

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Красников Антон Андреевич



ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ
ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Специальность 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и
хранилищ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук
Палаев Александр Григорьевич

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ НА РАЗРУШЕНИЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ	12
1.1 Анализ причин разрушения магистральных трубопроводов	12
1.2 Анализ факторов, влияющих на разрушение сварных соединений магистральных трубопроводах	16
1.3 Значение и воздействие остаточных напряжений на эксплуатационные характеристики магистральных трубопроводов	20
1.4 Анализ методов снижения остаточных сварочных напряжений.....	28
1.5 Анализ математических моделей для оценки распределения остаточных напряжений в сварных соединениях	38
1.6 Анализ устройств для ультразвуковой ударной обработки	40
1.7 Выводы по Главе 1.....	47
ГЛАВА 2 МЕТОДИКИ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ	50
2.1 Материалы исследования	50
2.2 Разработка установки для имитации процесса сварки линейной части магистрального трубопровода	51
2.3 Методика определения остаточных и действующих механических напряжений	52
2.4 Методика ультразвуковой ударной обработки сварного соединения	57
2.5 Методика проведения исследований микроструктуры и механических характеристик	59
2.6 Выводы по Главе 2.....	65
ГЛАВА 3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	67
3.1 Численное моделирование распределение температурных полей и напряжений в сварном соединении с применением ANSYS.....	67

3.2 Установление зависимости сигнала магнито-анизатропного метода от величины растягивающих напряжений в исследуемых трубных сталях	74
3.3 Верификация модели распределения напряжений в сварном соединении при численном моделировании с экспериментальными значениями	77
3.4 Исследования зависимости снижения остаточных напряжений в сварном соединении при ультразвуковой ударной обработке на внешней и внутренней поверхности	79
3.5 Анализ микроструктуры до и после ультразвуковой ударной обработки на внешней и внутренней поверхности трубной стали.....	81
3.6 Исследование микротвердости образцов со сварными соединениями по толщине до и после ультразвуковой ударной обработки на внешней и внутренней поверхности трубной стали.....	85
3.7 Исследование механических свойств образцов со сварными соединениями до и после ультразвуковой ударной обработки на внешней и внутренней поверхности трубной стали	96
3.8 Оценка ресурса сварных соединений магистрального трубопровода, исходя из ударной вязкости металла сварного шва.....	98
3.9 Выводы по Главе 3.....	100
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ.....	102
4.1 Разработанное ультразвуковое ударное устройство для снижения остаточных напряжений на внутренней поверхности сооруженного нефтепровода, перемещаемое за счет движения жидкости	102
4.2 Разработанное ультразвуковое ударное устройство для снижения остаточных напряжений на внутренней поверхности строящегося трубопровода, перемещаемое методом протаскивания	104
4.3 Разработанное самоходное ультразвуковое ударное устройство для снижения остаточных напряжений на внутренней поверхности строящегося трубопровода.....	107

4.4 Рекомендации по применению разработанных устройств для снижения остаточных напряжений в магистральных трубопроводах.....	110
4.5 Выводы по Главе 4.....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ А Патент на изобретение «Устройство для снижения остаточных напряжений»	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Заявка на изобретение «Устройство для ультразвуковой ударной обработки сварных соединений с внутренней стороны магистральных трубопроводов методом протаскивания».....	132
ПРИЛОЖЕНИЕ В Заявка на изобретение «Самоходное устройство для ультразвуковой ударной обработки сварных соединений с внутренней стороны магистральных трубопроводов»	133
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт о промышленном внедрении результатов диссертации	134

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Нефтегазовая промышленность играет ключевую роль в экономике России. Её стабильное развитие является одним из основных факторов, способствующих прогрессу. Наиболее эффективным видом транспорта углеводородов является трубопроводный транспорт.

В Российской Федерации протяженность магистральных трубопроводов составляет около 260 000 км. При этом значительная часть трубопроводов в России была возведена более четырех десятилетий назад. В настоящее время ведется активное сооружение новых магистральных трубопроводов.

В процессе эксплуатации магистральных трубопроводов происходят аварии, которые приводят к значительным финансовым убыткам. Согласно данным Ростехнадзора, в период с 2000 по 2019 гг. произошло 494 аварий на магистральных трубопроводах, из которых 356 были связаны с газопроводами, а 138 - с нефтепроводами, что вызывает необходимость усиленного контроля за их работоспособностью.

При сооружении, ремонте и реконструкции магистральных трубопроводов используют сварку. Сварные соединения занимают 1,0 – 1,5 % от общего объема магистральных трубопроводов, на них приходится до 70 – 80 % всех отказов, в основном по причине образования остаточных сварочных напряжений (ОСН) и наличия дефектов. Необходимость снижения (ОСН) на магистральных трубопроводах представляет собой важную научно-практическую задачу.

Степень разработанности темы исследования

Вопросом влияния остаточных напряжений, структурной неоднородности и дефектов на эксплуатационные характеристики сварных соединений активно изучается в работах отечественных и зарубежных ученых таких, как Н.И. Голиков, Ю.Н. Сараев, М.М. Сидоров, О.И. Слепцов, Г.Б. Талыпов, И.П. Трочун, В.И. Труфяков, В.Ф. Чабуркин, О.И. Черпанов, М.В. Шахматова, Г.П. Яковлев, M.G. Dawes, D. Deng, Z. Feng, J.R. Harrison, H.D. Hibbitt, Y. Ishii, M. James и др.

Несмотря на значительное количество исследований по данной теме, на сегодняшний день отсутствуют результаты комплексных испытаний, направленных на исследование полей ОСН в сварных соединениях, а также математические модели, способные рассчитать их распределение. В действующих нормативных документах отсутствуют ясные указания относительно уровней и распределения остаточных напряжений в магистральных трубопроводах.

Проведенные исследования многих авторов показывают, что ультразвуковая ударная обработка (УЗУО) способствует улучшению механических свойств металла и повышению долговечности сварных соединений. Практическое применение этой технологии уже доказало свою эффективность в таких областях, как мостостроение, судостроение и железнодорожный транспорт. Однако применительно к кольцевым сварным соединениям магистральных трубопроводов потенциал УЗУО изучен недостаточно. В связи с этим является актуальным проведение исследований, направленных на оценку воздействия УЗУО на уровень остаточных сварочных напряжений в кольцевых сварных соединениях магистральных трубопроводов на стадии сооружения и ремонта.

Объект исследования – магистральные трубопроводы, содержащие кольцевые сварные соединения.

Предмет исследования – остаточные напряжения и свойства металла кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов.

Цель работы – повышение ресурса магистральных трубопроводов путем снижения остаточных напряжений в кольцевых сварных соединениях.

Идея работы – повышение ресурса магистральных трубопроводов обеспечивается ультразвуковой ударной обработкой кольцевых сварных соединений на стадии сооружения и ремонта, осуществляемой с использованием разработанного устройства.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать литературные источники и патенты отечественных и зарубежных ученых по теме диссертации.

2. Разработать численную модель для оценки остаточных напряжений, возникающих при сварке в кольцевых соединениях трубопроводов.

3. Провести экспериментальные исследования влияния УЗУО различной частоты на величину остаточных напряжений, микроструктуру и механические свойства металла сварного соединения образцов, имитирующих кольцевое сварное соединение трубопровода.

4. Разработать конструкцию устройства, позволяющего проводить УЗУО внутренней поверхности кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов на стадии сооружения и ремонта.

