

АНТОНОВ Алексей Алексеевич

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ТЕХНИЧЕСКИХ И МЕТОДИЧЕСКИХ
СРЕДСТВ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В СВАРНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ
МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

По специальностям:

05.02.11 - Методы контроля и диагностика в машиностроении

05.02.10 - Сварка, родственные процессы и технологии



Москва, 2019

Работа выполнена на кафедре сварки и мониторинга нефтегазовых сооружений
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ВОПИЛКИН Алексей Харитонович
ООО НПЦ «Эхо+», генеральный директор
доктор технических наук, профессор

ДЫМКИН Григорий Яковлевич
ПГУПС Императора Александра I,
заведующий кафедрой методов и приборов
неразрушающего контроля

доктор технических наук, профессор
ЦАРЬКОВ Андрей Васильевич
Калужский филиал МГТУ имени Н.Э.Баумана,
директор

Ведущая организация: **НИУ «МЭИ»**

Защита состоится «20» июня 2019 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: +7 (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «____» _____ 2019 г.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета
к.т.н.



Прилуцкий М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Для Российской Федерации нефтегазовая отрасль имеет важное стратегическое значение. Безопасность и устойчивое функционирование инфраструктуры трубопроводного транспорта нефти и газа является одним из базовых условий поступательного развития экономики. В нашей стране создана одна из наиболее протяженных систем магистральных трубопроводов. Линейная часть магистрального трубопровода – это сварная металлоконструкция, состоящая из труб, сваренных между собой кольцевыми монтажными стыками. Трубы большого диаметра для магистральных трубопроводов являются сварными. Проведение ремонтно-восстановительных работ на магистральных трубопроводах, как правило, также связано с использованием технологий сварки плавлением.

Процесс сварки плавлением неизбежно приводит к возникновению полей остаточных сварочных напряжений в сварных соединениях. При статическом нагружении конструкции и достаточном запасе пластичности основного металла и сварных соединений влияние остаточных сварочных напряжений на несущую способность отсутствует. Однако, при переменных нагрузках, низких температурах эксплуатации и малом запасе пластичности высокий уровень остаточных сварочных напряжений может существенно снизить несущую способность.

Таким образом, при оценке несущей способности сварной металлоконструкции одним из важных параметров является уровень остаточных сварочных напряжений. Однако в федеральных и отраслевых нормативных документах методика оценки уровня остаточных сварочных напряжений не прописана. Отсутствие общепризнанных методик оценки напряженно-деформированного состояния металла в области сварного шва не позволяет дать рекомендации по оптимизации технологии сварки с целью снижения уровня остаточных сварочных напряжений.

Особую актуальность эта проблема представляет для сварных магистральных трубопроводов, нарушение целостности которых может приводить к серьезным авариям и катастрофическим последствиям для экологии.

Степень разработанности темы

Значительный вклад в теорию и практику методов оценки остаточных напряжений в нашей стране внесли О.А. Бакши, В.А. Винокуров, В.П. Вологдин, А.Г. Григорьянц, Н.Н. Давиденков, В.С. Игнатьева, В.А. Кархин, Е.С. Касаткин, С.А. Куркин, Н.А. Клыков, Л.А. Копельман, А.И. Лебедев, В.И. Махненко, Н.А. Махутов, Д.И. Навроцкий, А.Я. Недосека, Г.А. Николаев, Е.О. Патон, Н.Н. Прохоров, Д. Розенталь, В.М. Сагалевиц, В. Суте, И.П. Трочук, В.И. Труфяков и др. Они показали необходимость учета наличия остаточных напряжений при оценке работоспособности и долговечности сварных конструкций.

В развитии и совершенствовании методов оценки остаточных напряжений основополагающими являются работы отечественных ученых: А.А. Антонова, М.Х. Ахметзянова, И.А. Биргера, Л.И. Дехтяря, А.Г. Игнатьева, Б.С. Касаткина, И.В. Кудрявцева, Л.М. Лобанова, О.Н. Михайлова, В.А. Пивторака, А.В. Поздея, Н.И. Пригоровского, Н.Н. Прохорова, И.А. Разумовского, С.Б. Сапожникова, В.П. Щепинова. Среди иностранных ученых можно выделить: M. Bijak-Zochowski, W. Cheng, W. Evans, M.T. Flaman, M. Kabiri, M. Moore, J. Mather, A. Niku-Lari и др.

Из существующих методов оценки остаточных напряжений наибольшей достоверностью выделяются механические методы, основанные на разрезке поверхностных слоев металла и последующей фиксации возникших перемещений и деформаций, а среди них наиболее перспективным считается метод создания зондирующего отверстия. На данный метод разработаны нормативные документы: ASTM E 837 «Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method» и российский ГОСТ Р 52891-2007 «Контроль остаточных технологических напряжений методом лазерной интерферометрии. Общие требования».

Цели и задачи:

Адаптация метода лазерной интерферометрии для выполнения работ в полевых условиях.

1. Выполнить анализ существующих методов оценки уровня остаточных сварочных напряжений в сварных конструкциях.

2. Разработать подходы для повышения чувствительности и снижения трудоемкости метода лазерной интерферометрии.

3. Определить рациональные геометрические параметры зондирующего отверстия.

4. Разработать комплекс технических и методических средств, позволяющий выполнять работы по оценке уровня остаточных напряжений методом лазерной интерферометрии в полевых условиях.

5. Разработать комплексную методику оценки уровня остаточных напряжений в сварных соединениях магистральных трубопроводов (в том числе в местах проведения сварочных работ при ремонте) с учетом минимального воздействия на конструкцию при измерениях.

6. Использовать разработанную методику и оборудование для оценки уровня остаточных напряжений в сварных магистральных трубопроводах.

Научная новизна и теоретическая значимость работы:

1. Показано, что чувствительность оптической схемы Лейта-Упатниекса может быть увеличена более чем в 2 раза за счет перехода от измерения нормальной к наклонной компоненте вектора перемещений, состоящей из проекций нормальной и касательной компоненты на оптическую плоскость интерферометра. На данное решение получен Патент РФ.

2. Установлено, что чувствительность метода лазерной интерферометрии остается практически неизменной при переходе к соотношению геометрических параметров глухого зондирующего отверстия H/R до значений, близких к 1, что обеспечивает снижение уровня повреждения поверхности при проведении работ по измерению напряженного состояния.

3. Обоснована возможность применения зондирующих отверстий с конусным дном, получаемых обычными сверлами, вместо традиционно применяемых глухих отверстий с плоским дном. Показано, что изменение величины перемещений кромки отверстия при этом не превышает 0,7 %, чем можно пренебречь.

4. Разработана методика снижения погрешности при измерении напряжений низкого уровня за счет последовательного увеличения диаметра зондирующего отверстия и, соответственно, увеличения числа интерференционных полос.

5. Экспериментально подтверждено, что независимо от диаметра и толщины стенки трубы, последовательности и направления наплавляемых валиков при выполнении ремонтных наплавок на трубопроводе, характер поля остаточных напряжений не изменяется. Максимальные растягивающие остаточные напряжения возникают в зоне основного металла, прилегающей к зоне наплавки в осевом направлении, что связано с разной жесткостью трубы в осевом и кольцевом направлениях. Знание указанной закономерности позволяет уменьшить объем мероприятий, направленных на снижение уровня остаточных напряжений.

Практическая значимость работы

1. Повышена чувствительность метода лазерной интерферометрии более чем в 2,5 раза за счет перехода к измерению проекции наклонной компоненты вектора перемещений и снижению длины волны лазера.

2. Определены рациональные размеры и форма дна зондирующего отверстия, обеспечивающие получение информации о полях остаточных напряжений с заданной точностью при снижении требований к технологии его создания.

3. Предложена методика определения знака компонент тензора напряжений путем сравнения поведения интерференционных полос от сверления и от известного по направлению локального поля перемещений.

4. Создано оборудование для оценки остаточных напряжений, пригодное для использования в полевых условиях.

5. Результаты работы использованы при разработке 5 отраслевых нормативных документов ПАО «Газпром» и его дочерних организаций.

