. Для её решения использовался метод конечных элементов. Воспроизведем из [44] некоторые результаты этого решения.

На Рис. 1.2 приведены графики нормальных перемещений w точек поверхности по главным осям x и y в зависимости от радиуса отверстия r . Распо-

ложение самих осей по отношению к отверстию показано на Рис. 1.1. Цифрами 1-5 отмечены графики w , соответствующие глубинам 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, и 2.0 мм и оси x ($\varphi = 0$), цифрами 6-10 - графики, соответствующие тем же глубинам, но по оси y ($\varphi = \pi/2$).

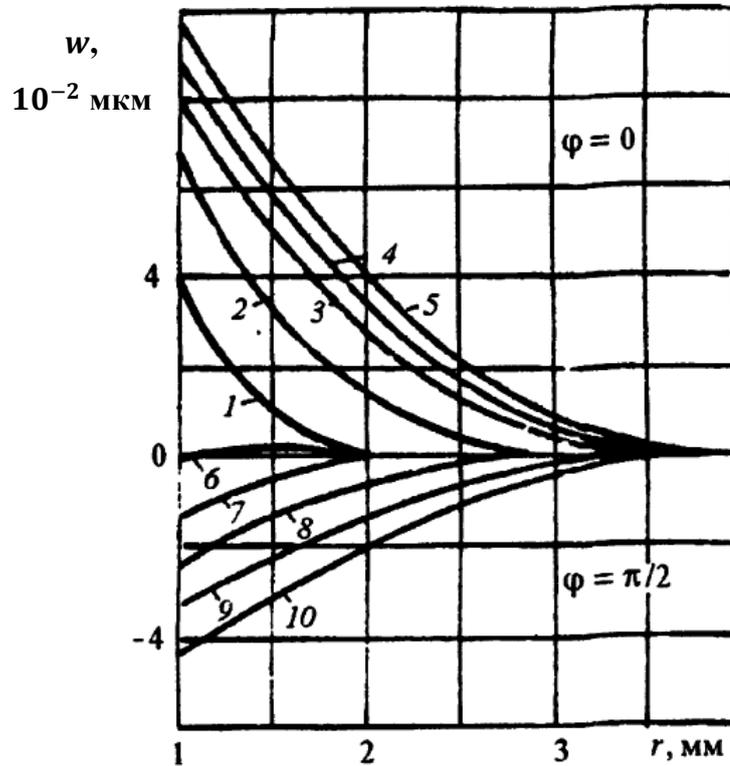


Рис. 1.2 – Нормальные перемещения w точек поверхности по главным осям

Для материалов с другими модулями упругости результаты получаются перемножением на коэффициент, равный отношению модуля упругости испытуемого материала к модулю эталонного.

Аналогичным образом решается задача для линейно меняющегося по глубине остаточного напряжения, самоуравновешенного по глубине отверстия:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{xx}^1 \left(1 - 2 \frac{z}{h} \right). \quad (1.2)$$

Графики перемещений w приведены на Рис. 1.3 для случая, когда $\sigma_{xx}^1 = 10$ МПа, $\sigma_{xx}^0 = 0$, а глубины отверстий те же самые.

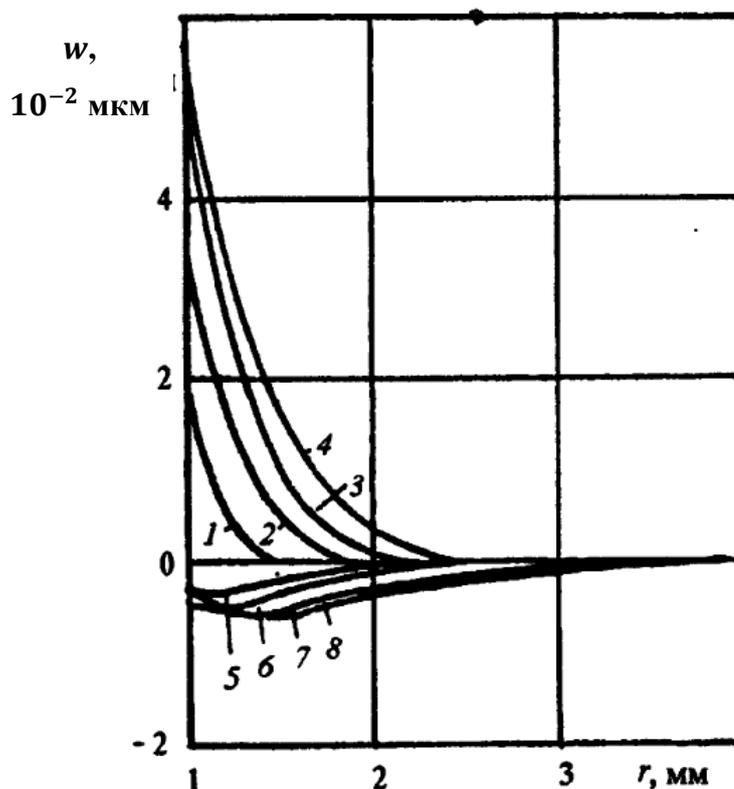


Рис. 1.3 – Нормальные перемещения w точек поверхности по главным осям

Решение модельных задач позволило провести полезное для методики измерения напряжений исследование зависимости коэффициента концентрации $K = \sigma_{xx} / \sigma_{xx}^0$ от глубины отверстия (Рис. 1.4). Для отверстий с глубиной, равной диаметру и более, коэффициент концентрации напряжений практически равен трем. Это значит, что для остаточных напряжений, превышающих $\frac{1}{3}\sigma_t$ (σ_t - предел текучести материала), при сверлении отверстия могут возникать напряжения возмущенного состояния, превышающие в некоторой области около отверстия этот предел, и, следовательно, могут произойти пластические деформации, что повлияет на точность измерений. Еще сложнее обстоит дело с хрупкими материалами, концентрация напряжений в которых может привести к разрушению материала, как это происходит при измерении остаточных напряжений в закаленном стекле.

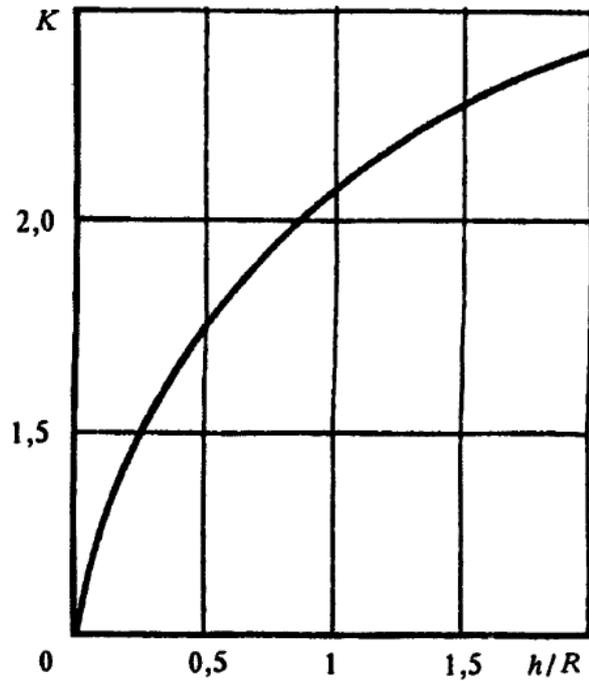


Рис. 1.4 – Коэффициент концентрации напряжений

Уменьшая глубину зондирующего отверстия, можно уменьшить коэффициент концентрации до приемлемого значения. Таким образом, изменяя глубину и радиус отверстия, можно подобрать их так, чтобы иметь достаточную точность измерения и сделать безопасным вносимый дефект - отверстие.

Используя графики с Рис. 1.2 и Рис. 1.3, можно проводить экспресс-оценку напряжений по числу полос на интерферограмме окрестности отверстия.

При наблюдении интерферограммы нетрудно определить число интерференционных полос с каждой из четырех сторон отверстия, где оси симметрии картины - это главные оси остаточных напряжений, а число полос вдоль каждой из главных осей определяет перемещение w возмущенного отверстием напряженно-деформированного состояния вдоль этой оси.

Напряжение определяется перемножением числа полос на коэффициент, определяющий цену полосы для данного материала и размеров отверстия. Цена полосы определяется из решения эталонной задачи для заданного напряжения, например 10 МПа. Цена полосы σ является величиной, обратно пропорциональной перемещению w_1 и определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{\lambda}{2w_1}. \quad (1.3)$$

где λ - длина волны излучения лазера, используемого для измерения. Число полос в окрестности отверстия $r < R_0$ (R_0 - радиус круга, вне которого перемещения возмущенного состояния практически равны нулю) определяет перемещение w на кромке отверстия. Разделив эти перемещения на перемещение w_1 от единичного остаточного напряжения на кромке отверстия (10 МПа), получим искомое остаточное напряжение. Также можно делить не перемещения, а число полос, наблюдаемых на интерферограмме, на число полос, соответствующее единичному остаточному напряжению. Процедура еще более упростится, если определить цену интерференционной полосы для данного материала и затем перемножением цены полосы на число полос определить остаточное напряжение.

§ 1.2. Идея координатного метода

Из графиков Рис. 1.2 и Рис. 1.3 и формулы (1.3) следует, что при тестовом напряжении в 100 МПа в окрестности отверстия диаметром 2 мм будут зафиксированы 3 интерференционные полосы, соответствующие приблизительно уровням 30, 60 и 90 МПа. Следовательно, напряжение, зарегистрированное с помощью экспресс-методики, будет заключено в интервале от 90 до 120 МПа. Несомненно, что истинное значение напряжений попадает внутрь этого интервала. Однако, относительная погрешность его определения с помощью этой методики оказывается достаточно существенной. Правда, с повышением напряжений она снижается.

Отмеченный шаг в определении напряжений, связанный с шагом интерференционных полос, может быть снижен, если в качестве информационного показателя включить не только количество интерференционных полос, но и их расположение внутри интервала высот в форме нормального перемещения по-

верхности между крайними положениями, квантованными длиной полуволны лазера.

Повышение точности измерений напряжений по микроперемещениям поверхности тела в окрестности зондирующего отверстия, как уже говорилось, может быть достигнуто при учёте не только числа полос, но и их расположения относительно отверстия: при увеличении растягивающего напряжения центры полос должны отодвигаться от него, при снижении – сближаться с отверстием (см § 1.5 где показаны графики от разных напряжений). При этом общее число полос может оставаться неизменным.

Следовательно, измерив расстояние от центра полосы до центра отверстия, можно определить, отвечающее положению полосы, значение напряжения в теле в МПа. Таким образом, при условии чёткого выделения центров полос, может быть обеспечена возможность снижения погрешности измерений по уровням напряжений до 10÷15% от измеряемой величины, начиная с нижнего порога чувствительности метода. В этом и состоит идея координатного метода.

Рассмотрим его детально на более простой модельной задаче Кирша - классической плоской задаче о напряжениях и перемещениях в окрестности отверстия в упругом пространстве, находящемся под действием приложенного на бесконечности постоянного поля напряжений ориентированного перпендикулярно оси отверстия [1,54].

§ 1.3. Расчетно-теоретическая модель перемещений в окрестности сквозного отверстия пластины (задача Кирша)

§ 1.3.1. Определение перемещений w при воздействии нагрузки вдоль оси x

Расчетная схема задачи Кирша для плоского напряженного состояния представлена на Рис. 1.5 (S_x – величина приложенного на бесконечности посто-

янного поля напряжений, ориентированного перпендикулярно оси отверстия вдоль координаты x).

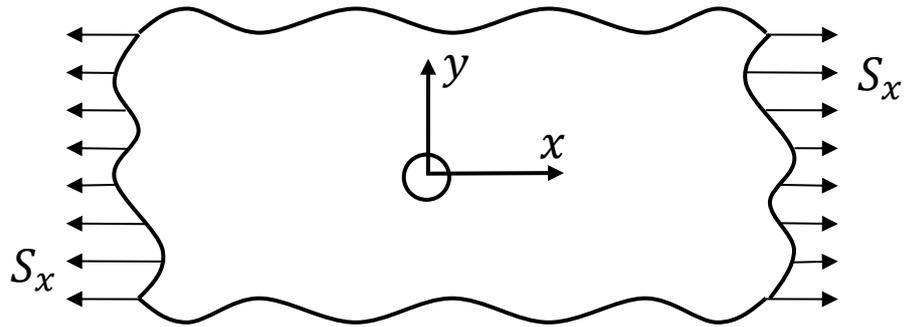


Рис. 1.5 – Расчетная схема задачи Кирша

Воспользуемся решением этой задачи для описания возмущенного напряженно-деформированного состояния в пластине с остаточными напряжениями, постоянными по глубине сквозного отверстия. Для напряжений в окрестности отверстия в полярной системе координат, связанной с отверстием, имеют место формулы [1]:

$$\begin{aligned}\sigma_{r,x} &= \frac{1}{2} S_x \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{1}{2} S_x \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta, \\ \sigma_{\theta,x} &= \frac{1}{2} S_x \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{1}{2} S_x \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta, \\ \tau_{r\theta,x} &= -\frac{1}{2} S_x \left(1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta,\end{aligned}\tag{1.4}$$

где

$\sigma_{r,x}, \sigma_{\theta,x}, \tau_{r\theta,x}$ - радиальное, окружное и касательное напряжения;

a - радиус отверстия.

Напряжения, определяемые по формулам (1.4), вызывают перемещения в окрестности отверстия с компонентами $u_{r,x}, u_{\theta,x}$ и $u_{z,x} = w_x$.

Так как экспериментальная регистрация перемещений в используемом спекл-интерферометрическом методе осуществляется только по нормальной

компоненте w_x , то остановимся подробнее на её определении через напряжения.

При плоском напряженном состоянии, связь нормальной деформации с напряжениями в полярной системе координат дается формулой [40]:

$$\varepsilon_{z,x} = -\frac{\nu(\sigma_{r,x} + \sigma_{\theta,x})}{E}$$

где E - модуль упругости, ν - коэффициент Пуассона материала пластины.

С учетом (1.4), получим:

$$\varepsilon_{z,x} = \frac{S_x \nu}{E} \left(2 \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta - 1 \right). \quad (1.5)$$

Для определения перемещений w_x необходимо проинтегрировать выражение (1.5) по переменной z :

$$w_x(r, \theta, z) = \frac{S_x \nu}{E} \left(2 \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta - 1 \right) z + c_1 \quad (1.6)$$

где c_1 - константа.

Для определения неизвестной константы c_1 используем граничное условие, в соответствии с которым нейтральная плоскость пластины остается неподвижной, а именно: при $z = 0$ перемещения w_x равны нулю. Отсюда следует, что $c_1 = 0$.

Полагая в (1.6) $z = h/2$, где h - толщина пластины, получим зависимость нормального перемещения на поверхности пластины от радиальной координаты в виде:

$$w_x\left(r, \theta, \frac{h}{2}\right) = W_x(r, \theta) = \frac{S_x \nu h}{2E} \left(2 \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta - 1 \right). \quad (1.7)$$

Для наглядного отображения полученной функции, представим её в линиях уровня. Уравнения этих линий выводятся из условий постоянства на них

функции $W_x(r, \theta)$: $W_x(r, \theta) = C_\ell$, где $\ell = 1, 2, \dots, n$ – номер линии уровня и имеют вид:

$$r_\ell = \pm \sqrt{2}a \sqrt{\frac{\nu S_x h \cos 2\theta}{\nu S_x h + 2EC_\ell}}. \quad (1.8)$$

На (Рис. 1.6) показаны перемещения $W_x(r, \theta)$ в линиях уровня (1.8).

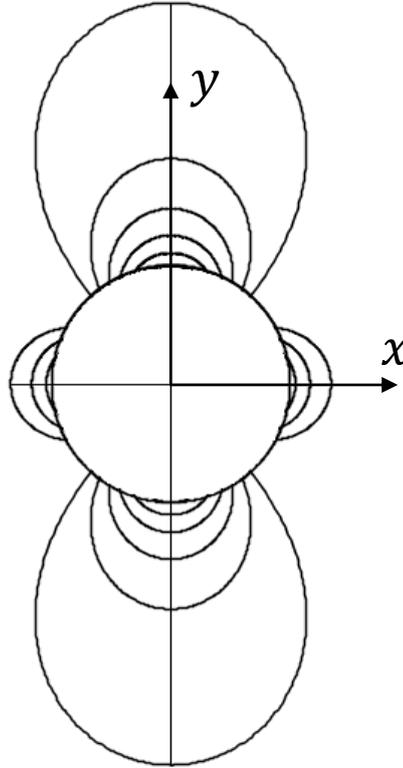


Рис. 1.6 – Расположение линий уровня нормальных перемещений поверхности тела в окрестности зондирующего отверстия при однонаправленном напряжённом состоянии

Как видно, не одинаковое число линий уровня по направлению действия силы и перпендикулярным ему соответствует разному уровню концентрации напряжения в этих направлениях. Действительно, из выражения (1.7) при $r = a$ можно найти перемещения $W_x(r, \theta)$ рассматриваемой поверхности пластины на границе отверстия:

$$W_x(a, \theta) = -\frac{S_x \nu h}{2E} (1 - 2 \cos 2\theta). \quad (1.9)$$

Тогда, для точек с $\theta = 0$ (координата x) и $\theta = \pi/2$ (координата y) выражения перемещений W_x имеют вид:

$$\begin{aligned} W_x(a, 0) &= \frac{S_x \nu h}{2E}, \\ W_x\left(a, \frac{\pi}{2}\right) &= -\frac{3S_x \nu h}{2E}. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Тем самым, перемещения при $\theta = \pi/2$ по абсолютной величине в три раза больше чем перемещения при $\theta = 0$, - в той же пропорции, что и напряжения в этих точках на краю отверстия.

§ 1.3.2. Определение перемещений w при воздействии нагрузки вдоль оси y

Выражения для напряжений при воздействии нагрузки S_y , направленной вдоль оси y , имеют вид, аналогичный выражениям (1.4):

$$\begin{aligned} \sigma_{r,y} &= \frac{1}{2} S_y \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2} S_y \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta, \\ \sigma_{\theta,y} &= \frac{1}{2} S_y \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2} S_y \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta, \\ \sigma_{z,y} &= 0, \\ \tau_{r\theta,y} &= \frac{1}{2} S_y \left(1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2}\right) \sin 2\theta. \end{aligned} \quad (1.11)$$

С помощью зависимостей, описанных в § 1.3.1, и проведя аналогичные подстановки, можно получить необходимые выражения для деформаций $\varepsilon_{z,y}$ и перемещений w_y при воздействии одноосной силы S_y .

На основании этого, выражение для деформации $\varepsilon_{z,y}$, с учетом подставленных соответствующих им выражений для напряжений, имеет вид:

$$\varepsilon_{z,y} = -\frac{S_y \nu}{E} \left(2 \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta + 1 \right).$$

Следовательно, окончательное выражение для вертикальных перемещений w_y имеет вид:

$$w_y(r, \theta, z) = -\frac{S_y \nu}{E} \left(2 \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta + 1 \right) z + c_2 \quad (1.12)$$

где c_2 - константа интегрирования.

Для определения неизвестной константы c_2 необходимо использование граничного условия, в соответствии с которыми нейтральная ось пластины остается неподвижной. Таким образом, полагая, что при $z = 0$ перемещения w_y будут равны нулю, константа c_2 также будет равна нулю.

Следовательно, окончательное выражение для нормальных перемещений w_y на поверхности пластины записывается в виде:

$$w_y\left(r, \theta, \frac{h}{2}\right) = W_y(r, \theta) = -\frac{S_y \nu h}{2E} \left(2 \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta + 1 \right) \quad (1.13)$$

Как и в предыдущем случае, с помощью полученного выражения для перемещения W_y (1.13) возможно определение перемещений поверхности пластины по оси z на границе отверстия ($r = a$):

$$W_y(a, \theta) = -\frac{S_y \nu h}{2E} (1 + 2 \cos 2\theta). \quad (1.14)$$

Для точек с координатами $\theta = 0$ и $\theta = \pi/2$, выражения перемещений W_y имеют вид:

$$W_y(a, 0) = -\frac{3S_y \nu h}{2E}, \quad (1.15)$$

$$W_y\left(a, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{S_y \nu h}{2E}.$$

Здесь видно, что перемещения при $\theta = \pi/2$ по абсолютной величине в три раза

меньше чем перемещения при $\theta = 0$, - в той же пропорции, что и напряжения в этих точках на краю отверстия.

§ 1.3.3. Нормальные перемещения пластины при совместном действии нагрузок в ее плоскости

В рассмотренных выше случаях были получены формулы для определения перемещений по оси z под действием нагрузок S_x в первом случае и S_y во втором. Учитывая то, что данная задача является линейной, при рассмотрении случая, в котором нагрузки S_x и S_y действуют одновременно для получения соответствующей формулы перемещений w необходимо просуммировать перемещения w_x и w_y , полученные при действии напряжений S_x и S_y по отдельности. В результате получим следующее выражение на поверхности пластины ($z = h/2$):

$$W_{xy}(r, \theta) = \frac{\nu h}{2E} \left[2 \frac{a^2}{r^2} (S_x - S_y) \cos 2\theta - (S_x + S_y) \right]. \quad (1.16)$$

Используя представление (1.16), можно также получить форму нормального перемещения поверхности через линии уровня и, тем самым идентифицировать величины исходных нагрузок S_x и S_y без указания их характера - растягивающего или сжимающего (определение знака нагрузок рассмотрено в § 1.4).

Исключением является случай, когда действующие напряжения равны, т.е. $S_x = S_y = S$. Тогда получается выражение для w , в соответствии с которым перемещения всех точек поверхности одинаковы и определяются следующей формулой:

$$W_{xy, S_x=S_y=S} = -\frac{\nu h}{E} S. \quad (1.17)$$

Заметим, что в случае отсутствия отверстия в пластине для определения перемещений необходимо подставить в формулу для перемещений W_{xy} (1.16) значение радиуса отверстия равное нулю, т.е. $a = 0$. Тогда:

$$W_{xy,a=0} = -\frac{\nu h}{2E} (S_x + S_y). \quad (1.18)$$

Отсюда видно, что в случае воздействия на пластину с отверстием равных напряжений выражениям для перемещений в окрестности отверстия не отличается от аналогичных перемещений в пластине без отверстия.

Данная ситуация принципиально усложняет определение перемещений основанное на подсчете числа линий уровня и такой частный случай в дальнейшем рассматриваться не будет.

Как уже говорилось ранее, при создании отверстия определяются перемещения точек поверхности пластины без учета исходных перемещений, вызванных в пластине приложенной нагрузкой, а именно сужение пластины на основе коэффициента Пуассона при приложении растягивающей нагрузки. Следовательно, для определения перемещений, обусловленных отверстием, необходимо из полного перемещения (1.16) вычесть перемещение в случае отсутствия отверстия (1.18). Следовательно, перемещения, вызванные отверстием в напряженном теле, могут быть определены по формуле:

$$W_{xy,exp}(r, \theta) = \frac{a^2 \nu h}{Er^2} (S_x - S_y) \cos 2\theta. \quad (1.19)$$

Линии уровня такого перемещения в безразмерных координатах $(r/a, \theta)$, при $S_x \neq S_y$ представлены на Рис. 1.7.

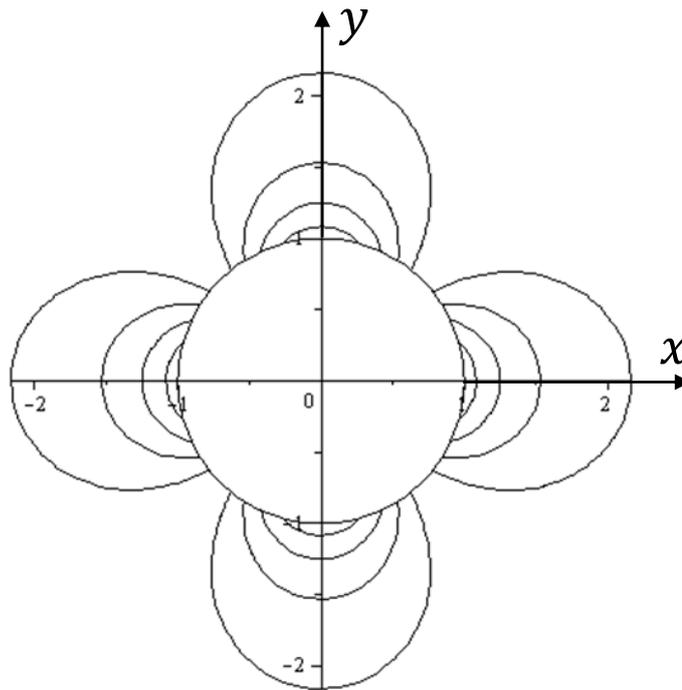


Рис. 1.7 – Расположение линий уровня нормальных перемещений поверхности тела в окрестности зондирующего отверстия при однонаправленном напряжённом состоянии без результирующего характера деформации

Как видно из Рис. 1.7 по числу линиям уровня w в окрестности возмущающего отверстия можно определить абсолютную величину разности напряжений $S_x - S_y$, но ничего нельзя сказать о результирующем характере этой разности – растягивающем или сжимающим. Этот характер может быть установлен через знак перемещений w .

§ 1.4. Проявление знака перемещений с помощью дополнительных локализованных поперечных воздействий

Для определения знака перемещений применим метод дополнительного локализованного воздействия в окрестности отверстия. Рассмотрим математическую модель такого воздействия на примере нормальной силы, приложенной к упругому полупространству [40].

На Рис. 1.8 изображена расчетная схема такой вспомогательной задачи, где принято, что постоянная нагрузка q распределена по кругу радиуса b на поверхности полупространства $z \geq 0$.

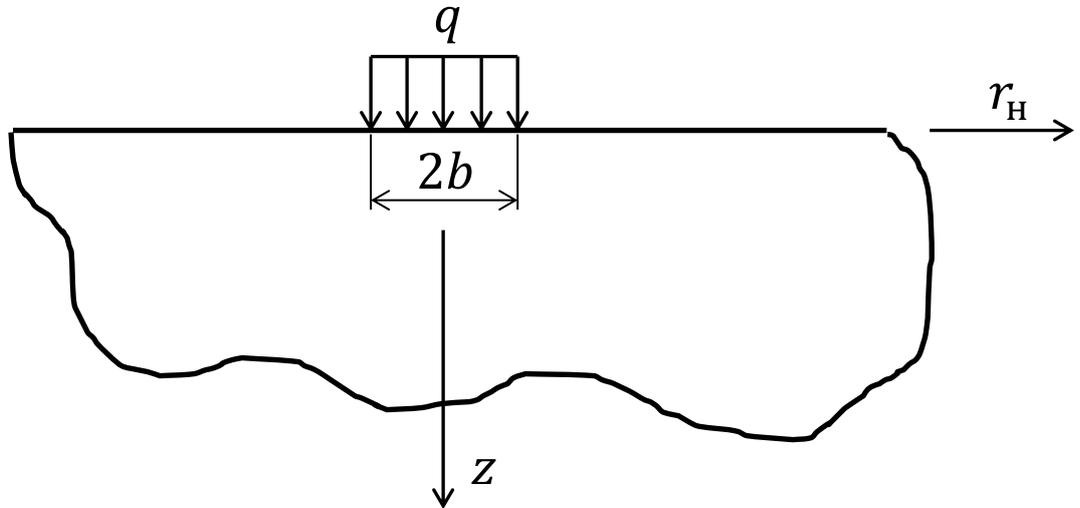


Рис. 1.8 – Модель локального надавливания

Рассмотрим перемещения вызываемые этой нагрузкой внутри и вне зоны ее приложения.

§ 1.4.1. Перемещения вне зоны приложения поперечной локализованной нагрузки

Следуя [40], выпишем выражение для нормальных перемещений поверхности полупространства $z = 0$ вне зоны приложения поперечной локализованной нагрузки ($r_H > b$)

$$w_{out}(r_H) = \frac{4q(1-\nu^2)}{\pi E} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{b^2 \cos^2 \varphi}{\sqrt{r_H^2 - b^2 \sin^2 \varphi}} d\varphi. \quad (1.20)$$

Из этого выражения можно получить перемещение на границе приложения нагрузки:

$$w_{out}(b) = \frac{4q(1-\nu^2)}{\pi E} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{b \cos^2 \varphi}{\sqrt{1-\sin^2 \varphi}} d\varphi = \frac{4qb(1-\nu^2)}{\pi E}. \quad (1.21)$$

В общем случае, интеграл (1.20) выражается через полные эллиптические интегралы Лежандра первого и второго рода:

$$w_{out}(r_n) = \frac{4q(1-\nu^2)}{\pi E r_n} \left[K(k)(b^2 - r_n^2) + r_n^2 E(k) \right], \quad k = \frac{b}{r_n} \quad (1.22)$$

где

$$K(k) = \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{(1-x^2)(1-k^2x^2)}} \quad \begin{array}{l} \text{- полный эллиптический интеграл} \\ \text{Лежандра первого рода;} \end{array}$$

$$E(k) = \int_0^1 \sqrt{\frac{1-k^2x^2}{1-x^2}} dx \quad \begin{array}{l} \text{- полный эллиптический интеграл} \\ \text{Лежандра второго рода.} \end{array}$$

§ 1.4.2. Перемещения внутри зоны приложения поперечной локализованной нагрузки

Для анализа перемещений внутри зоны приложения поперечной силы используется следующее выражение [40]:

$$w_{in}(r_n) = \frac{4q(1-\nu^2)}{\pi E} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{b^2 - r_n^2 \sin^2 \psi} d\psi. \quad (1.23)$$

При этом, перемещения на границе приложения распределенной силы q ($r_n = b$) имеют такой же вид, как и в случае использования формулы для перемещений вне зоны нагружения:

$$w_{in}(b) = \frac{4qb(1-\nu^2)}{\pi E} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-\sin^2 \psi} d\psi = \frac{4qb(1-\nu^2)}{\pi E}. \quad (1.24)$$

Выражение для перемещений внутри зоны локального надавливания (1.23) может быть записано через полный эллиптический интеграл Лежандра второго рода:

$$w_{in}(r_n) = \frac{4qb(1-\nu^2)}{\pi E} E(p), \quad p = \frac{r_n}{b}. \quad (1.25)$$

Для построения графика перемещений в виде линий уровня, из полученных формул для перемещений (1.22) и (1.25) необходимо выразить переменную по радиусу опираясь на условие $w(r_n) = C_\ell$, где $\ell = 1, 2, \dots, n$ – номер линии уровня.

На Рис. 1.9 показан график перемещений поверхности полупространства в виде линий уровня, возникающих при локальном надавливании в безразмерных координатах $(r_n/b, \theta)$:

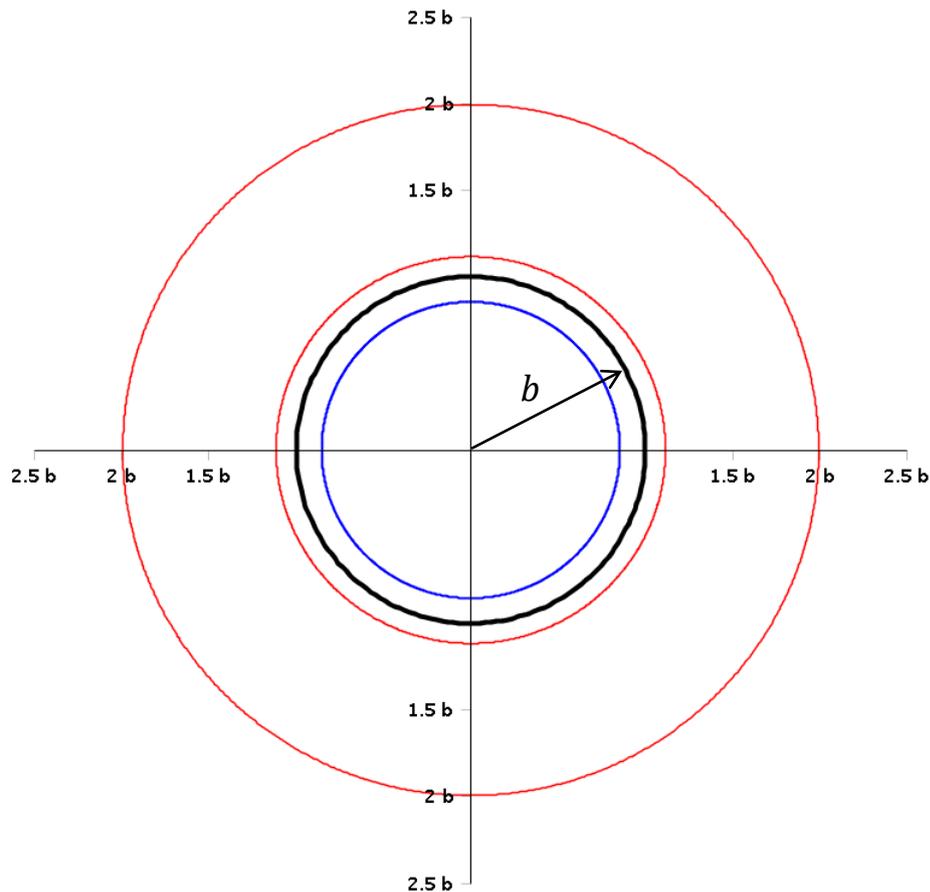


Рис. 1.9 – Перемещения поверхности полупространства при локальном надавливании

На графике черной линией отмечена граница зоны локального надавливания, а перемещения, возникающие при надавливании внутри и вне данной зоны – синей и красной линиями соответственно.

На Рис. 1.10 представлены графики невзаимодействующих перемещений поверхности пластины в области отверстия (сплошная синяя заливка), показанные синим цветом, и при локальном надавливании (зона надавливания отмеченная зеленым цветом), показанные красным цветом.

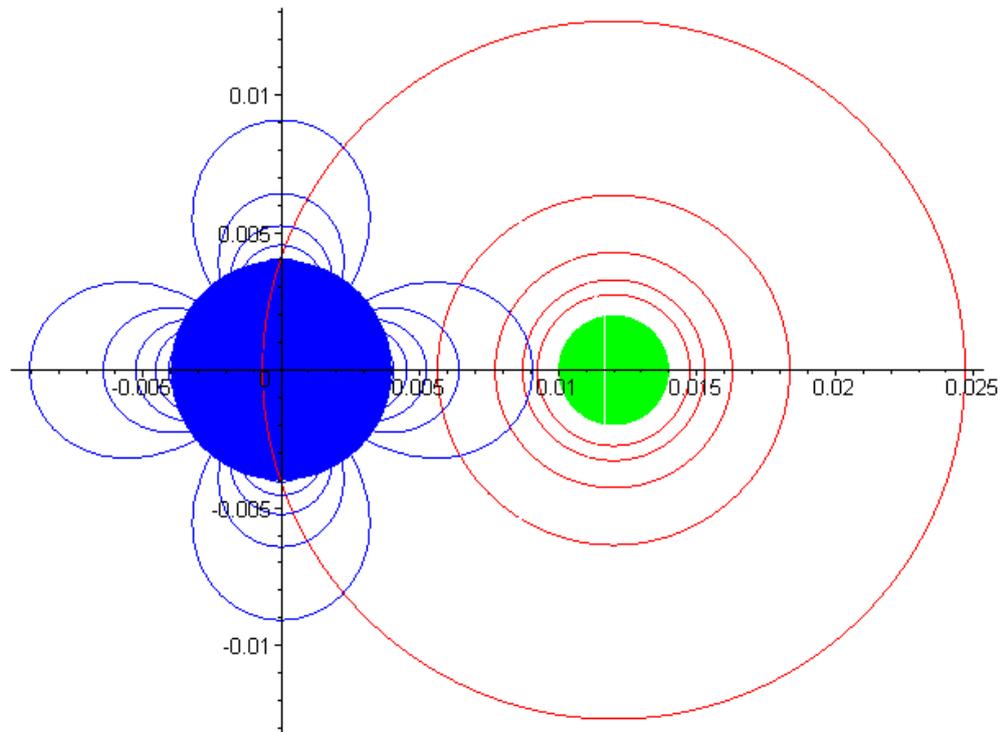


Рис. 1.10 – Невзаимодействующие перемещения поверхности полупространства в области отверстия и при локальном надавливании

§ 1.4.3. Перемещения при надавливании в общей системе координат

Введем общую систему координат с началом в центре отверстия (Рис. 1.11).

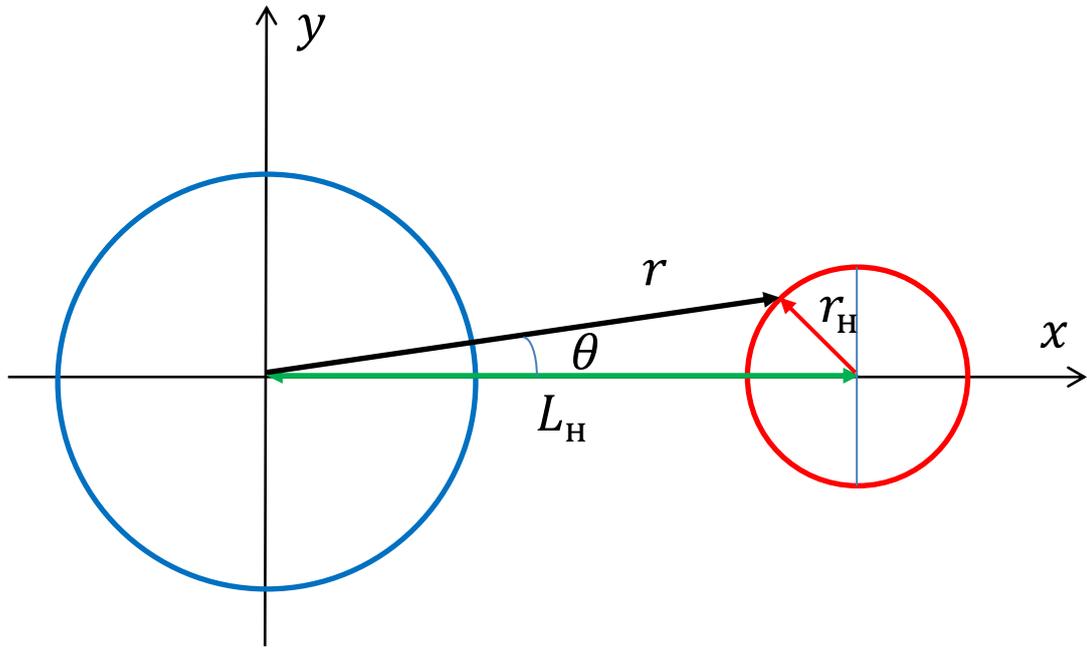


Рис. 1.11 – Схема общей системы координат для локального надавливания на оси x

Для определения перемещений в этой системе координат заменим в полученных выражениях для перемещений внутри (1.25) и вне (1.22) зоны приложения дополнительной нагрузки для локальной системы координат переменную r_H на переменную r , которая определяется следующими выражениями:

$$r = \sqrt{r_H^2 + L_H^2 - 2r_H L_H \cos \theta} \quad (1.26)$$

где L_H - расстояние между центром отверстия (центром общей системы координат) и центром приложения силы при локального надавливания (центром локальной системы координат).

В результате, выражения (1.22) и (1.25) преобразуются к виду:

$$w_{out}(r) = \frac{4q(1-\nu^2)}{\pi E r} \left[K(k)(b^2 - r^2) + r^2 E(k) \right], \quad k = \frac{b}{r} \quad (1.27)$$

$$w_{in}(r) = \frac{4qb(1-\nu^2)}{\pi E} E(p), \quad p = \frac{r}{b} \quad (1.28)$$

Для проявления знака перемещений необходимо определить суммарные перемещения при одновременном воздействии растягивающих (сжимающих) сил и дополнительных локализованных поперечных воздействий.