Научная новизна работы:

1. Установлено, что в процессе сооружения магистральных трубопроводов в кольцевых сварных соединениях возникают остаточные растягивающие напряжения, наибольшие на внутренней поверхности сварного шва, и достигают величины (до $0,8\sigma_T$ использованной трубной стали).

2. Показано, что ультразвуковая ударная обработка снижает остаточные растягивающие напряжения в шве сварного соединения трубопровода; наибольшее снижение напряжений (до 1,6 раза) достигается при обработке внутренней поверхности сварного соединения с частотой 20 кГц.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ по пункту 4: Методы и средства информационных технологий, моделирования, мониторинга, прогнозирования, интеллектуального инжиниринга и управления, автоматизации и роботизации, стандартизации и цифровизации технологических процессов проектирования, сооружения, эксплуатации, диагностики, ремонта сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, а также других газовых, жидкостных и многофазных сред, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта с целью повышения

эффективности, надежности и безопасности использования отраслевого потенциала и ресурса трубопроводных конструкций.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Установлено, что ультразвуковая ударная обработка внутренней поверхности сварного соединения трубных сталей приводит к измельчению зерна металла подповерхностного слоя сварного шва, что сопровождается увеличением (в 1,5 раза) ударной вязкости сварного соединения.

2. Разработано ультразвуковое ударное устройство для снижения остаточных напряжений на внутренней поверхности сооруженного нефтепровода, перемещаемое за счет движения жидкости (патент на изобретение № 2805006, Приложение А).

3. Разработано ультразвуковое ударное устройство для снижения остаточных напряжений на внутренней поверхности строящегося трубопровода, перемещаемое методом протаскивания (заявка на патент на изобретение № 2024138241, Приложение Б).

4. Разработано самоходное ультразвуковое ударное устройство для снижения остаточных напряжений на внутренней поверхности строящегося трубопровода (заявка на патент на изобретение № 2024138234, Приложение В).

5. Результаты диссертационной работы внедрены в ООО НПФ «ЭнТехМаш» (акт № 12 от 10.02.2025 г., Приложение Г).

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач применен комплексный метод исследований, включающий анализ теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации. Использовалось аттестованное и поверенное специализированное оборудование, на котором исследовались образцы до и после ультразвуковой ударной обработки.

Положения, выносимые на защиту:

1. Ультразвуковая ударная обработка кольцевых сварных соединений трубопроводов, проводимая в диапазоне частот 20 – 44 кГц, способствует снижению остаточных растягивающих напряжений σ_p в сварном шве, при этом

наибольшее снижение σ_p (до 1,6 раза) достигается при обработке внутренней поверхности сварного соединения с частотой 20 кГц.

2. Ультразвуковая ударная обработка внутренней поверхности кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов, проводимая на частоте 20 кГц, приводит к измельчению до 1,6 раза зерна используемой трубной стали в подповерхностном слое глубиной до 2 мм сварного соединения, что сопровождается повышением до 1,5 раза ударной вязкости сварного соединения и до 1,6 раза ресурса сварного соединения трубопровода.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена тем, что защищаемые положения, выводы и рекомендации, разработанные в диссертации, базируются на строгих теоретических подходах, теоретически и экспериментально обоснованных математических моделях. Достоверность результатов работы подтверждается близкими значениями экспериментальных данных с результатами общепризнанных исследований по теме диссертации.

Апробация результатов диссертации. За последние 3 года принято участие в 12 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных:

- I Всероссийская научная конференция «Транспорт и хранение углеводородов - 2022», (апрель 2022 г., г. Санкт-Петербург);
- XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (май 2022 г., г. Санкт-Петербург);
- XIV Специализированная выставка-форум «Нефтедобыча. Нефтепереработка. Химия» (ноябрь 2022 г., г. Самара);
- IV Международная научно-техническая конференция молодых ученых «Транспорт и хранение углеводородов» (апрель 2023 г., г. Омск);
- VI Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы нефти и газа» (октябрь 2023 г., г. Москва);
- III Всероссийская научная конференция «Транспорт и хранение углеводородов - 2024», (апрель 2024 г., г. Санкт-Петербург);

- V Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых «Транспорт и хранение углеводородов» (апрель 2024 г., г. Омск);
- XVII Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (апрель 2024 г., г. Москва),
- III Международная научно-практическая конференция «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья» (май 2024 г., г. Санкт-Петербург);
- Научная конференция студентов и молодых ученых Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II «Полезные ископаемые России и их освоение» (октябрь 2024 г., г. Санкт-Петербург);
- XIX Международная научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт - 2024» (ноябрь 2024 г., г. Уфа);
- XX Всероссийская конференция-конкурс студентов выпускного курса и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (декабрь 2024 г., г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме диссертации, разработке методики исследования, проведении экспериментальных исследований влияния ультразвуковой ударной обработки на снижение остаточных напряжений в зоне сварного соединения, микроструктуру и свойства металла шва, участия в написании научных работ по теме диссертации.

Публикации

Результаты диссертации в достаточной степени освещены 7 печатных работах (пункты в списке литературы № 69, 102-105, 147, 148), в том числе 2 статьяx – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание учетной степени доктора наук, в 2 статьяx – в изданиях, входящих в международную базу данных в систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение (Приложение А) и подано 2 заявки на патенты на изобретения (Приложения Б и В).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 155 наименований, и 4 приложений. Диссертация изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 53 рисунка и 27 таблиц.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ НА РАЗРУШЕНИЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

1.1 Анализ причин разрушения магистральных трубопроводов

На сегодняшний день транспортировка жидких и газообразных веществ с использованием трубопроводных систем является ключевым элементом функционирования топливно-энергетического комплекса России. Каждый год в стране строится и вводится в эксплуатацию значительное количество новых магистральных трубопроводов. Учитывая их работу в условиях сложной природной среды и сурового климата, где любая аварийная ситуация способна привести к масштабным негативным последствиям, такие системы представляют собой критически важный и потенциально опасный элемент промышленной инфраструктуры. Для этого необходимо соблюдать строгие стандарты касательно надежности и эффективного функционирования трубопроводов.

Как следует из данных, представленных на рисунке 1.1, интенсивность возникновения отказов на магистральных трубопроводах имеет четкую корреляцию с периодом их эксплуатации. Результаты исследований [50, 128] свидетельствуют о наличии трех характерных стадий в процессе эксплуатации магистральных трубопроводов.

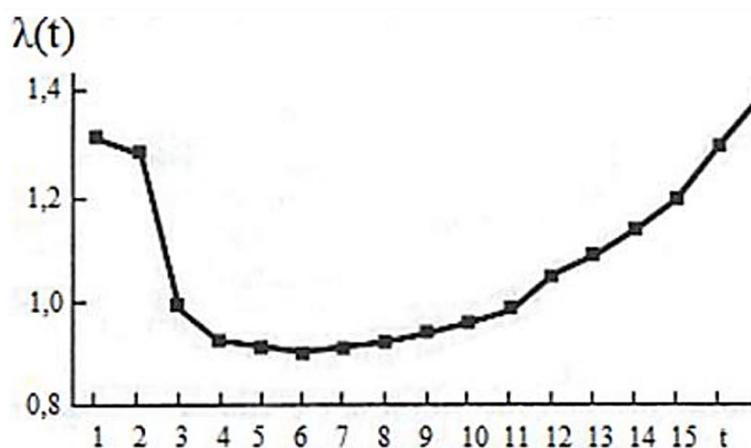


Рисунок 1.1 – Корреляция между продолжительностью эксплуатации магистральных трубопроводов и частотой возникновения аварийных отказов (количество инцидентов на тыс. км) [50]

Первый этап (примерно до трех лет эксплуатации) связана с периодом «приработкой» линейной части трубопровода. В это время большинство отказов происходит из-за дефектов проектирования или отклонений характеристик труб от требуемых норм. По мере выявления и устранения этих недостатков, а также корректировки рабочих процессов, интенсивность отказов постепенно снижается.