6. Получены 4 патента РФ на технические решения, выработанные при создании узлов и элементов интерферометра, подтвердившие полезность принятых решений. В том числе на два способа крепления интерферометра на трехмерную поверхность не допускающие возможности смещения интерферометра относительно исследуемой поверхности на величину, не превышающую 130 нм; на способ гашения внешних высокочастотных колебаний за счет эффекта внутреннего трения в биметаллической пластине, влияющих на стабильность работы оптических элементов и на новую схему фокусировки интерферометра, упрощающую процесс настройки интерферометра в полевых условиях.

7. Введение в оптическую схему интерферометра полосового фильтра и объемного диффузора позволило устранить влияние солнечной засветки и обеспечить возможность юстировки интерферометра без применения сложного вспомогательного оборудования.

8. Разработано программное обеспечение, позволяющее получать цифровые интерферограммы в реальном масштабе времени.

9. Сформулированы и экспериментально проверены требования к инструменту, предназначенному для создания зондирующих отверстий.

10. Предложена комплексная методика, предусматривающая применение двух принципиально различных методов оценки напряженного состояния, позволяющая существенно сократить трудоемкость и уровень повреждения поверхности.

11. Установлено, что при сварке стыковых швов труб класса прочности X80 (K65) диаметром 1420 мм магистрального трубопровода Бованенково-Ухта максимальные значения остаточных напряжений в зоне сварного шва не

превышают 20% от предела текучести, что позволило отказаться от применения послесварочной термической обработки.

Реализация работы в промышленности

Результаты исследований, выполненных в рамках данной работы, были использованы при разработке ряда отраслевых нормативных документов.

1. Рекомендации к послесварочной термической обработке сварных соединений труб диаметром 1420 мм класса прочности K65 (X80) для системы МГ «Бованенково-Ухта». ООО «ВНИИГАЗ».

2. Стандарт организации «Временная инструкция по технологиям ремонта сваркой (наплавкой) газопроводов с дефектами труб и сварных соединений, включая дефекты КРН». ООО «Газпром трансгаз Югорск».

3. Стандарт организации «Специальные технологии временного ремонта сваркой критических дефектов труб линейной части магистральных газопроводов». ООО «Газпром трансгаз Югорск».

4. Стандарт организации «Ремонт протяженных дефектов труб с применением механизированной и автоматической сварки». ООО «Газпром трансгаз Югорск».

5. Стандарт организации «Инструкция по технологии ремонта газопроводов с дефектами КРН методом аргонодугового переплава с последующей ультразвуковой ударной обработкой». ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург».

Методология и методы исследования

В работе использовалась совокупность теоретических и экспериментальных методов исследования.

Для тарировки метода лазерной интерферометрии было получено аналитическое решение эталонной задачи – модели тонкой круглой диафрагмы, жестко защемленной по контуру и нагруженной в центре внешней нагрузкой.

Для расчетного определения величин перемещений кромок глухого зондирующего отверстия использовался метод конечных элементов.

При проведении экспериментальных исследований использовались:

- стенд для оценки параметров рассеяния светового потока, созданный на базе гониометра ГС-5;
- тепловизор FLIR-620 для контроля тепловых процессов при сверлении;
- приборы для оценки напряженного состояния физическими методами: «Комплекс 2.05» и МВН-3М (магнитно-анизотропный метод), «ИКН» (метод магнитной памяти металлов), «STRESSCAN 500» и «Интроскан» (метод шумов Баркгаузена).

Для моделирования технологических операций сварки и наплавки были использованы: ручная дуговая сварка, механизированная сварка в среде защитных газов (плавящимся и неплавящимся электродами), автоматическая сварка в среде защитных газов, сварка под флюсом, комбинированная лазерно-дуговая сварка.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается:

- использованием современных поверенных электронных приборов для экспериментальной оценки остаточных сварочных напряжений физическими методами;
- применением универсальных программных пакетов ANSYS 10.0 и ANSYS R18.2 основанных на методе конечных элементов;
- подтверждением экспериментальных данных определения величин перемещений методом лазерной интерферометрии соответствующими результатами аналитического решения эталонной задачи.

Апробация результатов

Основные положения и научные результаты работы докладывались на:

- Международной научно-практической конференции «Инженерная механика в нефтегазовом деле», посвященной 75-летию факультета инженерной механики РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (Москва, 2018 г.);
- VII международной научно-технической конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2017)» (пос. Развилка, 2017 г.);
- VIII отраслевом совещании «Состояние и основные направления развития сварочного производства ПАО «Газпром» (Москва, 2016 г.);

- Межведомственном совещании «Метрологическое обеспечение измерения механического напряжения в Российской Федерации» (Москва, 2015 г.);
- Научно-практической конференции «Современные технологии сварки, оборудование и материалы для строительства и ремонта магистральных трубопроводов» (Санкт-Петербург, 2014 г.);
- VIII международной конференции «Сварочные материалы» (Киев, 2014 г.);
- IV международной научно-практической конференции «Сварочные и родственные технологии при строительстве, реконструкции и ремонте объектов ТЭК» (Московская обл., 2014 г.);
- Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы машиностроения» (Москва, 2014 г.);
- Австрийско-Российском Форуме для прикладных исследований «Трибология, химмотология и сварка в машиностроении» (Москва, 2013 г.);
- Научно-практической конференции московского межотраслевого альянса главных сварщиков совместно с РНТСО по проблеме «Сертификация и нормативное регулирование сварочного производства» (Москва, 2013 г.);
- VI отраслевом совещании «Состояние и основные направления развития сварочного производства ОАО «Газпром» (п. Развилка, 2012 г.);
- III научно-технической конференции «Сварочные и родственные технологии при строительстве, реконструкции и ремонте магистральных и промысловых трубопроводов» (Москва, 2011 г.);
- Семинаре «Состояние и направления развития сварочного производства ООО «Газпром трансгаз Югорск» (Югорск, 2011 г.);
- Семинаре «Организационно-методическое обеспечение неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах» (Москва, 2011 г.);
- Круглом столе «Трубопроводный транспорт углеводородов» (Москва, 2010 г.);
- V отраслевом совещании-конференции «Состояние и основные направления развития сварочного производства ОАО «Газпром» (Москва, 2010 г.);

- Отраслевом совещании-конференции «Состояние и основные направления развития сварочного производства ОАО «ГАЗПРОМ» (Москва, 2008 г.);
- Научно-технической конференции «Диагностика газонефтепроводов и резервуарных конструкций при их сооружении и эксплуатации в условиях старения и коррозии» (Москва, 2008 г.);
- Международной конференции «Сварочные и родственные технологии при строительстве, реконструкции и ремонте газонефтепроводов» (Москва, 2007 г.).

Личный вклад автора

Личное участие автора выразилось в постановке задач исследований; проведении экспериментов; получении основных научных результатов; разработке методик пересчета измеряемых перемещений в напряжения; разработке методики и оборудования повышенной чувствительности; проведении цикла лабораторных и полевых работ; установлении характерных особенностей распределения полей остаточных сварочных напряжений, возникающих после выполнения сварочно-монтажных работ; разработке предложений по оптимизации методов снижения остаточных напряжений; участии в разработке отраслевых нормативных документов, основанных на результатах выполненных научно-исследовательских работ; разработке положений комплексной методики определения остаточных сварочных напряжений на магистральных трубопроводах.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 34 печатных работ, в том числе: 5 работ - в списке Scopus, 12 работ - в списке ВАК РФ, 4 патента РФ, 3 учебных пособия (по теме диссертации).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка использованных литературных источников. Общий объем диссертации составляет 368 страниц, включая 251 рисунок и 24 таблицы. Список литературы включает 245 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная новизна. Показана потребность отрасли в технологии определения остаточных напряжений в магистральных трубопроводах. Сформулированы цель и задачи исследования.

В первой главе проведен обзор литературных источников, посвященных анализу влияния остаточных напряжений на прочность и работоспособность сварных конструкций. Показан вклад отечественных и зарубежных ученых в разработку методов оценки остаточных напряжений.

Проведен глубокий обзор известных методов оценки напряженного состояния. Проведена классификация методов.

Отмечено, что среди механических методов, пригодных для применения в зоне сварного шва, в настоящее время наиболее перспективен метод отверстия. Современное развитие данного метода идет по двум направлениям, отличающимся технологией измерения возникших перемещений и деформаций и, соответственно, математическими моделями. Первое направление – тензометрическая регистрация деформаций. Развитие этого направления связано с разработанным в США нормативным документом ASTM E837. Второе направление использует оптические бесконтактные измерения полей перемещений в окрестности зондирующего отверстия. Его представляет разработанный в России ГОСТ Р 52891-2007.