Для определения суммарных (взаимодействующих) перемещений в общей системе координат необходимо вычесть из формулы для измеряемых перемещений, определяемых с помощью выражения (1.19), перемещения, полученные при локальном надавливании, которые определяются с помощью выражений (1.27) и (1.28). Графически данный результат в виде линий уровня представлен на Рис. 1.12 – для случая растяжения по оси x , и на Рис. 1.13 – для случая сжатия.

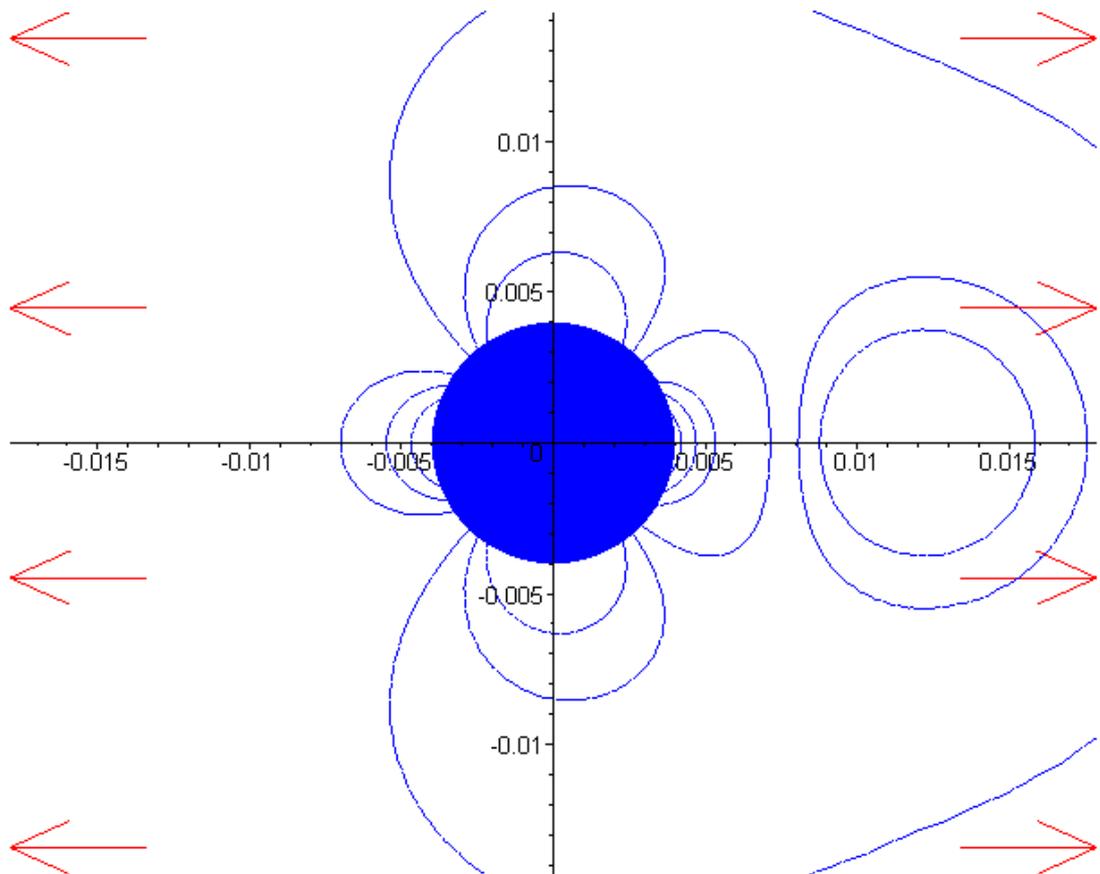


Рис. 1.12 – Взаимодействующие перемещения в области отверстия в виде линий уровня при растяжении

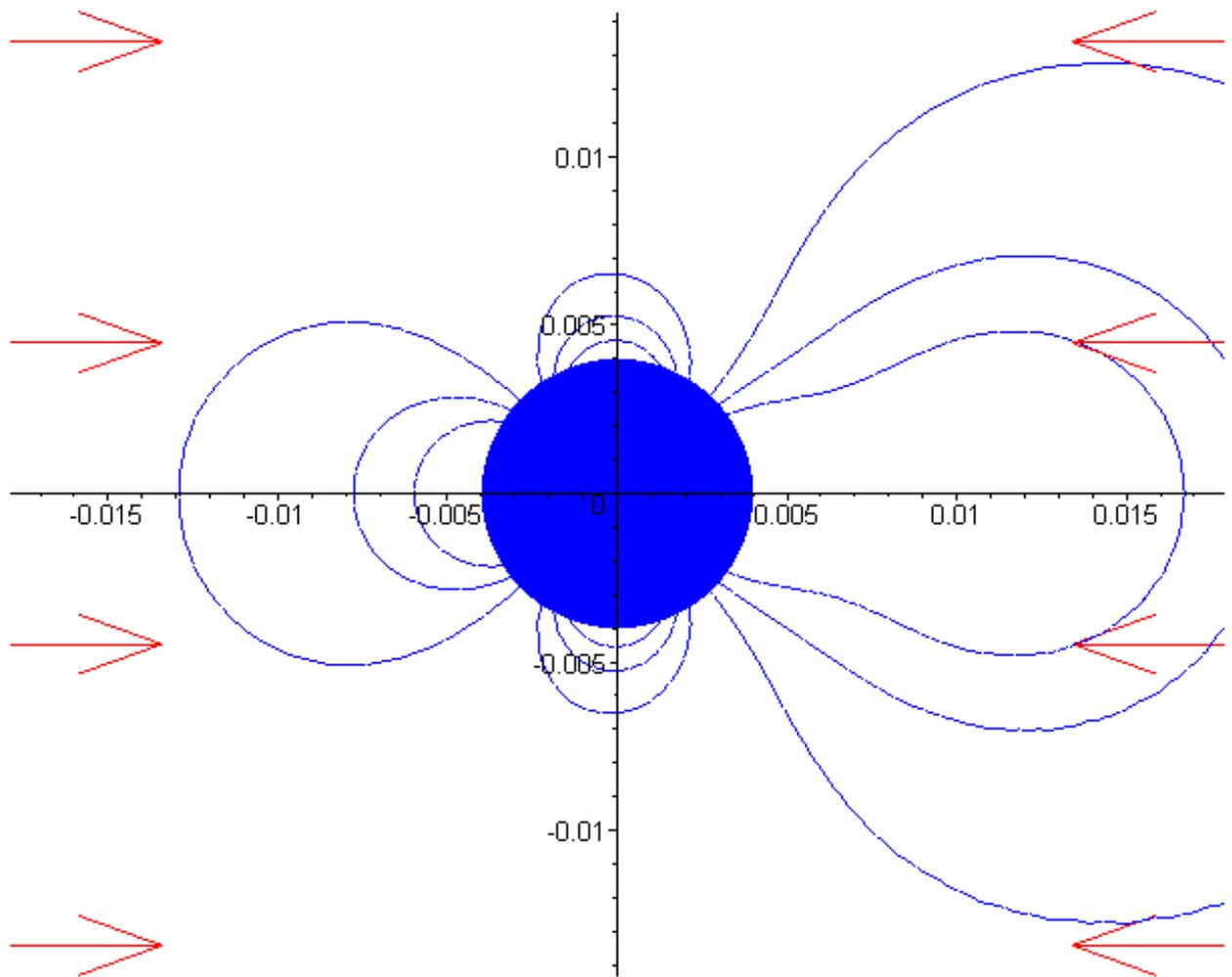


Рис. 1.13 – Взаимодействующие перемещения в области отверстия в виде линий уровня при сжатии

Центр надавливания на Рис. 1.12 и Рис. 1.13 находится на расстоянии трех радиусов отверстия от начала координат на оси действующих напряжений.

Примеры 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, в различных точках относительно зондирующего отверстия, представлены на Рис. 1.14.

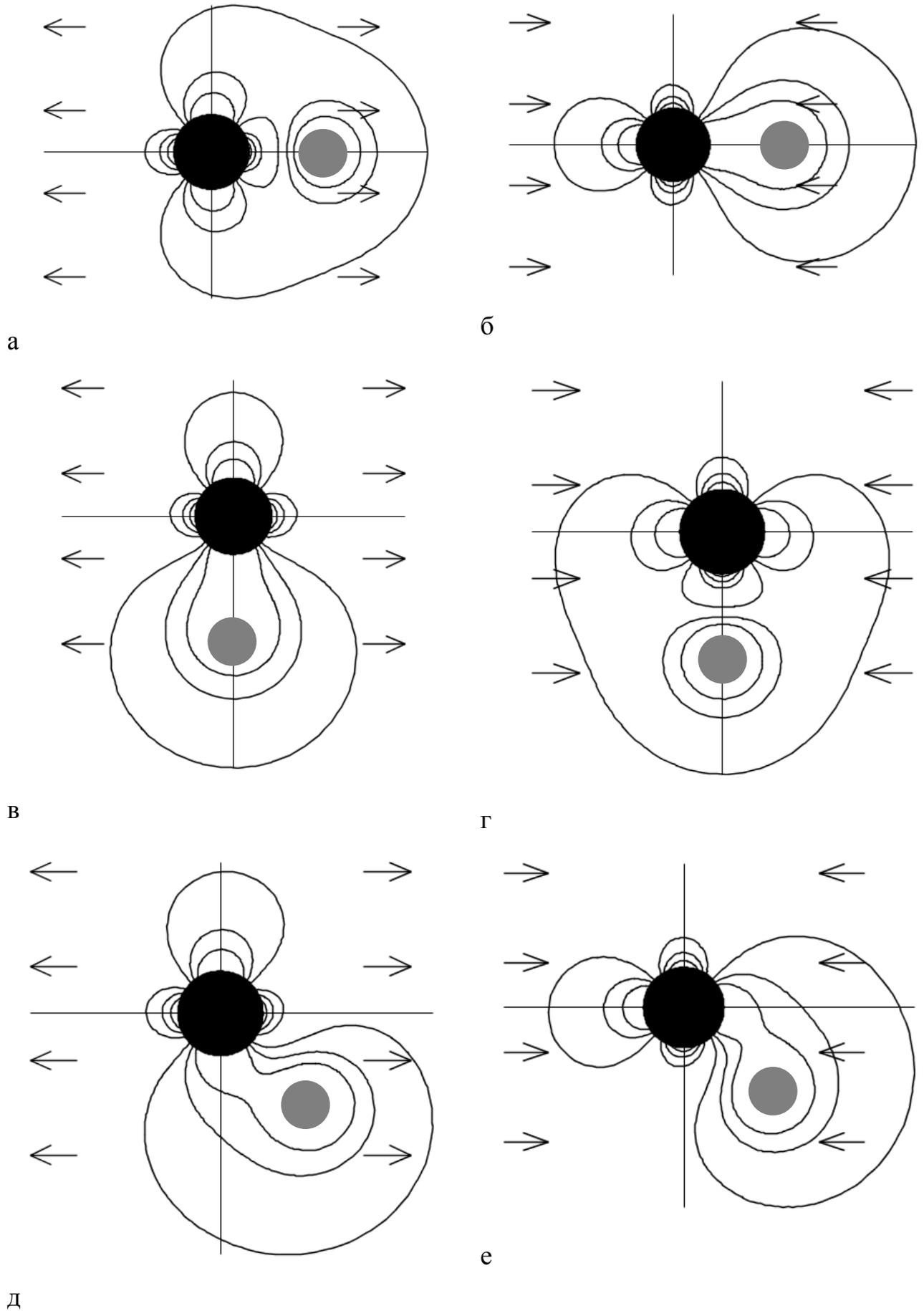


Рис. 1.14 – Картины линий уровня с учетом локального надавливания

Как видно, эффект надавливания проявляющийся в изменениях форм линий уровня нормальных перемещений в окрестности отверстия не только от действующих (растягивающих или сжимающих) напряжений, а также и от положения места надавливания. 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 (Рис. 1.14,а). При нажатии на оси сжимающих напряжений линии уровня, ориентированные по этой оси, расширяются и удаляются от отверстия, а по перпендикулярной оси - прижимаются к отверстию (Рис. 1.14,б). При нажатии на оси, перпендикулярной к направлению действия напряжений, наблюдается обратный эффект, видимый на Рис. 1.14,в,г. В случае с локальным надавливанием в точке, находящейся под углом 45° к направлениям главных осей, линии уровня, ориентированные по оси находящейся в 135° от точки нажатия в направлении против часовой стрелки, удаляющиеся от отверстия характеризуют растягивающие действующие напряжения (Рис. 1.14,д), а прижимающиеся - сжимающие действующие напряжения (Рис. 1.14,е).

На Рис. 1.15 показан результат эксперимента по определению остаточных сварочных напряжений с помощью высверливания зондирующего отверстия. Регистрация микроперемещений в окрестности отверстия производилась с помощью голографической интерферометрии. Темные и светлые полосы на этом рисунке, начинающиеся от отверстия 1, соответствуют линиям уровня нормальных перемещений поверхности тела, квантованных длиной полуволны лазера (0.32 мкм). Знак перемещений на исходной картине линий уровня не определен. Для определения знака перемещений, справа и слева от отверстия производилось локальное надавливание, которые также отображены в виде линий уровня на интерферограмме.



Рис. 1.15 – Спекл-интерферограмма с влиянием локального надавливания на линии уровня в области отверстия

Как видно, левая зона локального надавливания, расположенная дальше от отверстия, чем правая, не оказывает влияние на линии уровня в области отверстия. Локальное надавливание с правой стороны оказало влияние на конфигурацию линий уровня подобно изображенному на Рис. 1.12 и Рис. 1.14,а. Следовательно, можно сделать вывод, что в данном месте с помощью зондирующего отверстия были проявлены растягивающие напряжения, величина которых определяется по числу интерференционных полос (см § 1.1).

Изложение материала по обоснованию метода деформации интерференционных полос с помощью локального надавливания в окрестности зондирующего отверстия, позволяющего выявить характер (растягивающий или сжимающий) действия главного остаточного напряжения, представлено в [21].

§ 1.4.4. Численная реализация проявления знака перемещений в задаче Кирша

В численной реализации рассматриваемой задачи использовались следующие исходные данные:

Действующее растягивающее напряжение по оси x : $S_x = 80$ МПа

Действующее напряжение по оси y : $S_y = 0$

Толщина пластины: $h = 5$ мм

Радиус сквозного отверстия: $a = 3$ мм

Материал: Алюминий

Модуль упругости: $E = 0.7 \cdot 10^5$ МПа

Коэффициент Пуассона: $\nu = 0.31$

В соответствии с приведенными данными по формуле (1.19) был рассчитан трехмерный профиль нормального перемещения поверхности растягиваемой пластины в окрестности отверстия. На Рис. 1.16 представлен этот профиль в линиях уровня. Максимальный положительный подъем отмечается при $\theta = 0$

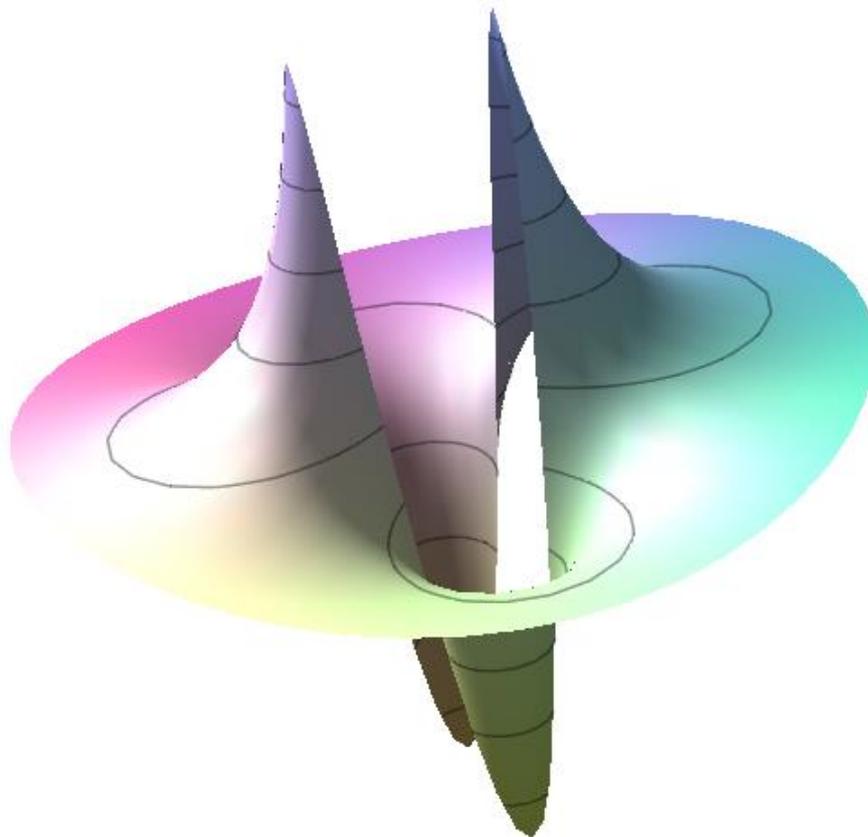


Рис. 1.16 – Трехмерный график нормальных перемещений поверхности тела в окрестности отверстия

и π , т.е. по линии действия растягивающей нагрузки. На виде сверху линии уровня нормального перемещения представлены на Рис. 1.7. Здесь уже направ-

ления подъема и опускания формы нормального перемещения неразличимы. Для дальнейшего из симметричной картины рисунка Рис. 1.7 сохраним одну четверть от $\theta = 0$ до $\pi/2$ и одну линию уровня. Эта вырезка изображена на Рис. 1.17.

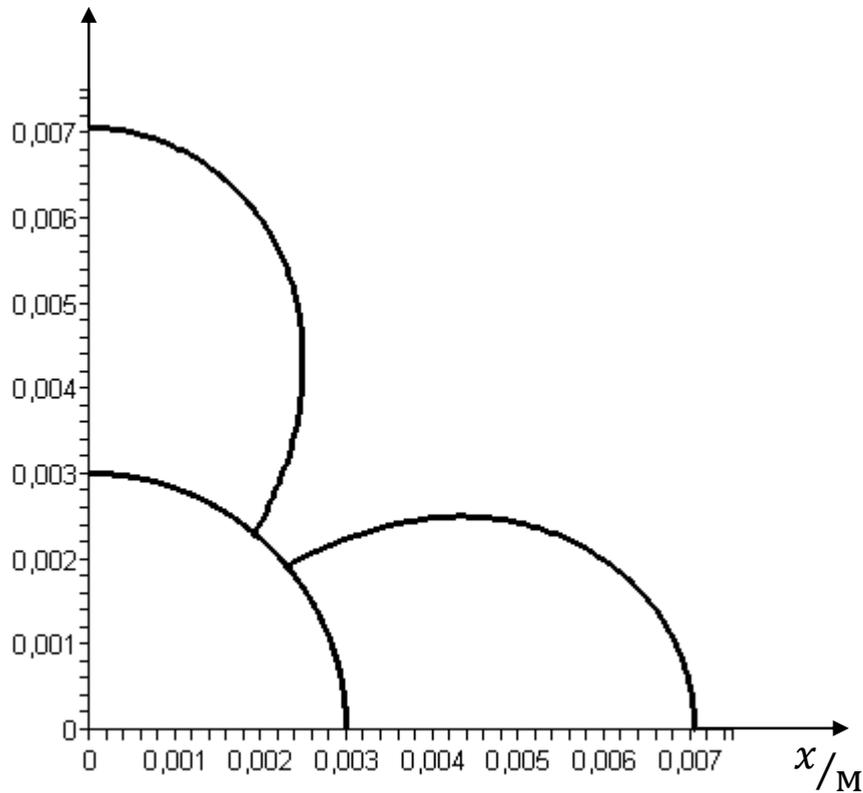


Рис. 1.17 – Первая линия уровня графика перемещений с Рис. 1.7

Для данного графика первая линия уровня была построена в привязке к минимальным экспериментально регистрируемым перемещениям на уровне 0.32 мкм.

В связи с тем, что экспериментально регистрируется только модуль перемещения, для выявления знака перемещения, необходимо рассмотрение одновременного воздействия растягивающей и надавливающей нагрузок, по алгоритму, описанному в § 1.4.3.

Вначале оценим нормальные перемещения при воздействии только распределенной надавливающей нагрузки q в локальной системе координат. Для этого воспользуемся следующими параметрами:

Радиус круга, на котором приложена нагрузка: $b = 1$ мм

Величина надавливающей нагрузки: $P_H = 150 \text{ Н}$

Отсюда, распределенная нагрузка:

$$q = \frac{P_H}{\pi \cdot b^2} = 4.775 \cdot 10^7 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 47.75 \text{ МПа}$$

На Рис. 1.18 показано расположение линий уровня в 0.32, 0.64 и 0.96 мкм при локальном надавливании, повторяющее Рис. 1.9 в размерных координатах. Здесь граница зоны локального надавливания показана пунктирной линией.

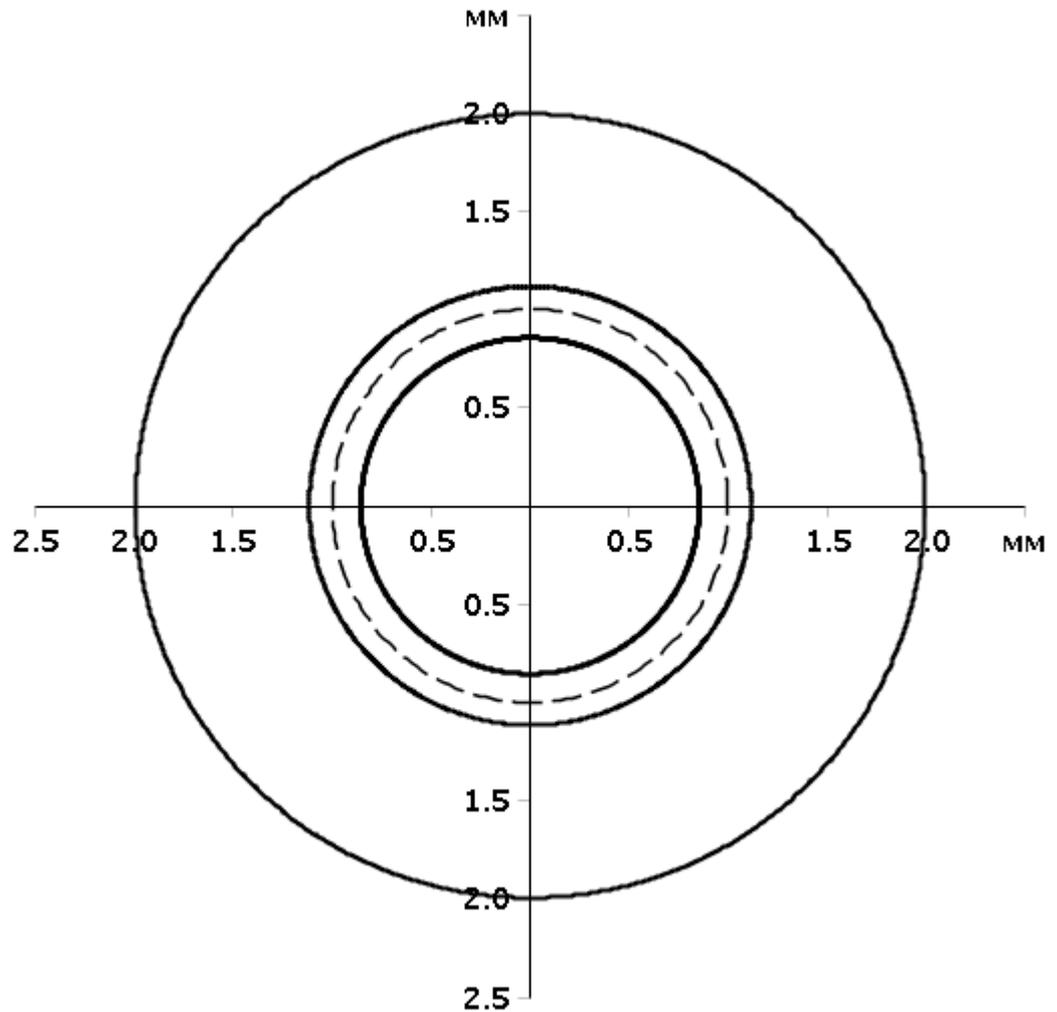


Рис. 1.18 – График перемещений при локальном надавливании

Значения отмеченных координат линий уровня сведены в Табл. 1.1.

Табл. 1.1 – Координаты линий уровня при локальном надавливании

Перемещения w , мкм	Значение координаты r , мм
0.32	1.99
0.64	1.12
0.96	0.85

Рассмотрим сначала случай, когда район локального надавливания находится на оси приложения нагрузки. Рис. 1.19 иллюстрирует эффект надавливания, проявляющийся в изменении исходной формы линии уровня нормального перемещения в окрестности отверстия. Здесь черной линией отмечена граница

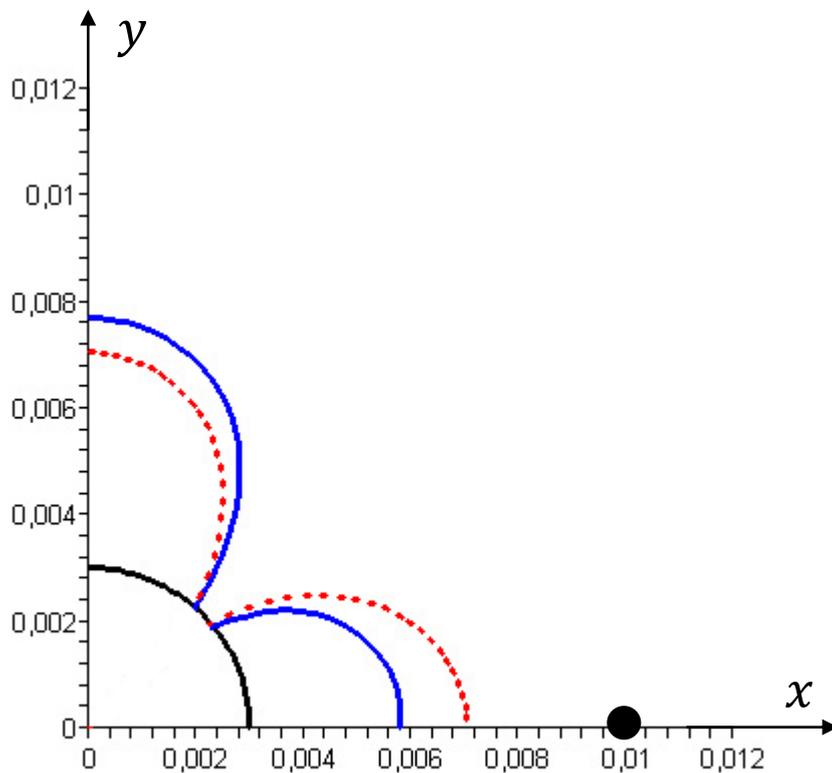


Рис. 1.19 – Эффект надавливания на оси приложения нагрузки

отверстия, черным кружком – зона локального надавливания, красной пунктирной линией – линия уровня нормального перемещения без учета надавливания, синей сплошной – перемещения с учетом локального надавливания.

Из полученного графика видно, что перемещения при надавливании не симметричны относительно угла 45 градусов. При этом, первая линия уровня

сократилась и сдвинулась по оси приложения нагрузки к отверстию. Следовательно, перемещения от растяжения и локального надавливания имеют разные знаки на оси x . Таким образом, перемещение от растяжения в этой области имеют положительный знак, что идентифицирует растягивающую нагрузку в этом направлении.

Аналогичный вывод, на основе полученного графика, можно сделать о перемещениях на оси y . В данном случае, они будут иметь знак минус, так как линия уровня перемещений удлинилась вследствие приложения надавливающей нагрузки по оси x .

Рис. 1.20 иллюстрирует соотношения между уровнями перемещений от растягивающей нагрузки и от надавливания по оси x при разных углах θ .

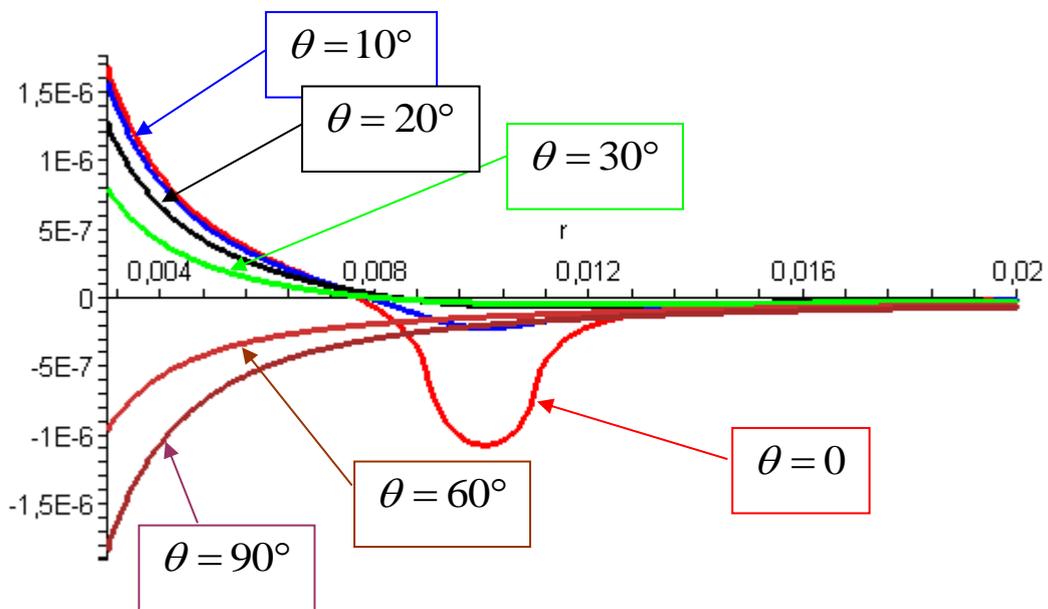


Рис. 1.20 – График суммарных перемещений для разных углов θ при надавливании на оси приложения нагрузки

Аналогично был проведен расчет для случая, когда локальное надавливание производилось на оси y , перпендикулярной к оси приложения нагрузки. В этом случае, выражение для радиальной компоненты r общей системы координат записывается в виде:

$$r = \sqrt{r_n^2 + L_n^2 - 2r_n L_n \sin \theta} \quad (1.29)$$

Соответствующий график изменения исходной формы линии уровня нормального перемещения в окрестности отверстия после локального надавливания на оси y изображен на Рис. 1.21.

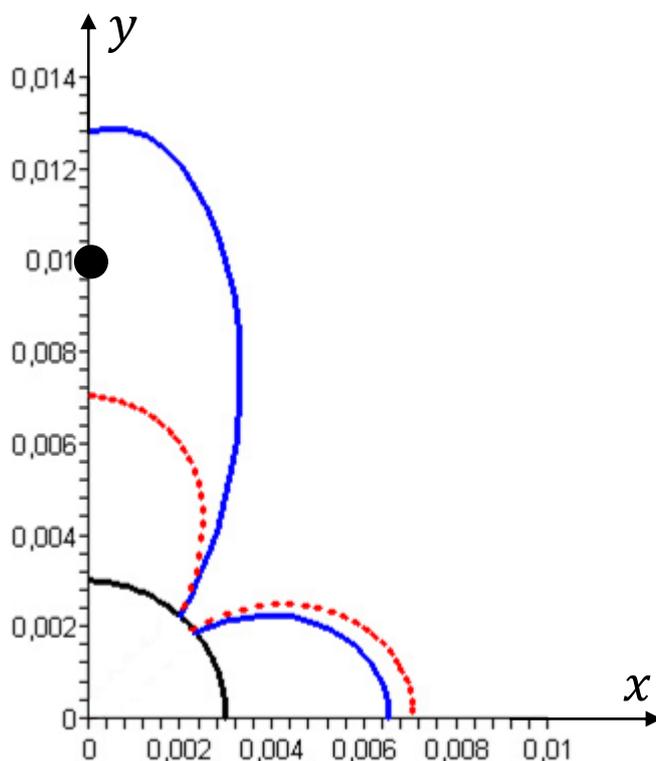


Рис. 1.21 – График перемещений при локальном надавливании на оси, перпендикулярной к оси приложения нагрузки

Как и в предыдущем случае, с помощью полученного графика можно сделать вывод о знаках перемещений при растяжении. Так как первая линия уровня для перемещений увеличилась в направлении поперечной оси y , то перемещения при растяжении и локальном надавливании имеют одинаковый знак на этой оси, что говорит о знаке минус в перемещениях вдоль поперечной оси пластины, и, как следует из Рис. 1.16, - о растяжении вдоль оси x .

Аналогично предыдущему случаю, можно заключить, что так как перемещения на продольной оси x уменьшились, следовательно, в этой зоне перемещения имеют знак плюс.

График суммарных перемещений для различных углов θ при надавливании на оси y показан на Рис. 1.22.

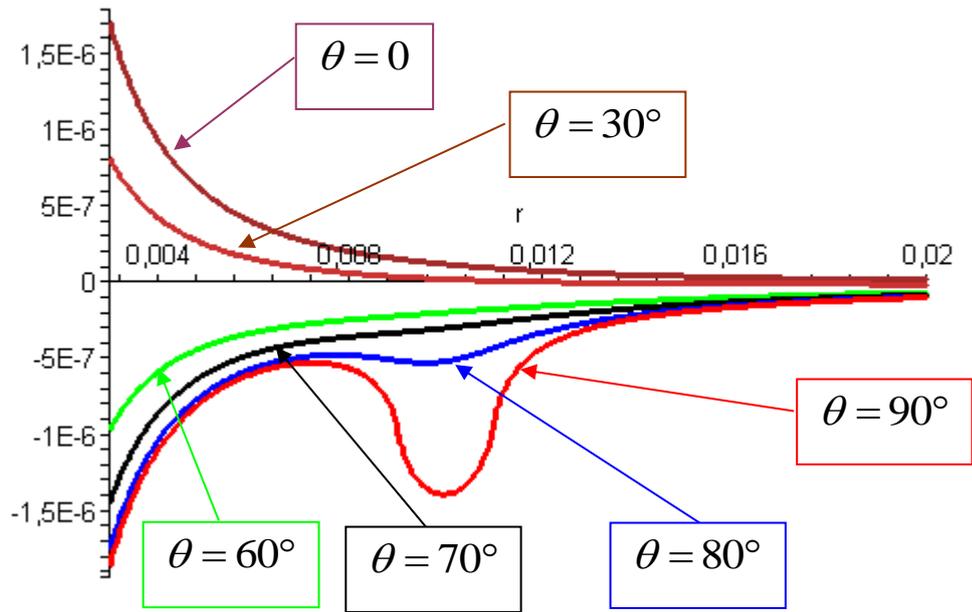


Рис. 1.22 – График суммарных перемещений для разных углов θ при надавливании на поперечной оси y

Таким образом, локальное надавливание в окрестности зондирующего отверстия обеспечивает определение знака перемещений, а по нему - и знака напряжений при применении метода голографической и спекл-интерферометрии для определения остаточных напряженных состояний.

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

§ 1.5. Связь координат расположения интерференционных полос с напряжениями

Как уже отмечалось, при определении напряжений по шагу интерференционных полос погрешность в значениях напряжений доходит до 30 МПа для стали. Эта погрешность может быть снижена, если в качестве информационного показателя включить не только число линий уровня (интерференционных полос в эксперименте), но и их расположение внутри интервала высот в форме нормального перемещения поверхности образца в окрестности зондирующего отверстия между крайними положениями, квантованными длиной полуволны лазера.

Рассмотрим зависимости положения линий уровня от материала, приложенного напряжения и диаметра сквозного отверстия.

§ 1.5.1. Зависимость положений линий уровня от материала

Для определения зависимости положения линий уровня от материала и других зависимостей воспользуемся выражением (1.19), ограничившись в нем только растягивающим напряжением S_x :

$$w(r_a, \theta) = \frac{\nu h}{Er_a^2} S_x \cos 2\theta, \quad r_a = \frac{r}{a}. \quad (1.30)$$

Подставляя в эту формулу параметры материала и нагрузки из § 1.4.4, получим зависимость нормального перемещения на поверхности тела от безразмерного расстояния r_a до центра отверстия. На Рис. 1.23 эта зависимость при $\theta = 0$ отображена для алюминия, а на Рис. 1.24 – для стали со следующими характеристиками: $E_{ст} = 2.1 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_{ст} = 0.3$.

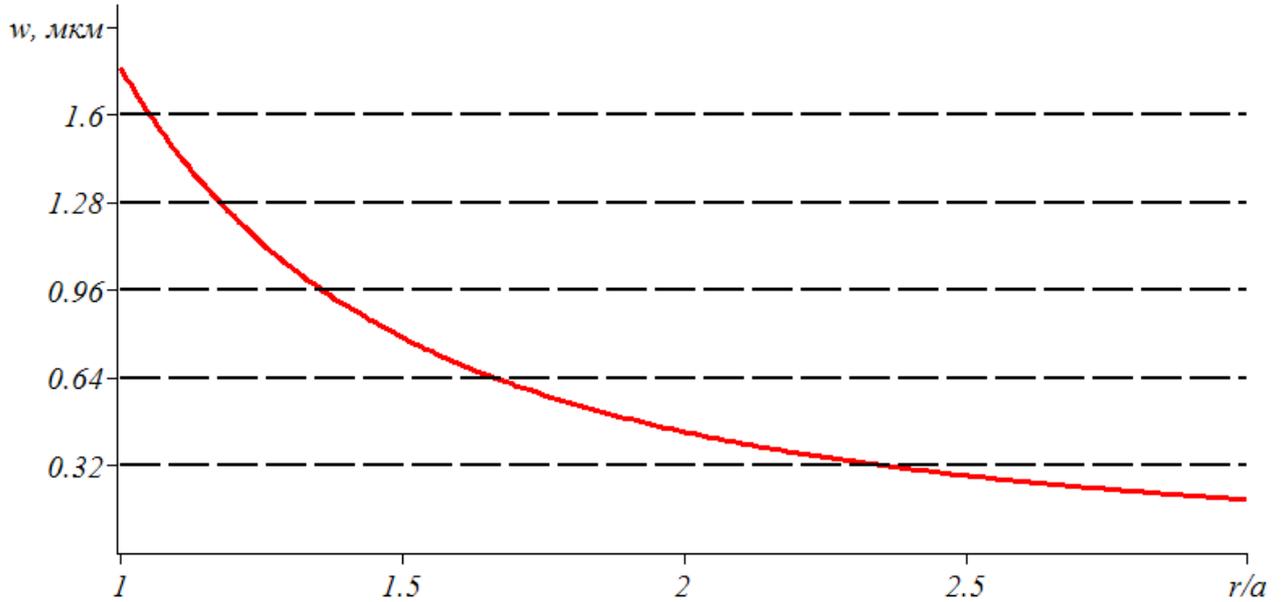


Рис. 1.23 – График нормального перемещения для алюминия от безразмерной полярной координаты при $\theta = 0$

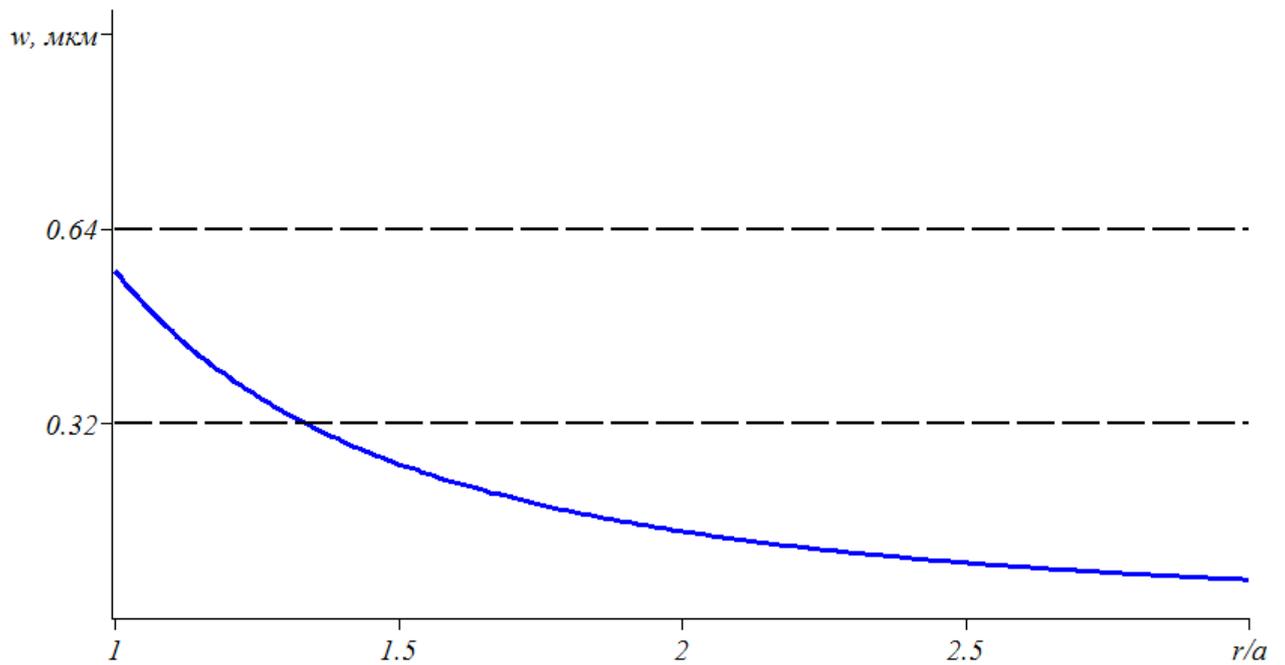


Рис. 1.24 – График нормального перемещения для стали от безразмерной полярной координаты при $\theta = 0$

Кроме зависимостей $w(r_a, 0)$, штриховыми линиями показаны линии уровня с шагом 0.32 мкм, соответствующие центрам интерференционных полос в лазерно-интерферометрическом отображении картины формы прогиба.