Второй этап (от 3 до 9 лет эксплуатации) характеризуется сменой доминирующих механизмов отказов. Коррозионные процессы и случайные факторы выходят на первый план, при этом интенсивность отказов остается практически стабильным [33].

На третьем этапе (после 9 - 10 лет службы) наблюдается рост аварийных отказов, которые связаны с процессами старения трубной стали и постепенной деградацией ее механических характеристик.

Как установлено в исследованиях [128, 139, 144], в регионах с положительными среднегодовыми температурами преобладающей причиной разрушения магистральных трубопроводов выступает коррозионное растрескивание под напряжением (КРН). Данные мониторинга показывают, что остаточные напряжения в трубопроводах достигают 60 - 80 % от предела текучести стали, что создает благоприятные условия для возникновения и развития трещин, вызванных КРН [14, 17, 128].

В зимний период увеличивается количество отказов магистральных трубопроводов из-за того, что низкие температуры при эксплуатации способствуют возникновению хрупких повреждений [53, 70, 72, 137]. Отказы магистральных трубопроводов, работающих при низких температурах представлены в виде гистограммы (рисунок 1.2) [137].

При анализе причин ранних отказов сварных конструкций, в частности магистральных трубопроводов [119], основными причинами снижения эксплуатационной надежности являются: коррозионные процессы, дефекты сварных соединений (включая трещины и непровары), а также конструктивные и технологические недоработки.

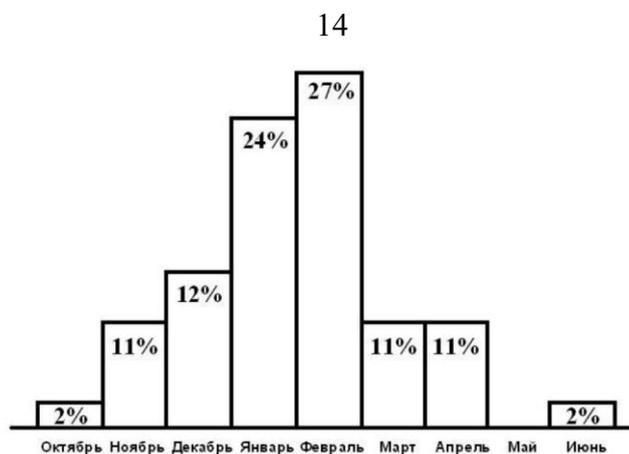


Рисунок 1.2 – Статистика отказов магистральных трубопроводов, представленная в виде гистограммы [137]

При эксплуатации магистральных трубопроводов, проложенных подземным способом, при низких температурах выявлено, что уменьшение влажности в значительной степени снижает скорость коррозии в 16 - 20 раз в сравнении с южными регионами. Учитывая эти данные, случаи коррозионных повреждений в северных регионах почти не зарегистрированы [64, 84].

Согласно проведенным исследованиям [20, 116], в условиях резко континентального климата и на Крайнем Севере основной зоной разрушения магистральных трубопроводов являются сварные соединения. При этом в ходе анализа аварийных ситуаций не было зафиксировано ни дефектов сварки, ни следов коррозионно-механического воздействия, что указывает на доминирующее значение усталостных процессов. Интенсивность таких разрушений существенно увеличивается в весенне-осенний период.

При анализе механизма разрушения трубопровода принято выделять три ключевых этапа. Первый этап — это формирование трещины, вызванный как минимум одним дефектом, и состояния, при котором трещина остается стабильной. На втором этапе происходит увеличение трещины до критических размеров. Наконец, третий этап характеризуется неуклонным распространением трещины [48].

Среди наиболее распространенных недостатков трубопроводов выделяют дефекты сварных швов, такие как пористость, непровары, шлаковые включения и проблемы, возникающие в процессе формирования шва, а также разнообразные

механические повреждения труб, возникающие во время их транспортировки и установки.

Разрушение начинается в дефектной области с высокой скоростью из-за ограниченной пластичности в хрупком металле. Такие параметры, как длина и развитие трещины, зависят от механических свойств металла трубы и физических процессов, сопровождающихся при разрушении [11].

Трещина с высокой начальной скоростью распространяется в неповрежденный участок металла, продвигаясь на некоторое расстояние. На этом этапе критически важны свойства основного материала, которые позволяют ему поглощать часть энергии, высвобождающейся при пластической деформации.

Одним из ключевых факторов, снижающих риск серьёзных повреждений трубопроводов, таких как нефтепроводы, является процесс декомпрессии, позволяющий уменьшить давление. Необходимо отметить, что жидкость является не сжимаемой в отличие от газа. Данный факт свидетельствует о том, что потенциальная энергия в нефтепроводах намного ниже, чем в газопроводах. Следовательно, процесс декомпрессии при аварии на нефтепроводах радикально отличается от аналогичного процесса в газопроводах. Данная несравнимость подчеркивает уникальность каждой из этих систем, где в случае происшествий динамика событий и потенциальный риск различаются друг от друга. Понимание этих различий становится необходимым для эффективного управления аварийными ситуациями и обеспечения безопасности [16-18].

Аварии на газопроводах часто происходят из-за небольших разрывов длиной от 2 до 3 метров, вызванных дефектами в сварных соединениях [12]. Это указывает на особые условия эксплуатации металла и сварных соединений в газопроводах. На прочность таких конструкций влияют следующие факторы:

1. Магистральные трубопроводы в северных регионах подвержены экстремально низким температурам.
2. Магистральные трубопроводы, транспортирующие природный газ, способны накапливать энергию, которая может привести к квазихрупким или хрупким разрушениям при увеличении динамической нагрузки.

Параллельно с этим происходит накопление энергии упругой деформации, что создает дополнительные проблемы при эксплуатации трубопроводов.

1.2 Анализ факторов, влияющих на разрушение сварных соединений магистральных трубопроводах

Процесс сварки имеет значительное влияние на формирование технологических и конструктивных концентраций напряжений. В результате этого в области сварного соединения накапливаются повреждения, приводящие к разрушению; около 80 % таких случаев происходит именно в этих зонах [53, 64].

Однако воздействие, связанное с образованием сварного шва, не сводится только к концентрации напряжений. Сварочный процесс также вызывает структурные изменения и приводит к появлению значительных остаточных напряжений [4].

Напряжение сосредоточивается в зонах с резкими переходами формы, таких как сварные швы, отверстия, острые углы и выемки. Также такая концентрация может наблюдаться на границах между сваркой и основным материалом, а также в местах, где имеются дефекты [133].

Степень концентрации напряжений в сварных конструкциях зависит от таких факторов, как форма сварного шва и метод распределения внешних нагрузок [101]. В отличие от трубопроводов, концентрация напряжений чаще всего возникает в стыковых соединениях. Исследования показали, что напряжения в этих областях минимальны, а прочностные характеристики таких соединений составляют примерно 50 % прочности исходного металла, прошедшего прокатку с окалиной [126].

В зонах с высокой концентрацией напряжений выпуклость сварного шва играет ключевую роль. Если соединение выполнено качественно, то коэффициент концентрации напряжений обычно находится в пределах от 1,3 до 2,0. Однако при наличии дефектов, таких как подрезы, пористость, непровары, избыточные наслоения, смещения краёв или острые углы, значения этого коэффициента могут

значительно увеличиться. Эти дефекты способны существенно снизить усталостную прочность сварных соединений.