Сформулированы особенности зоны сварного шва, которые необходимо учитывать при выборе методов оценки напряженного состояния. Показано, что физические методы не могут быть применены для количественного определения уровня остаточных напряжений в зоне сварного шва.

Вторая глава посвящена развитию метода лазерной интерферометрии. Проведен анализ основных оптических схем, позволяющих измерять перемещения после возмущения поверхности. Выделены особенности трех, наиболее часто применяемых для лазерной интерферометрии оптических схем – Денисюка, Лейта-Упатниекса и Леендертца. Показано, что оптическая схема Лейта-Упатниекса имеет

серьезные преимущества перед другими, а именно, возможность определения направления и величины двух главных напряжений плоского напряженного состояния за одно измерение, при этом отсутствует необходимость точного позиционирования интерферометра вдоль главной оси. Однако такая схема обладает более низкой чувствительностью. Поэтому одной из главных задач работы является повышение чувствительности при применении данной оптической схемы.

На основе анализа формулы (1), преобразованной из формулы, приведенной в ГОСТ Р 52891-2007, позволяющей определить цену одной интерференционной полосы σ_1 , повысить чувствительность метода можно путем изменения следующих параметров.

$$\sigma_1 = \left(30 + \frac{10}{h}\right) \frac{D_0}{D} \frac{E}{E_{Al}} \frac{\lambda}{2W_1} \quad (1)$$

Где D_0 - эталонный диаметр, равный 2 мм; E_{Al} - модуль упругости алюминия, равный 70 ГПа; D, h - диаметр и глубина зондирующего отверстия, мм; E - модуль упругости (Юнга), ГПа; λ - длина волны лазерного излучения, мкм; W_1 - перемещение от единичного напряжения, равного 1 МПа.

Во-первых, уменьшить длину волны лазерного излучения λ .

Во-вторых, добиться увеличения измеряемого показателя. В нашем случае это проекция вектора перемещения точек кромки отверстия на оптическую плоскость интерферометра. Вектор перемещения состоит из нормальной и касательной компоненты. В классическом случае при применении оптической схемы Лейта-Упатниекса измерению подвергается только нормальная компонента. Переход к измерению большего по величине суммарного вектора перемещений требует модернизации оптической схемы.

Существует еще одна возможность повышения чувствительности – увеличение геометрических параметров зондирующего отверстия (D, h). Однако этот путь не приемлем для зоны сварного шва, имеющей высокий градиент напряжений, что приведет к усреднению полученных результатов за счет увеличения базы измерения.

Для увеличения измеряемой величины W_1 было предложено изменить угол наклона оптической плоскости интерферометра к исследуемой поверхности с классических 90° до 45° . В результате такого решения измеряют величину проекции суммарного вектора перемещений, состоящего из нормальной и касательной компоненты, на оптическую плоскость интерферометра (Рисунок 1). Т.к. касательная компонента изначально существенно больше нормальной, то и величина проекции тоже больше величины только нормальной компоненты более чем в 2 раза. На новую конструкцию интерферометра получен патент РФ.

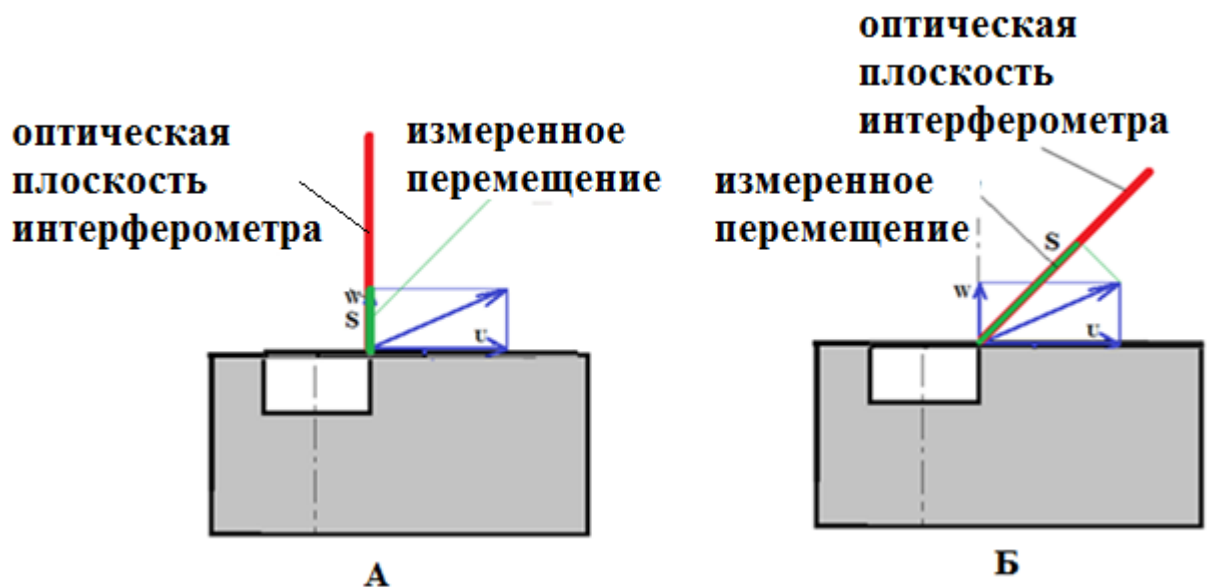


Рисунок 1. Схема измерения нормальной компоненты вектора перемещений (А) и проекции суммарной компоненты на оптическую плоскость интерферометра (Б)

Замена лазера с длиной волны $\lambda=650$ нм на лазерный диод с $\lambda=532$ нм обеспечило дополнительное повышение чувствительности еще на 18 %.

В результате проведенных мероприятий чувствительность была повышена более чем в 2,5 раза, что обеспечило достаточную точность при измерении малых по величине напряжений.

Выполнено математическое обоснование возникновения интерференционных полос на интерферограмме. Приведены кривые, описывающие величину перемещений точек поверхности вблизи засверленного отверстия в зависимости от расстояния до кромки отверстия.

В процессе модернизации оборудования был осуществлен переход от применения голографической интерферометрии, предусматривающей запись информации на стеклянную фотопластинку, к электронной спекл-интерферометрии, позволивший получать и обрабатывать цифровую информацию в реальном масштабе времени.

Для адаптации оборудования для работы в полевых условиях при оценке напряжений, возникающих на магистральных трубопроводах, была изменена конструкция интерферометра. Основное направление изменений - упрощение технологии юстировки и работы в полевых условиях; обеспечение устойчивости оборудования и отдельных узлов и элементов к транспортным, вибрационным и ударным нагрузкам; обеспечение возможности работы интерферометра на поверхностях сложной формы; обеспечение крепления интерферометра на исследуемую поверхность сложной формы; обеспечение возможности установки и функционирования интерферометра в любом пространственном положении; разработке новой схемы фокусировки интерферометра.

Разработаны методики расшифровки интерферограмм для разных углов наклона оптической интерферометра к исследуемой поверхности.

Последовательность этапов визуальной расшифровки интерферограмм показана на Рисунке 2.

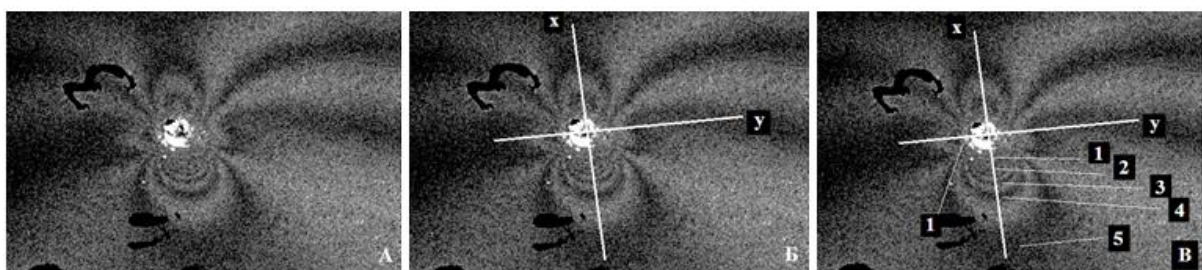


Рисунок 2. Последовательность расшифровки интерферограммы
А – общий вид интерферограммы; Б – определение направления главных напряжений; В – подсчет числа полос по каждому из главных напряжений

На первом этапе определяют направления осей главных напряжений. Они соответствуют осям симметрии картины на интерферограмме. Затем подсчитывают число темных интерференционных полос, пересекающих каждую

из главных осей. В зависимости от глубины, диаметра, угла наклона оптической плоскости интерферометра и модуля упругости исследуемого материала интерференционной полосе присваивают цену в единицах измерения напряженного состояния – МПа. Для определения значения главной компоненты напряженного состояния число интерференционных полос умножают на цену одной интерференционной полосы.