Из полученных графиков видно, в частности, что максимальное значение перемещения в случае алюминия равно 1.77 мкм, в то время как при расчете по числу линий уровня - не превышает 1.6 мкм. Следовательно, при расчете по числу линий уровня максимальное напряжение будет ниже действующего более чем на 10%. Соответственно, цена полосы для алюминия составит 14.5 МПа.

Аналогичное сопоставление для стали показывает отличие расчетного по числу полос уровня напряжений от действующего уже на 35 МПа при цене полосы 45 МПа.

На Рис. 1.25 приведен совместный график перемещений в окрестности одинаковых отверстий при одинаковых напряжениях для алюминия (красная линия) и стали (синяя линия), показывающий разную чувствительность материалов к одинаковым напряжениям.

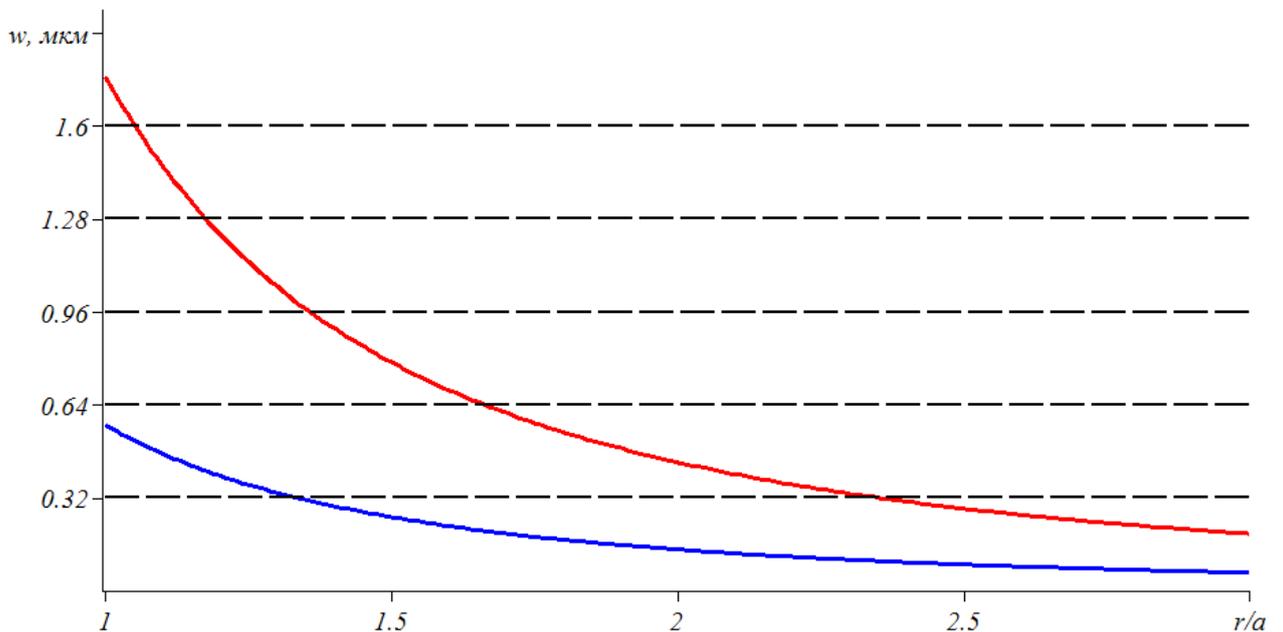


Рис. 1.25 – Графики нормальных перемещений для алюминия и стали в окрестности отверстия диаметром 6 мм при действии растягивающей нагрузки

$$S_x = 80 \text{ МПа и } \theta = 0$$

Из графика перемещений для алюминия видно, что расстояние между первой и второй полосами по горизонтали составляет $0.67a$ или 2 мм. Это

означает, что при регистрации интерферограммы с помощью 3-х мегапиксельной камеры центры первой и второй полос при $\theta = 0$ будут находиться на расстоянии 227 пикселей. Учитывая, что, неопределенность выделения центров полос не превышает ± 3 пикселя [8,9], можно заключить что, с использованием координатного метода погрешность определения напряжения для алюминия снижается с 14.5 МПа до 0.5 МПа. Аналогичные рассуждения для стали показывают, что с использованием координатного метода погрешность определения напряжения в этом случае снижается до 2.5 МПа.

§ 1.5.2. Зависимость положений линий уровня от величины приложенной нагрузки

Рассмотрим теперь зависимость положений линий уровня перемещения поверхности пластины от величины приложенной нагрузки. Как и для случая с определением зависимости от материала, данный анализ также будет построен с помощью функции (1.30).

Допустим, что величина приложенного напряжения меняется в пределах от 20 до 120 МПа с шагом 10 МПа. Преобразуем функцию (1.30) на поверхности пластины к виду:

$$w_{ал}(r_a, 0) = \frac{K_0^{ал}}{r_a^2} \quad (1.31)$$

где $K_0^{ал}$ – коэффициент напряжений для угла $\theta = 0$.

Для каждого из значений напряжений интервала [20 – 120 Мпа] исходя из равенства $w_{ал}(r_a, 0) = 0.32$ мкм определялись координаты r_a первой линии уровня; эти данные для алюминия сведены в Табл. 1.2.

Табл. 1.2 – Координаты первой линии уровня при разных напряжениях S_x для алюминия при $\theta = 0$

Напряжение S_x , МПа	Коэффициент $K_0^{ал}$, мкм	Координата первой линии уровня r_a
20	0.429	1.16
30	0.643	1.42
40	$8.57 \cdot 10^{-7}$	1.64
50	$1.07 \cdot 10^{-6}$	1.83
60	$1.29 \cdot 10^{-6}$	2.00
70	$1.50 \cdot 10^{-6}$	2.17
80	$1.71 \cdot 10^{-6}$	2.31
90	$1.93 \cdot 10^{-6}$	2.45
100	$2.14 \cdot 10^{-6}$	2.59
110	$2.36 \cdot 10^{-6}$	2.71
120	$2.57 \cdot 10^{-6}$	2.83

На Рис. 1.26 показаны графики перемещений в окрестности отверстия при указанных значениях напряжений и их пересечения линиями уровня $w = 0.32 \cdot n$ мкм, $n = 1,2,3$.

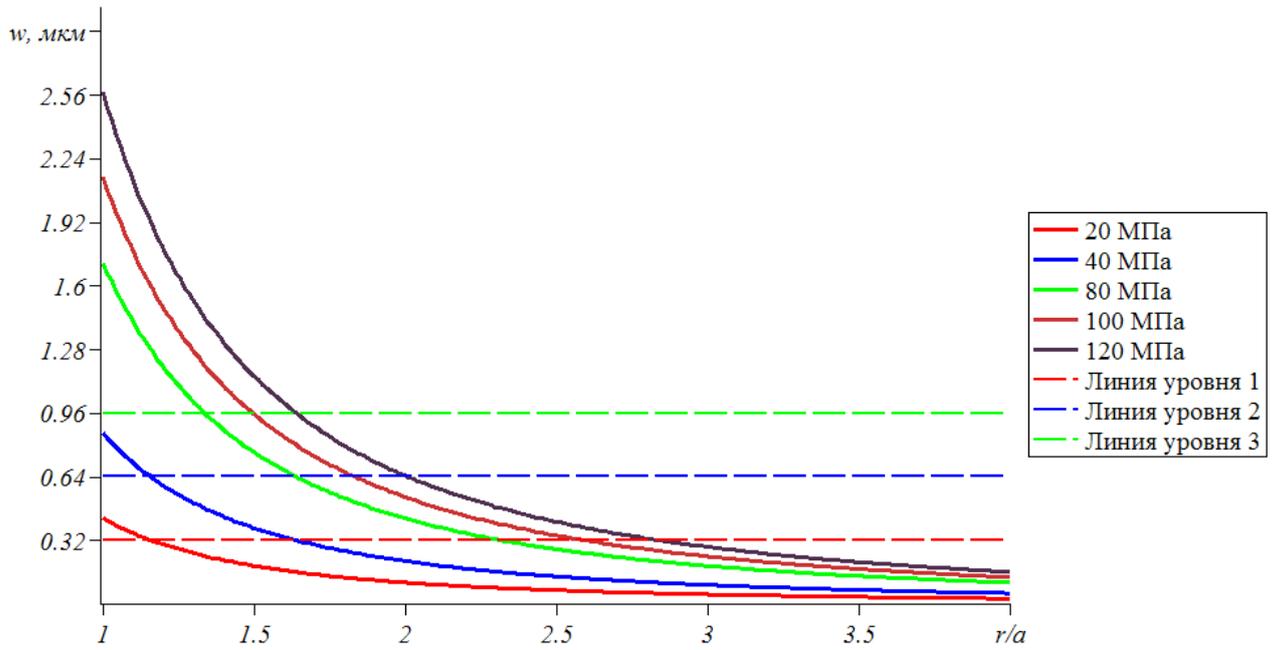


Рис. 1.26 – Графики нормальных перемещений по направлению $\theta = 0$ для алюминия при действии различных растягивающих нагрузок S_x

В Табл. 1.3 приведены данные по расположению координат линий уровня для алюминия при угле наблюдения $\theta = 20^\circ$.

Табл. 1.3 – Координаты первой линии уровня при разных напряжениях S_x для алюминия при $\theta = 20^\circ$

Напряжение S_x , МПа	Коэффициент $K_{20}^{ал}$, мкм	Координата первой линии уровня r_a
20	$3.28 \cdot 10^{-7}$	1.01
30	$4.92 \cdot 10^{-7}$	1.24
40	$6.57 \cdot 10^{-7}$	1.43
50	$8.21 \cdot 10^{-7}$	1.60
60	$9.85 \cdot 10^{-7}$	1.75
70	$1.15 \cdot 10^{-6}$	1.89
80	$1.31 \cdot 10^{-6}$	2.03
90	$1.48 \cdot 10^{-6}$	2.15
100	$1.64 \cdot 10^{-6}$	2.26
110	$1.81 \cdot 10^{-6}$	2.37
120	$1.97 \cdot 10^{-6}$	2.48

Эти данные могут пригодиться в случае, если на спекл-интерферограмме плохо распознаются центры полос при $\theta = 0$.

На Рис. 1.27 показаны графики перемещений в окрестности отверстия при указанных значениях напряжений и их пересечения линиями уровня $w = 0.32 \cdot n$ мкм, $n = 1, 2, 3$.

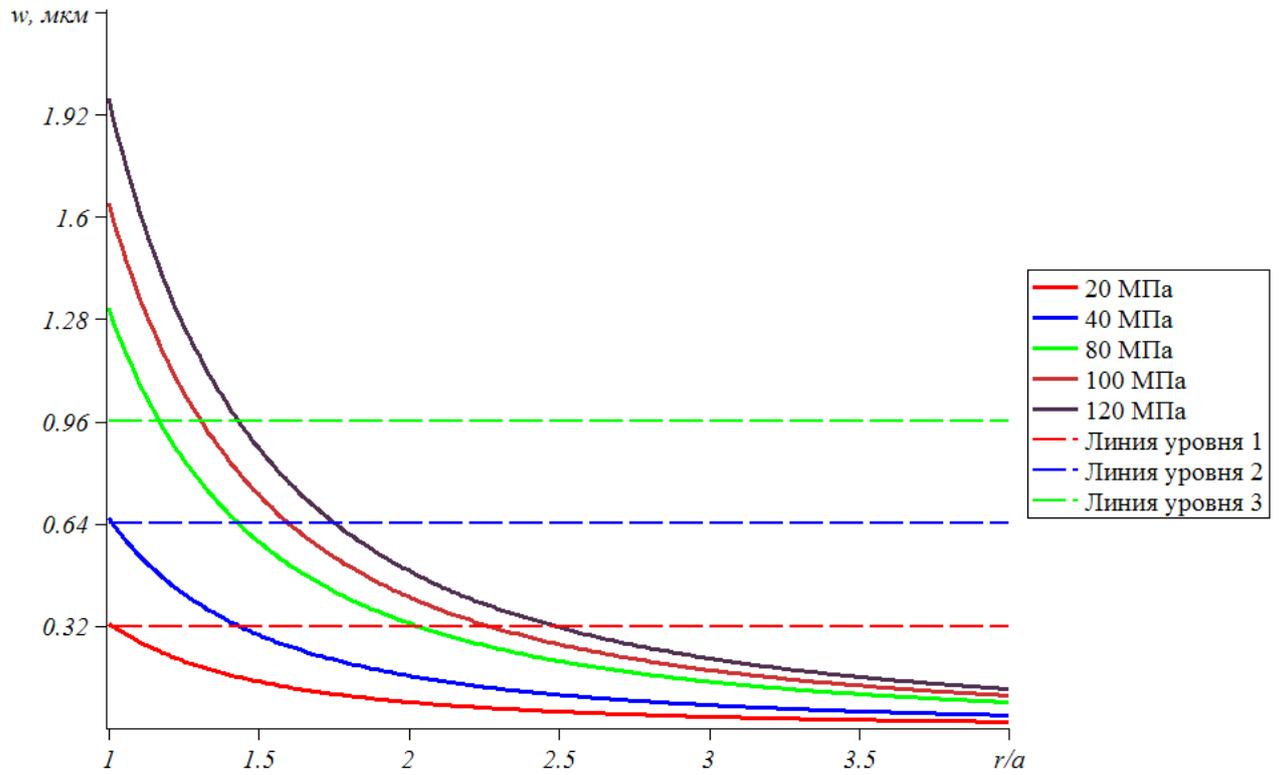


Рис. 1.27 – Графики нормальных перемещений по направлению $\theta = 20^\circ$ для алюминия при действии различных нагрузок S_x

Аналогичные расчеты для стальной пластины отображены в Табл. 1.4 и Табл. 1.5 и на графиках Рис. 1.28 и Рис. 1.29.

Табл. 1.4 – Координаты первой линии уровня при разных напряжениях S_x для стали при $\theta = 0$

Напряжение S_x , МПа	Коэффициент K_0^{CT} , мкм	Координата первой линии уровня r_a
20	$1.43 \cdot 10^{-7}$	0.67
30	$2.14 \cdot 10^{-7}$	0.82
40	$2.86 \cdot 10^{-7}$	0.94
50	$3.57 \cdot 10^{-7}$	1.06
60	$4.29 \cdot 10^{-7}$	1.16
70	$5.00 \cdot 10^{-7}$	1.25
80	$5.71 \cdot 10^{-7}$	1.34
90	$6.43 \cdot 10^{-7}$	1.42
100	$7.14 \cdot 10^{-7}$	1.49
110	$7.86 \cdot 10^{-7}$	1.57
120	$8.57 \cdot 10^{-7}$	1.64

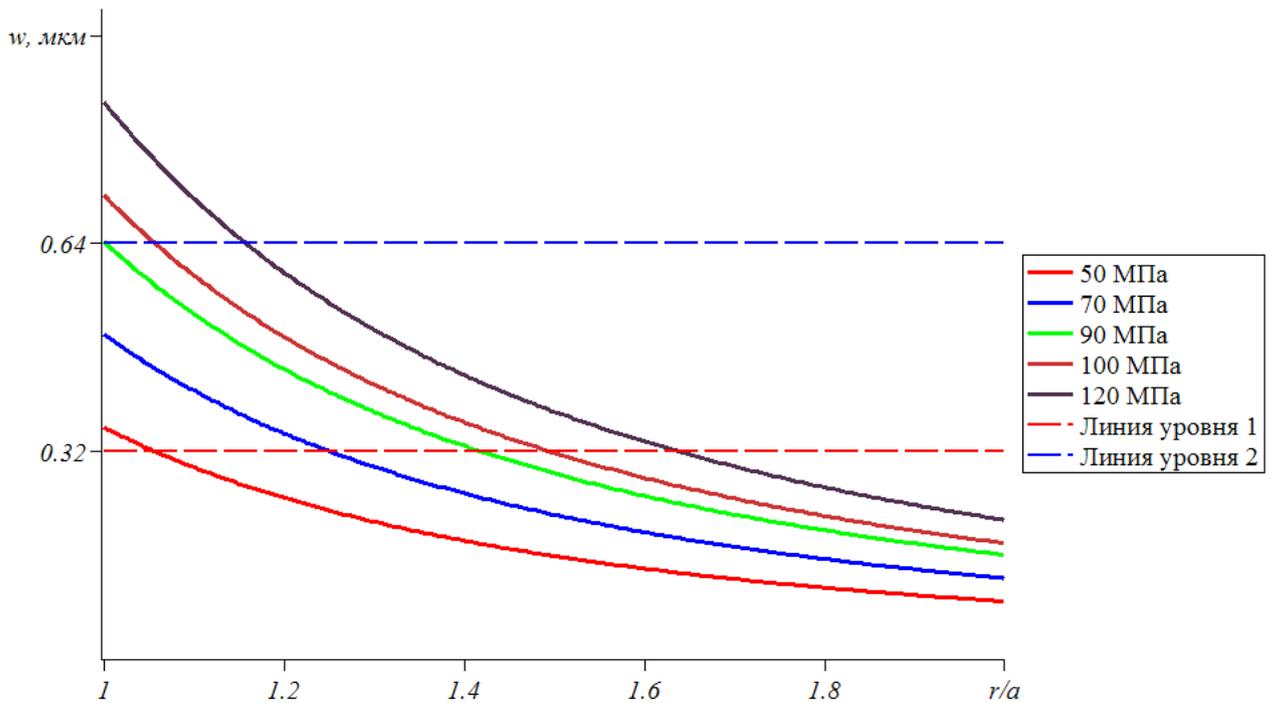


Рис. 1.28 – Графики нормальных перемещений по направлению $\theta = 0$ для стали при действии различных растягивающих нагрузок S_x

Табл. 1.5 – Координаты первой линии уровня при разных напряжениях S_x для стали при $\theta = 20^\circ$

Напряжение S_x , МПа	Коэффициент K_{20}^{CT} , мкм	Координата первой линии уровня r_a
20	$1.09 \cdot 10^{-7}$	0.58
30	$1.64 \cdot 10^{-7}$	0.72
40	$2.19 \cdot 10^{-7}$	0.83
50	$2.74 \cdot 10^{-7}$	0.92
60	$3.28 \cdot 10^{-7}$	1.01
70	$3.83 \cdot 10^{-7}$	1.09
80	$4.38 \cdot 10^{-7}$	1.17
90	$4.92 \cdot 10^{-7}$	1.24
100	$5.47 \cdot 10^{-7}$	1.31
110	$6.02 \cdot 10^{-7}$	1.37
120	$6.57 \cdot 10^{-7}$	1.43

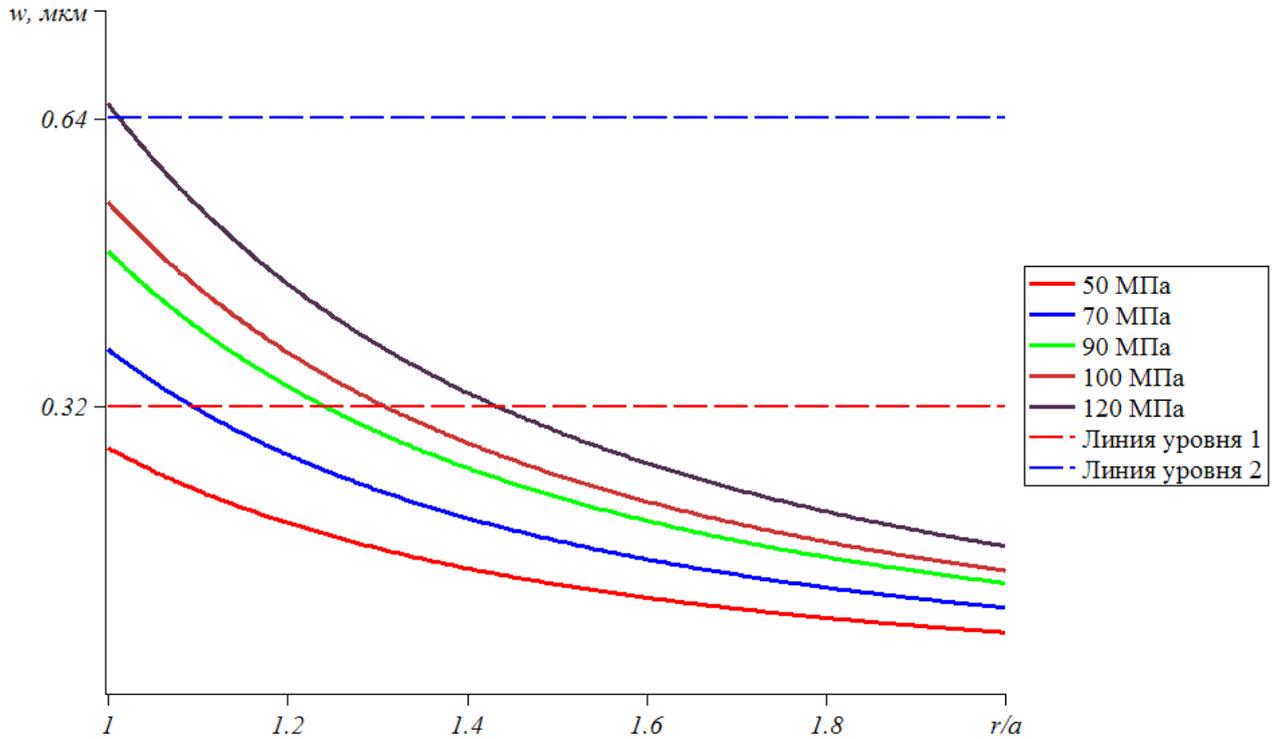


Рис. 1.29 – Графики нормальных перемещений по направлению $\theta = 20^\circ$ для стали при действии различных нагрузок S_x

На Рис. 1.30 приведены объединенные графики зависимостей координат линий уровня по направлениям $\theta = 0$ и 20° для алюминия и стали от величины растягивающей нагрузки S_x (фиксированные значения S_x отмечены кружками).

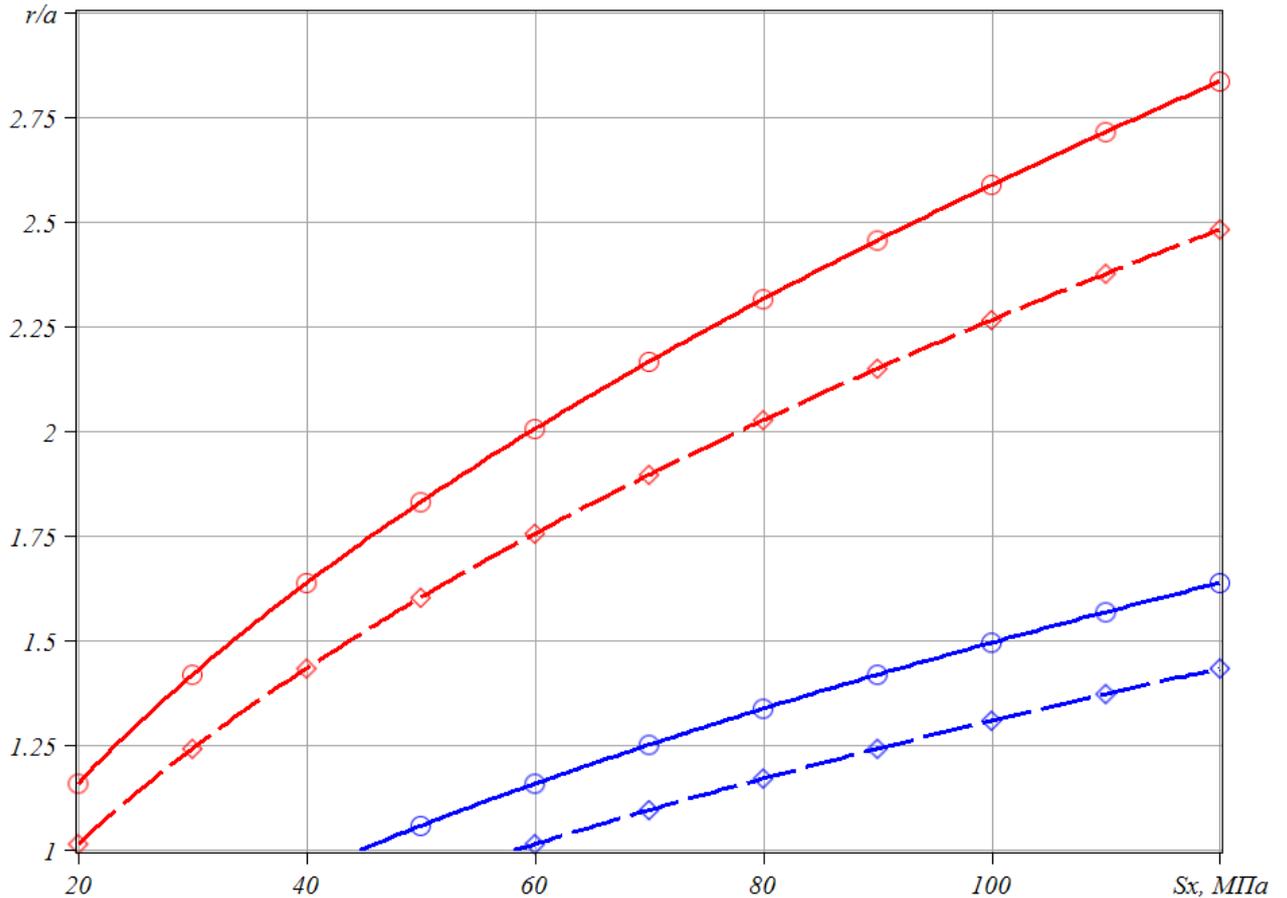


Рис. 1.30 – Графики положений первой линии уровня для алюминиевой (красные линии) и стальной (синие линии) пластин при углах $\theta = 0$ (сплошные) и $\theta = 20^\circ$ (штриховые) в зависимости от приложенной нагрузки

Из рассмотрения Рис. 1.26 и Рис. 1.27 для алюминия следует полезность определения цены полосы не только по направлениям главных напряжений, но и под некоторыми углами к ним. Например, в случае напряжения $S_x = 20$ МПа из соответствующего графика Рис. 1.26 можно заключить, что действующее напряжение находится в интервале $14.5 \text{ МПа} \leq S_x \leq 29 \text{ МПа}$, в то время как из графика построенного для угла 20° , следует вполне определенное значение $S_x = 20$ МПа.

§ 1.5.3. Зависимость положений линий уровня от радиуса отверстия

Рассмотрим влияние изменения радиуса отверстия на распределение положений линий уровня относительно центра отверстия.

Используя выражение (1.30), получим связь между положением линий уровня и радиусом отверстия в виде

$$r = a \sqrt{\frac{\nu h}{EN\lambda} S_x |\cos 2\theta|} \quad (1.32)$$

где $N = 1, 2, \dots$ – число полос линий уровня, λ – длина полуволны лазера.

Отсюда видно, что с увеличением радиуса отверстия, линии уровня отдаляются от его центра, что может способствовать улучшению их распознавания, особенно при небольших уровнях действующих напряжений. В то же время высверливание зондирующих отверстий большого радиуса создает большую поврежденность материала конструкции и может вывести часть линий уровня за область наблюдения интерферометра.

Практика определения напряжений методом высверливания зондирующих лунок показала, что для алюминия, как правило, достаточно отверстия с диаметром, не превышающем 2 мм, а для стали – 3-5 мм [8,11]. Применяется также ступенчатое высверливание с постепенно увеличивающимся диаметром и контролем результативности по проявлению интерференционных полос [11].

§ 1.6. Анализ полученных результатов и выводы

Описанный в предыдущих разделах работы новый экспериментально-теоретический метод оценки напряженно-деформированного состояния, основанный на определении координат интерференционных полос в окрестности сквозного отверстия пластины развивает метод зондирующего отверстия в направлении повышения точности определения остаточных напряжений. Используя решение задачи Кирша, была разработана теоретическая модель, ха-

рактирующая расположение линий уровня нормального перемещения в окрестности отверстия (основного диагностического параметра) при определении напряжений в пластине, в зависимости от таких факторов как:

1. материал пластины;
2. действующее напряжение;
3. диаметр отверстия.

При этом были рассчитаны и построены графики, с помощью которых возможна последующая оценка напряженно-деформированного состояния пластин на основе координатного метода, изготовленных из различных материалов в широком диапазоне действия нагрузок. В частности, на Рис. 1.31 показаны зависимости действующих напряжений от положения первой линии уровня. Приведены графики действующих напряжений для алюминиевой (красные линии) и стальной (синие линии) пластин при углах $\theta = 0$ (сплошные) и $\theta = 20^\circ$ (штриховые) в зависимости от положения первой линии уровня.

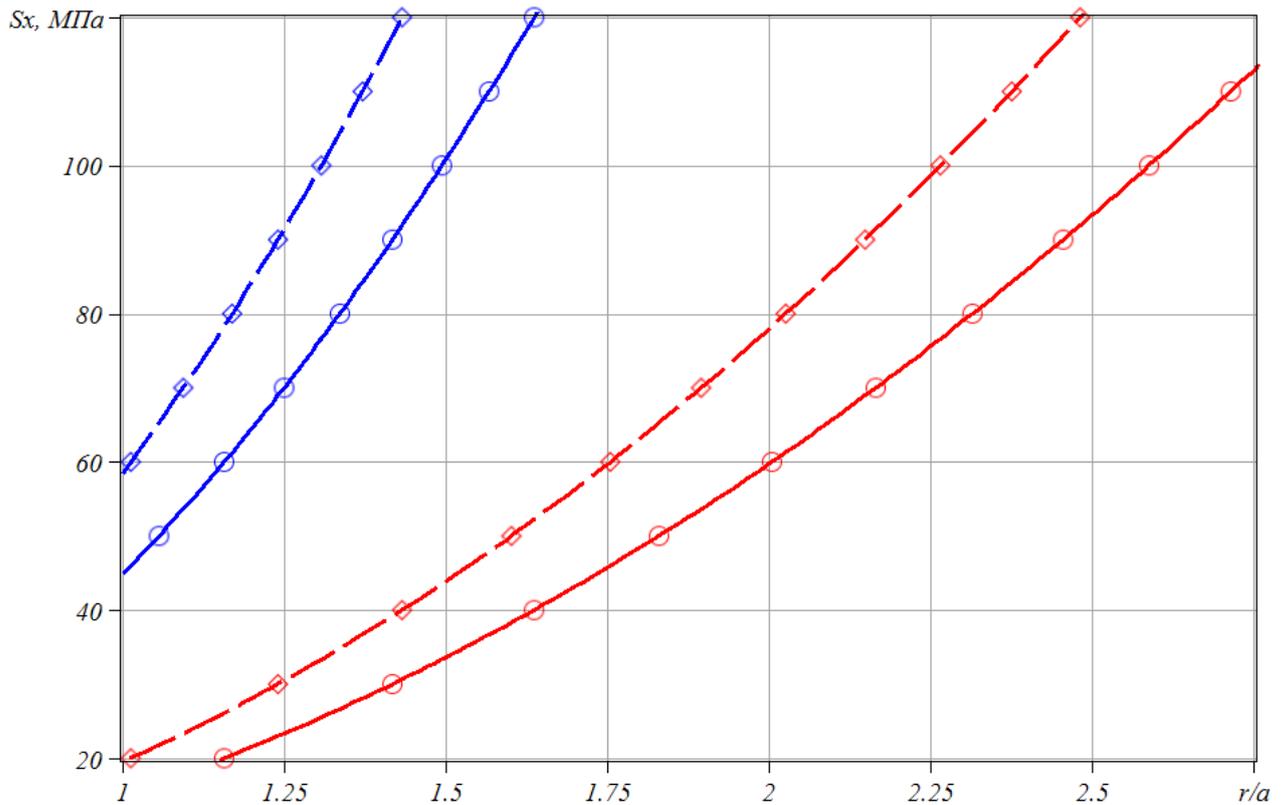


Рис. 1.31 – Графики действующих напряжений для алюминиевой (красные линии) и стальной (синие линии) пластин при углах $\theta = 0$ (сплошные) и $\theta = 20^\circ$ (штриховые) в зависимости от положения первой линии уровня

Полученные графики позволяют их использовать как номограммы при определении остаточных напряжений. Погрешность определения напряжений при использовании этих графиков в сравнении с дискретными значениями, следующими из подсчета числа полос, снижается для алюминия до 0.5 МПа, а для стали до 2.5 МПа.

Наряду с повышением точностью 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. Использование здесь дополнительного локализованного надавливания в окрестности отверстия позволяет проявить разный характер деформирования линий уровня нормальных перемещений в точках, находящихся на направлении приложенной нагрузки, и на линиях, перпендикулярных этому направлению.

Глава 2. Определение температурных следов на поверхности металла сварного соединения по термическому циклу

В этой главе рассмотрены экспериментальные предпосылки, идея и математическое обоснование нового неразрушающего метода оценки остаточных напряжений в сварном соединении по температурным следам, длительное время сохраняющихся на металле сварного соединения после окончания сварки. В качестве таких следов рассматриваются границы сварного шва и цвета побежалости, характеризующие уровни максимально достигнутых температур на удалении от шва. Чтобы связать расположение температурных следов с остаточными напряжениями, необходимо решить две задачи: выполнить математическую реконструкцию термического цикла сварки по температурным следам и связать полученные температурные зависимости с остаточными сварочными напряжениями.

Известно, что возникновение остаточных напряжения в сварных соединениях обусловлено резким локализованным повышением температуры, переводящим металл в зоне сварки в пластичное и жидкое состояния, а затем – быстрым охлаждением этой зоны при сохранении жесткостных характеристик в материале примыкающих областей, препятствующих развитию деформаций [5]. Поэтому ключевым моментом в определении остаточных сварочных напряжений является знание координатно-временных зависимостей температуры в зоне шва и прилегающих областях в процессе выполнения сварки и охлаждения шва. Неудивительно, что большое количество исследований посвящено созданию расчётно-теоретических моделей термического цикла при сварке [1, 5, 26, 28, 29, 30, 39, 42, 47, 50, 55]. При этом, сами авторы таких моделей отмечают ([39] с.203), что «часто характер теплового воздействия при сварке и условия распространения теплоты и теплоотдачи настолько сложны, что расчётное определение температур становится настолько неточным, что его использование ока-

зывается неоправданным». Вследствие этого, из-за сложности явления формирования остаточных напряжений в настоящее время не существует единого теоретического метода определения таких напряжений [5].

Другой подход – это экспериментальные измерения температурного поля и его кинетики при сварке. Здесь, однако, следует отметить, что измерения температуры и её градиентов в реальном технологическом цикле сварки не всегда возможны. В лабораторных условиях, когда доступ к зоне сварки открыт, для получения временной и координатной зависимостей температур остывания шва и околошовной зоны может быть использован, например, традиционный контактный метод измерения температуры с помощью термопар.

Рис. 2.1 иллюстрирует один из таких экспериментов. Данные об изменениях температур при нагреве и охлаждении околошовной зоны регистрировались в этом эксперименте цифровым мультиметром.

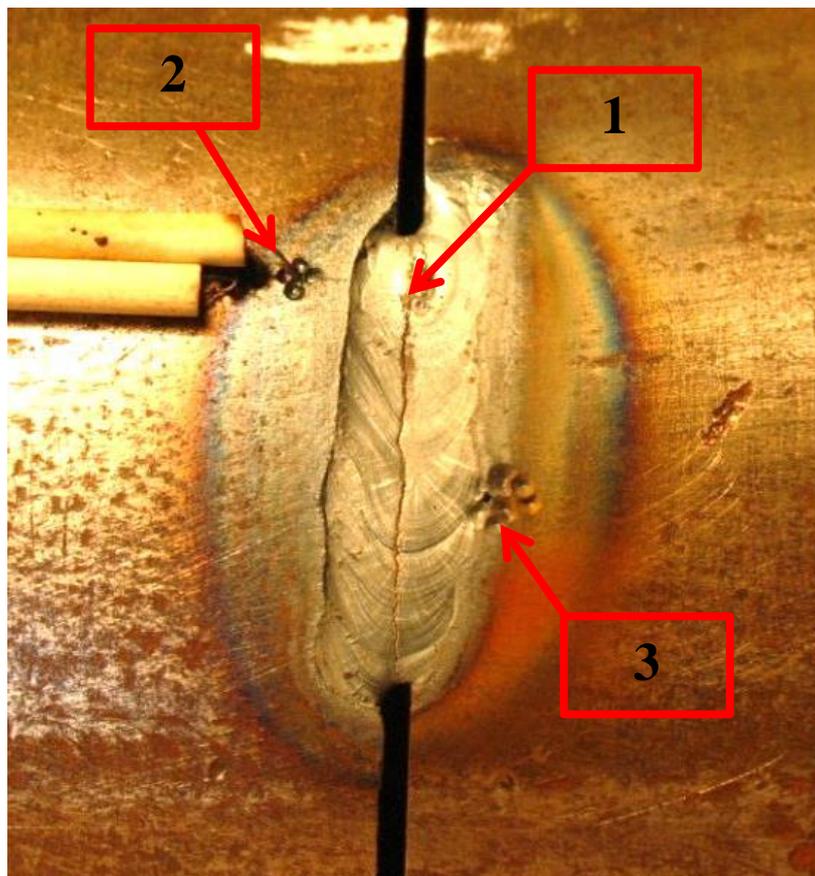


Рис. 2.1 – Околошовная зона с использованием термопар: 1 - зона сварки двух стальных труб; 2, 3 - места зачеканки хромель-алюмелевых термопар

Выводы, сделанные по результатам этого и аналогичных экспериментов оказались неоднозначными. Положительной стороной явилось выявление кинетики температурного поля в процессе нагрева и охлаждения определённых мест в околошовной зоне. С другой стороны требуется значительное искусство в обеспечении работоспособности датчиков в экстремальных условиях высоких и быстроменяющихся сварочных температур, когда часть датчиков буквально пережигалась в процессе сварки (такое место отмечено на Рис. 2.1 цифрой 3).