Присутствие дефектов (несплошностей) в сварных соединениях ослабляет их прочностные характеристики, создавая концентратор напряжений. Это происходит из-за резких переходов между основным металлом и сварным швом при соединении различных материалов. Такие концентраторы напряжений способны оказать негативное влияние при статических нагрузках в условиях низких температур или воздействия неблагоприятных факторов, создавая внутренние напряжения в агрессивной среде [29].

Сварка — это технология, в процессе которой происходит локальное плавление соединяемых деталей. В результате этого процесса происходит изменение микроструктуры и механических характеристик материала в сварном соединении.

В процессе сварки выделяют три основные зоны [38]:

- сварной шов (СШ);
- зона термического влияния (ЗТВ);
- основной металл (ОМ).

Сварной шов - это участок сварного соединения, который образовался в результате плавления и последующей кристаллизации расплавленного металла.

Зона термического влияния включает участки, где температура материала изменяется, и это вызывает модификацию микроструктуры.

Основной металл представляет собой сам материал, который соединяется и в который внедряется сварной шов.

Указанные зоны играют определяющую роль в формировании структурно-механических особенностей сварного соединения. Качество и эксплуатационные характеристики сварного шва обусловлены комплексом факторов, включающих исходные свойства сварочных материалов и параметры термического воздействия при обработке. Существенное влияние на конечную структуру металла шва оказывают кинетические процессы, сопровождающие кристаллизацию - в частности, скорость теплоотвода и диффузионная подвижность атомов. Эти

явления могут вызывать неоднородное распределение компонентов (зональную сегрегацию) и образование дефектов кристаллического строения, что в итоге определяет гетерогенность механических свойств по сечению соединения. Деформационные процессы, возникающие при кристаллизации, оказывают значительное влияние на механические свойства металла шва. Как следствие, структура металла шва заметно отличается от структуры основного металла, что сказывается на их механических и физико-химических характеристиках. При отсутствии дефектов (трещин, непроваров, пор, неоднородных включений и др.) структурные различия в сварном соединении не приводят к его усталостному разрушению до истечения расчетного срока службы [133].

Зоной термического влияния (ЗТВ) принято называть участок основного металла, прилегающий к сварному шву, в котором под действием теплового воздействия сварочного процесса происходят структурные и фазовые превращения, приводящие к формированию неоднородной микроструктуры. В соответствии с современными представлениями, ЗТВ разделяют на несколько характерных участков (рисунок 1.3).

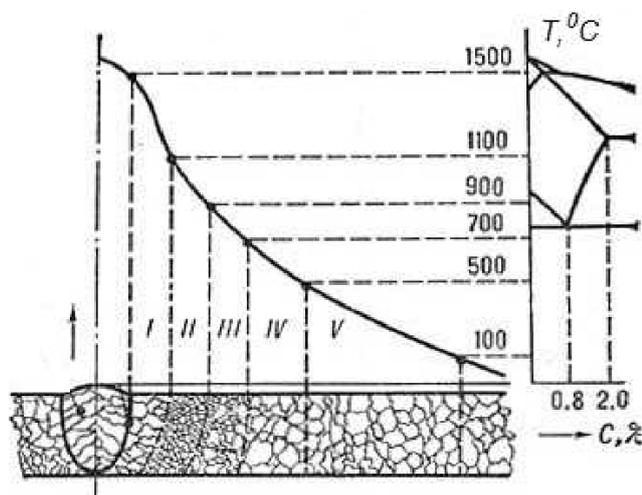


Рисунок 1.3 – Структура зоны термического влияния:

I – зона твердожидкого состояния; II – зона перегрева; III – зона перекристаллизации; IV – зона полной и неполной перекристаллизации;
V – зона рекристаллизации [133]

Размеры зоны ЗТВ определяются совокупностью факторов сварочного процесса, включая тепловую мощность, скорость сварки и свойства основного

металла. Нормативные и экспериментальные размеры ЗТВ представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Геометрические параметры структурно-фазовых участков в пределах ЗТВ [8, 132]

Способ сварки	Погонная энергия, кДж/см	Длительность пребывания при температуре выше 900°C	Ширина участков, мм		
			перегрев	перекристаллизация	неполная перекристаллизация
Электронно-лучевая	1-5	1,5-5	0,0-0,1	0,1-0,3	0,3-1
Ручная луговая	5-15	6-18	0,01-0,3	0,3-1,0	3-8
Под флюсом	40-60	14-100	0,1-0,5	0,3-2,0	3-15
Электрошлаковая	300-600	220-560	0,5-5	1-10	5-50

В процессе сварки термдеформационное воздействие приводит к структурно-фазовым преобразованиям в зоне термического влияния (ЗТВ), что вызывает образование временных остаточных напряжений [132]. Гетерогенность химического состава, структурные изменения и неравномерное распределение деформационных воздействий обуславливают неоднородность характеристик сварного соединения, что существенно влияет на его механические свойства и твердость.

В научной работе В.П. Ларионова [74] рассматриваются прочностные характеристики разных зон сварных соединений, выполненных в сталях 10ХСНД, 14Х2ГМР, 14Г2САФ, 09Г2Д и Т1. При исследовании выявлено, что при увеличении энергии плавления до 20 кДж/см² происходит улучшение микроструктуры ЗТВ. Тем не менее, важно подчеркнуть, что это также вызывает уменьшение микротвердости вследствие замедления охлаждения.

Каждый новый слой сварного шва, подвергаясь тепловому воздействию, способствует улучшению структуры слоёв, расположенных ниже, что ведёт к образованию мелкозернистой структуры. В то же время верхний слой сохраняет свою литую металлическую текстуру, однако его характеристики становятся более совершенными.

Сопrotивляемость сварных соединений к медленному разрушению в значительной степени зависит от химического состава сварного шва. Эта

зависимость определяется температурными градиентами и временем, необходимым для фазовых переходов в области термического воздействия и в самом сварном соединении [31, 74].

Таким образом, изменение легирующих компонентов может значительно повлиять на механические свойства и устойчивость сварных швов. Понимание химического состава и его воздействия на фазовые переходы помогает в разработке более надежных сварных конструкций. Исследование в данной области становится все более актуальным для повышения качества сварных изделий и увеличения их срока службы.

Концентрация напряжений оказывает значительное влияние на прочность сварных соединений при циклических нагрузках. Она появляется вследствие изменений формы сварного шва и наличия внутренних дефектов, таких как поры и включения. Кроме того, образование зоны с крупнозернистой структурой вокруг шва в процессе сварки также выступают в качестве причины этой концентрации.

1.3 Значение и воздействие остаточных напряжений на эксплуатационные характеристики магистральных трубопроводов

Остаточные напряжения, возникающие в процессе сварки, оказывают значительное влияние на долговечность сварных соединений. Эти явления объясняются тем, что резкие колебания температуры приводят к изменению структуры и упругопластическим деформациям в области сварки, что, в свою очередь, вызывает образование значительных остаточных напряжений. Эти напряжения могут быть равны пределу текучести основного материала или даже превосходить его [4, 69].