Для случаев, когда точно подсчитать число интерференционных полос невозможно, можно вести расчет исходя из определения координаты крайней интерференционной полосы.

$$W(r_s) = W(r)e^{-a\left(\frac{r-r_s}{r_s}\right)}, \quad (2)$$

Где $W(r)$ – значение компоненты перемещения в любой точке окрестностей отверстия; $W(r_s)$ – значение соответствующей компоненты на кромке отверстия; a – степенной показатель; r – координата точки на главной оси; r_s – радиус высверленного отверстия.

Создание зондирующего отверстия также является определенной проблемой. Была решена задача по определению размеров отверстия, которые отвечали требованиям по технологичности его создания без потери чувствительности измерения. Анализ влияния формы дна отверстия, а также его глубины на величину нормальных перемещения кромок выполнен численно методом конечных элементов с помощью программного пакета ANSYS 10.0.

Американский стандарт ASTM E837-13a регламентирует создание глухого отверстия с плоским дном и глубиной равной диаметру отверстия. Отечественный ГОСТ Р 52891-2007 не содержит каких-либо требований к зондирующему отверстию. Создание отверстия с плоским дном требует сложной технологии. В то же время создание отверстия с коническим дном значительно проще. При моделировании были разработаны четыре варианта конечно-элементной модели пластины, имеющей глухие отверстия с коническим и плоским дном с соотношениями $H/D = 1:2$ и $1:1$. Пример создания конечно-элементной модели пластины с отверстием с коническим дном при $H/D = 1:2$

показан на Рисунке 3. На Рисунке 4 показано распределение значений компонент нормальных перемещений точек W модели отверстия для этой же пластины. Результаты моделирования позволили рекомендовать коническую форму дна зондирующего отверстия с соотношением $H/D = 1:2$ (Таблица 1).

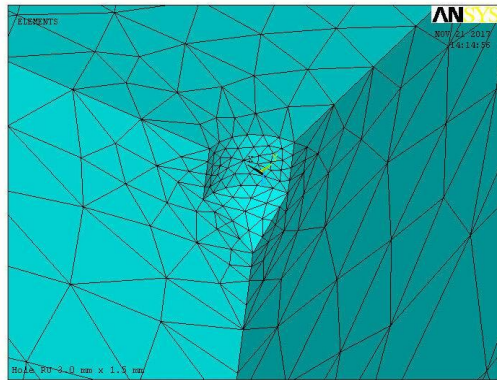


Рисунок 3. Конечно-элементная модель пластины с отверстием с коническим дном при $H/D = 1:2$

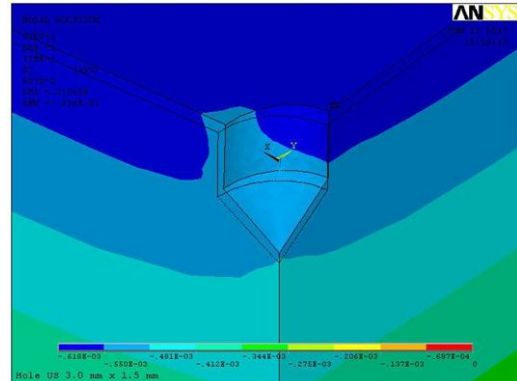


Рисунок 4. Распределение компонент вертикального перемещения в случае создания отверстия с коническим дном при $H/D = 1:2$

Таблица 1.

Сопоставление значений максимальных перемещений кромки отверстия вдоль оси OZ по четырем рассмотренным вариантам формы отверстия

№№ вар.	H/D	Форма дна отверстия	Максимальное перемещение по оси OZ , $\times 10^2$ мм
1	1:2	плоское	- 0,61392
2	1:2	коническое	- 0,61832
3	1:1	плоское	- 0,63487
4	1:1	коническое	- 0,63896

Результаты дополнительных расчетов подтвердили, что наиболее приемлемым является зондирующее отверстие глубиной, равной радиусу. При этом величина перемещений на кромке отверстия снижается незначительно, а само отверстие оказывается в 2 раза меньше по глубине, чем рекомендуется в нормативных документах. Т.е. снижается уровень повреждающего воздействия на исследуемое изделие.

Создание отдельных элементов и узлов оборудования потребовало решения ряда научно-практических задач.

Для создания равномерного светового потока в оптическую схему интерферометра был введен диффузор. С помощью экспериментальной установки, выполненной на базе гониометра ГС-5, проведены сравнительные испытания различных вариантов диффузоров. На Рисунке 5 показаны индикатрисы рассеяния, полученные для плоского диффузора из матированного стекла и для объемного диффузора из воска. Введение в оптическую схему интерферометра нового диффузора позволило значительно упростить юстировку оборудования в полевых условиях путем снижения требований к точности выставления угла наклона делительного зеркала.



Рисунок 5. Сравнение интенсивности светового потока, прошедшего через классический матовый рассеиватель (синий) и через восковой слой (красный)

Для обеспечения функционирования интерферометра в условиях солнечной засветки в оптическую схему включен полосовой фильтр, обеспечивающий пропускание только светового потока с длиной волны соответствующей длине волны применяемого лазерного диода.

Разработана новая технология фокусировки интерферометра на исследуемую поверхность, на которую был получен патент РФ. Патенты также были получены на способы фиксации интерферометра на изделии и на технологию гашения внешних вибрационных воздействий за счет эффекта внутреннего трения элементов интерферометра.

При выборе режимов сверления зондирующего отверстия был применен тепловизор FLIR-620 (Рисунок 6), позволивший снизить тепловое воздействие в

процессе сверления. Выданы рекомендации по ограничению количества зондирующих отверстий, созданных одним сверлом, из-за его износа.

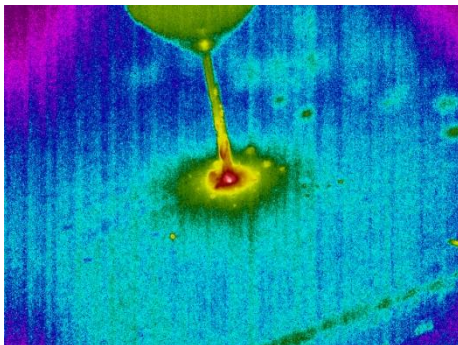


Рисунок 6. Регистрация температурного поля, возникающего при сверлении отверстия с помощью тепловизора

В связи с тем, что классическая оптическая схема Лейта-Упатниекса подверглась определенной модернизации в процессе работы, проведена расчетно-экспериментальная проверка правильности измерения перемещений. В качестве экспериментальной модели выбрана круглая жестко закрепленная по краю и установленная горизонтально диафрагма. Нагружение диафрагмы выполнено эталонным грузом. Расхождение в результатах расчета и эксперимента составило 1,3%, что позволяет сделать вывод, что модернизированная оптическая схема нового интерферометра позволяет использовать для измерения перемещений точек поверхности тот же математический аппарат, что и классическая схема.

При проведении измерений на стенде выполнена проверка достоверности оценки напряженного состояния новым интерферометром путем сравнения экспериментально полученных значений остаточных напряжений с расчетными, моделирующим напряженное состояние, возникающее на линейной части магистрального трубопровода. Расчет проведен как по котельным формулам, так и на основании данных о деформации, полученных с помощью тензорезисторов, установленных на стенде. Сравнение расчетных и экспериментально полученных данных показало их сходимость в пределах погрешности измерения.

Создание программно-аппаратного комплекса получения и обработки цифровых интерферограмм позволило разработать технологию последовательного повышения чувствительности измерения для случая, когда

после создания зондирующего отверстия обнаружено менее двух интерференционных полос, что характерно для областей с низким уровнем остаточных напряжений. Технология предусматривает возможность увеличения диаметра и соответственно глубины уже засверленного зондирующего отверстия и получения интерферограммы от первой и третьей экспозицией. Т.е. не происходит потери информации о напряженном состоянии от зондирующего отверстия, по которому первично полученная интерферограмма позволяет получить достаточно точной информации поле перемещений.