Даже при сохранении работоспособности термопар, информация об изменениях температур имеет локальный характер. Кроме того, зачеканка термопар, как видно из Рис. 2.1, вносит дефекты, соизмеримые с лунками при высверливании несквозных отверстий. Всё это, в сочетании с трудностью, а зачастую, и невозможностью доступа в зону сварки, показывает сложность использования прямых измерений для получения температурных зависимостей в зоне будущего шва и прилегающих областях при создании метода неразрушающего контроля сварочных напряжений, опирающегося на эти зависимости при определении возникающих напряжений.

В то же время, во многих случаях в процессе и по окончании сварки на поверхности свариваемых тел можно наблюдать своеобразные следы температурного воздействия в виде изотерм, окрашенных в определённые, присущие известным температурным уровням, цвета побежалости [25].

Эти следы сохраняются в течение длительного времени после остывания шва и отражают координатное распределение максимально достигнутых температур на расстояниях, соответствующих их расположениям по отношению к центру шва. На Рис. 2.1 видны такие линии, охватывающие сварной шов. В особенности отчётливо проявляется синий цвет побежалости.

Табл. 2.1, воспроизведённая из [25], иллюстрирует распределение температур по цветам побежалости.

Табл. 2.1 – Градации цветов побежалости

Цвета побежалости	Температура град С
Бледно-желтый	210
Светло-желтый	220
Желтый	230
Темно-желтый	240
Коричневый	255
Коричнево-красный	265
Фиолетовый	285
Темно-синий	300
Светло-синий	325
Серый	330

Таким образом, если по видимым следам температурного воздействия и некоторым предположениям о характере начального температурного распределения удастся восстановить температурное распределение в зоне шва при его остывании в произвольный момент времени, то открывается возможность, по найденному так распределению температур находить остаточные напряжения, фактически, - без трудоёмкой процедуры измерения температуры в процессе сварки.

§ 2.1. Экспериментальные данные по распределению цветов побежалости

В качестве исходных данных для математической модели реконструкции термического цикла сварки по температурным следам были использованы расположения границ шва и цветов побежалости после сварки стальных труб большого диаметра для морских трубопроводов на заводе ОАО «ПСКОВЭЛЕКТРОСВАР». Рассматривались соединения отрезков труб диаметром 1220

мм с толщиной стенок 27 мм (Рис. 2.2), выполненные методом контактно-стыковой сварки оплавлением (КССО) [23]. На Рис. 2.2,а приведена фотография стадии нагрева свариваемых торцов, на Рис. 2.2,б – стадии охлаждения сварного соединения; рядом со швом на Рис. 2.2,б видны также темные параллельные полосы – отходящие от него цвета побежалости. Такой тип сварки облегчает построение математической модели, так как все точки окружности контактируемой части трубы соединяются одновременно, тем самым в математической модели исключается зависимость от окружной координаты на поверхности трубы. Это же относится и к прогреву материала по толщине трубы. Тем самым создается практически одномерное температурное поле с зависимостью только от осевой координаты трубы.



а) Нагрев торцов свариваемых труб



б) Охлаждение околошовной сварной зоны

Рис. 2.2 – Цикл сварки прямошовных труб методом КССО

На Рис. 2.3 приведена фотография шва и околошовной зоны после окончания процесса сварки. Как видно из Рис. 2.3, после окончания процесса охлаждения, довольно четко проявляются разные цвета побежалости, отмеченные в Табл. 2.1, распределенные по линиям, параллельным оси шва 1. На Рис. 2.3 изображена также линейка, показывающая границы сварного шва и расположение различных цветов побежалости относительно центра шва.

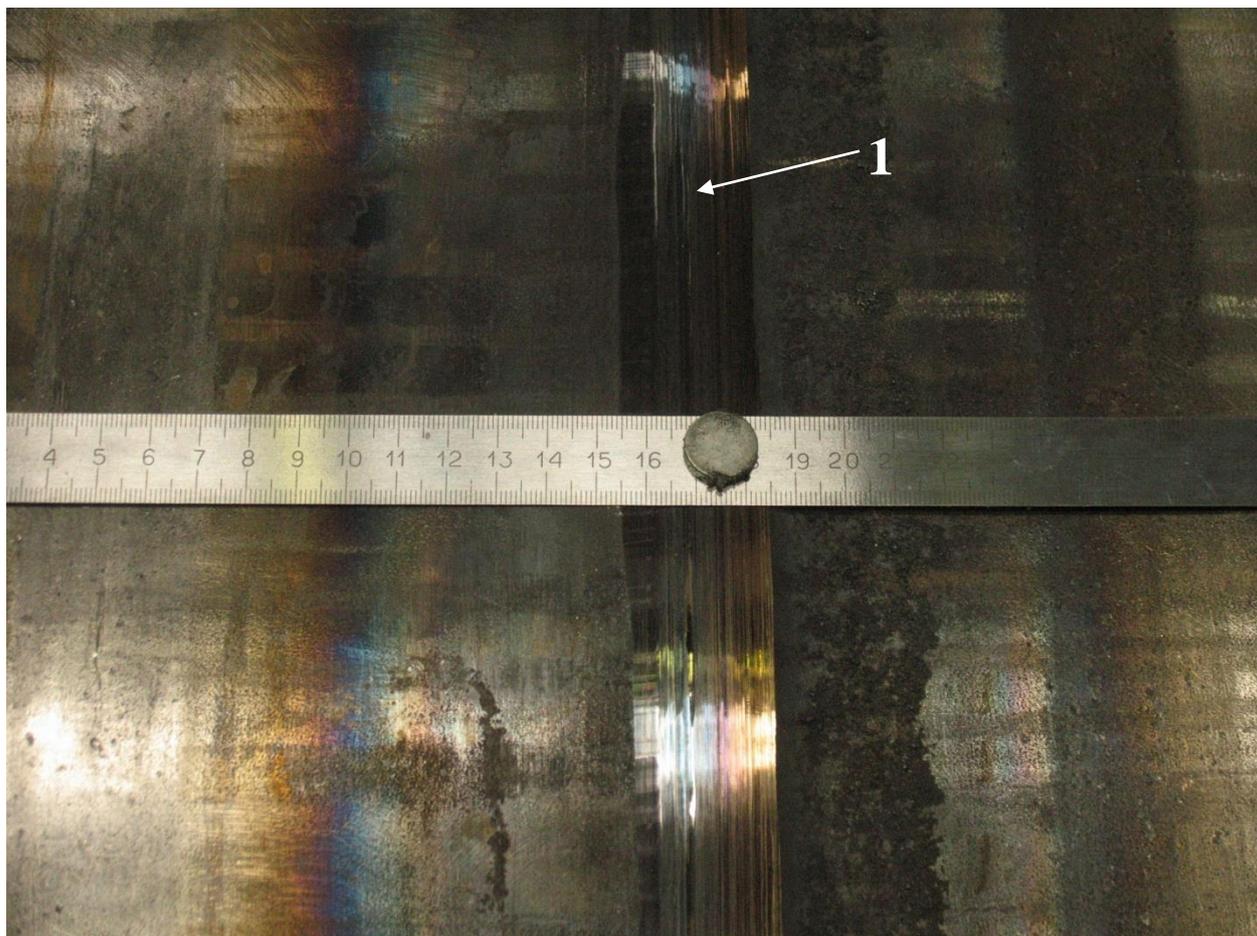


Рис. 2.3 – Цвета побежалости в околошовной зоне: 1 – центр сварного шва

В Табл. 2.2 приведены снятые с Рис. 2.3 данные по расположению максимальных изотерм включая границы сварного шва.

Табл. 2.2 – Расположение максимальных изотерм

Температура град С	Расстояние от центра сварного шва, см
1450 (температура плавления)	0.2 (граница сварного шва)
330	5.8
325	5.9
300	6.4
285	6.7
265	7.3
255	7.5
240	7.9
230	8.8
220	9.7
210	11.0

Эти данные можно аппроксимировать с помощью функции

$$T(x) = a_1 + a_2 e^{-b_1 x^2} + a_3 x \Phi^*(b_2 x) \quad (2.1)$$

где

$$\Phi^*(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad - \text{дополнительная функция ошибок}$$

собранный из решений одномерного уравнения теплопроводности по аналогии с [61]. График этой функции после определения коэффициентов a_i ($i = 1,2,3$) и b_j ($j = 1,2$) с помощью метода наименьших квадратов представлен на Рис. 2.4.

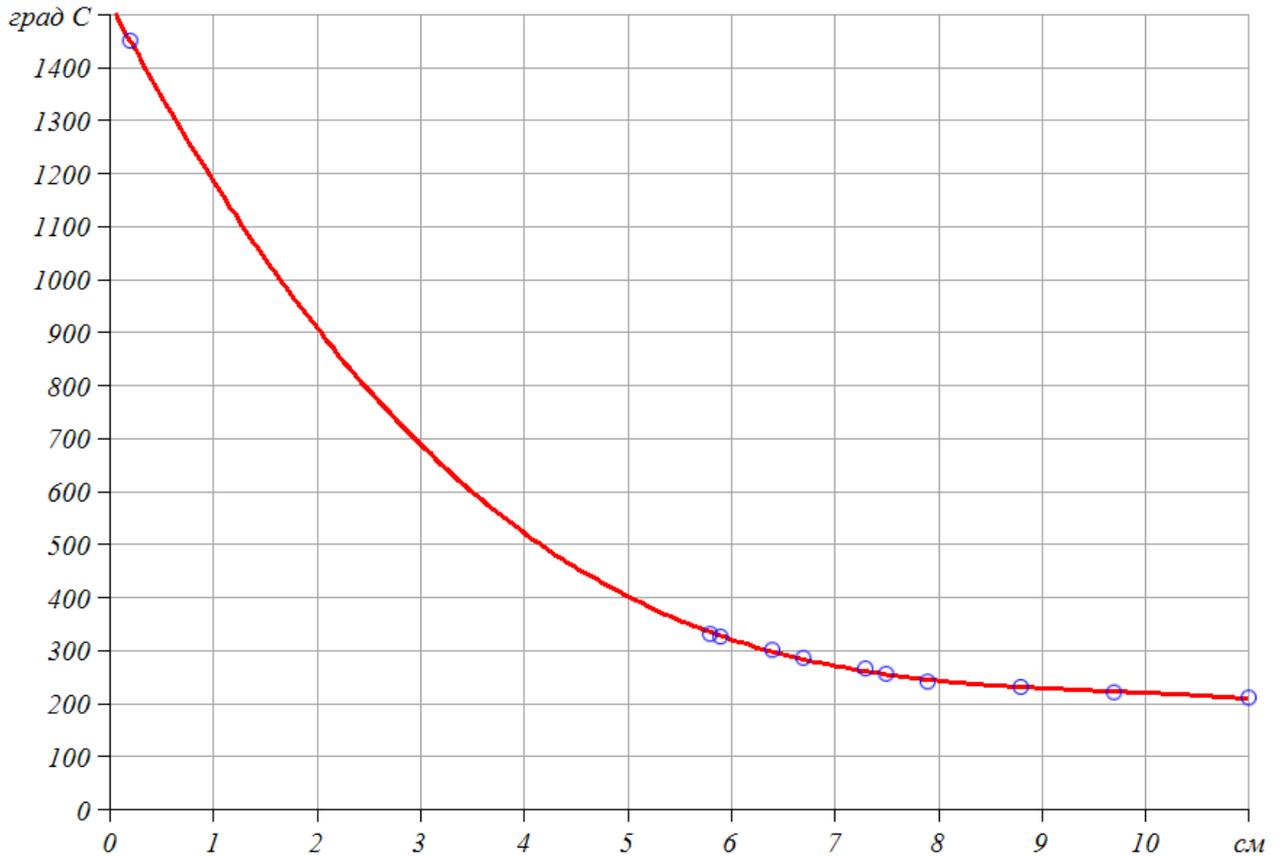


Рис. 2.4 – Аппроксимация координат расположения максимальных изотерм

На представленном графике синими кружками отмечены точки положения максимальных изотерм в реальном термическом цикле сварки, взятые из Табл. 2.2. Полученные данные и аппроксимирующая функция будут использованы в дальнейшем в качестве исходных данных для решения обратной задачи по восстановлению распределения температуры в области сварного шва в термическом цикле сварки.

§ 2.2. Восстановление температурного поля на основе уравнения теплопроводности

Решение обратной задачи восстановления координатно-временных зависимостей температурного поля в процессе нагрева, а затем охлаждения шва по расположению цветов побежалости после завершения термического цикла рассмотрим на примере сваренных встык пластин из стали длиной 190 мм, шири-

ной 100 мм и толщиной 5 мм каждая. На Рис. 2.5 изображён общий вид пластин после сварки. Также на Рис. 2.5 показаны размеры сварного шва и расстояния от центра шва до наиболее заметной - синей линии побежалости со стороны наложения шва.

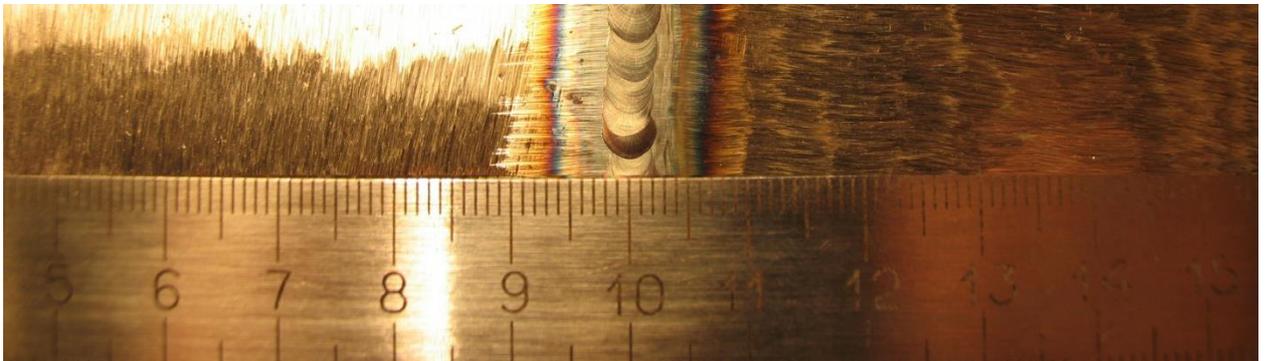


Рис. 2.5 – Цвета побежалости и их расстояние от центра шва

Ввиду важности правильной идентификации расстояния между характерной полосой побежалости и центром шва после его остывания для предложенного алгоритма построения координатно-временной функции остывания сварного соединения и того факта, что цвета побежалости образуются при нагреве выше определённой температуры, возникает вопрос, соответствует ли окончательное положение этой полосы стадии охлаждения, или же оно формируется ещё на стадии нагрева. Для ответа на этот вопрос, принимается условие, что при нахождении распределений температуры по лицевой поверхности пластины, изображённой на Рис. 2.5, необходимо учесть четыре последовательных процесса: относительно быстрый нагрев, плавление и затвердевание пластины на одном конце и затем относительно медленное остывание образованного сварного шва. Эти процессы схематически изображены на Рис. 2.6.

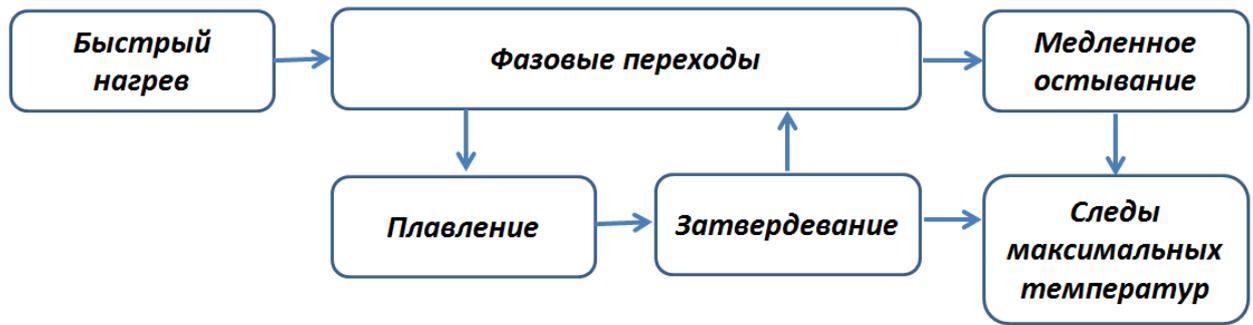


Рис. 2.6 – Термический цикл сварки

В связи с тем, что процессы нагрева торцевых сторон пластин и последующего остывания при контактно-стыковой сварке оплавлением происходят одинаково по всему шву, что подтверждается постоянством расстояния между сварным швом и синей линии побежалости на обеих сторонах от сварного шва (Рис. 2.5). Поэтому можно ожидать, что распространение тепла вдоль пластин происходит также равномерно. На основании этого следует предположить, что для разработки методики расчёта подобных температурных полей при сварке пластин достаточно рассмотрение одномерной задачи на основе стержневой модели. Иными словами, для восстановления процессов нагрева и остывания будем опираться на одномерные модели, в которых учитываются изменения температуры только по времени и по координате x , перпендикулярной оси шва.

При рассмотрении задачи о фазовом переходе на границе между расплавом и твердой частью свариваемых пластин используется решение задачи Стефана [3, 14, 41] о зависимости положения этой границы от времени при остывании расплава.

В стадии остывания при температурах ниже температуры фазового перехода для описания температурного поля используется решение уравнения теплопроводности по которым определяются и следы максимальных изотерм. Эти следы используются затем в качестве исходных данных для решения обратной задачи о реконструкции термического процесса сварки.

§ 2.2.1. Трехмерное уравнение теплопроводности

Процесс распространения тепла в твердом теле в общем случае – трехмерный, описываемый с помощью функции температуры $T = T(x, y, z, t)$ должен в каждом элементарном объеме в любой момент времени t подчиняться закону сохранения энергии. Температура каждого элементарного объема тела непрерывно изменяется вследствие теплообмена с окружающим металлом через поверхность, ограничивающую рассматриваемый элемент. Рассмотрение мгновенного теплового баланса произвольно выбранного элемента тела дает возможность получить трехмерное дифференциальное уравнение теплопроводности. Опуская вывод этого уравнения и пренебрегая изменениями от температуры коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости выпишем его из [41] в виде

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a^2 \nabla^2 T \quad (2.2)$$

где

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad - \text{оператор Лапласа;}$$

$$\lambda \quad - \text{коэффициент теплопроводности;}$$

$$\rho \quad - \text{плотность;}$$

$$c\rho \quad - \text{объемная теплоемкость;}$$

$$a^2 = \frac{\lambda}{c\rho} \quad - \text{коэффициент температуропроводности.}$$

В таком виде обычно принимается уравнение теплопроводности для однородных сред.

Коэффициент температуропроводности a характеризует скорость выравнивания температуры при нестационарной теплопроводности.

Следует отметить, что коэффициент теплопроводности и теплоемкость металлов существенно изменяются с повышением температуры, плотность же ρ изменяется незначительно. Так, для углеродистых сталей с ростом температуры

от 0 до точки плавления значения ρ уменьшается всего на 8-10%. Зависимость теплофизических свойств малоуглеродистой стали с содержанием углерода 0,1% представлена на Рис. 2.7, воспроизведенном из [37].

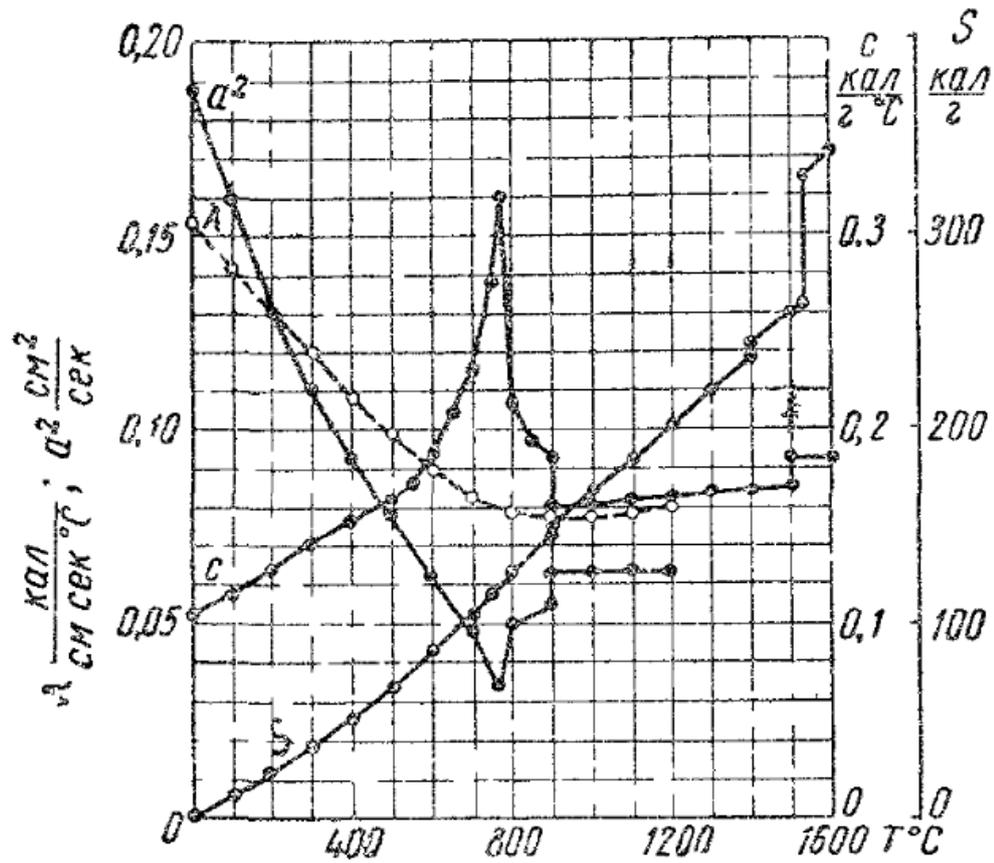


Рис. 2.7 – Теплофизические свойства малоуглеродистой стали с 0,1% углерода

На этом рисунке, кроме зависимостей $\lambda(T)$, $c(T)$ и $a^2(T)$, приведена зависимость теплосодержания $S(T)$. Видно, что эти зависимости имеют достаточно сложный вид. Поэтому, решение уравнения теплопроводности в широком диапазоне температур должно строиться, строго говоря, с разбивкой по отдельным интервалам температур, на которых коэффициент температуропроводности может считаться постоянным.

В дальнейшем будет использоваться не трехмерное, а одномерное уравнение теплопроводности, размерность которого достаточна для описания температурных процесса при контактно-стыковой сварке оплавлением.

§ 2.2.2. Математическое описание процесса нагрева

В приближениях, описанных в § 2.2, для восстановления процессов нагрева и остывания достаточно рассмотрения одномерной модели, в которой учитываются изменения температуры только по времени и по координате x , перпендикулярной оси шва. Следовательно, процесс нагрева может быть описан решением первой краевой задачи относительно функции температуры $T_h(x, t)$, являющейся решением дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial T_h(x, t)}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T_h(x, t)}{\partial x^2} \quad (2.3)$$

с начальными условиями

$$T_h(x, 0) = \varphi(x) \quad (2.4)$$

и граничными условиями

$$\begin{aligned} T_h(0, t) &= \mu_1(t) \\ T_h\left(\frac{\ell}{2}, t\right) &= \mu_2(t) \end{aligned} \quad (2.5)$$

При этом начало координаты x принимается на оси шва и задается в силу симметрии задачи на участке $x \leq \ell/2$.

Без ограничения общности можно принять начальное условие в виде

$$\varphi(x) = 0 \quad (2.6)$$

Кинетику нагрева края пластины в области будущего сварного шва (при $x = 0$) примем в виде линейной функции

$$\mu_1(t) = \beta t \quad (2.7)$$

где параметр β определяет скорость достижения температуры плавления в месте нагрева.

Ввиду кратковременности нагрева, на свободном краю пластины, параллельном шву, температура остается равной нулю

$$\mu_2(t) = 0 \quad (2.8)$$

Решение дифференциального уравнения (2.3), характеризующее распределение температуры в теле в процессе нагрева, выполненное по методике [41], представляется в виде

$$T_h(x, t) = \beta t \left(1 - 2 \frac{|x|}{\ell} \right) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\beta \ell^2 \left(e^{-\left(\frac{2\pi m}{\ell}\right)^2 a^2 t} - 1 \right) \sin \frac{2\pi m}{\ell} |x|}{2\pi^3 m^3 a^2} \quad (2.9)$$

При этом, в результате уже учтено, что после сварки пластина занимает область $-\ell/2 \leq x \leq \ell/2$.

Полученная функция представляет собой координатно-временную функцию нагрева шва и околошовной зоны. В качестве иллюстрации процесса на Рис. 2.8 представлен трехмерный график по координате x и времени t , показывающий изменение температуры участка пластины, примыкающего к центру шва, в течение одной секунды с начала нагрева. При этом, коэффициент температуропроводности a^2 принимался равным $0,09 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$ – среднему значению из графика на Рис. 2.7, длина сваренной пластины ℓ равнялась 38 см, а скорость нагрева β задавалась равной 1500 град/сек, что соответствовало реальной скорости достижения температуры плавления при сварке.

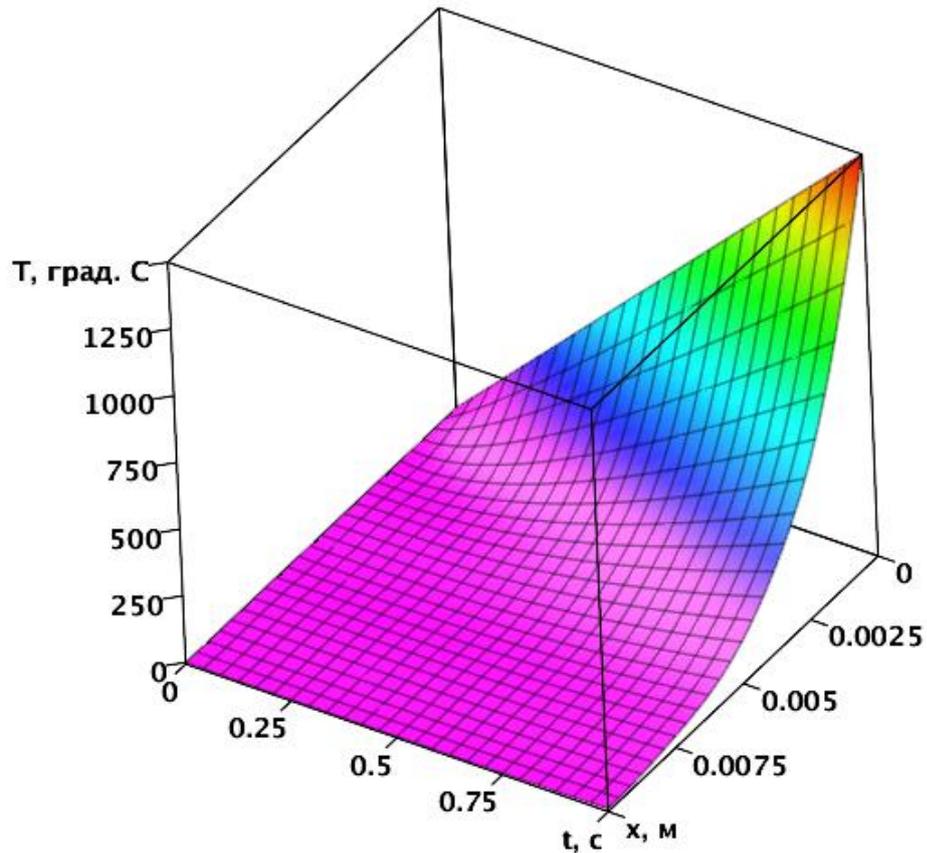


Рис. 2.8 – Нагрев в области сварного шва

Моментом окончания этапа нагрева будем считать достижение температуры плавления в центре шва; в данном случае это время $t = t_1 = 1$ с. В этот момент в соответствии с решением (2.9) при выбранных параметрах пластины максимальная изотерма 300°C находится на расстоянии 3.72 мм от центра шва.

Для описания дальнейших стадий термического цикла сварки в качестве начального условия необходима только функция распределения температуры в момент окончания нагрева. Эта функция представлена на Рис. 2.9 по обе стороны от центра сварного шва.

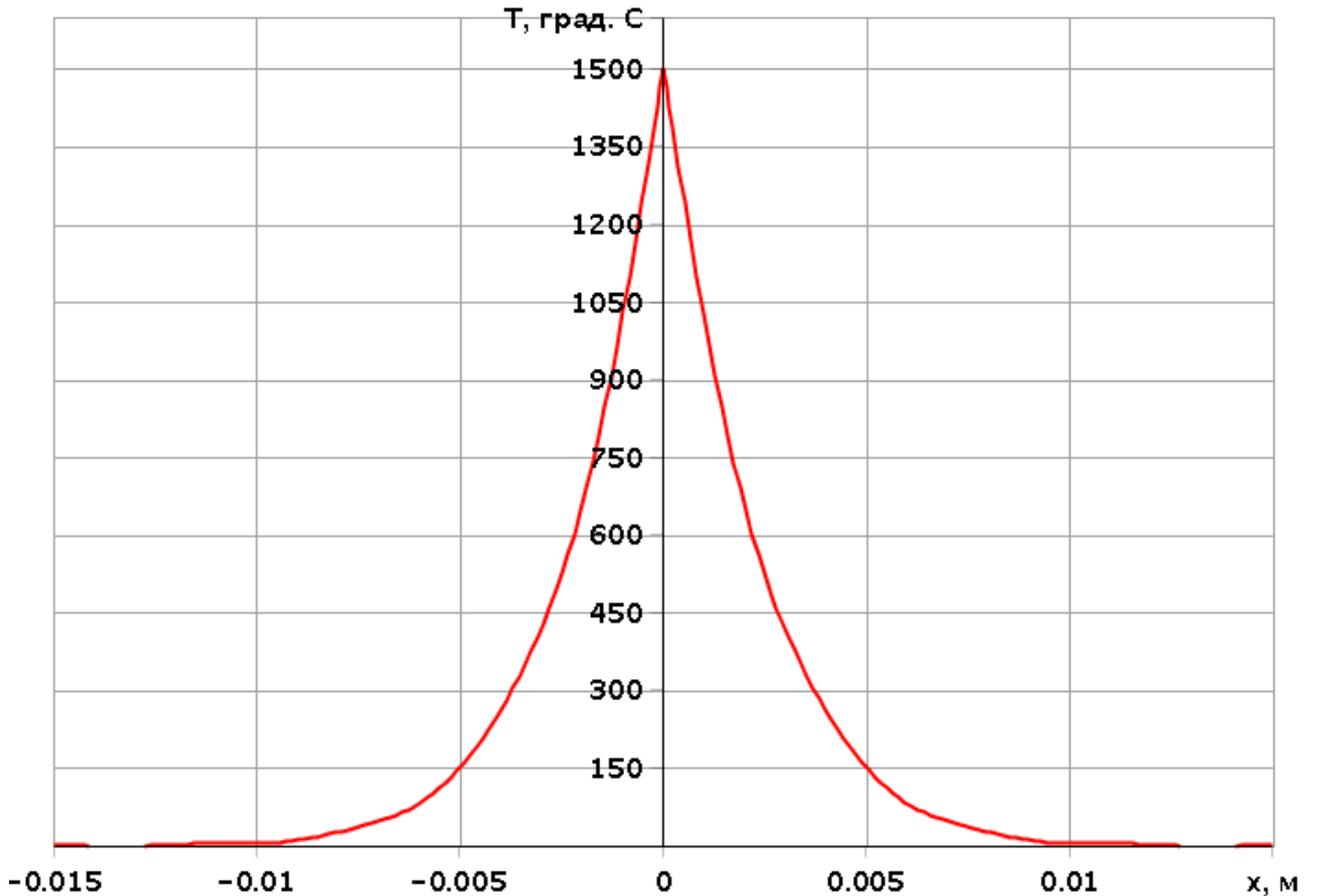


Рис. 2.9 – Функция распределения температуры в момент окончания нагрева

При рассмотрении следующих стадий термического цикла – плавление и затвердевание используют обычно не представление функции температуры в виде ряда, а явные аналитические выражения через функции ошибок [41]. Вследствие этого, функцию окончания нагрева удобнее представить в форме аппроксимирующей кривой, также содержащую функцию ошибок. Для кривой, представленной на Рис. 2.9 в качестве аппроксимирующей функции возьмем:

$$T_a = T_m \Phi^* \left(\frac{x}{2a\sqrt{t_h}} \right) \quad (2.10)$$

где T_m – температура плавления материала, t_h – аппроксимирующий параметр. Это представление коррелирует с выражением для функции влияния локализованного на интервале $\left[-\frac{\ell}{2}, \frac{\ell}{2}\right]$ источника, приведенного в [41].

Подбор t_h по методу наименьших квадратов показал что его значение близко к $1/2$ с.

Графики функции окончания нагрева и аппроксимирующей функции представлены на Рис. 2.10.

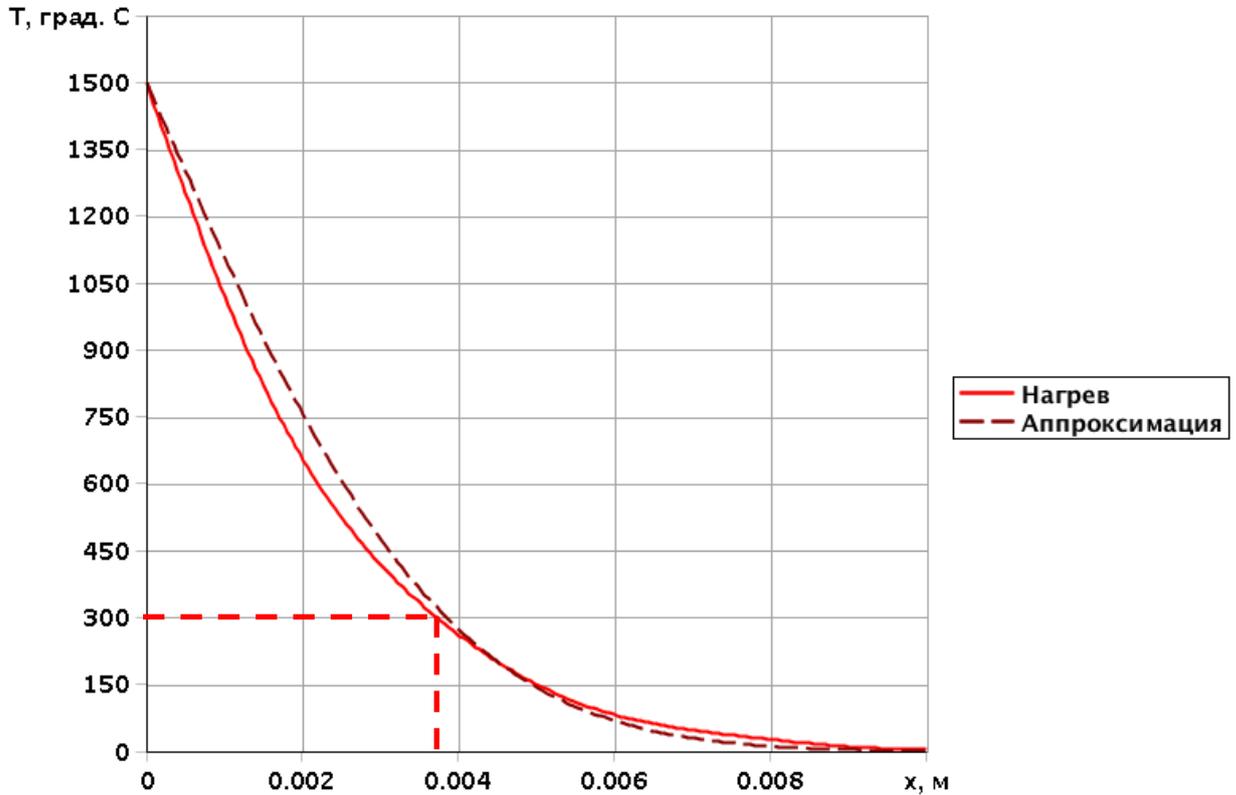


Рис. 2.10 – Распределение температуры в момент окончания процесса нагрева в сравнении с аппроксимирующей функцией

Здесь, сплошной линией показана точная функция распределения температуры в момент окончания нагрева, штриховой – аппроксимирующая функция. Прямыми штриховыми линиями отмечено положение максимальной изотермы 300 °С. Видно, что аппроксимирующая функция с таким параметром t_h близка к функции (2.9) при $t = 1$ с.

§ 2.2.3. Математическое описание процесса плавления и процесса затвердевания

При изменении температуры тела может происходить изменение его физического состояния, в частности при переходе температуры через точку плавления - переход из твердой фазы в жидкую или обратный процесс. На границе фазового перехода все время сохраняется постоянная температура. При движении границы фазового перехода происходит выделение скрытой теплоты плавления - дополнительной тепловой энергии в расчете на 1 кг твердого вещества, которая не повышает температуру расплавляемого тела, а идет на разрушение кристаллической структуры [27, 34, 43].

Задача о распределении температуры при наличии фазового перехода сводится к решению уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial t} &= a_1^2 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, & 0 < x < \xi \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} &= a_2^2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, & \xi < x \end{aligned} \quad (2.11)$$

где $T_1(x, t)$ и $T_2(x, t)$ – функции распределения температур в жидкой и твердой фазах вещества соответственно.

В качестве граничных условий для первого уравнения (2.11) используем равенства

$$T_1 = T_m, \quad x = 0, \xi \quad (2.12)$$

Для второго уравнения очевидным граничным условием будет

$$T_2 = T_m, \quad x = \xi, \quad (2.13)$$

а, в качестве начального условия примем распределение температуры в момент окончания стадии нагрева.

Положение границы раздела фаз $x = \xi(t)$ определяется из условия Стефана [41]

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=\xi} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=\xi} = \gamma \rho \frac{d\xi}{dt} \quad (2.14)$$

где γ – скрытая теплота плавления.

В связи с тем, что рассматривается температурное поле вблизи точки плавления, можно принять равенство коэффициентов теплопроводности и температуропроводности разных фаз: $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ и $a_1 = a_2 = a$.

Решение задачи (2.11) - (2.14) будем искать в виде, коррелирующим с известным решением задачи Стефана [3, 14, 41]:

$$\begin{aligned} T_1 &= T_m \\ T_2 &= T_m \Phi * \left(\frac{x - \xi}{2a\sqrt{t}} \right) \end{aligned} \quad (2.15)$$

В решении (2.15), удовлетворяющем уравнениям (2.11) и граничным условиям (2.12), (2.13) единственной неизвестной функцией является $\xi = \xi(t)$. Подставляя (2.15) в условие Стефана (2.14) получим явное уравнение

$$\lambda \frac{T_m}{a\sqrt{\pi}\sqrt{t}} = \gamma \rho \frac{d\xi}{dt} \quad (2.16)$$

из которого прямым интегрированием находим

$$\xi(t) = \frac{2\lambda T_m \sqrt{t}}{a\gamma\rho\sqrt{\pi}} + C_1 \quad (2.17)$$

Определив постоянную C_1 из условия совпадения функции распределения температуры в твердой фазе с функцией распределения температуры при нагреве в момент его окончания, получим окончательно

$$T_2 = T_m \Phi * \left(\frac{2\lambda T_m (\sqrt{t} - \sqrt{t_h}) - a\gamma\rho x\sqrt{\pi}}{2a^2\gamma\rho\sqrt{\pi}\sqrt{t}} \right) \quad (2.18)$$

Завершение процесса плавления определим по достижению границы раздела фаз точки, соответствующей границе шва. График распределения темпера-

туры в момент окончания плавления для шва шириной 4 мм представлен на Рис. 2.11.