В процессе производства сварных конструкций формируются остаточные напряжения, которые подразделяются на временные (самопроизвольно исчезающие в ходе эксплуатации без необходимости дополнительного вмешательства) и постоянные. Последние представляют особую значимость для магистральных трубопроводов, поскольку оказывают существенное влияние на их ключевые эксплуатационные характеристики: снижают несущую способность,

сокращают срок службы и уменьшают их надежность. Если магистральные трубопроводы эксплуатируются в районах, где нет резкого перепада температур окружающей среды, остаточные напряжения не оказывают значительного влияния на их работоспособность, а если происходит резкое изменения температуры окружающей среды, то их воздействие может быть значительным, особенно при хрупком разрушении [6, 32, 64, 69].

Особенно значительное воздействие остаточные напряжения оказывают на сопротивление усталостному разрушению при их высокой локальной концентрации. В зависимости от типа напряжений их воздействие может быть как положительным, так и отрицательным [69]:

- сжимающие напряжения повышают усталостную прочность сварных соединений;
- растягивающие напряжения снижают усталостную прочность, ускоряя их разрушения.

Согласно [69], остаточные напряжения способны изменить срок службы сварных соединений, и данный факт подчеркивает важность анализа их распределения. В данном исследовании выявлено, что остаточные растягивающие напряжения в сварных соединениях существенно снижают их стойкость к вибрационной нагрузке.

Следует учитывать, что в конструкциях из толстостенных труб остаточные растягивающие напряжения выше, чем в тонкостенных трубах. В основном это объясняется различиями в величине и их распределении.

В зависимости от характера и интенсивности физико-механических процессов среди ОСН выделяются сжимающие и растягивающие напряжения. В 1931 г. Н.Н. Давиденковым [98] предложена наиболее подробная и точная классификация, основанная на рентгеновских снимках межатомных расстояний:

- напряжения I рода (уравновешивающиеся) в пределах областей, размеры которых такого же порядка, как и размеры тела. В основном они вызваны неоднородностью силового, температурного или материального поля внутри тела и

определяются расчетным путем, исходя из теории упругости и пластичности либо экспериментально;

– напряжения II рода (кристаллитные) уравниваются в объемах одного порядка с размерами зерен и выражаются в виде размытия линий на рентгенограммах. Такие напряжения не имеют определенной направленности и не зависят от формы изделий, обнаруживаются опытным путем;

– напряжения III рода (элементарные) уравниваются в пределах объема нескольких элементарных кристаллических ячеек. Подобные напряжения не имеют определенной направленности и выявляются экспериментально по степени изменений интенсивности на рентгенограммах [105].

В зависимости от причин возникновения ОСН можно разделить на категории [107]:

– временные напряжения, возникающие под действием внешней нагрузки и исчезающие после ее снятия;

– внутренние напряжения – остаточные деформации, возникающие в теле без воздействия внешних нагрузок и сохраняющие равновесие.

Выделяют три основных последствия возникновения ОСН:

– неравномерный нагрев сварного шва (СШ) и прилегающих к нему участков. Более нагретые металлы расширяются сильнее, чем холодные, из-за чего напряжения начинают концентрироваться между слоями разной температуры. Такая величина зависит от степени нагрева и коэффициента теплового расширения.

– усадка – деформация происходит при охлаждении металла после сварки, то есть при его переходе из жидкой фазы в твердую из-за уменьшения объема. В результате этого вдоль и поперек СШ возникают напряжения, вызывающие удлинения смежных участков: при продольном перемещении изменяется длина шва, поперечное перемещение способствует образованию угловых деформаций.

– при сварке высокоуглеродистых и легированных сталей в условиях высоких температур происходит упрочнение за счет изменения объема и коэффициента теплового расширения. Это явление приводит к возникновению напряжений и образованию трещин в СШ и на его поверхности.

Экспериментальные исследования [90, 132] подтверждают, что остаточные растягивающие напряжения оказывают различное воздействие на разные типы сварных соединений. Интенсивность данного воздействия зависит от трёх основных параметров: асимметрии нагрузочных циклов, типа напряжённого состояния и специфики распределения силовых воздействий в конструкции. При определённых условиях вклад остаточных напряжений может достигать уровня влияния концентраторов напряжений.

Как демонстрирует исследование [86], параметры циклического нагружения играют решающую роль в механизме влияния остаточных напряжений на прочность сварных соединений. Особый интерес представляет обнаруженная обратная зависимость - при уменьшении величины рабочих напряжений негативное влияние остаточных напряжений усиливается.

Результаты исследований [86] показали следующие:

- снижение усталостной прочности под воздействием остаточных напряжений в пределах 35 – 50 %;
- установлена прямо пропорциональная зависимость между величиной остаточных напряжений и пределом выносливости ($\sigma_{\text{ост.}} \sim \sigma_{\text{вын.}}$).

Анализируя влияние остаточных напряжений (ОН) на усталостную прочность, В.И. Труфяков [138] предложил зависимость (1.1), устанавливающую связь между пределом выносливости материала и уровнем остаточных напряжений:

$$\sigma_{-1}^0 = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_B}\right), \quad (1.1)$$

где: σ_{-1}^0 и σ_{-1} – соответственно пределы выносливости при симметричном цикле нагружения образцов с ОН и без них, МПа; σ_0 – величина ОН в зоне разрушения; σ_B – предел прочности металла, МПа.

В научных исследованиях также встречается альтернативное выражение (1.2), учитывающее чувствительность материала к асимметрии цикла нагружения [127]:

$$\sigma_{-1}^0 = \sigma_{-1} - \Psi_{\sigma} \cdot \sigma_0, \quad (1.2)$$

где: Ψ_σ – коэффициент чувствительности материала к асимметрии цикла (для конструкционных сталей составляет 0,1 ... 0,4).

На начальной стадии образования усталостных трещин остаточные напряжения способны существенно изменять прочностные характеристики сварных соединений. Согласно исследованиям [86], их воздействие может варьироваться в широких пределах, снижая общую прочность конструкции на 10-90 % от максимального значения. Исследования [132, 134] показали, что осевые растяжения в области острого концентратора ускоряют процесс усталостного роста трещины. В то время как при аналогичных условиях осевые сжатия способствуют значительному замедлению ее распространения.

В исследовании [58] разработана математическая модель, описывающая кинетику роста усталостных трещин с учетом влияния остаточных сварочных напряжений (ОСН) (1.3):

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^m \left(1 + \frac{K_r}{\Delta K}\right)^s, \quad (1.3)$$

где: l – длина трещины, мм; N – число циклов нагружения; ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжения; K_r – коэффициент интенсивности остаточных напряжений; m, s – характеристики материала.

Склонность конструкционных материалов к хрупкому разрушению формируется под воздействием трех ключевых факторов. Во-первых, эксплуатационные факторы, включая низкие температуры, значительные объемные нагрузки и высокоскоростное деформирование. Во-вторых, конструктивные факторы, такие как масштабный эффект, зоны концентрации напряжений и наличие дефектов. В-третьих, технологические факторы такие как деформационное старение и остаточные сварочные напряжения, возникающие после сварки [33, 66, 76, 92, 124]. Наибольший риск хрупкого разрушения возникает при сочетании растягивающих напряжений с последующим деформационным старением, что увеличивает вероятность разрушения. Этот механизм особенно опасен тем, что приводит к резкому снижению пластичности материала и изменению характера разрушения от вязкого к хрупкому.

Предел прочности данной стали составлял $\sigma_T = 23,5$ кг/мм². Эксперименты проводились на образцах как с деформационным старением, так и без него, что позволило оценить воздействие этих факторов на механические свойства соединений. Анализ результатов исследований позволил установить, что при вязком характере разрушения остаточные напряжения не оказывают заметного воздействия на прочность соединений, если материал не подвергался деформационному старению. При этом обнаружено, что максимальная предрасположенность к хрупкому разрушению проявляется в двух областях: во-первых, в зоне перехода между вязким и квазихрупким разрушением и, во-вторых, при экстремально низких температурах. Эти критические температурные режимы характеризуются резким снижением пластичности материала и значительным повышением риска хрупкого разрушения сварных конструкций.