В работе предложена методика определения знака напряжений, основанная на определении направления деформации в зоне сверления. В голографической интерферометрии невозможно отличить положительный фазовый сдвиг от отрицательного. Поэтому для определения знака деформаций предложено создать рядом с зондирующим отверстием область с известным заранее направлением деформации. Изучение взаимодействия интерференционных полос, возникших от сверления и от области с известной по направлению деформацией, позволяет однозначно судить о знаке главных напряжений. Одним из вариантов создания области с искусственно созданной деформацией известного является кернение поверхности (Рисунок 7).

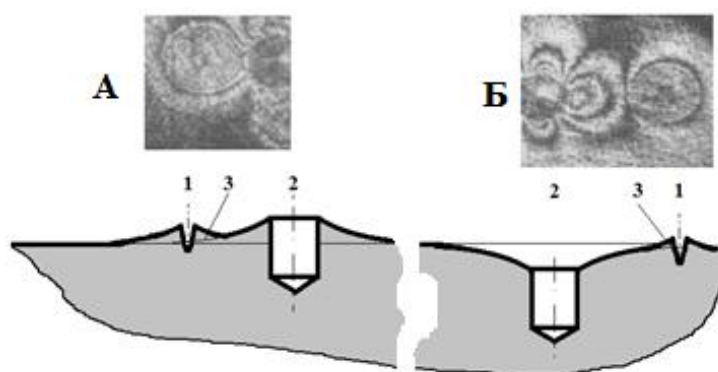


Рисунок 7. Суммарные перемещения, возникающие при засверливании отверстия (2) в теле объекта с имеющимся полем напряжений и удара керном (1). Тонкой линией (3) показано положение поверхности до кернения

Для уменьшения влияния созданного зондирующего глухого отверстия на несущую способность исследуемого изделия предложено несколько вариантов снижения коэффициента концентрации напряжений (рисунок 8).

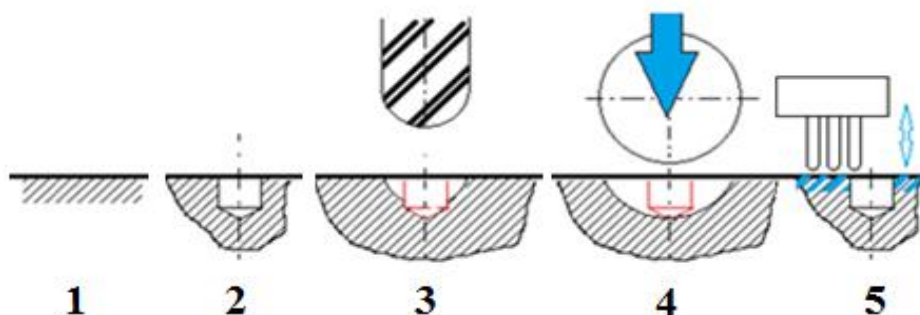


Рисунок 8. Снижение влияния зондирующего отверстия на несущую способность.

1 – поверхность до сверления зондирующего отверстия; 2 – зондирующее отверстие ($K_{\sigma} = 2,1$); 3 – рассверливание отверстия фрезой со сферической рабочей частью ($K_{\sigma} = 1,1 \dots 1,5$); 4 – обработка отверстия керном со сферической рабочей частью (наведение сжимающих напряжений); 5 – ультразвуковая ударная обработка для создания области сжимающих поверхностных напряжений вокруг отверстия

Для повышения производительности работ по измерению остаточных напряжений, снижения повреждающего воздействия на конструкцию предложена Комплексная методика определения остаточных напряжений в сварных конструкциях, объединяющая преимущества механических и физических методов изучения остаточных напряжений и снижающая их отдельные недостатки. На сварной конструкции выделяют зоны, для каждой из которых предусматривается своя технология определения остаточных напряжений.

Так для сварного шва и зоны термического влияния рекомендовано применение только механических методов, а на основном металле, прилегающем к зоне термического влияния, допустимо применение физических методов. Повышение достоверности получаемых данных предлагается обеспечить перекрытием областей применения механического и физического методов в зоне основного металла, прилегающей к околошовной области. Для снижения объемов применения механического метода и, как следствие, снижения трудозатрат и снижения уровня деструктивного воздействия на конструкцию, предложено проводить предварительное обследование шва и зоны термического влияния физическим методом с целью обнаружения областей с пиковым значением остаточных напряжений. В результате сравнительных испытаний при выполнении

работ, описанных в третьей и четвертой главе, качестве второго метода для Комплексной методики выбран метод шумов Баркгаузена (магнитошумовой метод).

В третьей главе приведены материалы исследовательских работ по определению остаточных напряжений, возникших при производстве, монтаже и ремонте труб магистральных трубопроводов.

Для принятия решения о необходимости проведения послесварочной термической обработки стыковых швов при строительстве газопровода Бованенково-Ухта для труб Ø1420×33,4 класса прочности X80, проведены работы по определению максимальных значений остаточных напряжений в зоне стыкового сварного шва. Работы проводились в полевых условиях. Основные результаты работы представлены в Таблице 2. Они позволили принять обоснованное решение об отказе от проведения термообработки, т.к. предельный уровень остаточных напряжений не превысил 20 % от предела текучести.

Таблица 2.

Максимальные значения остаточных напряжений кольцевых соединений, выполненных различными способами

Способ сварки	Максимальное значение остаточных напряжений	
	После сварки	После сварки и последующего высокого отпуска
	МПа	МПа
Механизированная	58	20
Ручная дуговая с заваркой корня шва на подъем	57	0
Ручная дуговая с заваркой корня шва на спуск	108	-20

В интересах ООО «Газпром трансгаз Югорск» проведены работы по исследованию напряженного состояния, возникающего в результате проведения ремонта внешней поверхности магистральных трубопроводов методом вышлифовки дефектного слоя и наплавки в эту область нового металла. Работы выполнялись в полевых и в лабораторных условиях. Рассматривались различные

варианты наплавки, отличающиеся направлением и последовательностью наложения валиков. Целью работ был выбор технологии ремонта, создающей минимальный уровень остаточных напряжений и деформаций. Пример интерферограммы одной из исследованных точек приведен на Рисунке 9. Результатом работ стали три отраслевых нормативных документа.

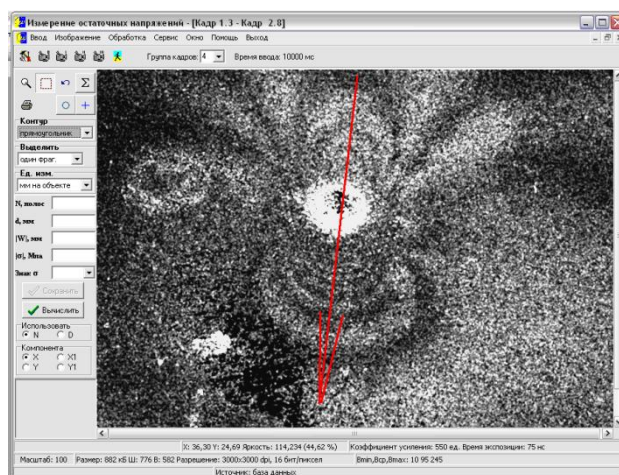


Рисунок 9. Интерферограмма одной из наиболее нагруженных точек

При выполнении данной работы отмечена устойчивая закономерность распределения полей остаточных напряжений, характер которой не зависит от особенностей технологии заполнения вышлифованной области (Рисунок 10).