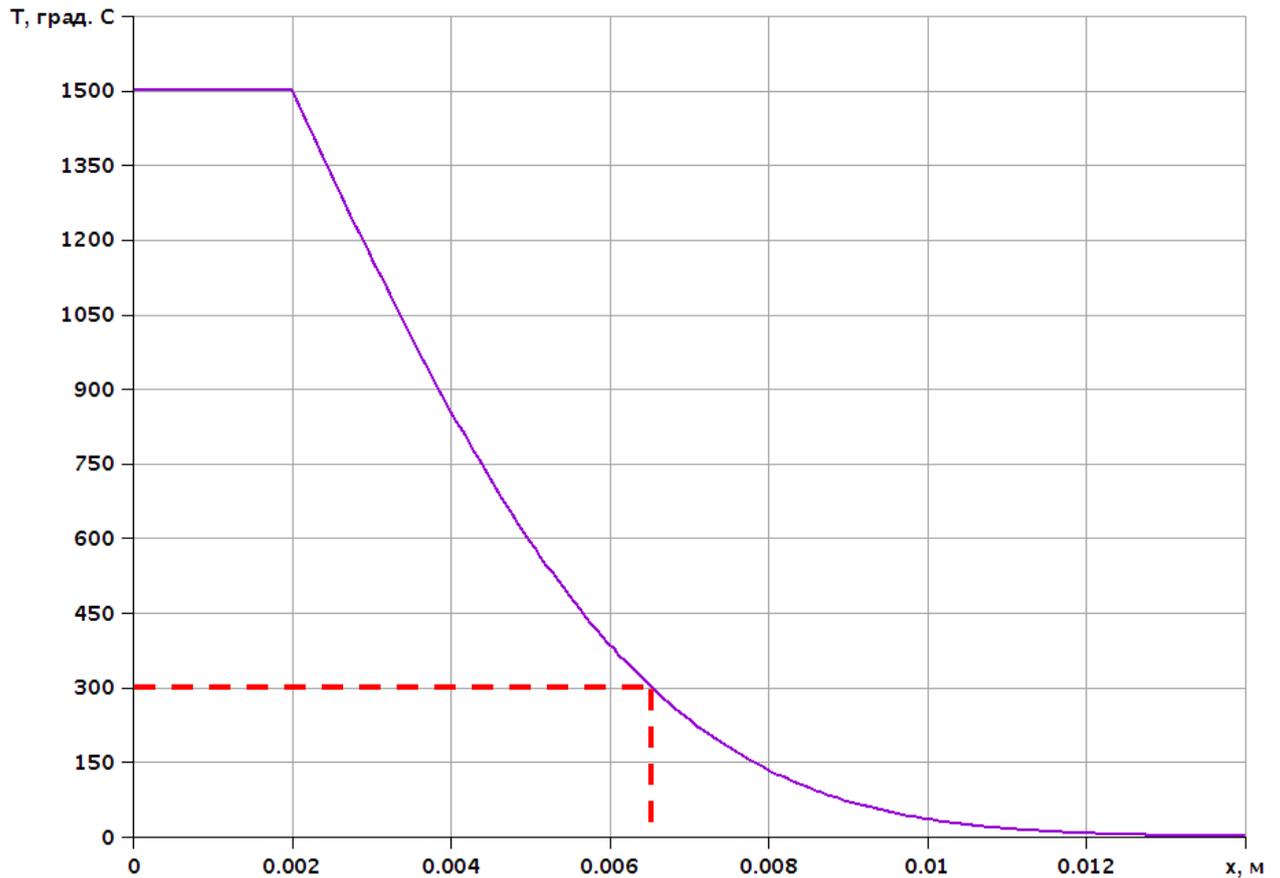


Рис. 2.11 – Распределение температуры при достижении края сварного шва ($x = 2$ мм)

На этом рисунке, также как и на Рис. 2.10, отмечено положение изотермы 300°С. В процессе плавления она отодвинулась от центра шва по сравнению с моментом окончания процесса нагрева на величину 2.81 мм.

Следующий за процессом плавления процесс остывания состоит из двух частей: процесса затвердевания и непосредственно остывания.

Как было отмечено выше, процесс затвердевания является обратным процессу плавления; поэтому для описания распределения температуры в процессе затвердевания можно воспользоваться теми же условиями, что и для процесса плавления, взяв только в уравнении (2.14) знак минус при производной от функции $\xi(t)$:

$$T_1 = T_2 = T_m, \quad x = \xi$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=\xi} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=\xi} = -\gamma\rho \frac{d\xi}{dt} \quad (2.19)$$

С учетом (2.15), дифференциальное уравнение (2.19) принимает вид

$$\lambda \frac{T_m}{a\sqrt{\pi}\sqrt{t}} = -\gamma\rho \frac{d\xi}{dt} \quad (2.20)$$

Решением этого уравнения является функция:

$$\xi(t) = -\frac{2\lambda T_m \sqrt{t}}{a\gamma\rho\sqrt{\pi}} + C_2 \quad (2.21)$$

где C_2 - константа.

Для определения константы C_2 , используется условие, в соответствии с которым в момент начала процесса затвердевания t_m (или - окончания процесса плавления) функция $\xi(t)$ равняется величине w_m - ширине зоны плавления с одной стороны от центра сварного шва:

$$\xi(t_m) = -\frac{2\lambda T_m \sqrt{t_m}}{a\gamma\rho\sqrt{\pi}} + C_2 = w_m.$$

Таким образом,

$$C_2 = \frac{a\gamma\rho w_m \sqrt{\pi} + 2\lambda T_m \sqrt{t_m}}{a\gamma\rho\sqrt{\pi}} \quad (2.22)$$

В итоге, функция $\xi(t)$ принимает вид:

$$\xi(t) = \frac{2\lambda T_m (\sqrt{t_m} - \sqrt{t})}{a\gamma\rho\sqrt{\pi}} + w_m \quad (2.23)$$

а распределение температуры в процессе затвердевания:

$$T_2 = T_m \left[1 + \Phi \left(\frac{w_m - x}{2a\sqrt{t}} + \frac{\lambda T_m (\sqrt{t_m} - \sqrt{t})}{a^2 \gamma \rho \sqrt{\pi} \sqrt{t}} \right) \right] \quad (2.24)$$

Завершение процесса затвердевания определим по достижению границы раздела фаз точки центра шва. График распределения температуры в момент окончания процесса затвердевания для шва шириной 4 мм представлен на Рис. 2.12.

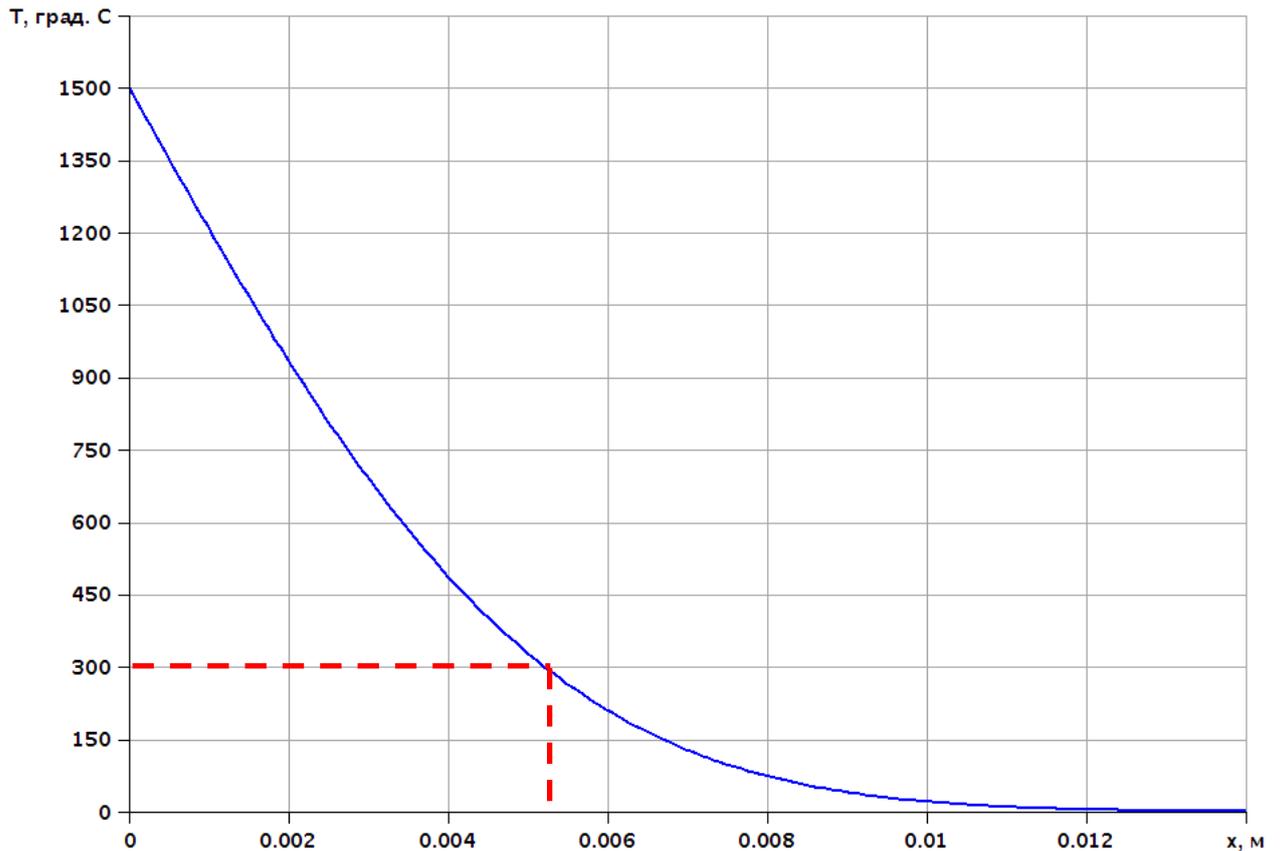


Рис. 2.12 – Распределение температуры в момент окончания процесса затвердевания

Полученную функцию $T_2(x, t_f)$ в момент окончания процесса затвердевания t_f можно использовать как начальную функцию для последующего процесса остывания пластины.

Интересно отметить положения окончания процессов нагрева, плавления и затвердевания на одном графике (Рис. 2.13)

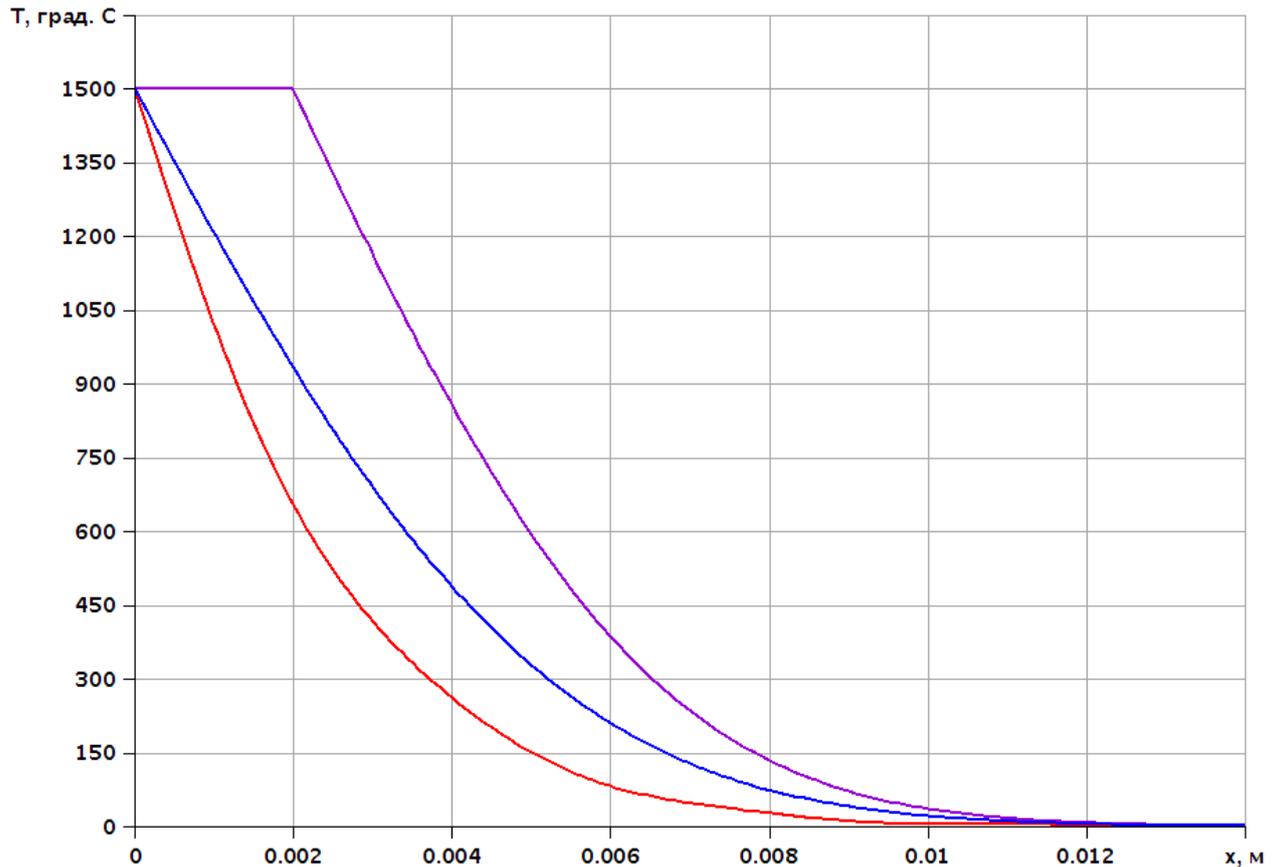


Рис. 2.13 – Сравнение конечных состояний процессов нагрева, плавления и затвердевания

Здесь, красной линией обозначена кривая распределения температур в момент окончания нагрева, фиолетовой – в момент окончания плавления, синей – в момент окончания затвердевания. Из этого сопоставления видна погрешность, допускаемая в начальных условиях для процесса остывания при замене общего процесса, включающего фазовый переход, одной стадией нагрева.

§ 2.2.4. Математическое описание процесса охлаждения

При определении распределений температуры в процессе охлаждения шва в тех же зонах, что и для процесса нагрева и плавления/затвердевания, будем применять также одномерные уравнения теплопроводности относительно функций температуры $T_c(x, t)$ [41], непосредственно связанными с процессом затвердевания за счет начальных условий.

В качестве основного уравнения, используется дифференциальное уравнение параболического типа 2-ого порядка:

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} \quad (2.25)$$

где a^2 – коэффициент температуропроводности материала пластин. При этом начало координаты x принимается на оси шва и задается на участке $-\ell/2 \leq x \leq \ell/2$.

В качестве начальной функции распределения температуры в момент начала остывания шва принимается функция, описывающая распределение температуры при полном затвердевании сварного шва, показанная на Рис. 2.12. Эта функция получается из (2.24) при $t = t_f$. В тоже время ее можно аппроксимировать и более простым выражением

$$\varphi(x) = T_m \Phi^* \left(\frac{x}{2a\sqrt{t_f}} \right) \quad (2.26)$$

На Рис. 2.14 представлены обе функции.

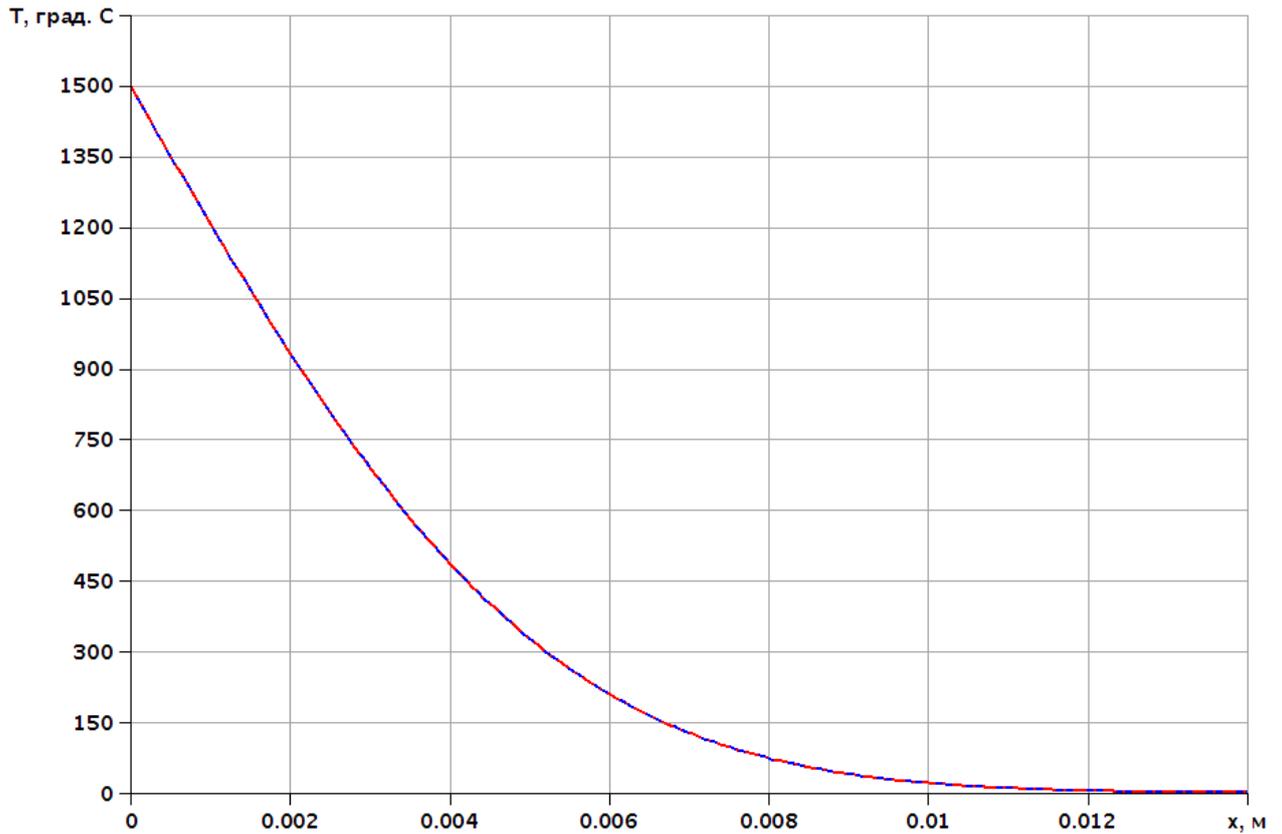


Рис. 2.14 – Сравнение начальных функций для процесса остывания

Видно, что они полностью совпадают.

Общие решения уравнения (2.25) на симметричном интервале $-\ell/2 \leq x \leq \ell/2$ (ℓ - длина сваренной пластины) при нулевых значениях температуры по её внешним торцам представляется на основе ряда Фурье [41]:

$$T_c(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n e^{-\left(\frac{\pi(2n+1)}{\ell}\right)^2 a^2 t} \cos\left(\frac{\pi(2n+1)}{\ell} x\right) \quad (2.27)$$

с коэффициентами C_n , определяемыми по формуле:

$$C_n = \frac{2}{\ell} \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \varphi(\xi) \cos\left(\frac{\pi(2n+1)}{\ell} \xi\right) d\xi \quad (2.28)$$

где под φ понимается выражение (2.26).

Для выбранных расчетных параметров функция распределения температуры в процессе остывания показана на Рис. 2.15.

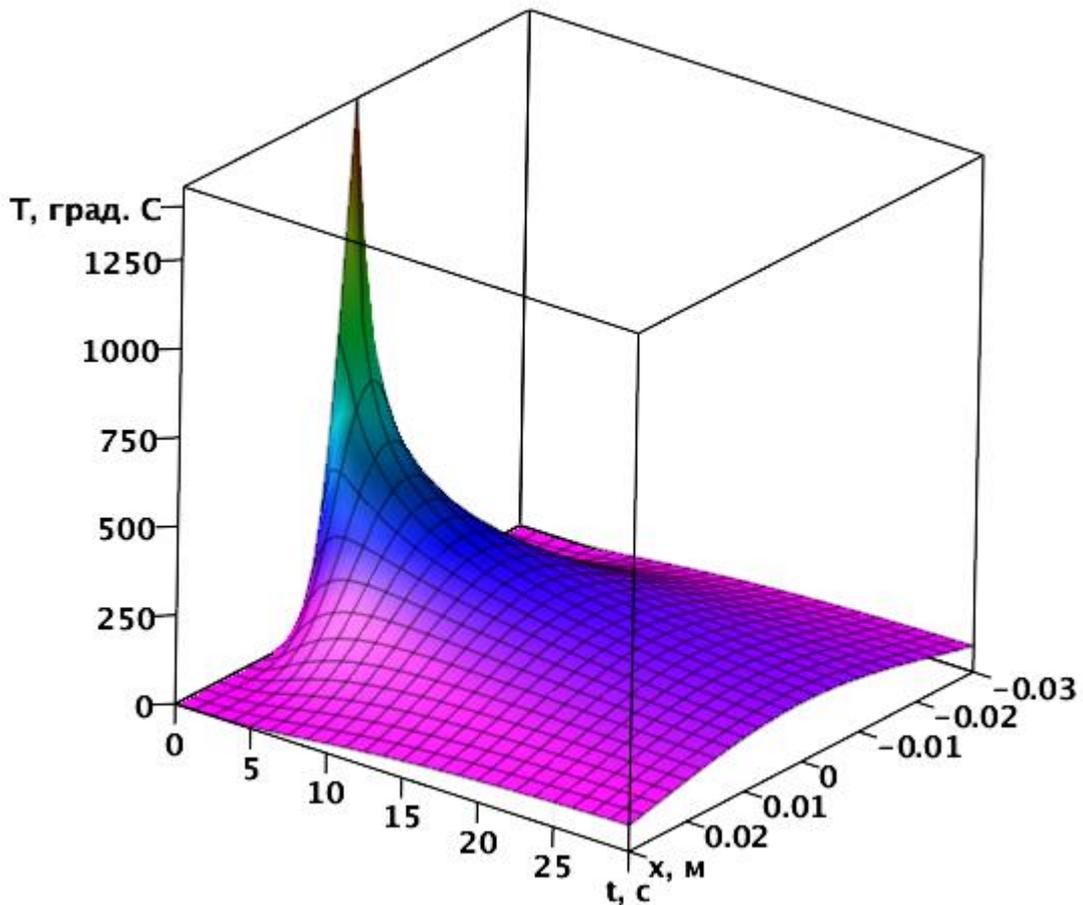


Рис. 2.15 – Распределение температуры в процессе остывания

На основе полученной функции остывания определяется расположение максимальных изотерм, сохраняющихся в виде цветов побежалости на поверхности сварного соединения.

§ 2.2.5. Технология нахождения положений экстремальных изотерм

При нахождении положений экстремальных изотерм дополнительными неизвестными, кроме их координат, являются моменты времени, на которых достигаются соответствующие им максимумы температуры (T_{max}) при остывании шва. Условия для определения этих неизвестных могут быть сформулированы в виде двух уравнений:

$$T_c(x, t) = T_{\max}, \quad \frac{\partial T_c(x, t)}{\partial t} = 0 \quad (2.29)$$

Решение этих уравнений дает представление о максимальном удалении определенной температурной зоны от центра сварного шва.

Графическое представление решения этой системы уравнений для случая $T_{\max} = 300^\circ\text{C}$ представлено на Рис. 2.16

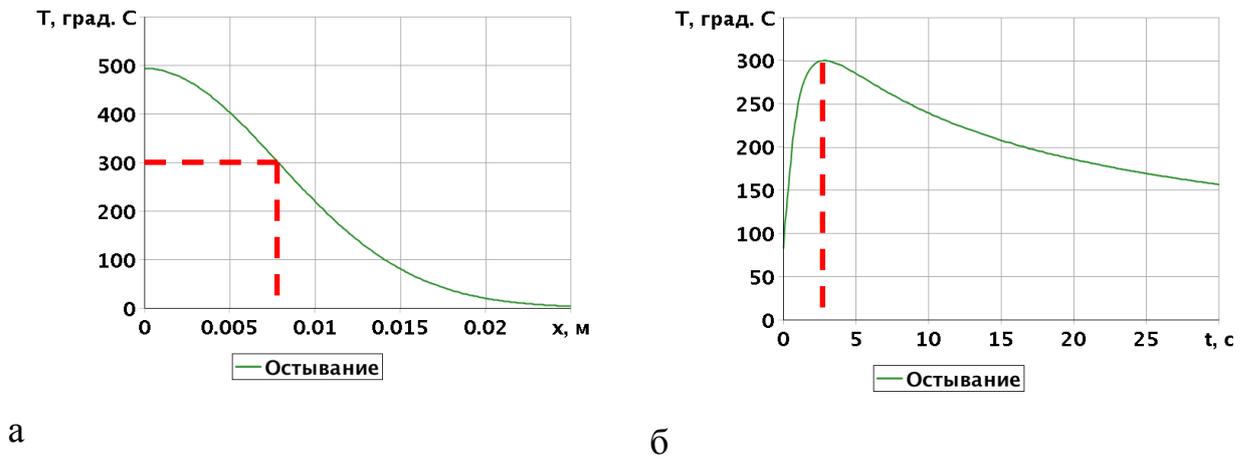


Рис. 2.16 – Графическое представление решения системы уравнений (2.29)

На Рис. 2.16,а изображена кривая распределения температуры по оси x в момент времени t_{\max} с выделенным штриховыми линиями уровнем 300°C , а на Рис. 2.16,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 температурный уровень в 300°C возвращается к центру шва.

Подстановка выражений (2.27), (2.28) в (2.29) и решение полученной системы относительно x и t дает значение координаты экстремальной изотермы и время ее достижения.

В рассматриваемом случае, максимальное удаление температурного уровня в 300°C было достигнуто в момент времени 2.85 с и составляет 7.83 мм от центра сварного шва. Эта координата в дальнейшем не меняет своего положения и идентифицируется синим цветом побежалости.

§ 2.3. Математические модели термических циклов при контактно-стыковой сварке оплавлением

§ 2.3.1. Контактно-стыковая сварка оплавлением

Контактная стыковая сварка - высокопроизводительный способ получения соединений, когда детали одновременно соединяются по всей площади касания (площади сечения). Схема КССО представлена на Рис. 2.17 [38].

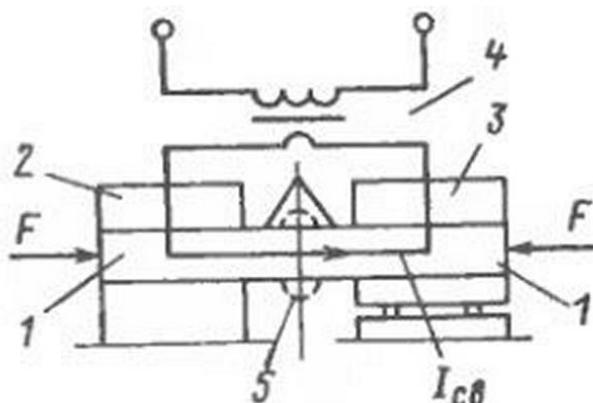


Рис. 2.17 – Схема процесса КССО

В соответствии со схемой, детали 1 закрепляют в токоподводящих зажимах 2, 3, один из которых (3) - подвижный. Детали сжимают с усилием $F = 3-5$ кН, включают сварочный трансформатор 4 и нагревают сварочным током до температуры расплавления металла в стыке. После нагрева сварочный ток выключают и резко увеличивают усилие до усилия осадки, что вызывает удаление жидкого металла. При этом обеспечивается формирование физического контакта и образование прочного соединения. После сварки на деталях образуется утолщение - грат 5, который затем удаляется.

§ 2.3.2. Восстановление стадии остывания термического цикла контактной стыковой сварки стержней по температурным следам

В качестве модельного температурного цикла, реконструкцию которого можно осуществить по температурным следам, воспользуемся результатами

численного и аналитического решений температурной задачи соединения контактной стыковой сваркой оплавлением двух одинаковых стержней [18].

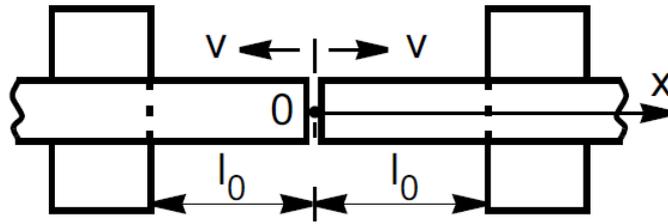


Рис. 2.18 – Модель соединения методом КССО двух одинаковых стержней

Стадия охлаждения при такой сварке может быть описана аналитическим выражением [18]:

$$T(x, t) = T_0 + \frac{1}{2} T_c F(x, t), \quad T_c = (T_b - T_0) e^{-\frac{vd}{a^2}} \quad (2.30)$$

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

Здесь:

$T(x, t)$ - температура в точке с координатой x , отсчитываемой от центра шва и направленной вдоль оси стержня;

t - момент времени, задаваемый от начала остывания;

a^2 - коэффициент температуропроводности материала стержня, принимаемый не зависящим от температуры.

В выражение (2.30) также входят и некоторые параметры термического цикла сварки до начала охлаждения:

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 нагреве.

При решении обратной задачи восстановления зависимости (2.30) по температурным следам, остающимся на поверхности стержня после сварки, параметры ν , d и T_b заранее неизвестны. Если свариваемые детали были изготовлены из материала, на поверхности которого остаются видимые следы термического воздействия, например, полосы цветов побежалости на сталях, или, если при подготовке к сварке применялись средства визуализации термического воздействия, например, наносились плавящиеся покрытия (термокарандаш), то по окончании стадии остывания можно зафиксировать координаты предельных изотерм – расстояний от центра сварного шва до точек, в которых температуры в процессе сварки не превысили некоторых известных значений.

В случае естественных следов, регистрируемых визуально (цвета побежалости) или инструментально (толщина окисной пленки, её структура, химический состав), температура предельной изотермы считается известной либо может быть определена из несложного эксперимента с нагревом малого образца материала. В случае искусственных следов, образуемых на поверхности термосоставом (черта, оставленная термокарандашом), температура предельной изотермы соответствует температуре плавления или изменения цвета термосостава и, как правило, может быть определена с более высокой точностью, чем по естественным следам. Естественной предельной изотермой является также видимая граница зоны сплавления, где температура в начале остывания равна температуре затвердевания (температура солидуса) материала.

Уравнение, связывающее температуру предельной изотермы, её координату и время достижения выбранной предельной температуры от начала остывания, получается из выражения (2.30), если его продифференцировать по времени и приравнять результат нулю [7]:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{1}{2} T_c \frac{\partial F(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (2.31)$$

Из рассмотрения выражения (2.30) следует, что для восстановления стадии остывания достаточно знать расположение двух предельных изотерм, т.е. их координаты x_1, x_2 и температуры $T_1 = T(x_1, t_1)$, $T_2 = T(x_2, t_2)$, имея в виду, что времена достижения t_1, t_2 температурами T_1 и T_2 этих координат в общем случае неизвестны. Тогда из системы двух уравнений типа (2.31):

$$\left. \frac{\partial F(x_j, t)}{\partial t} \right|_{t=t_j} = 0, \quad j = 1, 2 \quad (2.32)$$

и уравнения

$$\frac{T_1 - T_0}{T_2 - T_0} = \frac{F(x_1, t_1)}{F(x_2, t_2)} \quad (2.33)$$

в сумме содержащих три неизвестные величины t_1, t_2 и v , можно определить сначала скорость v , а затем и времена t_1 и t_2 .

Определять скорость v удобно методом подбора, при котором задаётся некоторое начальное значение v ; затем из уравнений (2.32) определяются времена t_1 и t_2 ; далее величины t_1, t_2 и v подставляются в уравнение (2.33), которое в этом случае следует представить в форме

$$U(v) = \frac{T_1 - T_0}{T_2 - T_0} - \frac{F(x_1, t_1, v)}{F(x_2, t_2, v)} \quad (2.34)$$

где $U(v)$ - невязка. Затем, исходя из величины и знака невязки, принимается следующее приближение для v . Процесс продолжается до тех пор, пока абсолютная величина невязки не станет меньше некоторого наперёд заданного значения.

По найденному значению v , а, следовательно, и $F(x, t)$, из уравнения (2.33), задав $x = 0$ и $t = 0$, можно определить температуру для центра шва в начале стадии остывания, т.е. в момент завершения процесса осадки

$$T_c = (T_b - T_0) e^{-\frac{vd}{a^2}} \quad (2.35)$$

Определять эту температуру необязательно, так как её можно исключить из (2.30), используя для этого выражение для одной из предельных изотерм, например, при $x = x_1$. В результате выражение (2.30) преобразуется к виду

$$T(x, t) = T_0 + [T(x_1, t_1) - T_0] \frac{F(x, t)}{F(x_1, t_1)} \quad (2.36)$$

пригодному для дальнейшего численного анализа.

Исходные данные для получения расчётных значений v , t_1 и t_2 были взяты из [18]: $T_0 = 300\text{К}$ - температура стержня перед началом нагрева, соответствующая нормальным условиям сварки стальных изделий; $x_1 = 0.2\text{ мм}$ - полуширина шва – координата первой предельной изотермы, соответствующая температуре затвердевания стали $T_1 = 1773\text{К}$; $x_2 = 15\text{ мм}$ - координата второй предельной изотермы, соответствующая температуре $T_2 = 573\text{К}$, при которой проявляется наиболее отчётливая полоса побежалости синего цвета.

По результатам расчёта, использующего алгоритм решения обратной задачи (2.32) – (2.36), была определена скорость сварки $v = (0.937 \pm 0.01)\text{ мм/с}$ и времена достижения максимумов температуры по первой и второй предельной изотермам: $t_1 = (0.43 \pm 0.02)\text{ мс}$, $t_2 = (18.095 \pm 0.005)\text{ с}$. Полученное значение скорости сварки оказалось практически совпадающим с величиной, заданной в примере [18] (0.94 мм/с), что подтверждает правильность выбранного подхода к решению задачи восстановления стадии остывания термического цикла данного вида сварки.

Распределение температуры в процессе остывания в виде трехмерного графика показано на Рис. 2.19, а на Рис. 2.20 – в виде изменений во времени на некоторых расстояниях от центра шва.

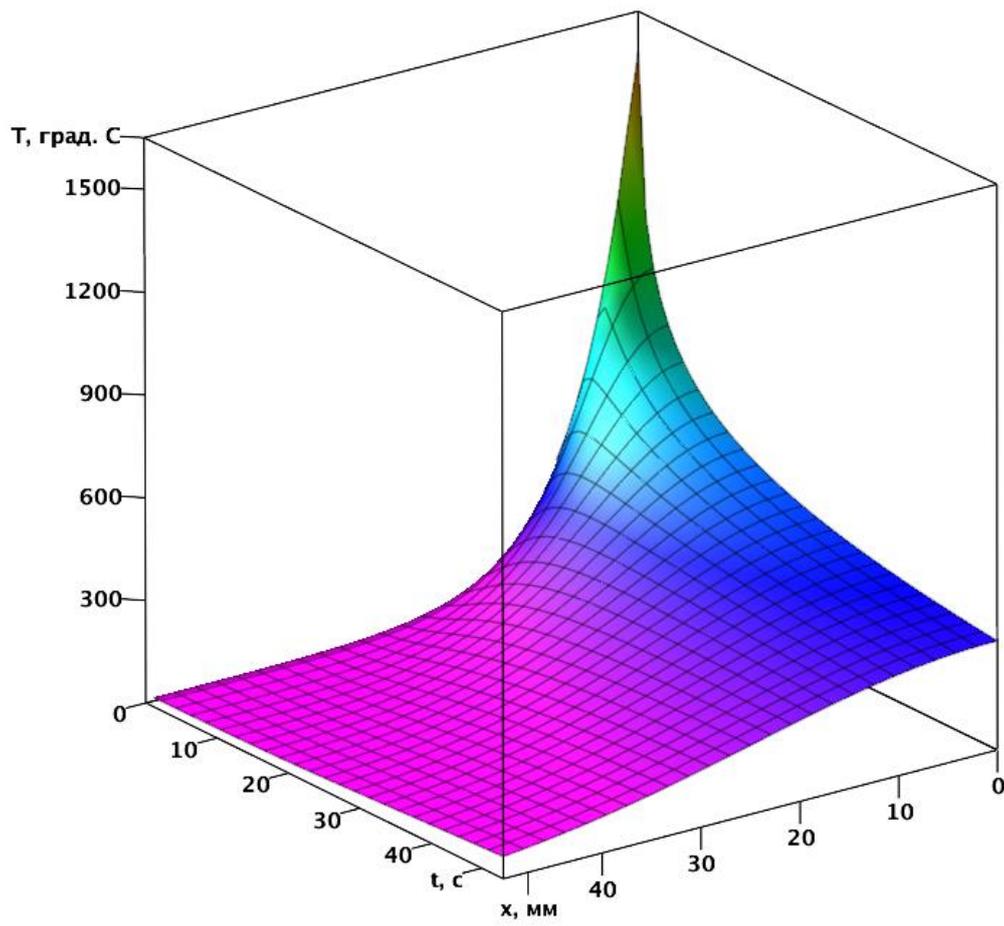


Рис. 2.19 – Распределение температуры в зависимости от координаты и от времени

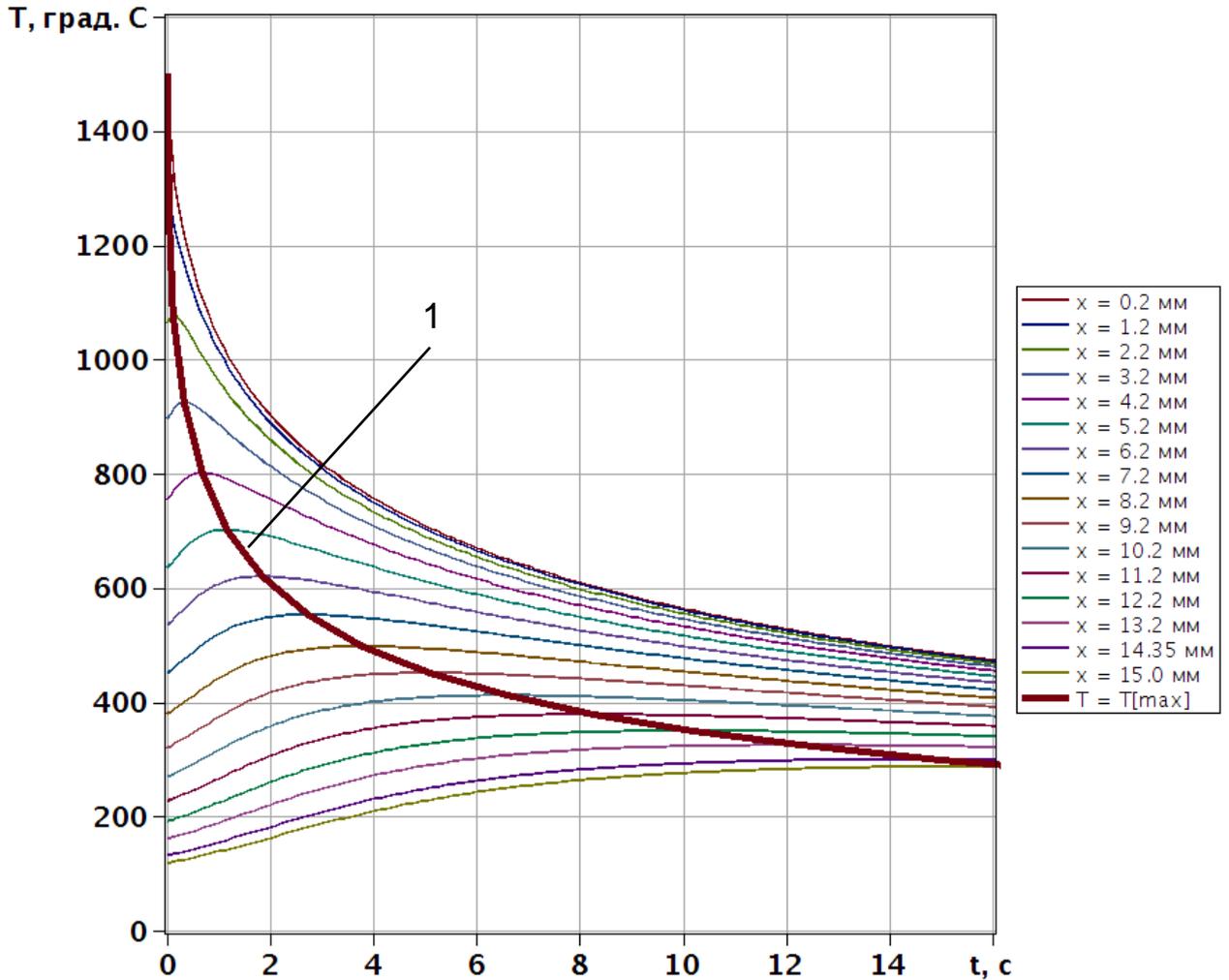


Рис. 2.20 – Распределение температуры на определенных расстояниях от центра шва

На Рис. 2.20 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 до 15 мм. Положения этих максимумов будет использовано ниже при определении остаточного НДС в окрестности шва.