Результаты исследований демонстрируют, что процесс деформационного старения вызывает повышение минимального температурного порога номинальной прочности материала. Также установлено, что при снижении температуры эксплуатации происходит значительное ухудшение механических свойств под воздействием остаточных напряжений. Полученные данные подтверждают выраженную температурную зависимость указанных процессов.

При действии внешних факторов остаточные напряжения взаимодействуют с основными напряжениями и по этой причине могут привести к хрупкому разрушению при относительно небольших нагрузках [27, 30].

Остаточные напряжения в кольцевых сварных соединениях возникают вследствие деформации металла и искривления стенок, а в многослойных сварных швах к этим факторам также добавляется неравномерное охлаждение и порядок их наложения [24].

1. Характер распределения напряжений в кольцевых сварных соединениях:

- напряжения в многослойных кольцевых швах имеют выраженную асимметрию [28];
- каждый сварочный проход оказывает воздействие на всю окружность соединения [47, 85].

2. Геометрические деформации кольцевых сварных соединений:

- наблюдается эффект "проседания" шва (рисунок 1.4);
- проявляется в виде: радиального смещения кромок; локального уменьшения диаметра трубы в зоне шва [85, 88].

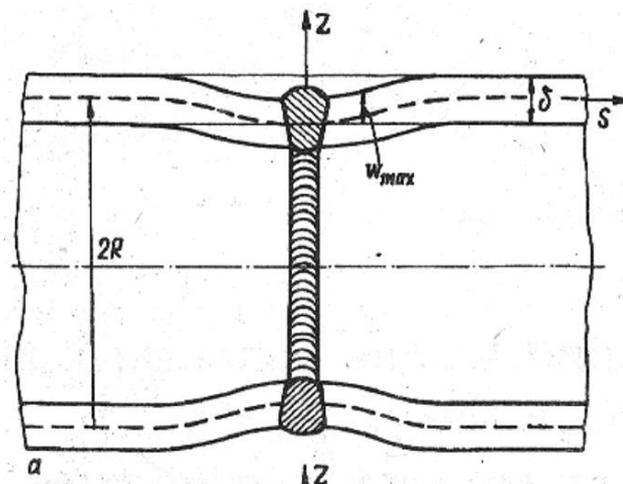


Рисунок 1.4 – Проседание в зоне кольцевых стыков труб [86]

3. Формируемые напряжения возникают осевые напряжения (σ_z) с двойственным эффектом:

- а) внешние сжимающие напряжения;
- б) внутренние растягивающие напряжения.

Результаты исследований распределения остаточных напряжений свидетельствуют, что зона сварного соединения характеризуется существенной анизотропией напряженного состояния. Наибольшие значения растягивающих напряжений (как окружных σ_θ , так и осевых σ_z) локализуются на внутренней поверхности трубы, что обусловлено особенностями термомодеформационных процессов при сварке. При этом на наружной поверхности отмечается снижение уровня кольцевых напряжений σ_θ на 15 - 25% относительно внутренней поверхности, что подтверждается данными численного моделирования и экспериментальных исследований [47, 85]. Численное моделирование методом конечных элементов [47] стальной трубы из коррозионностойкой стали 08X18H10T (толщина стенки 11 мм) [38] позволило выявить существенную неоднородность напряженного состояния с характерными зонами концентрации их в сварных соединениях. Данные результаты представлены на рисунке 1.5 и демонстрируют

четкий градиент изменения напряжений по толщине стенки, а также показывают влияние аустенитной структуры и легирующих элементов (Cr, Ni, Ti) на формирование остаточных напряжений.

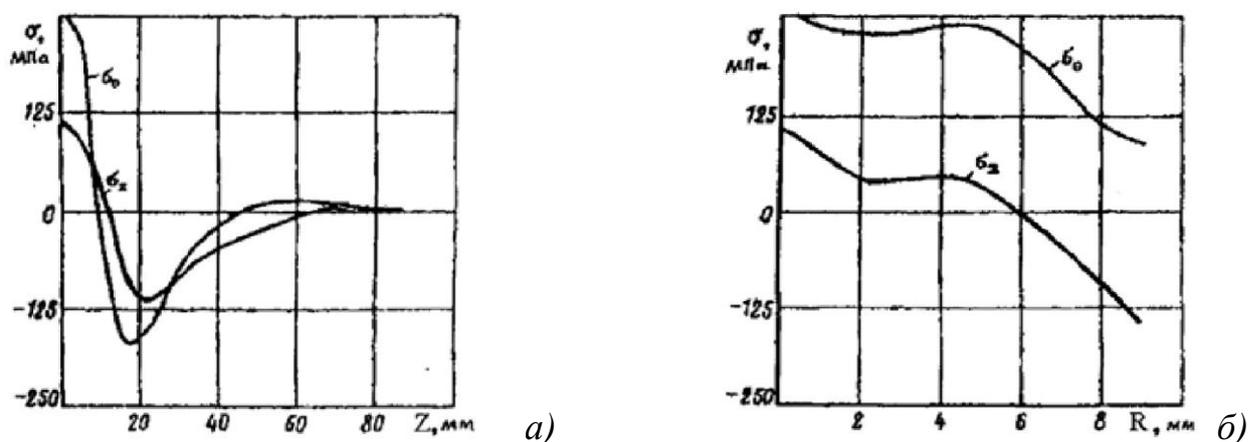


Рисунок 1.5 – Результаты анализа остаточных напряжений в кольцевом сварном соединении ($\text{Ø}102$ мм: *a*) распределение на внутренней поверхности; *б*) изменение кольцевых (σ_θ) и осевых (σ_z) компонент напряжений по толщине стенки трубы [85,127]

Анализ экспериментальных данных [88], полученных методом тензометрии (с базой 5 и 10 мм) для кольцевых сварных соединений труб из стали 10X18H10T, позволил установить следующие закономерности: максимальные значения растягивающих остаточных напряжений локализируются в зоне, удаленной на 25-30 мм от оси сварного шва, причем указанное распределение характерно как для наружной, так и для внутренней поверхности труб. Значительный вклад в развитие теоретических основ исследования остаточных напряжений внесли работы ведущих специалистов в области сварки: Г.А. Николаева [96, 97], Н.О. Окерблома [98, 99], И.П. Трочуна [135], В.А. Винокурова [2-28], В.И. Махненко [90-93] и др. Однако, несмотря на существенный прогресс в разработке аналитических методов расчета остаточных напряжений [37], сохраняются сложности в комплексном учете многофакторного влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров на их пространственное распределение [23].

Для того чтобы измерить остаточные сварочные напряжения в конструкциях, нередко используют магнитный метод [100]. Он основан на магнитоупругом эффекте, при котором намагниченность материала изменяется после воздействия

механических напряжений [6, 19]. Одновременно происходят изменения в таких характеристиках, как проницаемость, постоянная намагниченность, коэрцитивная сила и величина магнитострикции, которые могут служить важной информацией для анализа напряженного состояния ферромагнитных материалов [21]. В настоящее время с помощью данного метода возможно оценить одноосное напряженное состояние конструкции, рассматривая его как разность между основным напряжением и пластической деформацией [22].