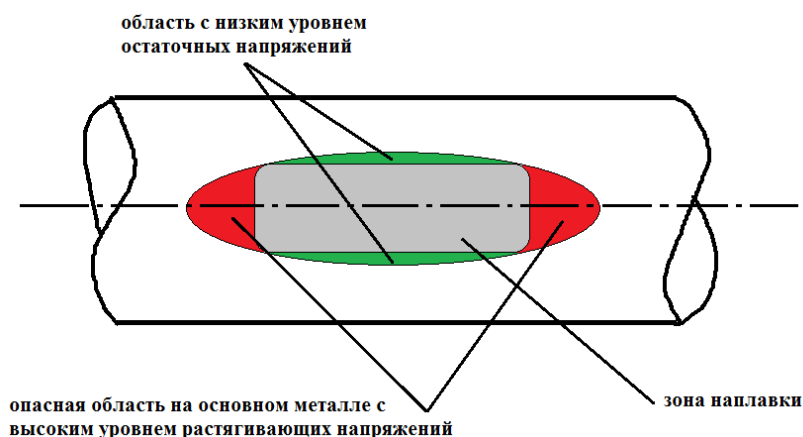


Рисунок 10. Характерные области распределения остаточных напряжений в зоне ремонтной наплавки на трубе

Обнаружено, что максимальные растягивающие напряжения наблюдаются не в наплавленном металле, а в зонах основного металла, прилегающих к зоне наплавки и имеющих протяженность до 40...50 мм от линии сплавления, и

располагающихся в осевом направлении. В кольцевом направлении на основном металле уровень остаточных напряжений низкий. Данный факт можно объяснить разной жесткостью трубы в осевом и кольцевом направлении. Первичная информация о зонах, где возможно возникновение наиболее высокого уровня остаточных напряжений, позволяет снизить размер области, где в дальнейшем планируется проводить мероприятия, направленные на снижение уровня остаточных напряжений. Пример характерных эпюры распределения двух компонент напряженного состояния в осевом и кольцевом направлении после применения разных вариантов заполнения разделки представлен на Рисунках 11 и 12. По заказу ООО «Спецподводремонт» проведены аналогичные работы по изучению характера распределения полей остаточных напряжений для труб подводного перехода, подвергнутых ремонтной наплавке.

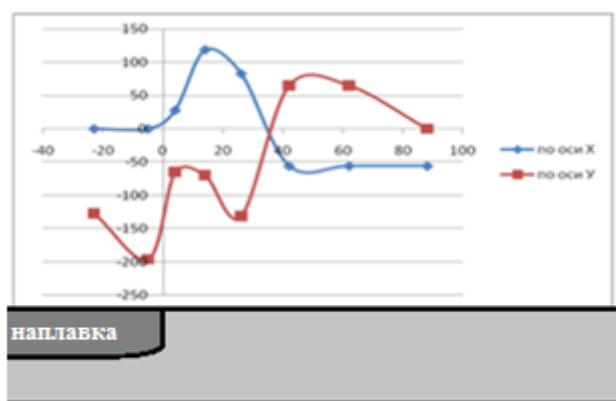


Рисунок 12. Распределение осевых (синий) и кольцевых (красный) напряжений по направлению вдоль оси трубы для одного из вариантов наплавки

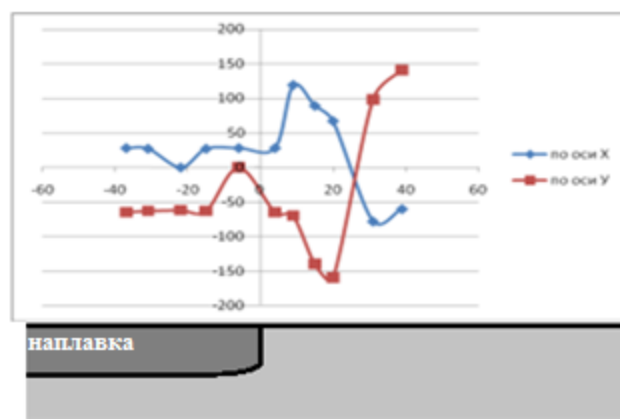


Рисунок 13. Распределение осевых (синий) и кольцевых (красный) напряжений по направлению вдоль оси трубы для другого варианта наплавки

Кроме ремонта трубопроводов методом вышлифовки дефектного слоя и последующей наплавки нового металла были выполнены работы по изучению возможности применения технологии, предусматривающей переплав дефектного слоя металла, содержащего дефекты типа коррозии под напряжением, без его

предварительного удаления с помощью технологии аргонодуговой сварки неплавящимся электродом.

Проведено сравнение классической многодуговой технологии сварки под слоем флюса и новой технологии, подразумевающей осуществление сварки корневого шва гибридной лазерно-дуговой сваркой, а последующее заполнение разделки - сваркой под слоем флюса при выполнении заводского продольного шва при изготовлении труб на заводе (Рисунок 14).

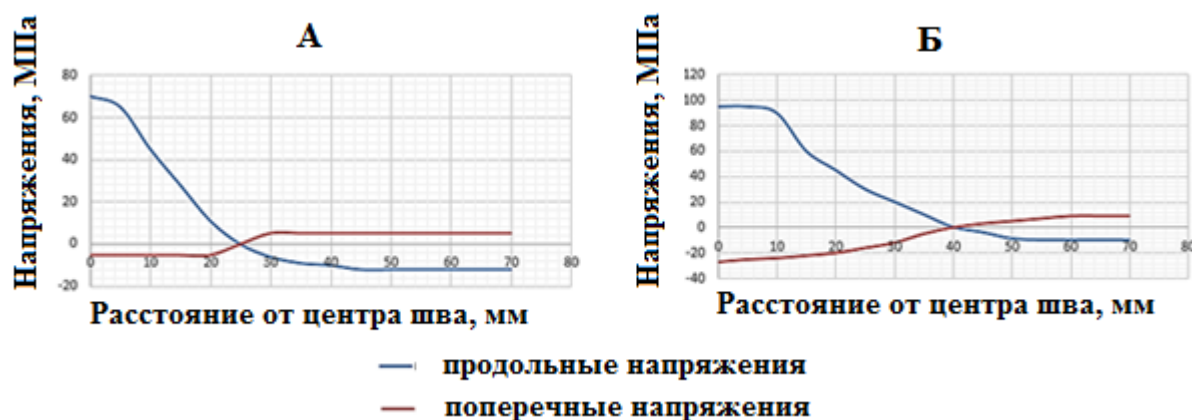


Рисунок 14. Распределение остаточных напряжений в сварных соединениях стали К60, выполненных разными способами:

А - лазерно-гибридная сварка в разделку с прихваткой, Б - многодуговая сварка под слоем флюса

В четвертой главе разработанная комплексная методика определения остаточных напряжений и ее отдельные элементы были применены для проверки эффективности некоторых технологий снижения уровня остаточных напряжений.

Проверке была подвергнута технология высокого отпуска для кольцевых стыковых сварных соединений. Обнаружено, что для всех исследованных технологий сварки, предусмотренных нормативными документами ПАО «ГАЗПРОМ» остаточные напряжения в центре шва после термического воздействия оказываются близкими к нулевому. Однако, для толстенной трубы (33,4 мм) было обнаружено, что на внутренней поверхности трубы не происходит полного снятия растягивающих остаточных напряжений (Рисунок 15).

Установлено, что применение ультразвуковой ударной обработки позволяет эффективно (до 70 %) «срезать» пики растягивающих остаточных

напряжений. При этом заметного влияния на уровень сжимающих напряжений не отмечено.

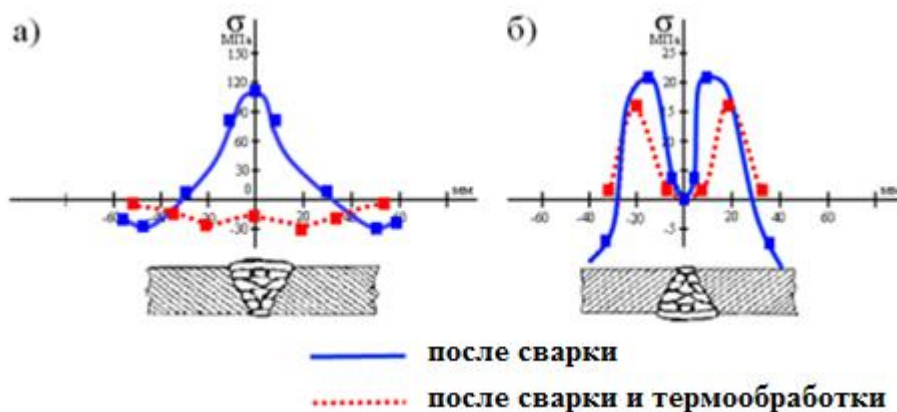


Рисунок 15. Снижение поперечных остаточных напряжений на внешней (а) и внутренней (б) поверхности трубы до и после термообработки

Были проведены полевые исследования эффективности вибрационной обработки сварной трубной плети на резонансных частотах. Трубная плеть содержала два стыковых кольцевых шва. Один из них был выполнен при строительстве трубопровод. После виброобработки их уровень стал близок к нулевому значению. Второй стыковой кольцевой шов был новый. В нем зафиксирован более высокий первоначальный уровень напряженного состояния. Результаты виброобработки приведены в Таблице 3.