§ 2.3.3. Контактная стыковая сварка рельсов

Контактная стыковая сварка широко применяется при сварке рельсов [35,48,61]. Возникающее при таком типе сварки температурное поле, по определению, - одномерное, что облегчает решение обратной задачи восстановления

ния температурного цикла сварки по характерным следам максимальных изотерм. Заметим, что стыковая сварка оплавлением, при которой возникает одномерное температурное поле, распространена не только при создании бесстыкового железнодорожного пути, но и в строительстве - в качестве одного из основных типов сварки стержневой арматуры железобетонных конструкций; также, как упоминалось ранее, всё шире она применяется и при соединении торцов стальных труб, в том числе - большого диаметра для морских магистральных газопроводов [23].

В качестве математической модели процесса нагрева термического цикла контактной стыковой сварки оплавлением используем аналитическое выражение [35,61]:

$$T = T_0 + \frac{q}{c\rho} \left(\sqrt{\frac{t}{\pi a^2}} e^{-\frac{x^2}{4a^2 t}} - \frac{x}{2a^2} \Phi^* \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} \right) \right) \quad (2.37)$$

где

- $T(x, t)$ - температура в точке с координатой x , отсчитываемой от центра шва и направленной вдоль оси стержня;
- t - момент времени задаваемый от начала остывания;
- q - плотность теплового потока источника нагрева;
- T_0 - температура стержней до сварки;

Исходные данные для получения графиков распределения температуры в процессе нагрева с использованием функции (2.37) были взяты из [61]:

- $T_0 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ - температура стержня перед началом нагрева, соответствующая нормальным условиям сварки стальных изделий;
- $t_h = 120 \text{ с}$ - момент времени окончания процесса нагрева;
- $q = 4 \text{ МВт/м}^2$ - плотность теплового потока источника нагрева.

Графическое отображение функции (2.37) при выбранных параметрах представлено на Рис. 2.21.

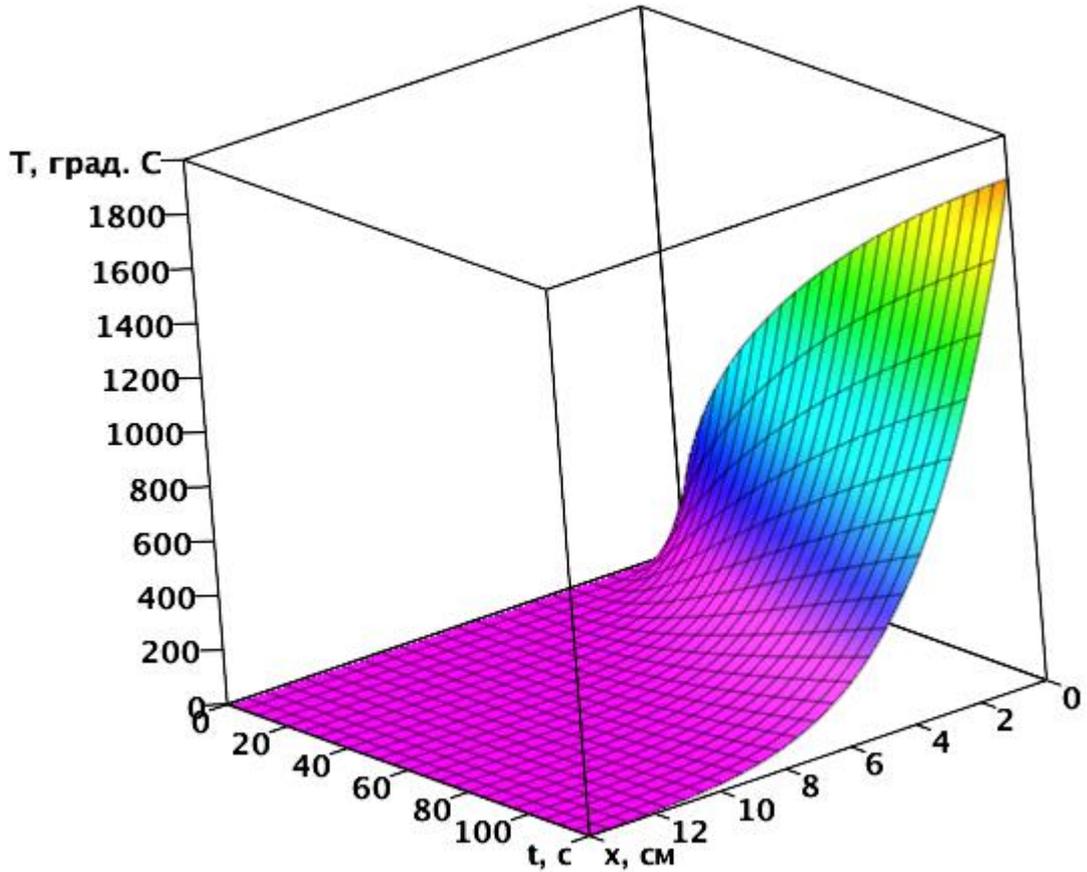


Рис. 2.21 – Распределение температуры в процессе нагрева при сварке рельсов

Для нахождения распределения температуры в процессе остывания решается дифференциальное уравнение (2.25) с использованием граничных условий

$$T\left(-\frac{\ell}{2}, t\right) = T\left(\frac{\ell}{2}, t\right) = T_0$$

и начальной функции $\varphi(x)$.

В обратной задаче восстановления зависимостей по температурным следам на поверхности стержня после сварки, параметры q и ℓ (длина (вылет) стержней, измеряемая от торца стержня до электрода стыковой машины) могут быть заранее неизвестны. Однако, при наличии на оси стержня идентифицированных положений максимумов температур, их определение для нахождения остаточных напряжений, как будет показано ниже, необязательно.

Для определения длины стержней $\ell/2$, достаточно воспользоваться условием, на основании которого температура в точке $x = \ell/2$ в момент окончания процесса нагрева равняется температуре перед началом нагрева T_0 :

$$T\left(\frac{\ell}{2}, t_h\right) = T_0$$

Подставляя в уравнение (2.37) $x = \ell/2$ и $t = t_h$, получим для определения длины стержней $\ell/2$ неявное уравнение

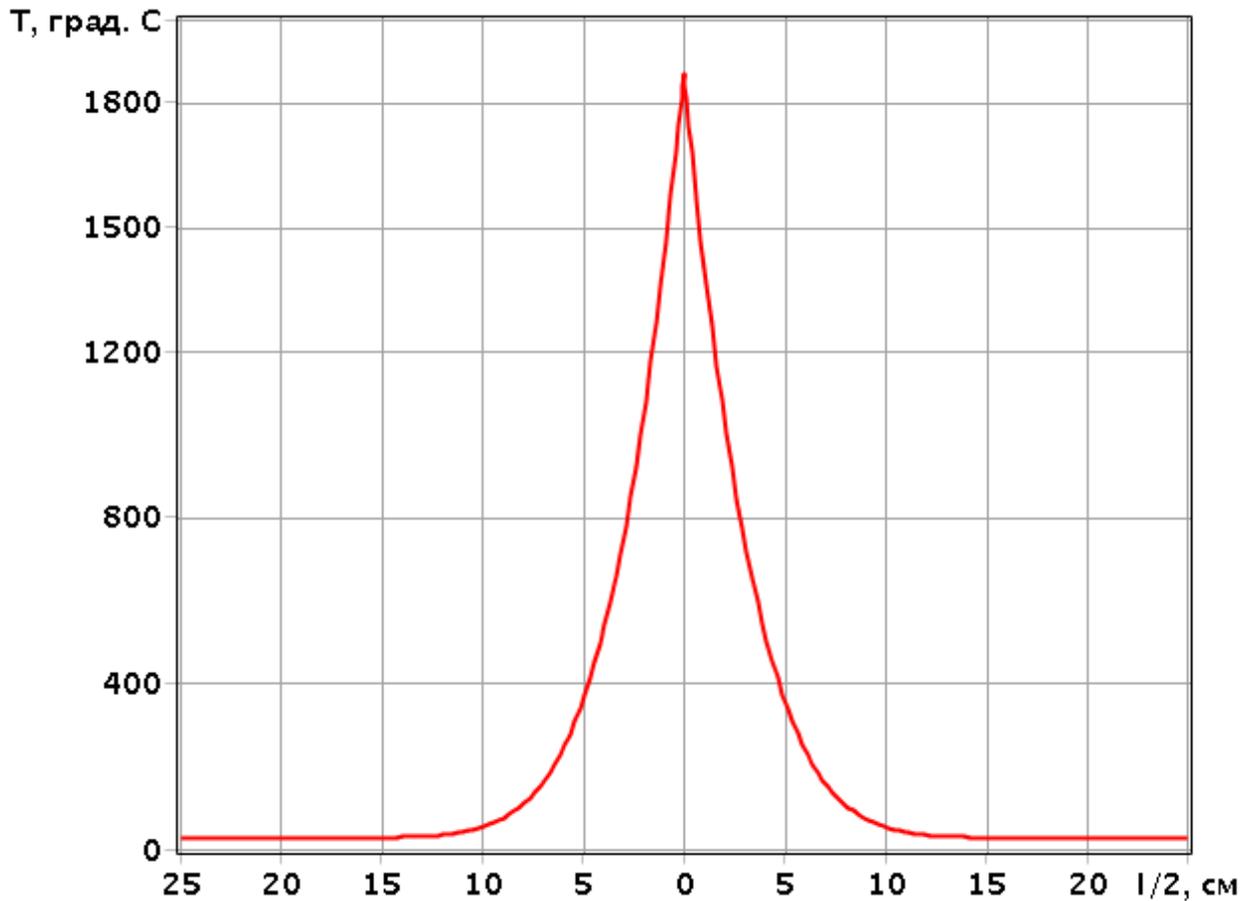
$$\sqrt{\frac{t}{\pi a^2}} e^{-\frac{(\ell/2)^2}{4a^2 t_h}} - \frac{\ell/2}{2a^2} \Phi^* \left(\frac{\ell/2}{2a\sqrt{t_h}} \right) = 0. \quad (2.38)$$

Его графическое решение при выбранных параметрах дает значение $\ell/2 = 25$ см.

Предыдущие рассмотрения термического цикла с учетом фазового перехода показывают, что при взятии в качестве начальной функции процесса остывания конечного распределения температуры нагрева допускается относительно небольшая погрешность. Поэтому ниже для определения температуры в процессе остывания в качестве начальной функции $\varphi(x)$ принимается функция нагрева (2.37) с учетом момента времени окончания процесса нагрева t_h :

$$\varphi(x) = T_0 + \frac{q}{c\rho} \left(\sqrt{\frac{t_h}{\pi a^2}} e^{-\frac{x^2}{4a^2 t_h}} - \frac{x}{2a^2} \Phi^* \left(\frac{x}{2a\sqrt{t_h}} \right) \right) \quad (2.39)$$

График этой функции изображен на Рис. 2.22.

Рис. 2.22 – Начальная функция $\varphi(x)$

Аналогично методу математического описания процесса остывания, описанному в параграфе § 2.2.4, распределение температуры представляется на основе ряда Фурье [41]:

$$T_c(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n e^{-\left(\frac{\pi(2n+1)}{\ell}\right)^2 a^2 t} \cos\left(\frac{\pi(2n+1)}{\ell} x\right) \quad (2.40)$$

с коэффициентами C_n , определяемыми по формуле:

$$C_n = \frac{2}{\ell} \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \varphi(\xi) \cos\left(\frac{\pi(2n+1)}{\ell} \xi\right) d\xi \quad (2.41)$$

где под φ понимается выражение (2.39).

Для данного случая распределение температуры в процессе остывания показано на Рис. 2.23.

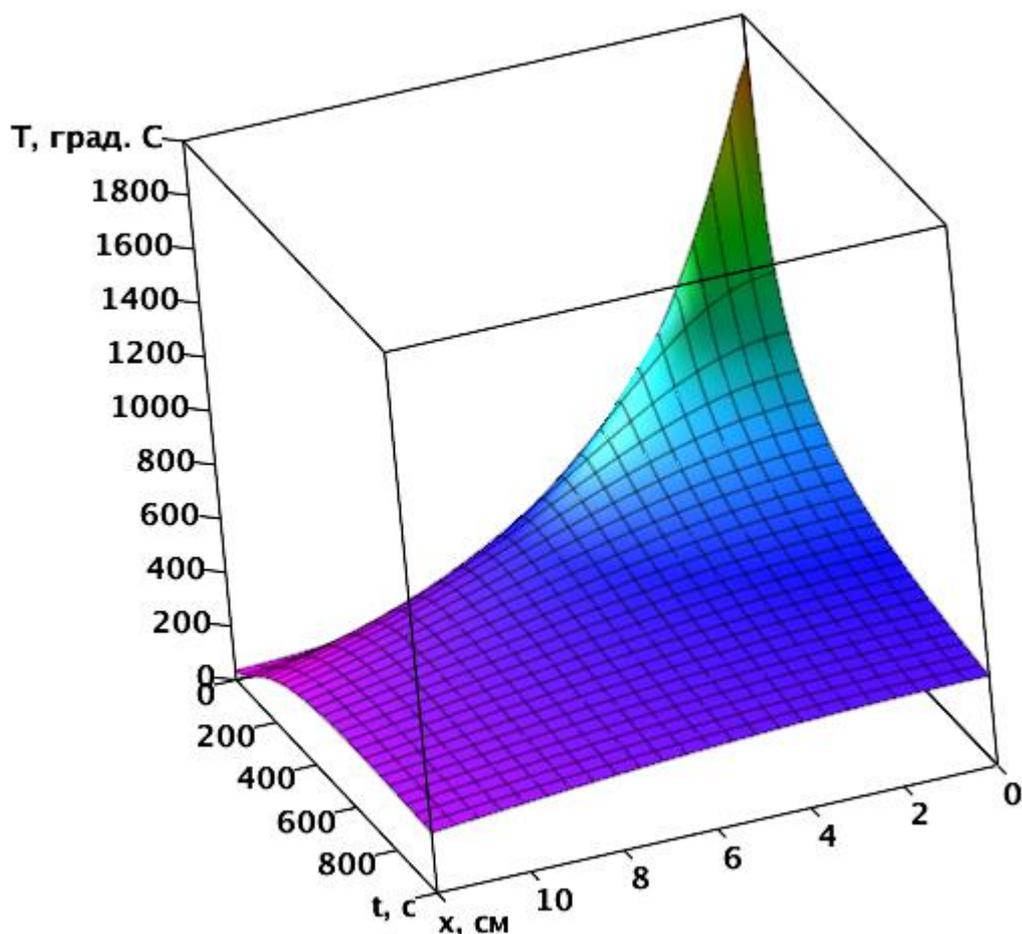


Рис. 2.23 – Распределение температуры в процессе остывания

Используя условие (2.29), определяются момент времени и координата максимального удаления синей линии побежалости (300°C) от центра шва. В рассматриваемом примере это расстояние составляет 94 мм, которое достигается через 421 с.

Полагая, что полученное выражение для процесса остывания справедливо и для всех точек околошовной зоны, можно определить значения максимальных изотерм в рассматриваемой точке. На Рис. 2.24 показаны графики распределения температуры в процессе остывания на различных расстояниях от центра шва.

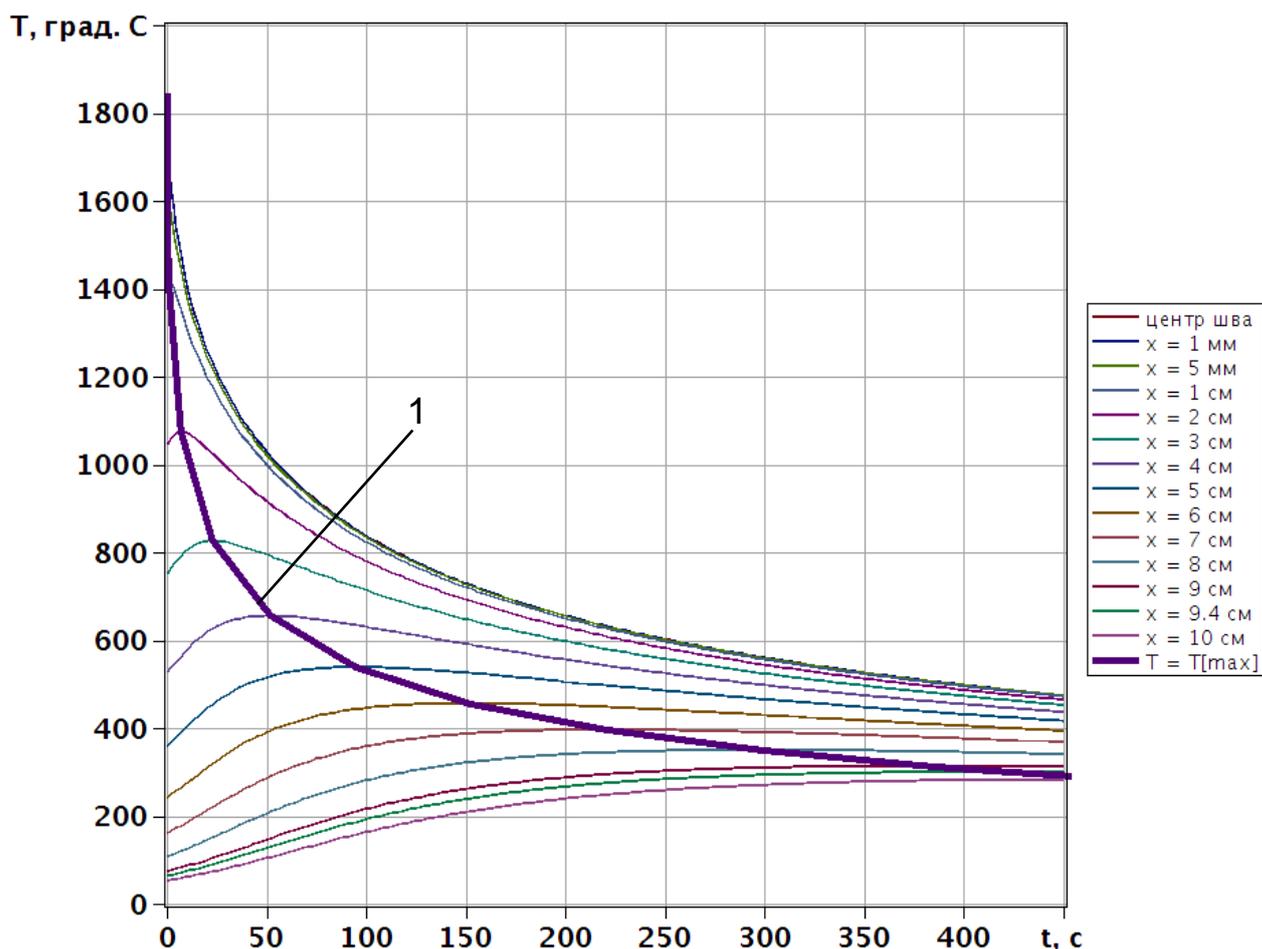


Рис. 2.24 – Распределение температуры в процессе остывания на различных расстояниях от центра шва

Полученный набор значений максимальных температур и соответствующих им координат на интервале от центра шва до $x = 10$ см аппроксимируем графиком $T_{max}(x)$ (кривая 1), изображённым на Рис. 2.24, который затем будет использоваться для определения остаточных напряжений.

Глава 3. Разработка метода оценки остаточных напряжений в сварном соединении по температурным следам

Построенное в Глава 2 координатно-временное распределение температуры в термическом цикле сварки может быть напрямую использовано для получения кинетики НДС в соответствии с графо-аналитическим методом Николаева-Окерблома [6]. В § 3.1 дано описание технологии метода на модели стыковой сварки стержней, а в § 3.2 рассмотрена реализация метода при конкретных условиях сварки. При этом для получения функции изменения напряжений во времени в точке, находящейся на определенном расстоянии от центра шва, требуется построение системы графиков, отражающих в едином масштабе зависимости напряжений от деформаций и дилатометрическую зависимость деформации от температуры для этой точки в термическом цикле.

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, проведенную через координаты максимальных изотерм, соответствующих расположению температурных следов. Тем самым, появляется возможность построения эпюры остаточных напряжений в области сварного шва и в зоне термовлияния по кривой максимальных изотерм минуя этап исследования кинетики напряжений в температурном цикле сварки. Примеры реализации модифицированной процедуры графо-аналитического метода приведены в § 3.2 - § 3.4. Вопрос адекватности в получаемых результатах по методу температурных следов рассматривается в § 3.4 путем сопоставления с измерениями остаточных напряжений с помощью стандартизированного метода зондирующего отверстия.

§ 3.1. Описание технологии метода на модели стыковой сварки стержней

Процесс образования сварочных деформаций и напряжений характеризуется упругопластическим поведением металла, нестационарными температурными условиями, высоким уровнем температуры при резко неравномерном ее распределении. Определение остаточных пластических деформаций в районе сварных соединений выполняется на базе рассмотрения термомеханических процессов, вызываемых сварочным нагревом. Эта часть задачи весьма специфична. Рассмотрение ее для различных условий сварки - основное содержание теории сварочных деформаций и напряжений. Вторая часть задачи не является специфической. Аналогичные задачи рассматриваются в теории остаточных напряжений, вызываемых другими технологическими процессами, а также в теории температурных напряжений [5, 6, 20, 44].

При решении термомеханической задачи удастся упростить изучение истории процесса образования деформаций и напряжений. Для определения напряжений в данный момент упругопластического деформирования элемента достаточно знать его полную деформацию, если он испытывает нагружение, а если идет процесс разгрузки, то, кроме того, необходимо знать деформации элемента в момент начала разгрузки [6]. Для области, прилегающей к оси шва и подвергаемой высокому нагреву, это положение означает, что до момента максимального нагрева идет процесс нагружки, а с момента охлаждения начинается процесс разгрузки. Следовательно, для оценки остаточных пластических деформаций изучение истории процесса можно ограничить рассмотрением упругопластического деформирования того или иного элемента в момент его максимального нагрева и после полного остывания.

Следует отметить, что принципиальным является допущение об одномерности напряженного состояния, которое очевидно реализуется при контактной стыковой сварки оплавлением. Поэтому, для оценки остаточных сварочных напряжений может быть изучена только кинетика деформаций и напряжений

элементарных полосок, расположенных параллельно шву, при нагреве по сварочным термическим циклам.

Под кинетикой деформаций и напряжений при сварке понимают процесс их развития в течение всего периода нагрева и остывания детали. Исследование кинетики сварочных деформаций и напряжений - проблема большой сложности, а решения возникающих при ее рассмотрении задач (в строгой постановке) могут быть выполнены только численными методами. Вместе с тем физическая сущность процесса развития упругопластических деформаций при сварке достаточно четко выявляется при его рассмотрении в рамках принятого допущения об одномерности процесса.

При анализе температурного поля в предыдущих разделах работы строились кривые, характеризующие изменение температуры в данной точке с течением времени, т.е. рассматривались термические циклы точек, расположенных на разном расстоянии от оси шва. При анализе термомеханических процессов необходимо проследить за изменением в указанных точках деформаций и напряжений.

Для анализа деформационных циклов элементарных полосок необходимо в качестве исходной информации иметь данные об изменении объема металла вследствие теплового расширения (или фазовых превращений) и кривые деформирования металла для ряда значений температуры (диаграмму растяжения-сжатия). Изменение объема металла при нагреве характеризуется дилатометрической кривой, определяющей дилатацию - свободное изменение линейного размера образца при нагреве. При отсутствии фазовых превращений дилатометрическая кривая может быть аппроксимирована прямой (что означает постоянство коэффициента линейного расширения). Если принять также схематизированную диаграмму растяжения-сжатия, то анализ термодформационных циклов элементарных призм можно выполнить методом, описанным ниже [6, 18].

В работе [18] проводился анализ стыковой сварки стальных стержней, в котором было получено аналитическое решение, описывающее распределение

температуры на разных расстояниях от оси шва как в процессе нагрева, так и в процессе остывания. По полученной в этой работе диаграмме распределения температуры, можно определить и распределение остаточных напряжений вдоль оси сваренного стержня.

Для определения остаточных напряжений воспользуемся графо-аналитическим методом Николаева-Окерблома [6, 39]. В соответствии с этим методом, изобразим схематизированную диаграмму растяжения-сжатия в таком масштабе, при котором упругий участок диаграммы наклонен к оси деформаций ε_x под углом 45° (упругие деформации и соответствующие им напряжения характеризуются одинаковыми отрезками на диаграмме $\sigma_x(\varepsilon_x)$, x – координата вдоль оси стержня) (Рис. 3.1).

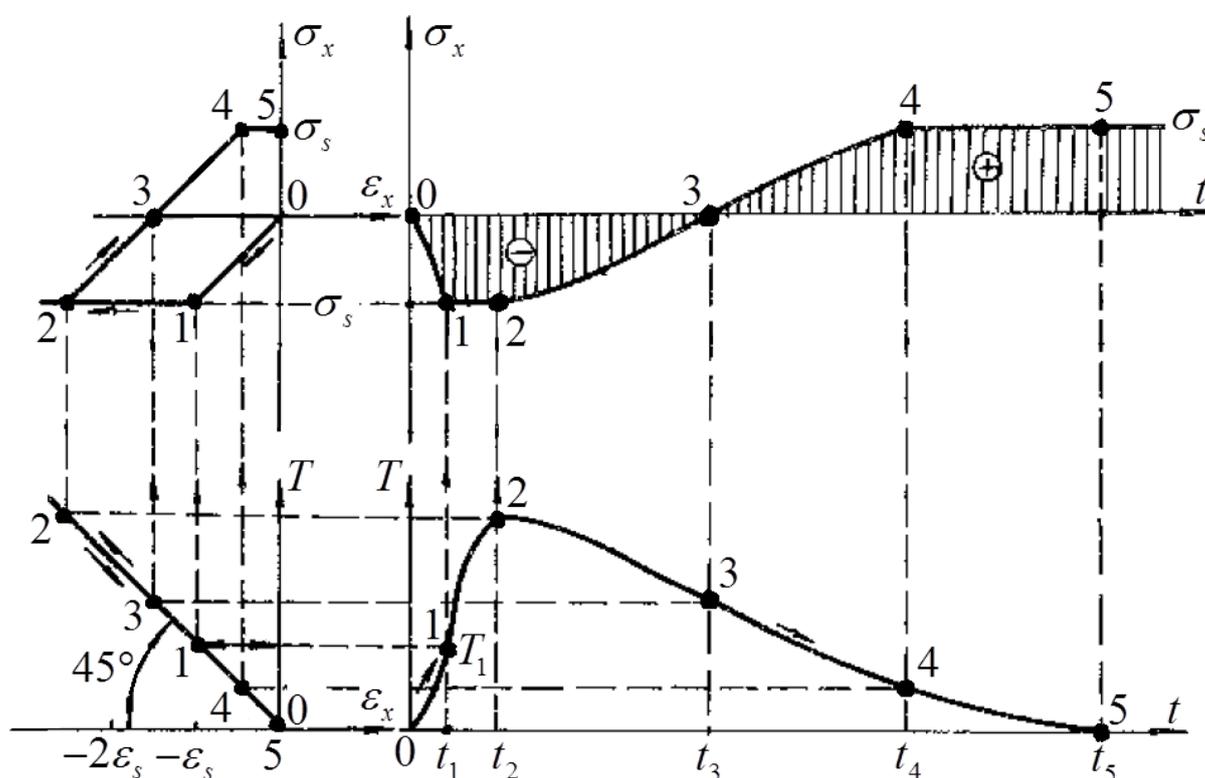


Рис. 3.1 – Кинетика напряжений и деформаций в точках элементарной полоски, параллельной шву

Под диаграммой расположена дилатометрическая прямая с масштабом для дилатации, равным масштабу деформации на диаграмме $\sigma_x(\varepsilon_x)$, и масштабом для температуры выбранным таким, чтобы были равными отрезки, харак-

теризующую температуру и соответствующую ей дилатацию. Справа от дилатометрической прямой изображена характерная кривая термического цикла с тем же масштабом для температуры, что и на дилатометрической прямой.

Например, для момента времени t_1 , температура T_1 характеризуется точкой 1 на кривой термического цикла. Из этой точки проводится горизонтальная прямая до дилатометрической прямой. Точка пересечения этих прямых на Рис. 3.1 также обозначена цифрой 1. Допустим, что этой точке соответствует температурная деформация $-\varepsilon_s$. Проекция этой точки на диаграмму $\sigma_x(\varepsilon_x)$ также обозначена через 1. Она характеризует σ_x и ε_x в момент времени t_1 (на Рис. 3.1 она соответствует значению напряжения предела текучести на сжатии $\sigma_x = -\sigma_s$). Далее, пересечение горизонтальной проекции точки 1 с диаграммы $\sigma_x(\varepsilon_x)$ и вертикальной проекции точки 1 с кривой термического цикла $T(t)$ дает точку 1, принадлежащую кривой изменения напряжений σ_x от времени.

Аналогично рассмотрим момент времени t_2 - момент максимального нагрева, для которого температура, дилатация и напряжения характеризуются точками 2 соответственно на кривых термического цикла, дилатометрической и диаграмме $\sigma_x(\varepsilon_x)$. Как видно из диаграммы $\sigma_x(\varepsilon_x)$, в этот момент имеет место упругая деформация $-\varepsilon_s$ и максимальная пластическая деформация укорочения, соответствующая отрезку между точками 1 и 2. Пересечение горизонтальной проекции точки 2 с диаграммы $\sigma_x(\varepsilon_x)$ и вертикальной проекции точки 2 с кривой термического цикла $T(t)$ дает точку 2, принадлежащую кривой изменения напряжений σ_x от времени. В этой точке и на всем интервале 1-2 напряжения равно пределу текучести на сжатие.

По достижению момента времени t_2 зона шва переходит в расплавленное состояние. После этого производится осадка, что вызывает удаление жидкого металла. Затем начинается охлаждение, которое сопровождается уменьшением по абсолютной величине напряжения и деформаций по прямой, параллельной прямой нагружения. Характерной точкой здесь является точка t_3 , для которой напряжения обращаются в нуль.

На интервале времени от t_3 до t_4 происходит упругое деформирование при положительных значениях напряжений. В момент t_4 напряжения достигают предела текучести на растяжение. Дальнейшее остывание на интервале от t_4 до t_5 (полное остывание) не приводит к повышению напряжений. В результате формируется остаточное напряжение равное пределу текучести на растяжение.

Если максимальная температура термического цикла не достигает значения обеспечивающего напряжения предела текучести, то и формируемое остаточное напряжение для выбранной элементарной полоски будет ниже предела текучести.

Из рассмотрения технологии метода следует, что, если ставить задачу нахождения только остаточного напряжения, то построенная 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 цветом побежалости. Этот вывод существенно упрощает реализацию метода Николаева-Окерблома. В следующих параграфах предложенное усовершенствование метода будет рассмотрено на двух конкретных задачах.

§ 3.2. Определение остаточных напряжений после контактной стыковой сварки оплавлением стержней

Описанный метод восстановления термического цикла сварки по расположению полос цветов побежалости и границ остывшего шва применим для случая контактной стыковой сварки оплавлением двух стержней. В качестве термических циклов такой сварки для разных точек окрестности шва используем данные из работ [10,18], основанные на экспериментальных результатах.

На Рис. 3.2, воспроизведенном из [18], изображены термические циклы металла стержней на различных расстояниях $x = 0, 0.2, 1.2, 2.2, 3.2, 4.2, 6.2$ (мм) от центра шва при скорости сближения стержней в процессе сварки $v = 0.94$ мм/с. Горизонтальными штриховыми линиями отмечены характерные температуры: $T_0 = 300$ К – температура перед началом сварки, $T_L = 1773$ К – температура плавления стали. Вертикальной штриховой линией отмечено время нагрева $t_w = 12$ с.

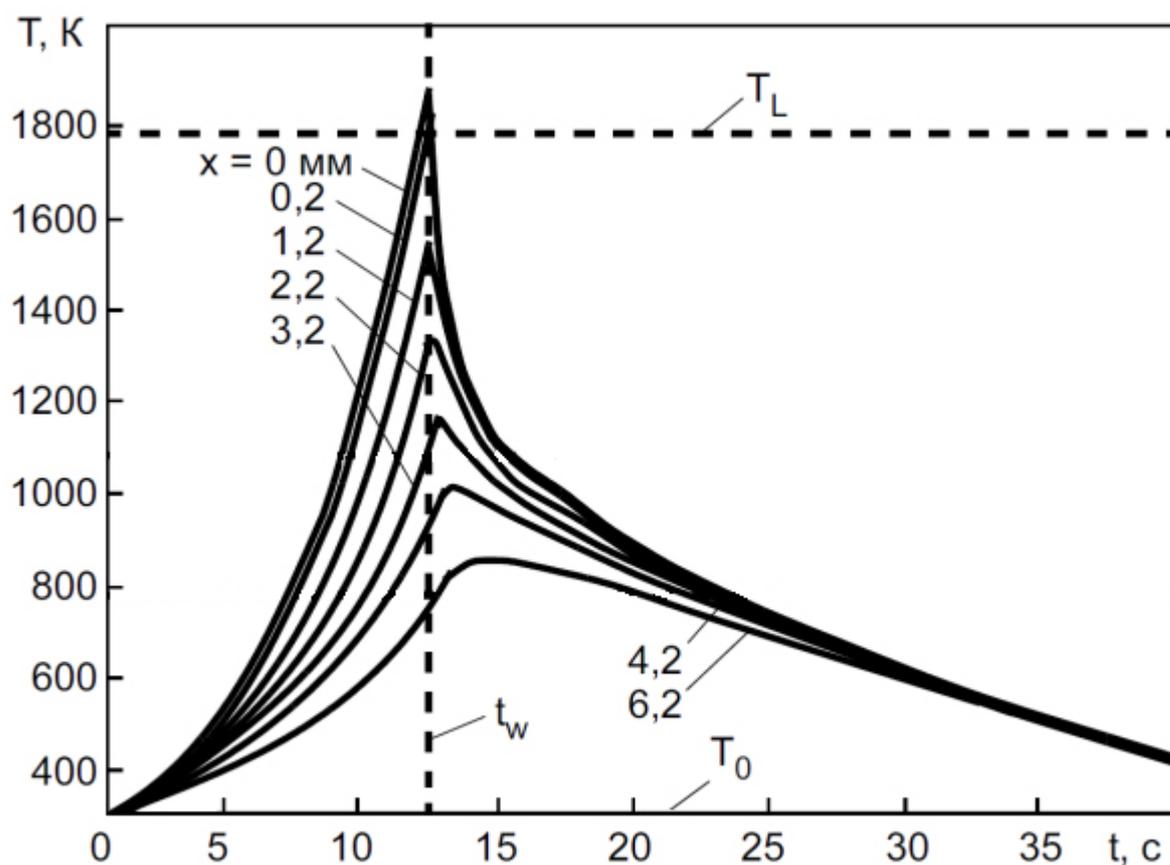


Рис. 3.2 – Термические циклы металла на различном расстоянии от центра шва x при скорости сварки $v = 0.94$ мм/с

На основе термических циклов с Рис. 3.2 построим дилатометрическую прямую и совмещенные диаграммы растяжения-сжатия для перечисленных точек в соответствии с графо-аналитическим методом Николаева-Окерблома (Рис. 3.3).

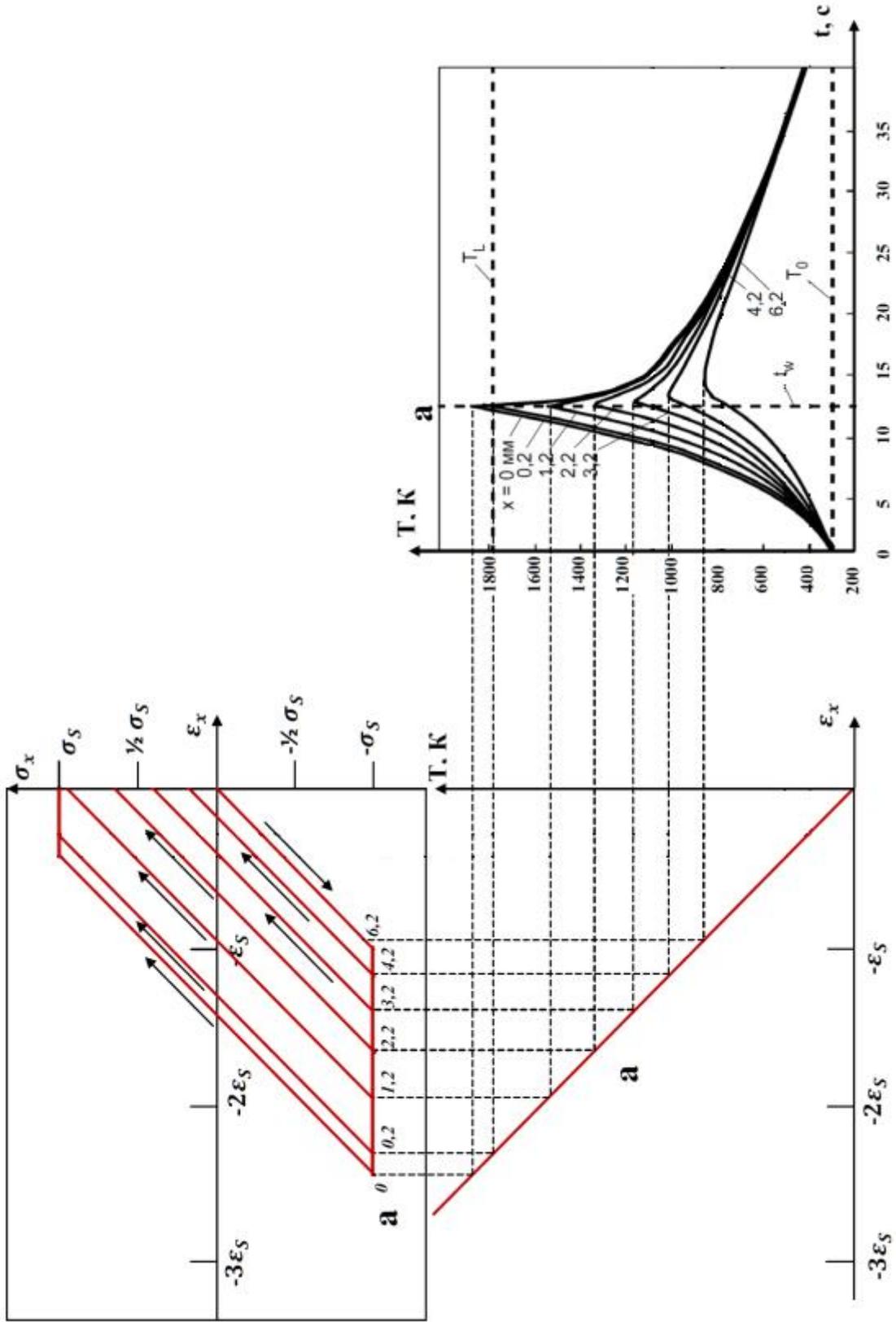


Рис. 3.3 – Экспериментальные термические циклы, дилатометрическая прямая и диаграммы растяжения-сжатия для точек с Рис. 3.2

Зависимости $\sigma_x(t)$ для этих точек на Рис. 3.3 не построены, так как для нахождения остаточных напряжений они содержат избыточную информацию. В этих точках необходимо знание только температур перехода из процесса нагрева в процесс остывания, т.е. пиковые точки значения температуры на диаграмме зависимости температуры от времени. Собрав положения этих точек и сопоставив им значения напряжений в точках пересечения прямых разгрузки с осью σ_x , получим распределение значений σ_x по оси x , т.е. эпюру $\sigma_x(x)$. Эта зависимость изображена на Рис. 3.4.