1.4 Анализ методов снижения остаточных сварочных напряжений

В современных исследованиях отмечается возрастающая роль пост-сварочной обработки для снижения остаточных напряжений, а также для повышения эксплуатационных свойств сварных соединений и зоны термического влияния. К числу наиболее изученных и технологически освоенных методов относятся термический отпуск, прокатка, вибрационная обработка и обработка методом взрыва. Анализ литературных данных [27, 29, 49, 129, 132] показывает, что выбор оптимального метода должен учитывать специфику материала, конструктивные особенности изделия и условия его эксплуатации.

Ниже представлен анализ основных методов, приводящих к снижению остаточных растягивающих напряжений и повышению механических характеристик сварных соединений.

Одним из наиболее эффективных и широко применяемых методов снижения остаточных сварочных напряжений является термическая обработка. Существует множество способов термической обработке, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. Один из самых экономичных способов - это газопламенный нагрев, однако его эффективность ограничена и не всегда обеспечивает высокое качество обработки. Кроме того, существуют электрические методы нагрева, которые можно упорядочить по возрастанию их экономичности:

- индукционный нагрев с частотой от 2500 до 8000 Гц;
- комбинированный метод нагрева с применением сопротивления;
- индукционный нагрев с частотой 50 Гц.

Термическая обработка представляет собой одну из наиболее известных и эффективных методик, направленных на снижение остаточных напряжений и стабилизацию структуры материалов. Эта процедура повышает эксплуатационные качества и прочность изделий. Такой метод обработки считается одним из наиболее эффективных способов предотвращения как производственного брака, так и преждевременного повреждения, вызванного эксплуатационными нагрузками.

Отпуск – это одна из наиболее широко используемых операций в термической обработке, применяемая для улучшения свойств сварных конструкций. Основная цель этой процедуры заключается в изменении микроструктуры металла и снижении остаточных сварочных напряжений. Преимущество отпуска заключается в его способности равномерно воздействовать на все зоны сварной конструкции, независимо от ее формы и геометрических особенностей [27, 66].

Отпуск стали может осуществляться при различных температурах. Выделяют три ключевых типа: высокий (500 – 750 °С); средний (300 – 450 °С); низкий (90 – 300 °С).

Увеличение температуры отпуска положительно сказывается на микроструктуре и свойствах в зоне термического влияния, что приводит к снижению остаточных (растягивающих) сварочных напряжений. Высокотемпературный режим отпуска также помогает уменьшить эффект наклепа и устранить негативные последствия деформационного старения [68].

Для достижения частичного восстановления свойств среднелегированных сталей применяются режимы отпуска при низких и средних температурах. Наибольшее снижение остаточных сварочных напряжений происходит в течение первых 1-2 часов отпуска. Однако последующее охлаждение вызывает повышение модуля упругости, что приводит к некоторому возрастанию напряжений [27].

Исследование различных режимов термообработки сварных соединений труб из стали 14Х2ГМР [50] показало, что при отпуске невозможно достичь одинаковых механических свойств во всех зонах сварного соединения и основного металла (рисунок 1.6).

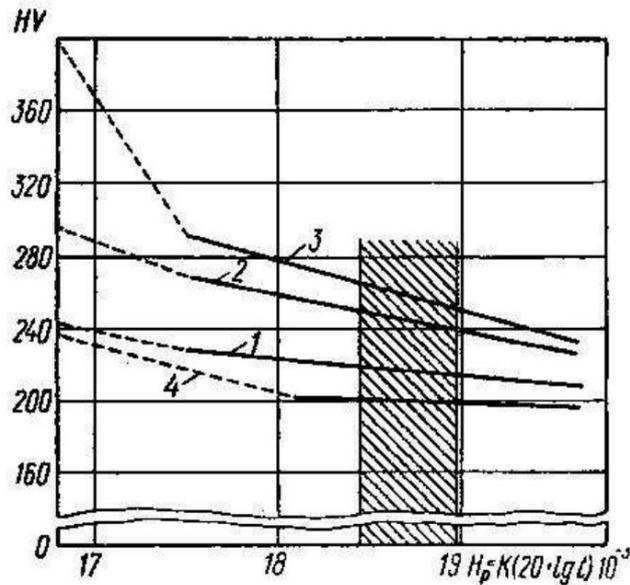


Рисунок 1.6 – Влияние отпуска на твердость различных участков сварного соединения стали 14X2ГМР [26]

Хотя отпуск способствует повышению усталостной прочности, в некоторых случаях он может оказаться неэффективным или даже ухудшить характеристики металла [26], что свидетельствует о возможном негативном влиянии термической обработки. В связи с этим применение отпуска не всегда целесообразно и необходимо учитывать его потенциальные отрицательные последствия (рисунок 1.7).

Выбор оптимальной технологии обработки сварных соединений требует комплексного учета нескольких ключевых факторов. В первую очередь, необходимо учитывать режимы термической обработки, регламентированные действующими нормативными документами. Существенное значение имеют геометрические характеристики соединения, включая диаметр трубы и толщину ее стенки, а также марка применяемой стали. Технологический процесс должен быть обеспечен соответствующим оборудованием - нагревательными устройствами и источниками питания требуемой мощности.



Рисунок 1.7 – Возможные отрицательные последствия проведения термической обработки [53]

Особое внимание следует уделить квалификации персонала, выполняющего термообработку, в частности специалистов-термистов. Немаловажным аспектом является и организационная составляющая процесса, включающая планирование работ, контроль качества и соблюдение техники безопасности. Только при учете всех перечисленных факторов можно обеспечить эффективную и качественную обработку сварного соединения.

Для термообработки сварных стыков трубопроводов наиболее широко применяется индукционный нагрев с использованием токов промышленной и средней частоты. Особое место среди методов снижения остаточных сварочных напряжений занимает высокотемпературный отпуск, особенно эффективный для низкоуглеродистых и низколегированных сталей [84]. Данная технология реализуется в три этапа: сначала металл нагревают до температуры 575 - 750°C, затем выдерживают при этой температуре около часа, после чего проводят медленное охлаждение со строго контролируемой скоростью, которая для трубопроводов обычно не превышает 250°C в час. Хотя этот метод демонстрирует высокую эффективность, снижая остаточные напряжения на 70 – 90 %, его

применение сопряжено с существенными трудностями. Высокие энергозатраты, необходимость использования сложного оборудования и сложность организации процесса в полевых условиях значительно ограничивают область его практического использования, особенно при монтаже трубопроводов в труднодоступных местах или при выполнении ремонтных работ [82].

При обработке крупногабаритных конструкций возникают дополнительные технологические сложности. Во-первых, необходимо использовать специализированное нагревательное оборудование большой мощности. Во-вторых, существует риск ухудшения механических свойств материала и повышения вероятности хрупкого разрушения конструкции. Эти факторы стимулируют поиск альтернативных способов повышения эксплуатационных характеристик сварных соединений без применения термической обработки.

Среди современных альтернативных методов особого внимания заслуживает вибрационная обработка. По сравнению с традиционным отпуском, этот способ отличается значительно меньшей энергоемкостью и может успешно применяться для различных типов конструкций - от несущих балок и рам до ответственных деталей машин. Вибрационная технология особенно эффективна при промышленном производстве, где требуется массовая обработка сварных узлов без изменения их структурных свойств.

Для снижения остаточных напряжений в ответственных металлоконструкциях с жесткими требованиями к прочностным характеристикам создали метод низкочастотной вибрационного воздействия. В основе процесса - использование низкочастотных механических колебаний, которые возникают непосредственно в сварной конструкции.