Таблица 3.

Сравнительные результаты измерения остаточных напряжений в области нового кольцевого стыкового шва до и после виброобработки

Точка	Примечание	$\sigma_{\text{продольные}}, \text{ МПа}$	$\sigma_{\text{кольцевые}}, \text{ МПа}$
1-11	До виброобработки	+ 104	+ 56
2-11	После виброобработки	+ 54	0

Таким образом подтверждено, что предложенная комплексная методика дает возможность контролировать уровень остаточных напряжений до и после того или иного воздействия на конструкцию, направленного на снижение уровня остаточных сварочных напряжений. Наличие информации о первоначальном

поле остаточных напряжений позволяет оптимизировать технологии снижения их уровня, снижая трудоемкость и повышая производительность.

Результаты одного из экспериментов по оптимизации технологии ультразвуковой ударной обработки сварной конструкции приведены на Рисунке 16. Один из образцов был подвергнут обработке по всей поверхности, а второй – локальной, только в областях с высоким уровнем растягивающих напряжений. В обоих случаях произошло значительное снижение уровня остаточных напряжений, однако объем работ во втором случае был примерно в 3...4 раза меньше.

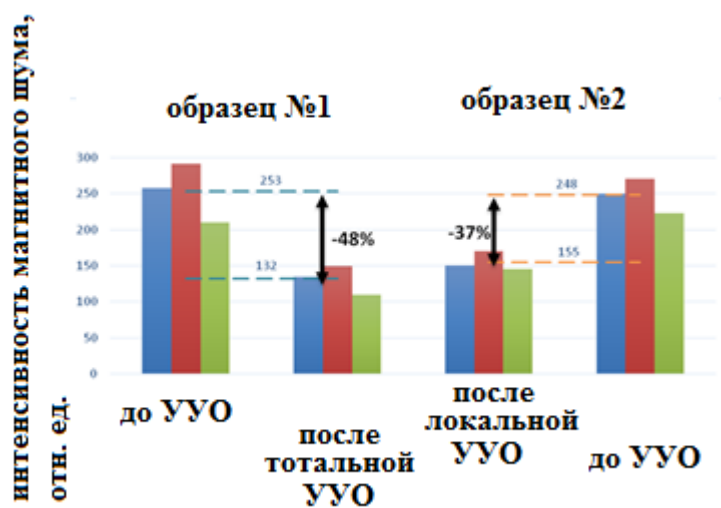


Рисунок 16. Снижение остаточных сварочных напряжений в наплавках вдоль продольной оси образца до и после ультразвуковой ударной обработки. Цветом показаны данные по трем характерным точкам

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Показано, что чувствительность оптической схемы Лейта-Упатниекса может быть увеличена более чем в 2 раза за счет перехода от измерения нормальной к наклонной компоненте вектора перемещений, состоящей из проекций нормальной и касательной компоненты на оптическую плоскость интерферометра. На данное решение получен Патент РФ.

2. Установлено, что чувствительность метода лазерной интерферометрии остается практически неизменной при переходе к соотношению геометрических параметров глухого зондирующего отверстия H/R до значений, близких к 1, что

обеспечивает снижение уровня повреждения поверхности при проведении работ по измерению напряженного состояния.

3. Обоснована возможность применения зондирующих отверстий с конусным дном, получаемых обычными сверлами, вместо традиционно применяемых глухих отверстий с плоским дном. Показано, что изменение величины перемещений кромки отверстия при этом не превышает 0,7 %, чем можно пренебречь.

4. Разработана методика снижения погрешности при измерении напряжений низкого уровня за счет последовательного увеличения диаметра зондирующего отверстия и, соответственно, увеличения числа интерференционных полос.

5. Экспериментально подтверждено, что независимо от диаметра и толщины стенки трубы, последовательности и направления наплавленных валиков при выполнении ремонтных наплавов на трубопроводе, характер поля остаточных напряжений не изменяется. Максимальные растягивающие остаточные напряжения возникают в зоне основного металла, прилегающей к зоне наплавки в осевом направлении, что связано с разной жесткостью трубы в осевом и кольцевом направлениях. Знание указанной закономерности позволяет уменьшить объем мероприятий, направленных на снижение уровня остаточных напряжений.

6. Предложена методика определения знака компонент тензора напряжений путем сравнения поведения интерференционных полос от сверления и от известного по направлению локального поля перемещений.

7. Создано оборудование для оценки остаточных напряжений, пригодное для применения, как в лабораторных, так и в полевых условиях.

8. На основе измерения напряжений выданы рекомендации по отмене термической обработки после сварки при строительстве магистрального трубопровода Бованенково-Ухта. Установлено, что при сварке стыковых швов труб класса прочности X80 (K65) диаметром 1420 мм магистрального

трубопровода максимальные значения остаточных напряжений в зоне сварного шва не превышают 20% от предела текучести.

9. Результаты работы использованы при разработке 5 отраслевых нормативных документов ПАО «Газпром» и его дочерних организаций.

10. Получены 4 патента РФ на технические решения, выработанные при создании узлов и элементов интерферометра, подтвердившие полезность принятых решений. В том числе на два способа крепления интерферометра на трехмерную поверхность не допускающие возможности смещения интерферометра относительно исследуемой поверхности на величину, не превышающую 130 нм; на способ гашения внешних высокочастотных колебаний за счет эффекта внутреннего трения в биметаллической пластине, влияющих на стабильность работы оптических элементов и на новую схему фокусировки интерферометра, упрощающую процесс настройки интерферометра в полевых условиях.

11. Введение в оптическую схему интерферометра полосового фильтра и объемного диффузора позволило устранить влияние солнечной засветки и обеспечить возможность юстировки интерферометра без применения сложного вспомогательного оборудования.

12. Разработано программное обеспечение, позволяющее получать цифровые интерферограммы в реальном масштабе времени.

13. Сформулированы и экспериментально проверены требования к инструменту, предназначенному для создания зондирующих отверстий.

14. Предложена комплексная методика, предусматривающая применение двух принципиально различных методов оценки напряженного состояния, позволяющая существенно сократить трудоемкость и уровень повреждения поверхности.

15. Экспериментально показано, что применение ультразвуковой ударной обработки приводит к снижению пиковых значений растягивающих напряжений до 70% от первоначального уровня, что позволяет, в ряде случаев, рекомендовать эту технологию как альтернативную термической обработке.

16. Экспериментально подтверждена эффективность высокого отпуска зоны стыковых швов, выполняемых при строительстве магистральных трубопроводов в соответствии с нормативными документами ПАО «Газпром». Применение термического воздействия приводит к снижению уровня остаточных напряжений в шве до величин, не превышающих 20 МПа.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

1. Антонов А.А. Остаточные напряжения в сварном соединении пластин из магниевого сплава // Сборник «Современные проблемы сварки». М. : 1984. С. 105-110. (0,37 п.л.)

2. Антонов А.А., Чернышев Г.Н. Взаимодействие остаточных сварочных и упругих температурных напряжений // Сборник «Технологические остаточные напряжения: Материалы III Всесоюзного симпозиума». М.: 1988. С.370-377. (0,5 п.л. / 0,25 п.л.)

3. Антонов А.А. Регулирование остаточных сварочных напряжений путем наведения термоупругих напряжений // Физика и химия обработки материалов. 1991. № 1. С. 121-124. (0,25 п.л.)

4. Антонов А.А. Влияние локальной электроимпульсной обработки на снижение уровня остаточных напряжений в сварных соединениях алюминиевого сплава 01420 // Сборник «Тезисы докладов IV межреспубликанского симпозиума «Остаточные напряжения: моделирование и управление». Пермь: 1992. С.10. (0,1 п.л.)

5. Антонов А.А., Стеклов О.И. Определение остаточных сварочных напряжений в кольцевых швах толстостенных труб категории прочности K65 (X80) // Сборник: Отраслевое совещание-конференция. Состояние и основные направления развития сварочного производства ОАО «ГАЗПРОМ». 10-12 ноября 2008г. Тезисы докладов. М.: ВНИИГАЗ. 2008. С.141-146. (0,37 п.л. / 0,2 п.л.)