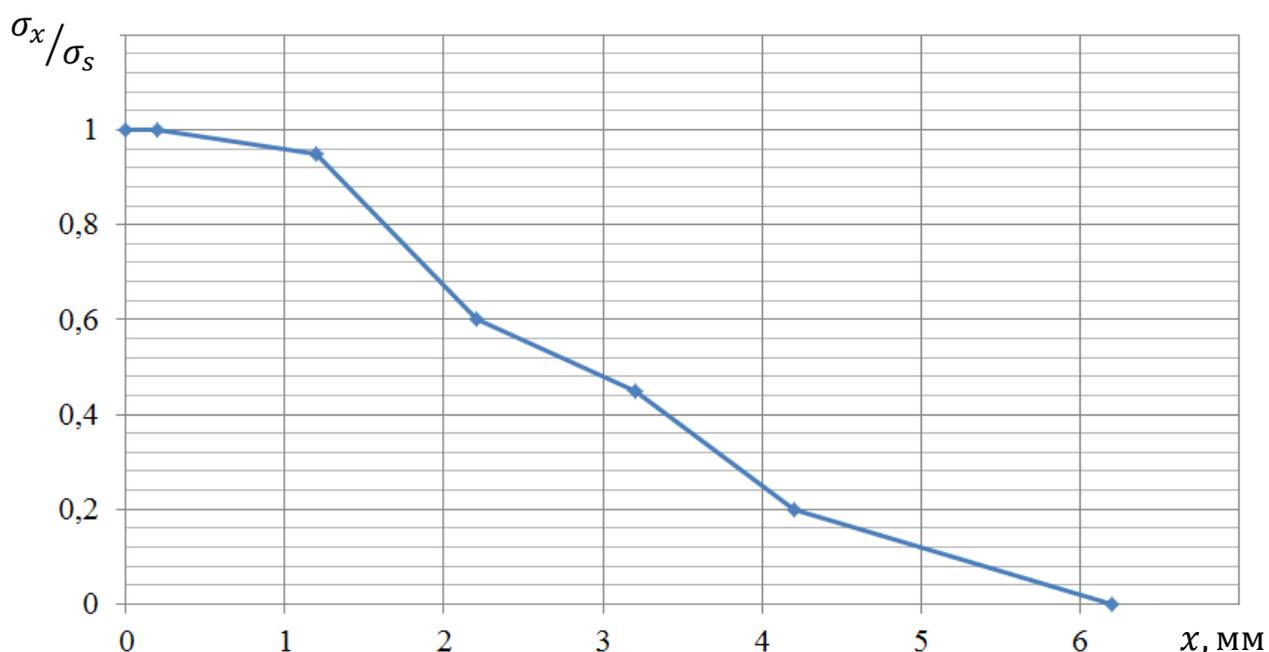


Рис. 3.4 – Эпюра остаточных напряжений для экспериментальных данных в долях от предела текучести

Произведем аналогичный анализ остаточных напряжений для такой же модели, используя аналитическое решение задачи, описанное в § 2.3.2. Для этого воспользуемся переработанным графиком распределения температур в процессе остывания, представленным на Рис. 2.20. Выполняя действия, аналогичные предыдущим, представим на Рис. 3.5 теоретические термические циклы, дилатометрическую прямую и диаграммы растяжения-сжатия для тех же точек, что и при построении экспериментальных зависимостей.

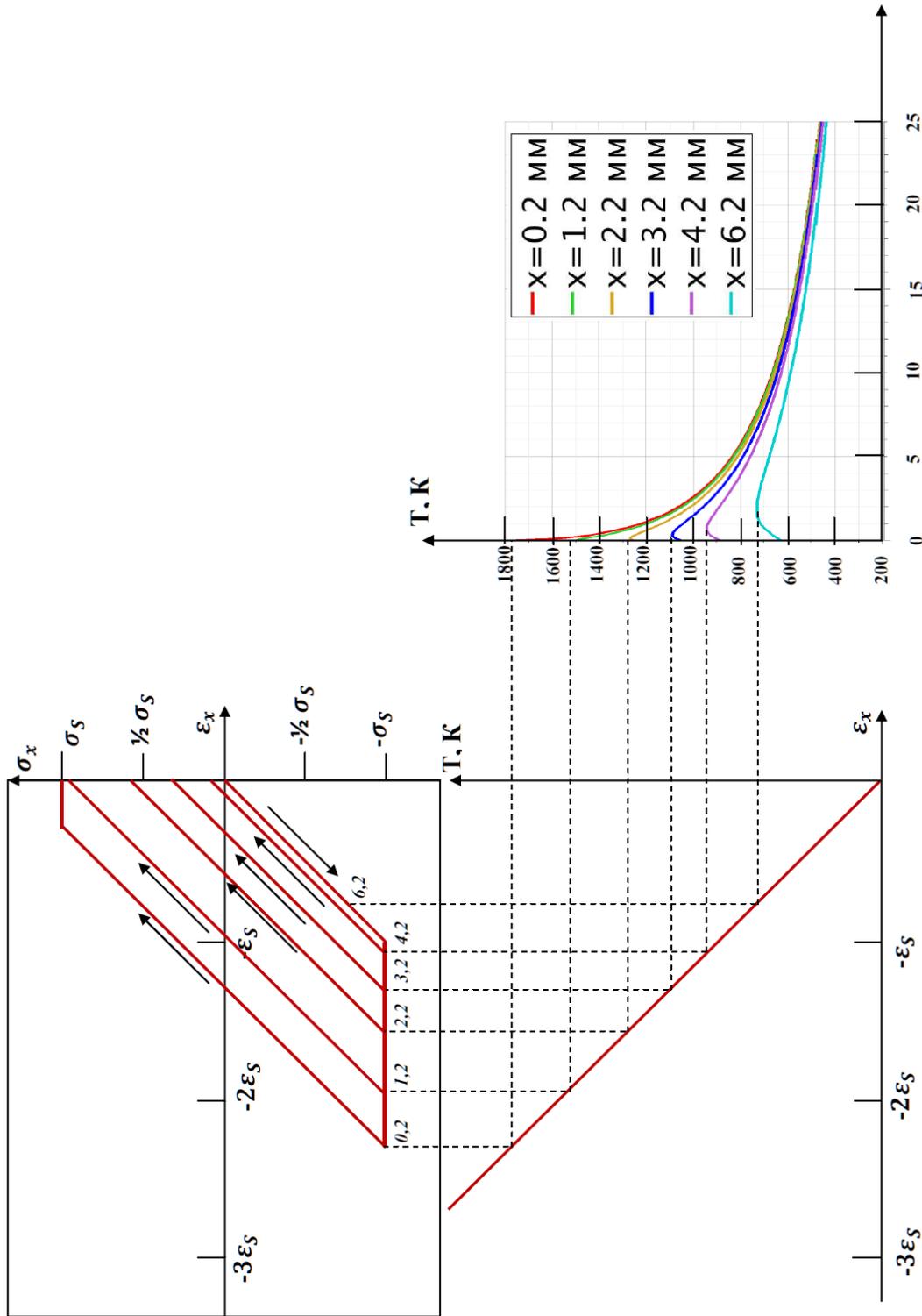


Рис. 3.5 – Теоретические термические циклы, дилатометрическая прямая и диаграммы растяжения-сжатия

Эпюра теоретического распределения остаточных напряжений в сравнении с экспериментально построенной приведена на Рис. 3.6 (синим цветом показана эпюра остаточных напряжений, полученная на основе экспериментальных данных, красным – на основе аналитического решения).

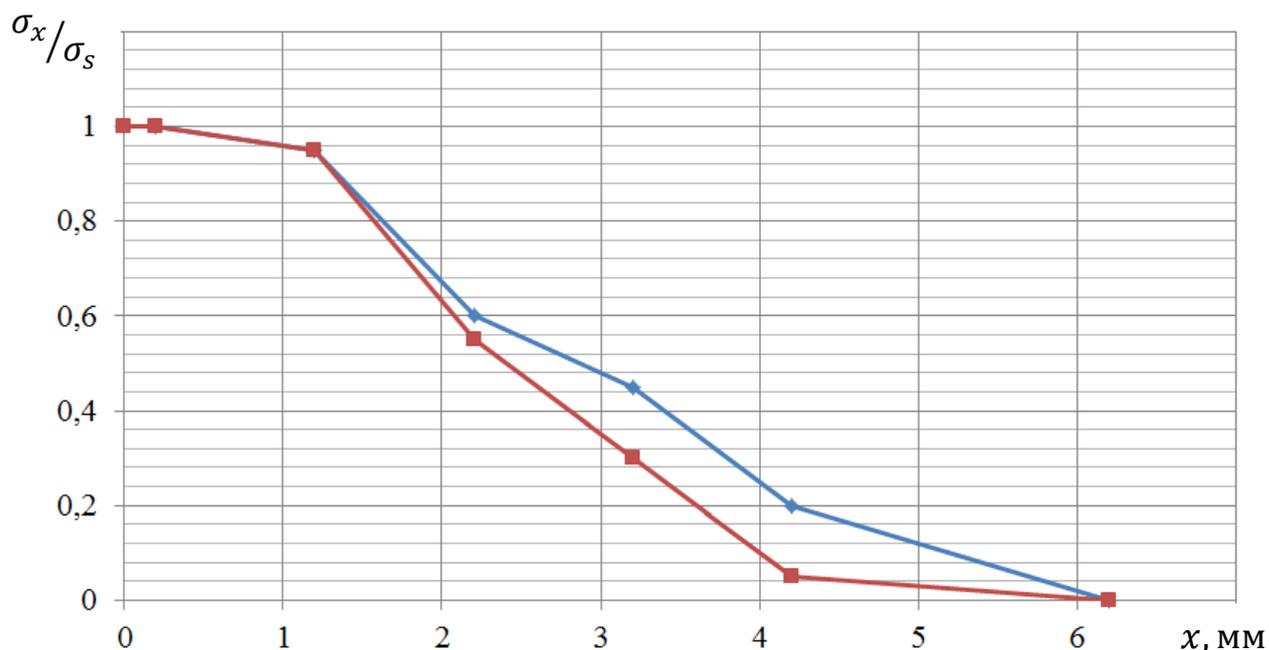


Рис. 3.6 – Эпюры теоретического (красная линия) и экспериментального (синяя линия) распределений остаточных напряжений в окрестности сварного шва

Из полученных результатов следует, что аналитическое решение, построенное на основе восстановления термического цикла по следам изотерм дает значения остаточных напряжений, близкие к значениям, найденным по экспериментальным термическим циклам, особенно - по большим напряжениям, что позволяет говорить о возможности применения предложенного неповреждающего способа диагностики остаточных сварочных напряжений для данного вида сварки и перспективности дальнейших работ по его распространению на другие, более сложные виды сварки.

§ 3.3. Использование температурных следов для неразрушающей диагностики остаточных напряжений в сварном соединении рельсов

Рассмотрим теперь реализацию процедуры реконструкции термического цикла по температурным следам и определение остаточных напряжений в шве и околошовной зоне по восстановленной стадии остывания сварного соединения с помощью модифицированного графо-аналитического метода на примере

контактной стыковой сварки рельсов; соответствующие экспериментальные данные приведены в работе [61]. Несмотря на одномерность модели, она описывает достаточно распространенный тип сварки рельсов при создании бесстыкового железнодорожного пути, сварку арматуры строительных конструкций; всё шире такой тип сварки применяется и при соединении торцов стальных труб, в том числе - большого диаметра для морских магистральных газопроводов. Примененный здесь метод оценки остаточных сварочных напряжений по расположению следов изотерм максимально достигнутых температур базируется, как и в предыдущих параграфах, на модифицированном графоаналитическом методе Николаева-Окерблома [6,39], позволяющем строить эпюру остаточных напряжений непосредственно по измерениям координат максимумов температур [35].

В качестве математической модели термического цикла контактной стыковой сварки оплавлением рельсов для стадии нагрева используем аналитическое выражение (2.37). Стадия остывания будет описываться выражениями (2.40), (2.41).

На Рис. 3.7 - Рис. 3.9 приведены, воспроизведенные из [61], экспериментальные графики остывания во времени сварного соединения рельсов при $q = 400, 800, 1600, 3000$ и 8000 Вт/см², для точек, находящихся на расстояниях 0.1 (Рис. 3.7), 1 (Рис. 3.8) и 3 (Рис. 3.9) см от центра шва; приведены также значения времен расплавления шва при каждой из мощностей источника.

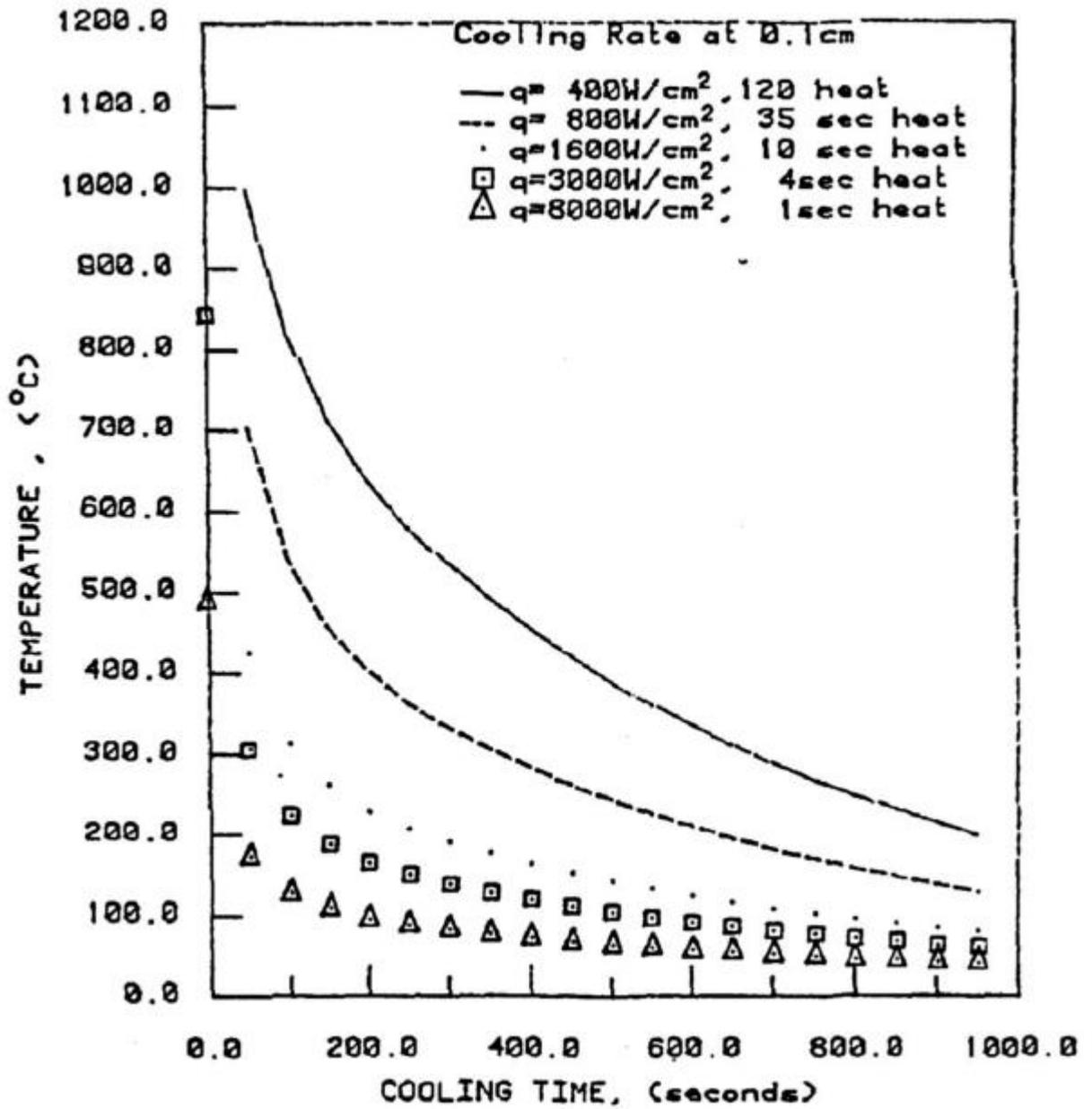


Рис. 3.7 – График остывания во времени для точки, находящейся на расстоянии 1 мм от центра шва

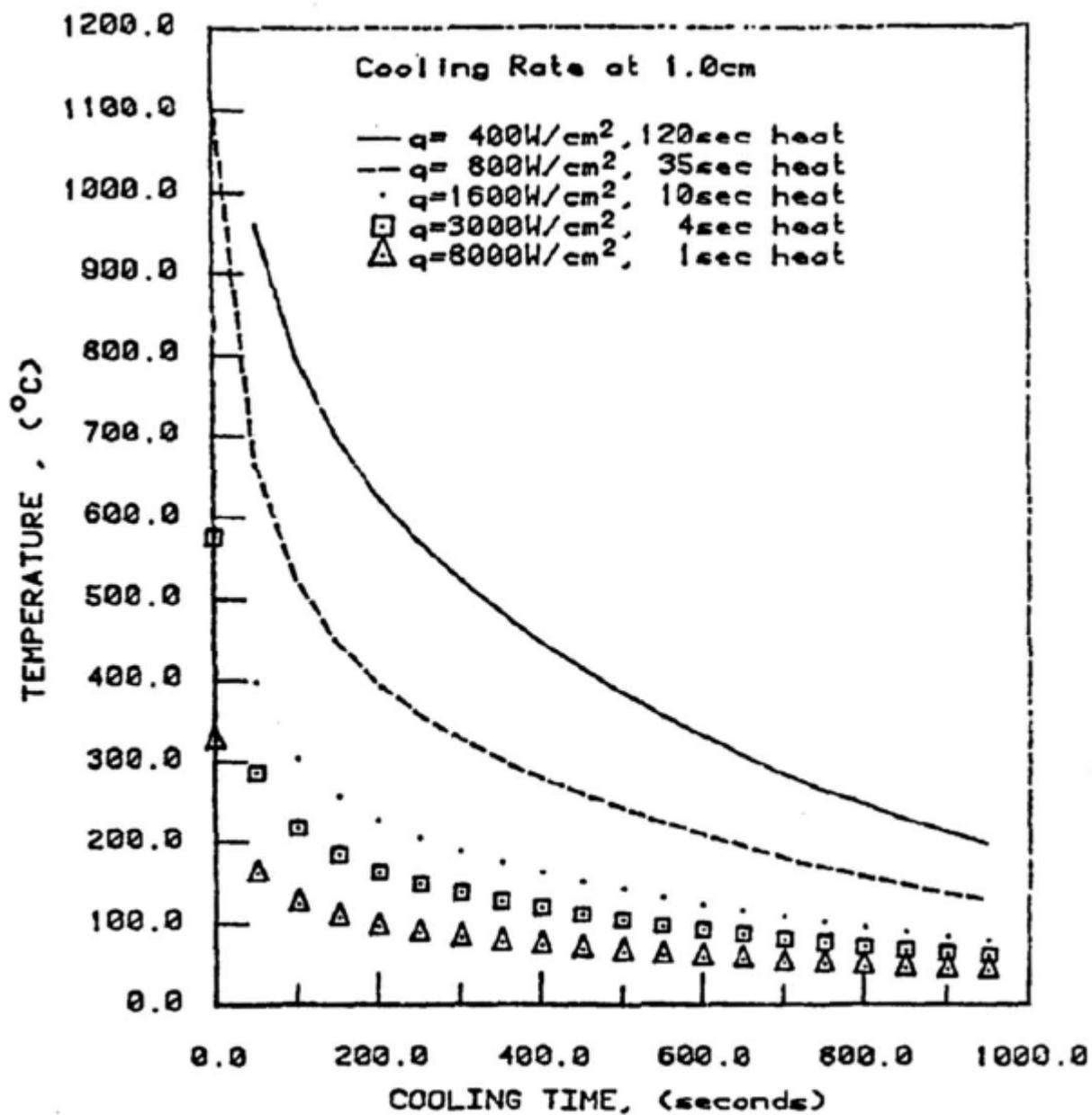


Рис. 3.8 – График остывания во времени для точки, находящейся на расстоянии 1 см от центра шва

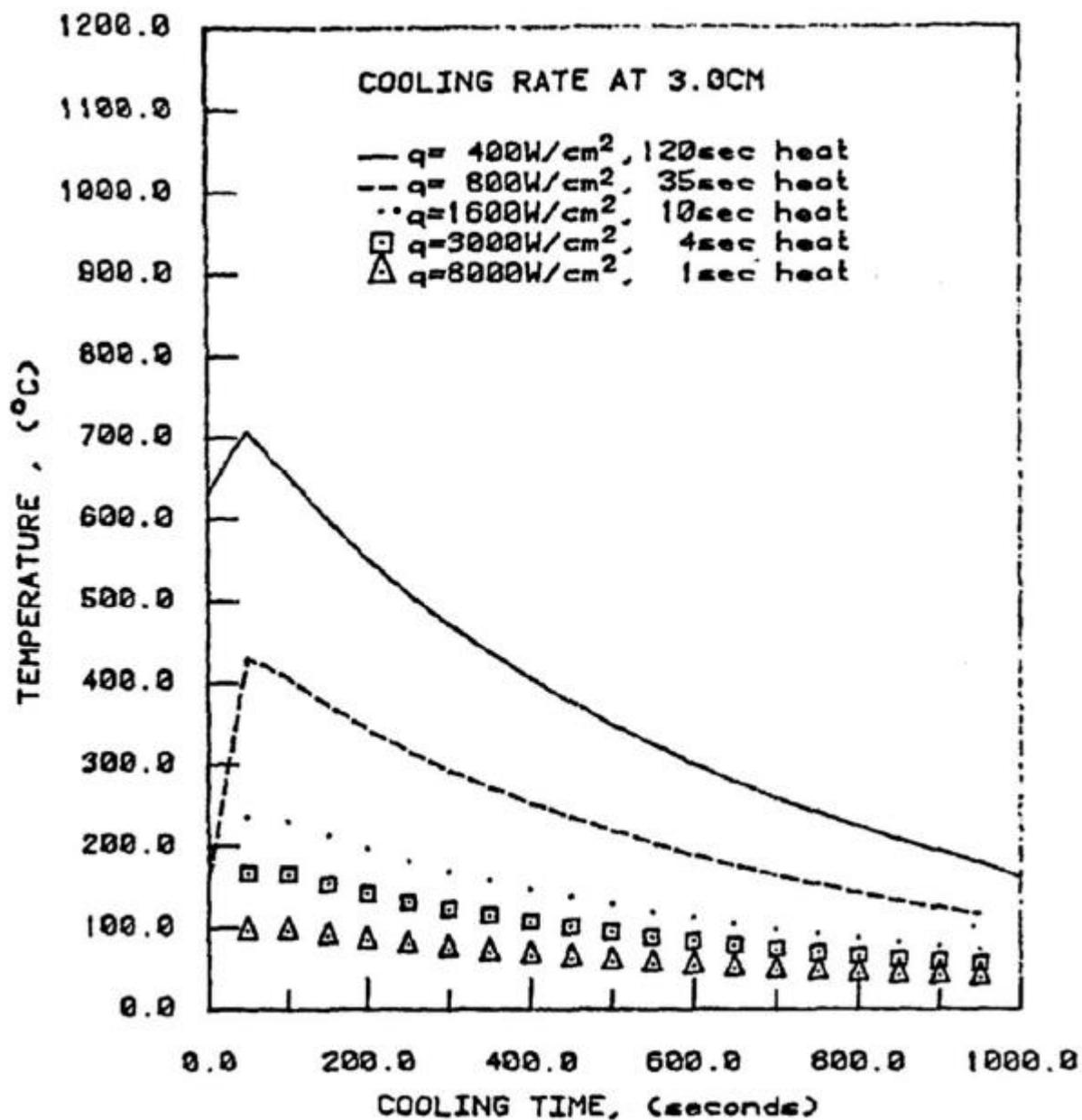


Рис. 3.9 – График остывания во времени для точки, находящейся на расстоянии 3 см от центра шва

Из приведенных графиков виден характерный максимум температуры, достигнутый при $x = 3$ см. Для других точек околошовной зоны координаты таких максимумов при температурах в 1500°C, 1200°C, 1000°C, 700°C, 600°C и 400°C были определены исходя из математической модели (2.40), (2.41), согласованной по величинам $q = 400$ Вт/см² и $l = 25$ см с экспериментальными данными Рис. 3.7 - Рис. 3.9. Полученный набор значений максимальных темпе-

ратур и соответствующих им координат аппроксимируем графиком $T_{max}(x)$, изображённым в квадранте II на Рис. 3.10.

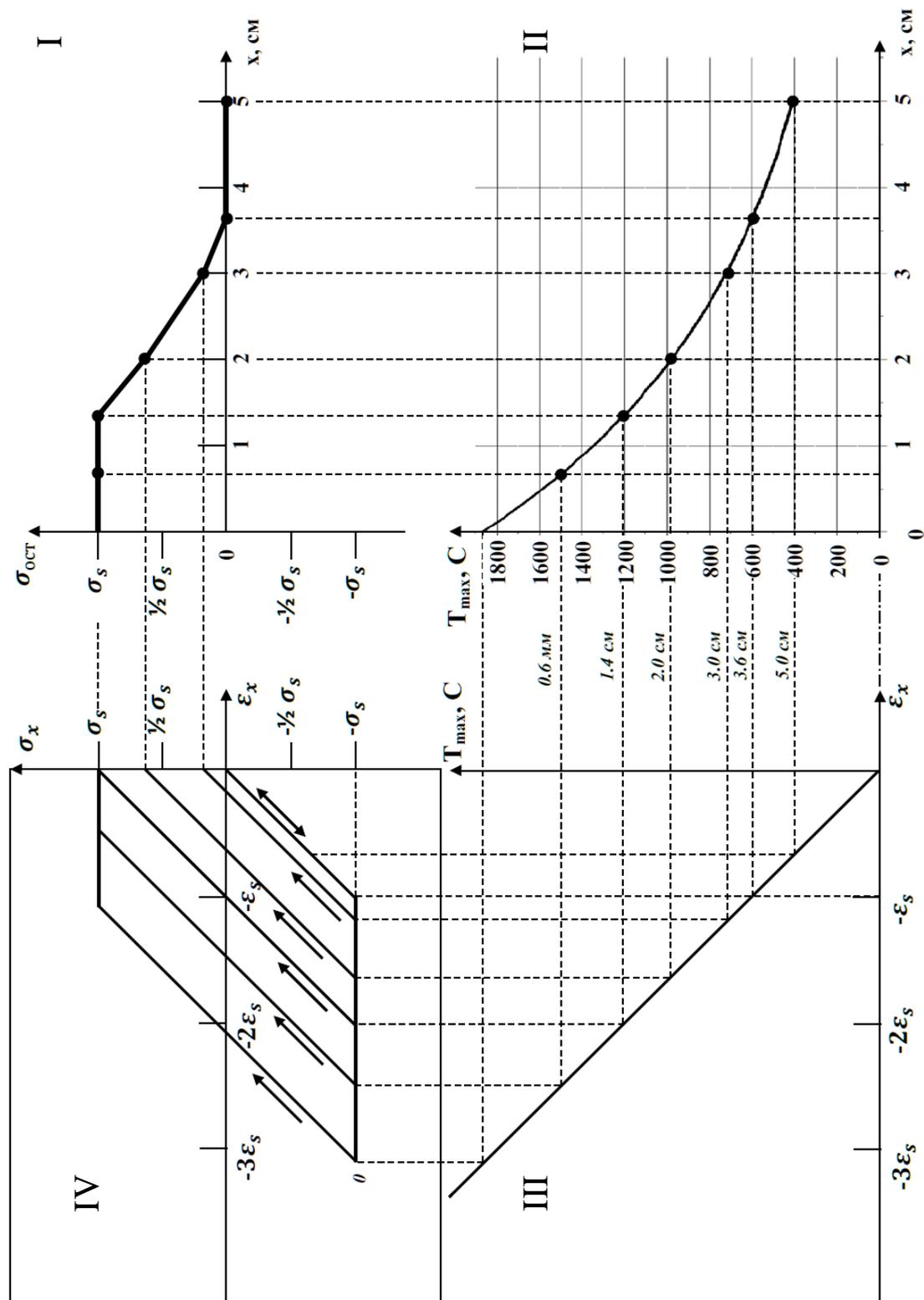


Рис. 3.10 – Определение остаточных напряжений в сварном соединении рельсов модернизированным графо-аналитическим методом

Характерные точки зависимости $T_{max}(x)$ спроектированы на схематизированную дилатометрическую прямую, изображённую в квадранте III на Рис.

3.10. При этом масштаб по оси температур на дилатометрической прямой взят таким же, как и на графике $T_{max}(x)$, а масштабный коэффициент для ε_s – деформации, соответствующей достижению предела текучести σ_s , – исходя из температуры 600°C , при которой металл (низкоуглеродистая сталь) теряет упругие свойства [6].

Точки пересечения максимумов температур с дилатометрической прямой проектированы на диаграмму растяжения-сжатия $\sigma_x(\varepsilon_x)$, изображённую в квадранте IV на Рис. 3.10. Эта диаграмма также имеет схематизированный вид: её упругие участки, как и дилатометрическая прямая, наклонены под углом 45° к оси деформаций, заданной в том же масштабе, что и на дилатометрическом графике. Значения температур точек области термовлияния, имевшие максимальный нагрев более 600°C , проектируются на нижний горизонтальный участок диаграммы $\sigma_x(\varepsilon_x)$, определяющий зону сжимающих пластических деформаций рельсов. Остывание выбранной точки рельса с координатой x от температуры $T_{max}(x)$ отображается упругим участком этой диаграммы в направлении, показанном стрелкой. Если этот участок не пересекает ось напряжений ранее достижения предела текучести σ_s по растягивающим напряжениям, то от точки пересечения упругого участка диаграммы с горизонталью $\sigma = \sigma_s$ пойдёт повторная пластическая деформация противоположного знака – удлинения; соответствующая горизонтальная прямая продолжается до пересечения с осью напряжений. Таким же образом на ось напряжений диаграммы $\sigma_x(\varepsilon_x)$ спроектированы и другие точки графика $T_{max}(x)$. Последующие горизонтальные проекции этих точек с оси напряжений в квадрант I на Рис. 3.10 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 $\sigma_x(\varepsilon_x)$.

В заключении отметим, что описанная методика позволяет построить эпюры остаточных сварных напряжений по температурным следам без применения сложных физических и математических операций.

§ 3.4. Определение остаточных напряжений после контактной стыковой сварки труб

В § 2.1 были приведены экспериментальные данные по распределению цветов побежалости на поверхности соединенной кольцевым стыковым швом трубы диаметром 1220 мм и толщиной 27 мм и аппроксимация соответствующих им температурных уровней в направлении поперек шва (Рис. 2.4). Используя эти данные, построим эпюру остаточных напряжений с помощью модернизированного графо-аналитического метода, действуя аналогично построениям описанным в § 3.3. Технология построения и сама эпюра представлены на Рис. 3.11.

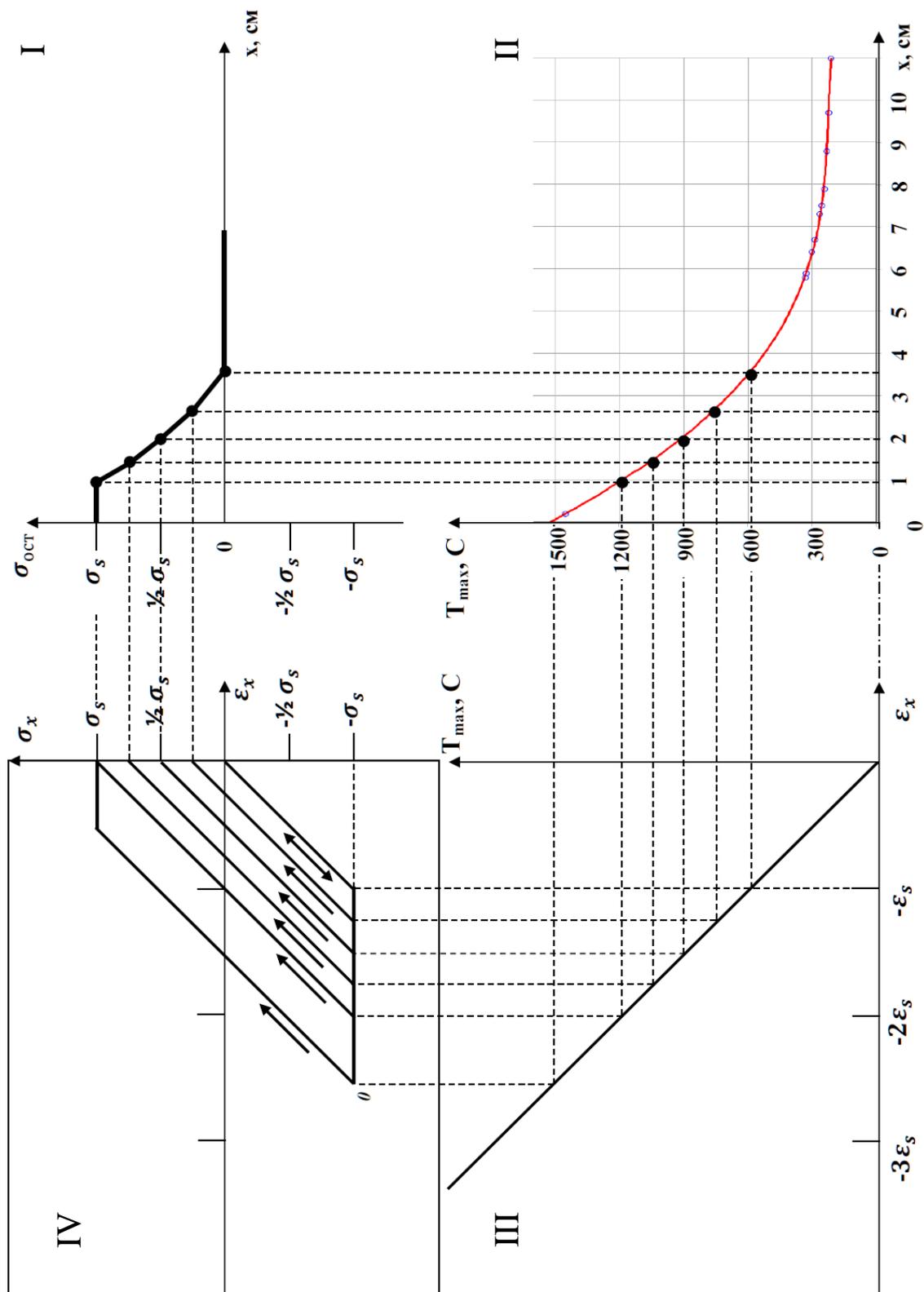


Рис. 3.11 – Определение остаточных напряжений в сварном соединении труб

Необходимый набор значений температур и соответствующих им координат представлен на графике $T_{max}(x)$, изображённом в квадранте II на Рис. 3.11.

Характерные точки зависимости $T_{max}(x)$ спроектированы на схематизированную дилатометрическую прямую в квадранте III на Рис. 3.11. При этом масштаб по оси температур на дилатометрической прямой взят таким же, как и на графике $T_{max}(x)$, а масштабный коэффициент для ε_s – деформации, соответствующей достижению предела текучести σ_s , - исходя из температуры 600°C , при которой металл (низкоуглеродистая сталь) теряет упругие свойства [6].

Точки пересечения максимумов температур с дилатометрической прямой проектированы на диаграмму растяжения-сжатия $\sigma_x(\varepsilon_x)$ в квадранте IV на Рис. 3.11. Эта диаграмма также имеет схематизированный вид: её упругие участки, как и дилатометрическая прямая, наклонены под углом 45° к оси деформаций, заданной в том же масштабе, что и на дилатометрическом графике. Значения температур точек области термовлияния, имевшие максимальный нагрев более 600°C , проектируются на нижний горизонтальный участок диаграммы $\sigma_x(\varepsilon_x)$, определяющий зону сжимающих пластических деформаций материала трубы. Остывание выбранной точки с координатой x от температуры $T_{max}(x)$ отображается упругим участком этой диаграммы в направлении, показанном стрелкой. Если этот участок не пересекает ось напряжений ранее достижения предела текучести σ_s по растягивающим напряжениям, то от точки пересечения упругого участка диаграммы с горизонталью $\sigma = \sigma_s$ пойдёт повторная пластическая деформация противоположного знака – удлинения; соответствующая горизонтальная прямая продолжается до пересечения с осью напряжений. Таким же образом на ось напряжений диаграммы $\sigma_x(\varepsilon_x)$ спроектированы и другие точки графика $T_{max}(x)$. Последующие горизонтальные проекции этих точек с оси напряжений в квадрант I на Рис. 3.11 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 $\sigma_x(\varepsilon_x)$.

Наряду с замерами положений цветов побежалости, В.М. Козинцевым и Д.А. Челюбеевым определялись остаточные напряжения в области сварного

шва методом зондирующего отверстия со спекл-интерферометрической иллюстрацией микроперемещений окрестностей отверстий.

Зондирующие отверстия выполнялись с диаметром 5 мм и глубиной 3.5 мм. Схема распределения отверстий для одного из экспериментов представлена на Рис. 3.12 (красными кружками выделены точки центра шва и точка, для которой на Рис. 3.13 показана зарегистрированная интерферограмма нормальных микроперемещений).

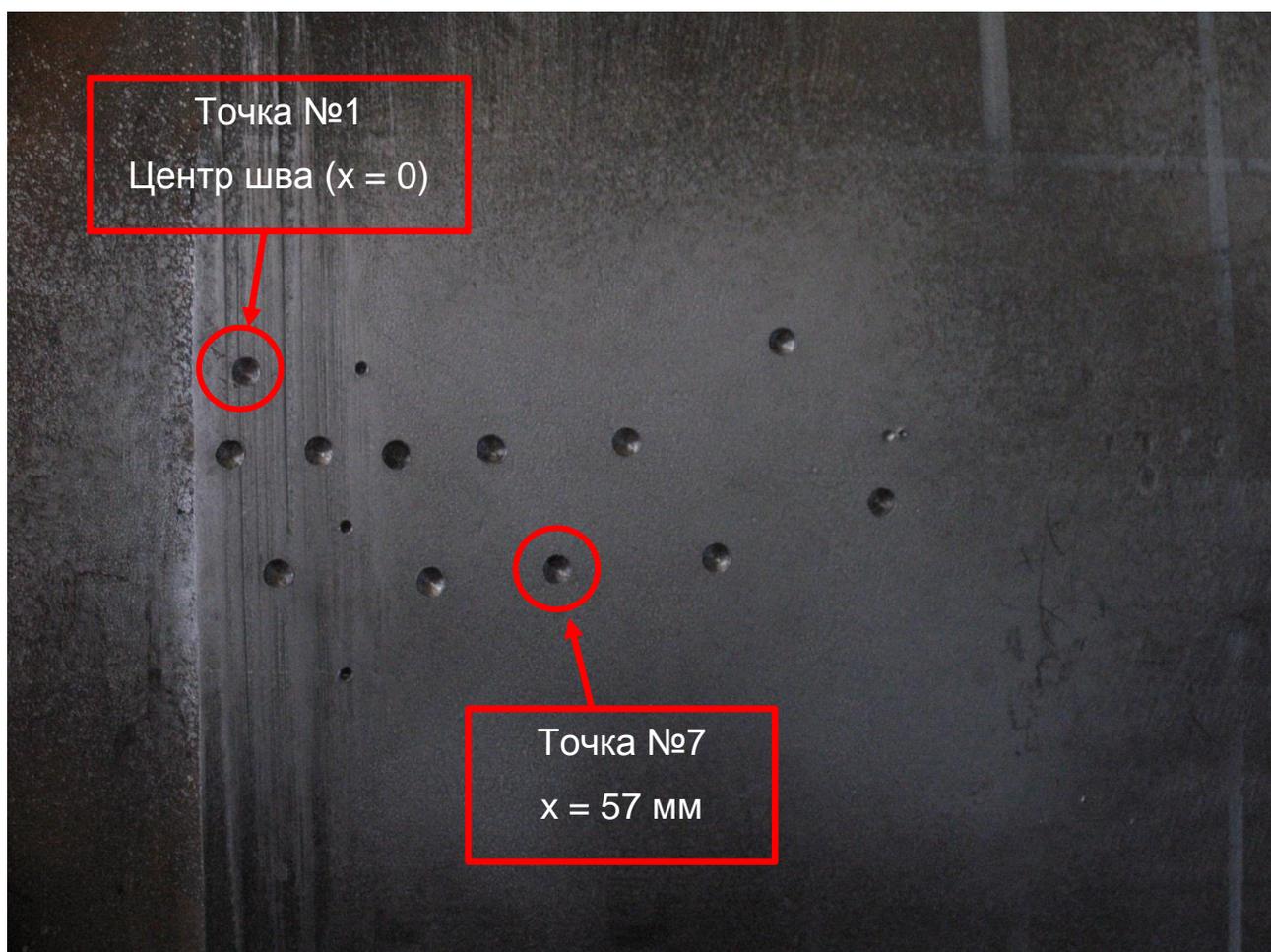


Рис. 3.12 – Распределение зондирующих отверстий в окрестности сварного шва

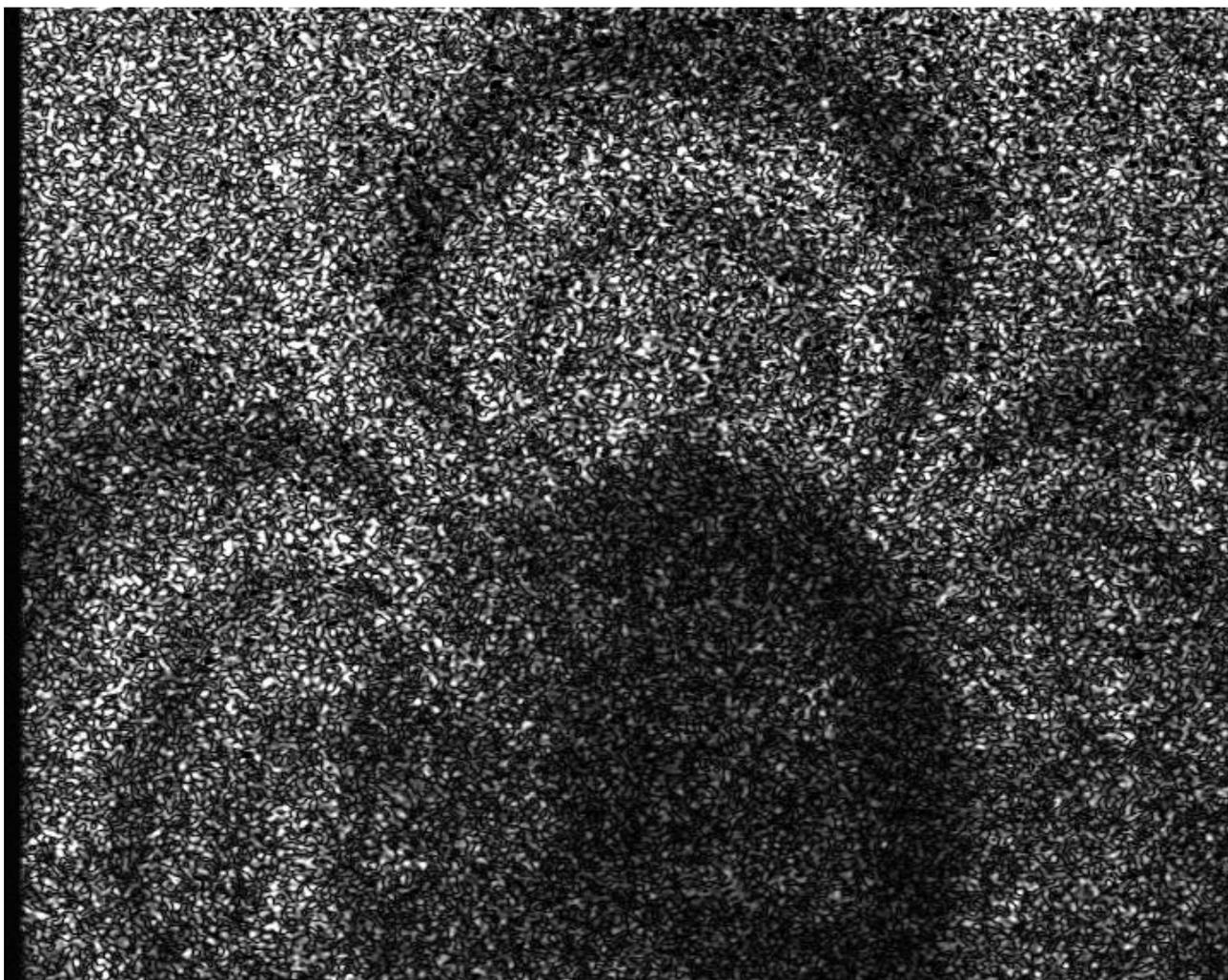


Рис. 3.13 – Характерная интерферограмма для высверленного отверстия

Цена интерференционной полосы для таких зондирующих отверстий составляет 50 МПа [44]. Точностью считывания интерферограммы определяется в половину полосы, что, соответственно, определяет погрешность оценки напряжения. В данном случае погрешность составляет $\pm (20 - 30)$ МПа.

Эпюры распределения остаточных напряжений на основе проведенного эксперимента представлены на Рис. 3.14.

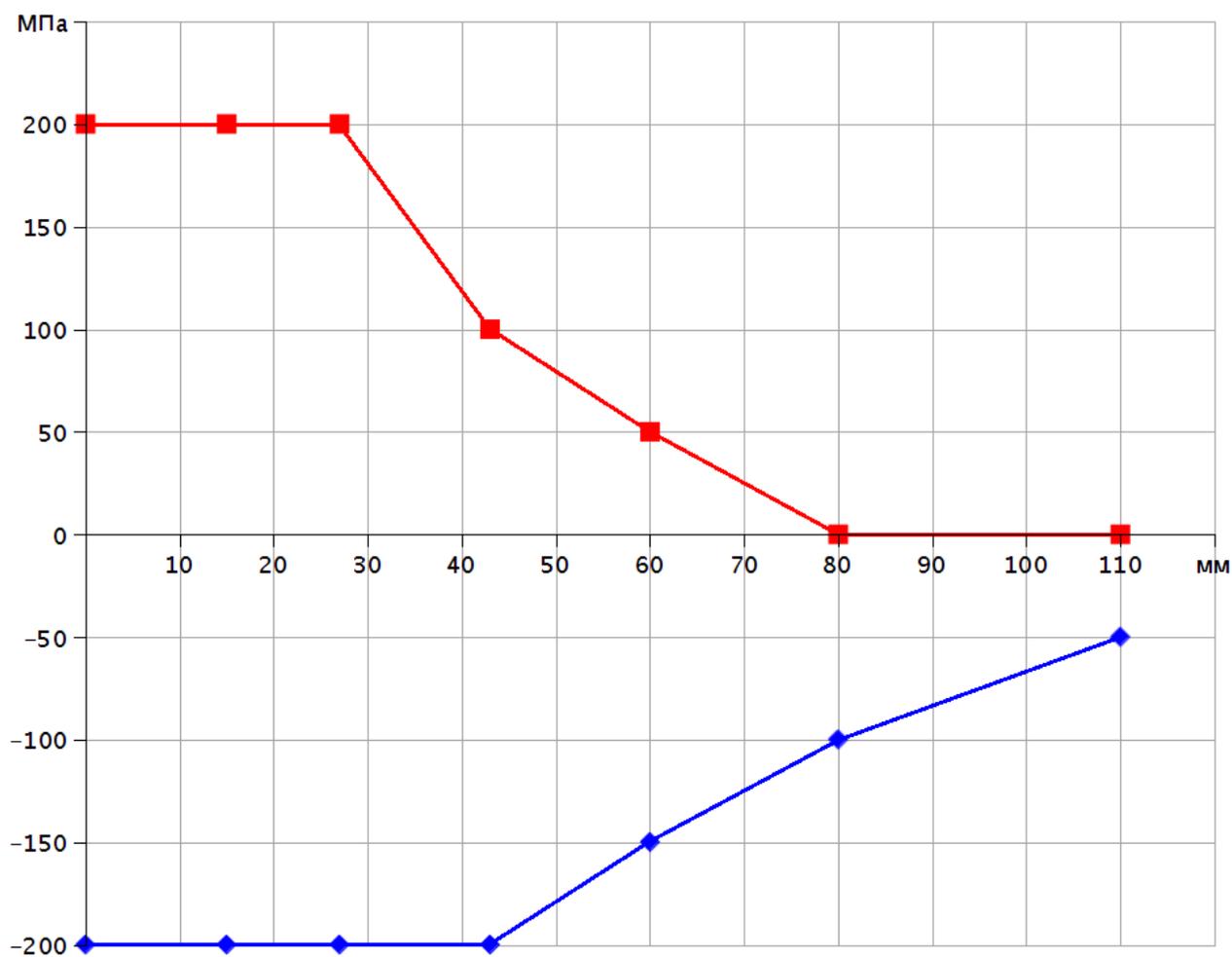


Рис. 3.14 – Экспериментальные эпюры остаточных напряжений

Здесь, красной линией показана эпюра распределения остаточных напряжений вдоль сварного шва (продольные напряжения), синей линией – эпюра остаточных напряжений поперёк сварного шва (вдоль свариваемой трубы).

При стыковой сварке труб в отличие от стержней, напряженное состояние – двумерное. В этом случае, главные напряжения, имеют постоянные значения в каждом из кольцевых сечений трубы. Экспериментальные измерения методом зондирующего отверстия (Рис. 3.14) показывают близость по абсолютной величине характера изменений продольных и поперечных остаточных напряжений при удалении от оси шва. Исходя из знака напряжения, в качестве оценки остаточных напряжений в кольцевом направлении на выбранном расстоянии от оси шва может служить теоретическая оценка, полученная с помощью метода температурных следов.

На Рис. 3.15 дано сравнение эпюр остаточных напряжений в кольцевом направлении, полученных методом зондирующего отверстия (красная линия) и методом температурных следов (зелёная линия).

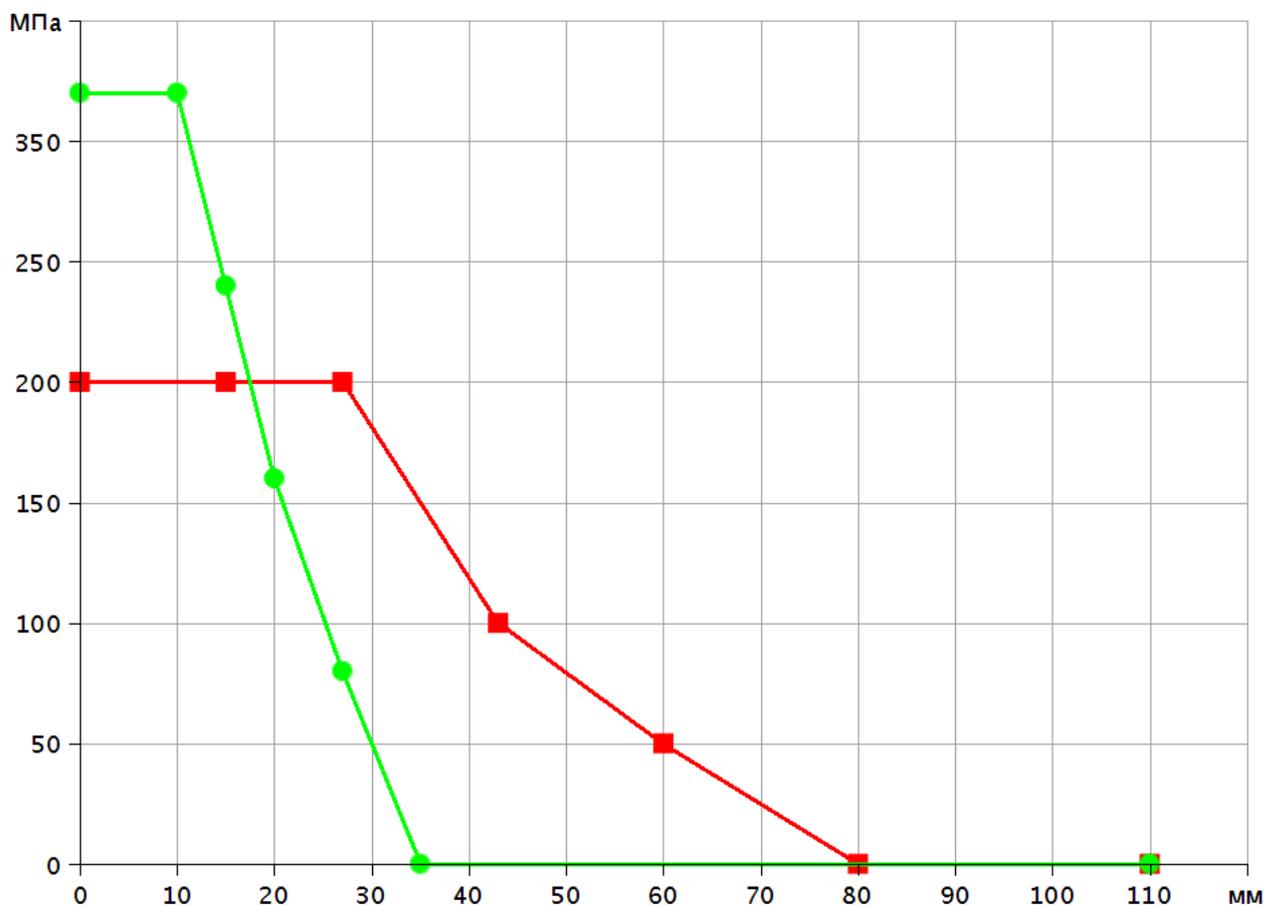


Рис. 3.15 – Сравнение экспериментальной и теоретической эпюр остаточных напряжений

Как видно из Рис. 3.15, остаточные напряжения, полученные методом температурных следов, в зоне сварного шва значительно превосходят напряжения, полученные методом зондирующего отверстия. Это может быть связано с тем, что измерения проводились на частично срезанном сварном шве (без удаления утолщения), что видно, в частности на Рис. 3.12, и более наглядно, - на Рис. 3.16.

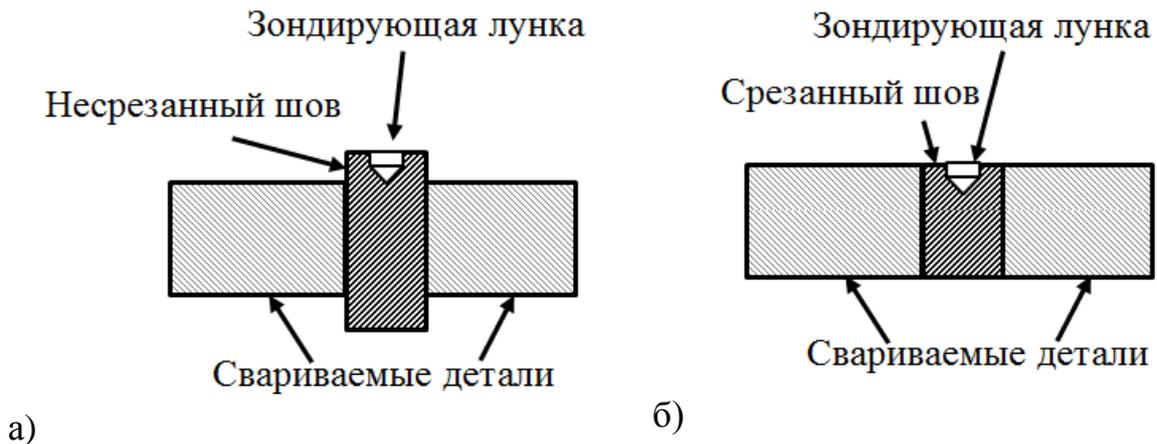


а)

б)

Рис. 3.16 – Несрезанные швы с зондирующими лунками

Вследствие того, что боковые поверхности выступающей части несрезанного шва свободны от напряжений, как это видно из Рис. 3.17,а, напряжения, измеряемые методом зондирующего отверстия непосредственно с несрезанной поверхности, могут иметь меньшие значения, чем напряжения, измеряемые в шве со срезанной выпуклостью (Рис. 3.17,б).



а)

б)

Рис. 3.17 – Схема сварного соединения

Данный вывод подтверждается экспериментальными эпюрами напряжений поперек кольцевого (Рис. 3.18) и спирального (Рис. 3.19) швов, построенными при несрезанных (сплошные линии) и срезанных (штриховые линии) выпуклостях швов [31].

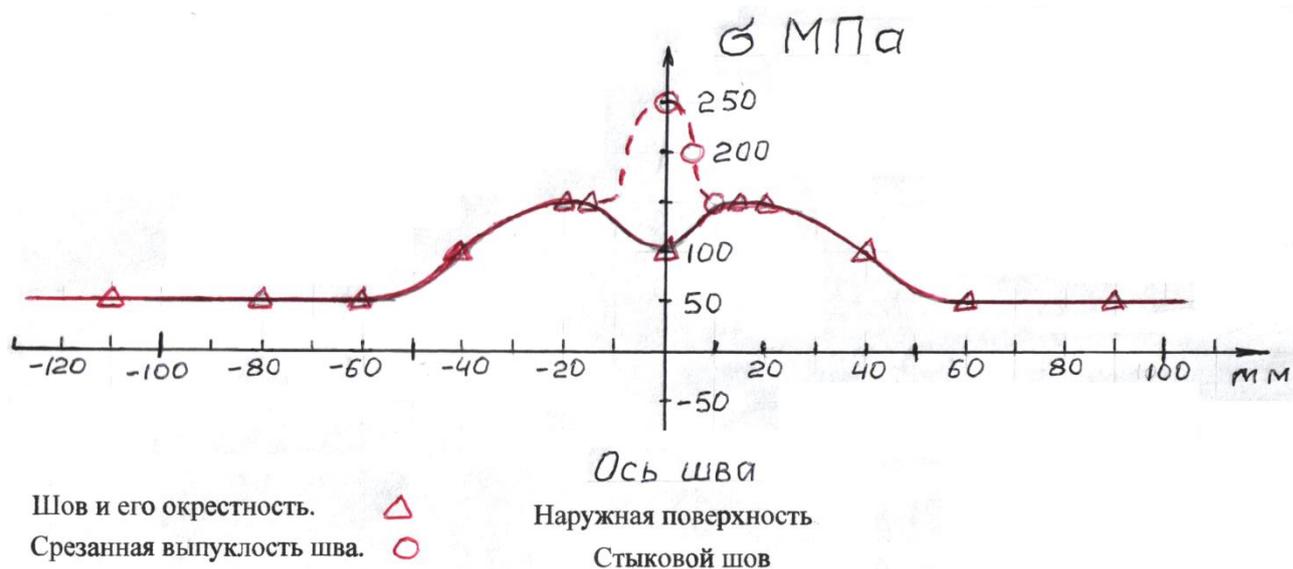


Рис. 3.18 – Эпюра напряжений поперек кольцевого шва

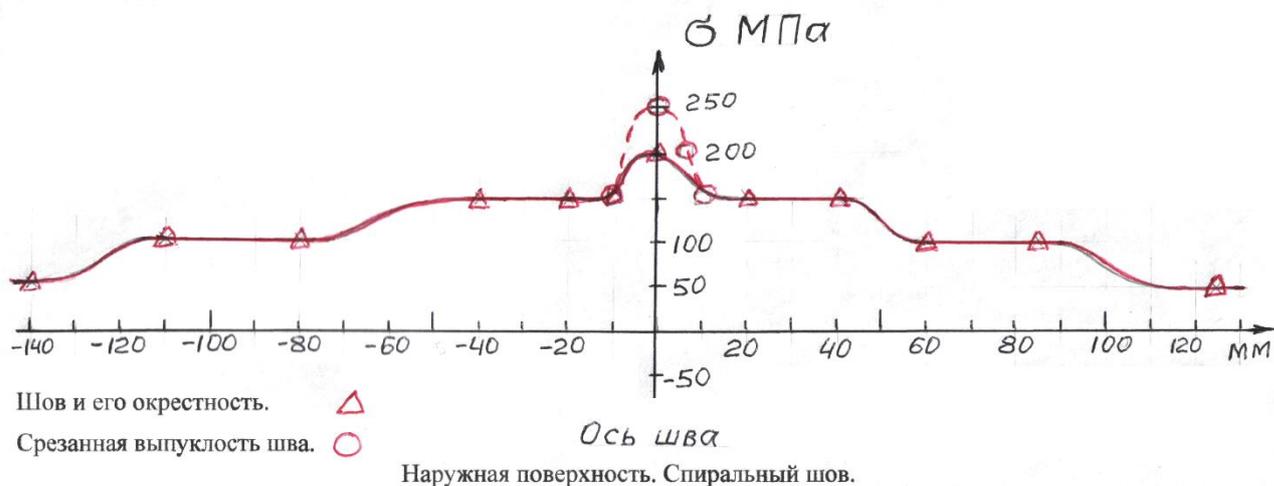


Рис. 3.19 – Эпюра напряжений поперек спирального шва

Как видно из Рис. 3.18 и Рис. 3.19, экспериментальные значения остаточных напряжений в зоне сварного шва, измеренные на срезанной выпуклости шва значительно выше, чем на несрезанной: в первом случае - в 2.5 раза, во втором – в 1.25 раза. Следовательно, чем глубже зондирующее отверстие относительно несрезанной поверхности шва, тем выше и точнее значение измеренного остаточного напряжения. Таким образом, опираясь на разность экспериментальных значений остаточных напряжений, измеренных на срезанной и несрезанной выпуклостях шва, можно утверждать, что реальные значения остаточных напряжений для эпюры остаточных напряжений, полученной методом

зондирующего отверстия, представленной на Рис. 3.15, в области сварного шва, и ближе к эпюре остаточных напряжений, полученной методом температурных следов.

Что касается поперечных напряжений, то их оценка может быть произведена из эпюры остаточных кольцевых напряжений и базы данных по измерениям методом зондирующих отверстий, из которой следует, что при контактно стыковой сварки оплавлением эти напряжения по величине примерно равны кольцевым, имеют такой же характер затухания при удалении от шва как и кольцевые, но противоположны им по знаку.

Таким образом, в случае с контактно стыковой сваркой труб, теоретическая модель, описанная выше, даёт представление о величине остаточных напряжений по распределению температурных следов, которые имеют положительный знак в кольцевом направлении (параллельном сварному шву) и отрицательный в продольном направлении (перпендикулярном сварному шву).

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие общие выводы.

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 позволило более гибко определять значения напряжений внутри перепада высот прогиба поверхности тела между соседними интерферометрическими полосами. В результате, при условии чёткого выделения центров полос, обеспечивается снижение погрешности измерений по уровням напряжений до $1\div 2\%$ от измеряемой величины, начиная с нижнего порога чувствительности метода в сравнении с $10\div 15\%$ - при определении напряжений только по числу полос. Также теоретически обоснован метод деформации интерференционных полос при локальном надавливании в окрестности зондирующего отверстия, позволяющий выявить характер (растягивающий или сжимающий) действия главного остаточного напряжения.

2. Сформулирован новый неповреждающий метод определения остаточных сварочных напряжений по температурным следам, длительное время сохраняющимся на металле сварного соединения после окончания сварки. Для этого была установлена связь расположения температурных следов с предшествующим температурным циклом сварки, что потребовало решения ряда задач о нагреве, плавлении, затвердевании и остывании сварного соединения. Дальнейшая связь реконструированного температурного цикла сварки с остаточными напряжениями производилась с помощью, модернизированного в работе, графо-аналитического метода Николаева-Окерблома. В исходной формулиров-

ке 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 зону сварного шва и область термовлияния, т.е. на выходе получается эпюра остаточных напряжений. Рассмотрены приложения этого метода для нескольких случаев контактно-стыковой сварки плавлением.

Отработка метода проводилась путем сравнения значений остаточных напряжений в области сварного шва, полученных с помощью метода температурных следов с результатами использования метода зондирующего отверстия со спекл-интерферометрической регистрацией микроперемещений в окрестности зондирующего отверстия. Из полученных результатов для контактно-стыковой сварки следует, что аналитическое решение, построенное на основе восстановления термического цикла по следам изотерм дает значения остаточных напряжений, близкие к значениям, измеренным с помощью спекл-интерферометрии, особенно - по большим напряжениям, близким к пределу текучести материала, что позволяет говорить о возможности применения предложенного неповреждающего способа диагностики остаточных сварочных напряжений для данного вида сварки и перспективности дальнейших работ по его распространению на другие, более сложные виды сварки. Подтверждением о возможности использования предложенного метода является Справка о внедрении от ЗАО «Псковэлектросвар». Копия Справки в Приложении 1.

Таким образом, главным результатом этой части работы является разработка научных основ метода определения остаточных сварочных напряжений по температурным следам. Дело - за практическим внедрением этого, наиболее экономичного на данный момент, метода неразрушающей диагностики остаточных сварочных напряжений.

Список литературы

1. Байкова И.П. Основы теории сварочных деформаций и напряжений / И.П. Байкова. - Л.: Изд. ЛПИ, 1976. - 81 с.
2. Биргер И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. - М.: Машгиз, 1963. - 232 с.
3. Бородин М.А. Задача Стефана / М.А. Бородин // Украинский математический вестник. - 2011. - Том 8. - №1. - с. 17-54.
4. Венгринович В.Л. Магнитошумовой метод и аппаратура для измерения напряжений в ферромагнитных материалах / В.Л. Венгринович, В.Л. Цукерман, В.Н. Бусько // Материалы III Всес. симп. «Технологические остаточные напряжения». - М.: ИПМ РАН, 1988. - С. 101-105.
5. Винокуров В.А. Сварочные деформации и напряжения / В.А. Винокуров. - М.: Машиностроение, 1968. - 236 с.
6. Гатовский К.М. Теория сварочных деформаций и напряжений / К.М. Гатовский, В.А. Кархин. - изд. ЛКИ, 1981. - с. 331.
7. 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.
8. 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.
9. Гольдштейн Р.В. Применение электронной спекл-интерферометрии для регистрации наноперемещений / Р.В. Гольдштейн, В.М. Козинцев, А.В. Подлесных, А.Л. Попов, Д.А. Челюбеев // Механика твердого тела. - 2008. - №4 - с. 166-175.

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. 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. Нечипоренко, И.Л. Пермяков, А.В. Подлесных, А.Л. Попов, Д.А. Челюбеев // Космонавтика и ракетостроение. - 2009. - №1 (54). - с. 94-102.
12. Горкунов Э.С. Магнитные методы и приборы неразрушающего контроля структуры, фазового состава и прочностных характеристик сталей и сплавов (обзор) / Э.С. Горкунов, М.В. Тартачная // Зав. лаборатория. - 1993. - Т. 59, № 7. - С. 22-25.
13. ГОСТ Р 52891-2007 «Контроль остаточных технологических напряжений методом лазерной интерферометрии». Стандарт размещён в базе нормат. док. Фед. агентства по технич. регулир. и метролог. www.complexdoc.ru. Стандартиформ, 2009. – 13 с.
14. Данилюк И.И. Проблема Стефана / И.И. Данилюк // УМН. - 1985. - Т. 40, №5 (245). - с. 133-185.
15. Дюрелли А. Экспериментальная механика / А. Дюрелли, Дж. Холл, Ф. Стерн [и др.] / Под ред. А. Кобаяси, в 2-х книгах. - М.: Мир, 1990. - 1168 с.
16. Иванов С.Д. Технологические напряжения в сварных соединениях / С.Д. Иванов, Г.Н. Чернышев, А.Л. Попов, А.А. Антонов, В.М. Козинцев. М.: Изд. МГОУ, 2004. - 254 с.
17. Ишлинский А.Ю. Об остаточных напряжениях при крутке / А.Ю. Ишлинский // Укр. матем. ж. - 1952. - Т. 4, вып. 6. - С. 155-167.
18. Кархин В.А. Анализ термических циклов при контактной стыковой сварке стали оплавлением / В.А. Кархин, П.Н. Хомич, Б.В. Федотов, П. Раямки // Сварочное производство. - 2008. - №1. - с.12-17.

19. Касаткин Б.С. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л.М. Лобанов [и др.]. - Киев: Наукова думка, 1981. - 584 с.
20. Касаткин Б.С. Напряжения и деформации при сварке / Б.С. Касаткин, В.М. Прохоренко, И.М. Чертов. - Киев: Вища Школа, 1987. - 248 с.
21. Козинцев В.М. 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.
22. Кучук-Яценко С.И. Контактная стыковая сварка трубопроводов / С.И. Кучук-Яценко, В.Г. Кривенко, В.А. Сахарнов, М.Р. Унигорский, В.И. Хоменко.- Киев: Наукова думка, 1986. - 208 с.
23. Кучук-Яценко С.И. Контактная стыковая сварка оплавлением толстостенных труб из высокопрочных сталей класса прочности К56 / С.И. Кучук-Яценко, Ю.В. Швец, В.Ф. Загадарчук, В.И. Швец, В.И. Хоменко [и др.] // Автоматическая сварка, 2012. - №5. - с. 5-11.
24. Махутов Н.А. Исследования остаточных напряжений с применением электронной цифровой спекл-интерферометрии в натуральных условиях / Н.А. Махутов, И.А. Разумовский, В.С. Косов, А.А. Апальков, И.Н. Одинцев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2008. - Т. 74, № 5. - с. 47-51.
25. Металлы и сплавы. Справочник / Под ред. Ю.П. Солнцева. - С.-Пб.: НПО "Профессионал, 2003. - 1066 с.
26. Михайлов А.М. Сварные конструкции / А.М. Михайлов - М.: Стройиздат, 1983. - 367 с.
27. Несис Е.И. Методы математической физики / Е.И. Несис. М.: Просвещение, 1977. - 199 с.

28. Николаев Г.А. Сварные конструкции. В 2-х т. / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. - М.: Высшая школа. Т.1. 1982. – 272 с., Т.2. 1983. – 344 с.
29. Окерблом Н.О. Расчет деформаций металлоконструкций при сварке / Н.О. Окерблом. - М.-Л.: Машгиз, 1955. - 212 с.
30. Окерблом Н.О. Сварочные деформации и напряжения / Н.О. Окерблом. - М.-Л.: Машгиз, 1948. - 246 с.
31. Отчет ИПМех РАН по дог. 29ИПМ-07
32. Патон Б.Е. Ультразвуковой неразрушающий метод измерения напряжений в сварных конструкциях. Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций / Б.Е. Патон, В.И. Труфяков, О.И. Гуца, А.Н. Гузь, Ф.Г. Махорин. - Киев: Наукова думка, 1986. - 220 с.
33. Поздеев А.А. Остаточные напряжения. Теория и приложения / А.А. Поздеев, Ю.И. Няшин, П.В. Трусов. - М.: Наука, 1982. - 109 с.
34. Полянин А.Д. Справочник по нелинейным уравнениям математической физики / А.Д. Полянин, В.Ф. Зайцев. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 432 с.
35. 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.
36. Разумовский И.А. Экспериментально-расчетный метод оценки нагруженности натуральных конструкций с поверхностными трещинами // И.А. Разумовский, А.С. Чернятин // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2009. - № 3. - с. 35-42.
37. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. - М.: Машгиз, 1951. - 297 с.
38. Сварка в машиностроении. Справочник в 4-х т. / Под ред. Н.А. Ольшанского. - М.: Машиностроение. Т.1. 1978. - 501 с.
39. Теория сварочных процессов / Под ред. В.В. Фролова. - М.: Высшая школа, 1988. - 559 с.

40. Тимошенко С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж.М. Гудьер; Пер. с англ. М.И. Рейтман; Под ред. Г.С. Шапиро. - М.: Наука, 1979. - 560с.
41. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. - М.: Наука, 1972. - 735 с.
42. Трочун И.П. Внутренние усилия и деформации при сварке / И.П. Трочун. - М.: Машгиз, 1964. - 245 с.
43. Франк Ф. Дифференциальные и интегральные уравнения математической физике / Ф. Франк, Р. Мизес. - Гостехиздат, гл. XIII, 1937.
44. Чернышев Г.Н. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Г.Н. Чернышев, А.Л. Попов, В.М. Козинцев, И.И. Пономарев. - М.: Наука, Физматлит, 1996. - 240 с.
45. Экспериментальные исследования напряжений в конструкциях / Под ред. Н.А. Махутова - М.: Наука, 1992. - 208 с.
46. ASTM E 837-08 Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain-Gauge Method, 2008.
47. Brickstad B. A Parametric Study of Residual Stresses in Multi-pass Butt-welded Stainless Steel Pipes / B. Brickstad, B.L. Josefson // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. - 1998. - v. 75. - pp. 11-25.
48. Davies J. Induction Heating Handbook / J. Davies, P Simpson. - McGraw Hill Ltd. London, 1979. - p. 426.
49. Dike J.J. Residual Stress Determination Using Acoustoelasticity / J.J. Dike, G.C. Johnson // Transactions of the ASME. - 1990. - v. 57 (1). - pp. 12-17.
50. Dong Y. Finite element modeling of residual stresses in austenitic stainless steel pipe girth welds / Y. Dong, J.K. Hong, C.L. Tsai, P. Dong // Weld J. - 1997. - v. 76. - pp. - 442-449.
51. Handbook on Experimental Mechanics / Society for Experimental Mechanics; Ed. A.S. Kobayashi. - Prentice-Hall, 1987. - 790 p.
52. Handbook of Measurement of Residual Stresses / Society for Experimental Mechanics; Ed. Dr. Jian Lu. - Upper Saddle River, N.J, Lilburn, Georgie: The Fairmont Press, Inc., 1996. - 238 p.

53. Kelsey R.A. Measuring Non-Uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Method / R.A. Kelsey // Proceedings SESA. - 1956. - v. 14 (1). - pp. 181-194.
54. Kirsch G. Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre / G. Kirsch // Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. - 1898. - 42. - pp. 797-807.
55. Li Y. Finite Element Analysis of Residual Stress in the Welded Zone of a High Strength Steel / Y. Li, J. Wang, M. Chen, X. Shen. // Bull. Mater. Sci. - 2004. - v. 27. - pp. 127-132.
56. Mathar J. Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes / J. Mathar // Transactions ASME. - 1934. - v. 56 (4). - pp. 249-254.
57. Milbradt K.P. RingMethod Determination of Residual Stresses / K.P. Milbradt // Proceedings SESA. - 1951. - v. 9 (1). - pp. 63-74.
58. Nelson D.V. Residual Stress Determination Through Combined Use of Holographic Interferometry and Blind Hole Drilling / D.V. Nelson, J.T. McCrickerd // Experimental Mechanics. - 1986. - v. 26 (4). - pp. 371-378.
59. Rendler N.J. Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses / N.J. Rendler, I. Vigness // Experimental Mechanics. - 1966. - v. 6 (12). - pp. 577-586.
60. Soete W. An Industrial Method for the Determination of Residual Stresses / W. Soete, R. Vancrombrugge // Proceedings SESA. - 1950. - v. 8 (1). - pp. 17-28.
61. Tsai N.S. Selection of processes for welding steel rails / N.S. Tsai, T.W. Eagar // Proc. In Railroad Rail Welding, Railway Systems and Management Assoc., Northfield, NJ, 421. - 1985. - pp. 421-435.

Приложение 1



Закрытое Акционерное Общество
«ПСКОВЭЛЕКТРОСВАР»



180006, Россия, г. Псков,
 ул. Новаторов, 3

Тел. (8112) 53-58-98, факс (8112) 53-59-49

e-mail: info@pskovelectrosvar.ru
www.pskovelectrosvar.ru

Утверждаю:
 Технический директор
 ЗАО «ПСКОВЭЛЕКТРОСВАР»



А.Я. Сударкин

Справка о внедрении.

При разработке технологии стыковой контактной сварки трубопроводов большого диаметра и выборе оптимальных режимов сварки большую роль играет оценка остаточных напряжений. Наиболее широко применяемыми методами для оценки остаточных напряжений являются методы спекл-интерферометрии и магнитоупругости.

При разработке оптимальных режимов сварки на ЗАО «Псковэлектросвар» для измерения остаточных сварочных напряжений в трубах большого диаметра в сентябре 2012 г. впервые была выполнена экспериментальная апробация метода температурных следов, предложенного в диссертационной работе Д.А.Курова «Совершенствование традиционных и разработка новых методов диагностики остаточных напряжений в сварном соединении».

Для оценки достоверности предложенного метода были выполнены параллельные измерения остаточных сварочных напряжений по расположению температурных следов и по микроперемещениям, регистрируемым электронным спекл-интерферометром в окрестностях несквозных зондирующих отверстий. Полученные результаты показали достаточную степень их коррелированности: практически полное совпадение в зоне максимальных напряжений и не более чем 20% расхождение в зоне снижающихся напряжений при удалении от шва. Это позволяет использовать метод температурных следов в качестве неповреждающего метода для оперативной оценки уровней остаточных сварочных напряжений в технологическом процессе сварки труб без привлечения спекл-интерферометрического метода, требующего высверливания зондирующих лунок или применения метода магнитоупругости, требующего применения сложной аппаратуры. Следует отметить простоту получения исходной информации при использовании метода температурных следов. Достаточно иметь таблицу цветов побежалости для металла сварного соединения и измерительную линейку, с

помощью которой определяются расстояния от центра шва до визуально зафиксированных положений максимальных остаточных изотерм. Данные по температурам и расстояниям между центром шва и остаточными изотермами вводятся в разработанный в диссертации математический алгоритм, на выходе которого получается эпюра остаточных напряжений.

Применение неповреждающего метода температурных следов обеспечивает снижение трудоемкости 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.

Заместитель генерального директора
ЗАО «ПСКОВЭЛЕКТРОСВАР»,
действительный член АТН РФ, К.Т.Н.,
Лауреат Ленинской премии

 10.10.2013.
В.И. Хоменко