6. Антонов А.А., Капустин О.Е. Оптико-электронный интерферометр для измерения остаточных напряжений // Технология машиностроения. 2008. №3. С. 45-52. (0,5 п.л. / 0,3 п.л.)

7. Антонов А.А. Измерение полей остаточных напряжений с помощью спекл-интерферометра «ДОН-4». Учебное пособие для практической работы в условиях полигона. М. : Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2008. 9с. (0,56 п.л.)

8. Антонов А.А. Сорокин В.Н. Методы измерения остаточных напряжений. Учебное пособие для практической работы в условиях полигона. М. : Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2008. 10с. (0,62 п.л. / 0,5 п.л.)

9. Определение остаточных сварочных напряжений в кольцевых швах толстостенных труб категории прочности K65 (X80) / О.И.Стеклов, А.А. Антонов [и др.] // Наука и техника в газовой промышленности. 2009. №1 (37). С. 84-87. (0,25 п.л. / 0,1 п.л.)

10. Научно-инженерное обоснование ремонта сваркой дефектов повышенной протяженности труб и сварных соединений магистральных газопроводов. Практика ремонта дефектов в ООО «Газпром трансгаз Югорск» / С.П. Севостьянов, А.А. Антонов [и др.] // V отраслевое совещание-конференция «Состояние и основные направления развития сварочного производства ОАО «Газпром». Тезисы докладов. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2010, с. 35. (0,1 п.л. / 0,03 п.л.)

11. Исследование технологических остаточных напряжений в сварных соединениях магистральных трубопроводов / А.А. Антонов [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. №3. С. 13-18. (0,37 п.л. / 0,2 п.л.)

12. Antonov A.A., Kapustin O.E. Determination of maximum residual stresses in butt-welded joints in transmission pipelines // Welding International. 2011. Vol. 25, No. 7. P. 556–561. (0,37 п.л. / 0,3 п.л.)

13. Reconditioning surfaces in a special caisson in repair of underwater transition sections of pipelines / O.I. Steklov, A.A. Antonov [и др.] // Welding International. 2011. Vol. 25, No. 10. P. 784–787. (0,25 п.л. / 0,1 п.л.)

14. Antonov A.A. Operative determination of the stress-strain state of welded joints in objects in oil and gas industries // Welding International. 2011. Vol. 25, No. 10. P. 795–799. (0,31 п.л.)

15. Летуновский. А.П., Антонов А.А., Стеклов О.И. Снятие остаточных механических напряжений в трубах методом низкочастотной вибрационной обработки // VI отраслевое совещание «Состояние и основные направления развития сварочного производства ОАО «Газпром». Тезисы докладов. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2012. С .52. (0.1 п.л. / 0,03 п.л.)

16. Сорокин В.Н., Антонов А.А. Гипербарическая восстановительная наплавка при ремонте подводных переходов трубопроводов. Учебное пособие. М. : Издательский центр РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. М.: 2012. 62 с. (3,88 п.л. / 1,94 п.л.)

17. Летуновский А.П., Антонов А.А., Стеклов О.И. Снятие технологических остаточных напряжений в металлоконструкциях низкочастотной виброобработкой // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. №8. С. 12-16. (0,31 п.л. / 0,1 п.л.)

18. Антонов А.А., Летуновский. А.П. Снижение остаточных сварочных напряжений методом ультразвуковой ударной обработки // Трубопроводный транспорт (теория и практика). 2012. № 2 (30). С. 21-26. (0,37 п.л. / 0,2 п.л.)

19. Антонов А.А. Распределение полей остаточных напряжений при ремонте труб методом наплавки // Сборник тезисов выступлений участников международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы машиностроения» М.: ЦНИИТМАШ, 2014. С. 45. (0,1 п.л.)

20. Севостьянов С.П., Стеклов О.И., Антонов А.А. Разработка технологии ремонта магистральных газопроводов с протяженными коррозионными дефектами с использованием сварочных и родственных процессов // Материалы Научно-практической конференции «Современные технологии сварки, оборудование и материалы для строительства и ремонта магистральных трубопроводов». Санкт-Петербург : 2014. С. 199. (0,1 п.л. / 0,03 п.л.)

21. Antonov A.A. Investigation of fields of residual stresses in welded structures // Welding International. 2014. Vol. 28, No. 12. P. 966–969. (0,25 п.л.)

22. Антонов А.А. Остаточные напряжения после ремонтной наплавки труб и их регулирование // Территория нефтегаз. 2014. №8. С. 70-76. (0,37 п.л.)

23. Макаров Г.И., Антонов А.А., Субботин Р.А. Современные экспериментальные методы определения сварочных остаточных напряжений при строительстве и ремонте магистральных трубопроводов // Трубопроводный транспорт (теория и практика). 2014 № 1 (41). С. 22-25. (0,25 п.л. / 0,1 п.л.)

24. Steklov O.I., Antonov A.A., Sevostianov S.P. Ensuring integrity of welded structures and constructions at their long-term service with application of renovation technologies // The Paton Welding Journal. 2014. № 6-7. P. 4-9. (0,37 п.л. / 0,1 п.л.)

25. Устройство для определения внутренних остаточных напряжений : пат. 153777 Рос. Федерация : МПК51 G01B 11/16 G02B 9/02 / А.А. Антонов ; заявитель и патентообладатель А.А. Антонов. № 2014150605/28 ; заявл. 15.12.2014 ; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 21. 2 с.

26. Устройство для определения внутренних остаточных напряжений : пат. 158768 Рос. Федерация : МПК51 G01B 11/16/ А.А. Антонов ; заявитель и патентообладатель А.А. Антонов. № 2015141744/28 ; заявл. 01.10.2015 ; опубл. 20.01.2016, Бюл. № 2. 2 с.

27. Устройство для измерения внутренних остаточных напряжений : пат. 159143 Рос. Федерация : МПК51 G01B 11/16 / А.А. Антонов; заявитель и патентообладатель А.А. Антонов. № 2015144339/28; заявл. 15.10.2015 ; опубл. 10.02.2016, Бюл. № 4. 1 с.

28. Устройство для измерения внутренних остаточных напряжений : пат. 162124 Рос. Федерация : МПК51 G01B 11/16/ А.А. Антонов ; заявитель и патентообладатель А.А. Антонов. № 2015147011/28 ; заявл. 02.11.2015; опубл. 27.05.2016, Бюл. № 15. 2 с.

29. Антонов А.А. Особенности экспериментального измерения остаточных напряжений в сварных конструкциях // VIII отраслевое совещание «Состояние и

основные направления развития сварочного производства ПАО «Газпром».: Тезисы докладов. М. : Газпром ВНИИГАЗ, 2016. С. 28. (0,1 п.л.)

30. Антонов А.А. Проблемы экспериментальных измерений напряженного состояния в сварных конструкциях // Промышленный сервис. 2016. №2. С. 27-30. (0,25 п.л.)

31. Антонов А.А., Голиков М.И. Применение комплексной методики измерения полей остаточных напряжений, возникающих при выполнении продольного шва труб большого диаметра // Промышленный сервис. 2016. № 3. С. 26-29. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.)

32. Макаров Г.И., Антонов А.А. Новая методика оценки остаточных сварочных напряжений при строительстве и ремонте магистральных газопроводов // Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2017): тезисы докладов VII Международной научно-технической конференции. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2017. С. 101. (0,1 п.л. / 0,05 п.л.)

33. Макаров Г.И., Антонов А.А. Метод лазерной интерферометрии для оценки уровня остаточных сварочных напряжений в сварных магистральных трубопроводах // Сварочное производство. 2018. №1. С. 38-42. (0,31 п.л. / 0,15 п.л.)

34. Овчинников В.В., Антонов А.А. Особенности свариваемости алюминиевого сплава 1913 в условиях сварки плавлением и трением с перемешиванием // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. №1. С. 13-20. (0,5 п.л. / 0,2 п.л.)

35. Антонов А.А., Летуновский. А.П. Возможности оценки и снятия остаточных напряжений в трубах больших диаметров // ЭКСПОЗИЦИЯ НЕФТЬ ГАЗ. 2018. № 5 (65). с. 60-62. (0,2 п.л. / 0,1 п.л.)