Современные исследования [45, 50] подтверждают, что технология вибрационной обработки успешно применяется для широкого спектра материалов, включая не только углеродистые стали, но и соединения на основе алюминиевых и титановых сплавов. Экспериментальные данные свидетельствуют о существенном влиянии режимов обработки на изменения микроструктуры. При частоте вибрации 100 Гц и амплитуде 0,8 мм наблюдается уменьшение среднего размера зерна на

15,4 %, тогда как снижение частоты до 50 Гц (при сохранении той же амплитуды) усиливает этот эффект до 23,1 %. Полученные результаты объясняются активацией процессов рекристаллизации и полигонизации под действием циклических нагрузок, что приводит к формированию более равновесной субструктуры с повышенной плотностью дислокаций. Исследования [29] демонстрируют возможность воздействия на микроструктуру материала путем оптимизации параметров вибрационного воздействия для улучшения их механических характеристик.

Особый практический интерес представляют результаты испытаний стали 12ХР10Е, демонстрирующие повышение устойчивости сварных соединений к усталостному разрушению при упругопластических деформациях. Проведенные исследования зафиксировали увеличение данного показателя на 18 - 22 %, что подтверждает высокую эффективность вибрационной обработки как метода улучшения эксплуатационных характеристик металлических конструкций.

Одним из многообещающих способов улучшения эксплуатационных характеристик конструкций является использование энергии взрыва в таких технологических процессах, как упрочнение и обработка после сварки. Основой упрочнения металлов и сплавов служит метод предварительной деформационной обработки, который предполагает управление физико-механическими свойствами через целенаправленное и контролируемое изменение дислокационной структуры. Однако традиционные методы пластической деформации имеют значительные ограничения [131].

Взрывное упрочнение происходит из-за распространения ударных волн через металл, где основным источником служат взрывчатые вещества – химические соединения или механические смеси, способные к быстрому превращению с выделением газов и тепла, что вызывает взрыв. Современная теория делит взрывные процессы на две фазы: сам взрыв и детонацию [7, 9, 127, 140].

Данный метод основан на воздействии ударной волны, генерируемый взрывчатыми веществами, которые формируют давление в диапазоне 5–50 ГПа. Ударное воздействие передаётся волновым образом, вызывая кратковременные и

интенсивные импульсы, которые способствуют упрочнению материала за счёт пластической деформации. Это приводит к уменьшению остаточных напряжений, что, в свою очередь, улучшает свойства металлов. Обработка металлов взрывом обладает уникальным технологическим преимуществом – она позволяет существенно улучшить прочностные характеристики материала (предел текучести, усталостную прочность). Ключевая особенность метода заключается в том, что упрочнение достигается за счет формирования благоприятной структуры остаточных напряжений сжатия при практически отсутствующей макродеформации заготовки. Это делает технологию особенно ценной для финишной обработки готовых деталей сложной конфигурации, где даже незначительные искажения геометрии недопустимы [127].

В исследовании [76] проведен сравнительный анализ характеристик сварных соединений из сталей 13ХГМР и Ст.3 до и после обработки взрывным методом. Полученные данные свидетельствуют о значительном повышении сопротивления хрупкому разрушению благодаря модификации механизма деформации - наблюдается переход от типичного скола к квазисколовому разрушению с образованием выраженной зоны пластичности. Особый интерес представляют выявленные изменения в кинетике развития трещин: обработка взрывом не только снижает скорость их роста, но и существенно изменяет морфологию фронта трещины. Авторы связывают эти эффекты с формированием многоуровневой дислокационной структуры, созданием благоприятного распределения остаточных напряжений сжатия и структурной модификацией границ зерен в зоне термического влияния. Такие преобразования кристаллической структуры приводят к перераспределению напряжений в области вершины трещины, что в итоге повышает циклическую долговечность соединений при динамических нагрузках.

Эксперименты показали, что обработка методом взрыва устраняет субструктурные повреждения в металле и восстанавливает его механические характеристики. Выяснили, что совместное изменение формы микроскопических объемов феррита, вызванное взрывным воздействием, способствует перестройке микроструктуры. Это приводит к образованию прочного каркаса, состоящего из

стенок тоннокристаллической субструктуры, которая становится более однородной по сравнению с исходным состоянием металла.

Таким образом, процесс деформации играет важную роль в улучшении свойств ферритов, обеспечивая их структурную устойчивость. Реорганизация под воздействием взрыва создает новые микроструктурные элементы, что, в свою очередь, ведет к равномерному распределению свойств металла, способствуя его повышенной прочности и долговечности. Данная работа вносит вклад в понимание влияния механических воздействий на металл, открывая новые перспективы для его применения в различных отраслях.

Тем не менее, данный подход обладает значительным недостатком: требуется использование специализированных устройств и строгое соблюдение протоколов безопасности.

Ультразвуковая ударная обработка (УЗУО) в настоящее время признана одним из наиболее прогрессивных методов обработки сварных соединений. Первые фундаментальные исследования воздействия ультразвуковых колебаний на металлические сплавы, начатые в конце 1950-х годов, выявили значительный потенциал метода для снижения остаточных напряжений в сварных соединениях, что стимулировало его применение в машиностроении. Однако первоначальные попытки по внедрению УЗУО столкнулись с рядом существенных ограничений, а именно: недостаточная мощность ультразвуковых генераторов, отсутствие методик контроля параметров обработки и неполным пониманием физических механизмов воздействия на микроструктуру. Данные барьеры временно замедлили распространения этого метода обработки, но научные достижения позволили превратить УЗУО в эффективный метод повышения качества сварных соединений.

Один из факторов, сдерживающих эффективность ранних УЗУО сварных соединений — это использование жестко закрепленных волноводов и инденторов. Эта конструктивная особенность препятствовала равномерной деформации неровных поверхностей швов. Кроме того, мощность ультразвукового оборудования в то время была недостаточной, а вес инструмента слишком большим для эффективного использования. Это ограничивало возможность создания

мобильных и компактных устройств, которые могли бы удовлетворить потребности сварочной промышленности на начальном этапе [2, 63].

Ультразвуковая ударная обработка разработана на судостроительном заводе в Северодвинске в период с 1970 по 1975 гг. С 1979 г. этот метод нашел более широкое применение в производстве и эксплуатации сварных конструкций общего назначения, что стало возможным благодаря исследованиям, направленным на повышение усталостной прочности материалов при воздействии переменных нагрузок. Эти исследования проводились совместно с Институтом электрических стыковок имени Патона, что позволило значительно расширить возможности использования УЗУО в различных промышленных сферах [94, 128].

В 1986 г. специалисты МНТЛ «Квант», а позже и СНТК продолжили исследование методов и приборов для ультразвуковой ударной обработки. В партнерстве с ведущими научными учреждениями как в России, так и за границей, они провели ряд экспериментов, направленных на оценку успешности данного метода для повышения прочности мостовых конструкций, а также высокопрочных, коррозионностойких и структурных сталей.

Полученные результаты продемонстрировали, что УЗУО существенно повышает усталостную прочность материалов, создает необходимые сжимающие напряжения и деформации, а также способствует улучшению механических характеристик сварных соединений в обработанных участках. Также обнаружено, что ультразвуковая ударная обработка комплексно воздействует на металл, активируя процессы релаксации деформаций [95, 126].

Эффективность применения УЗУО подробно исследована в ряде научных публикаций [1, 15, 24, 51, 85, 89, 106, 107]. Экспериментальные данные [10, 13, 15, 49, 60] показали, что воздействие УЗУО значительно изменяет структуру сварных соединений сталей 12X18H10T, 15Г2ФБ и 12X1МФ. УЗУО оказывает положительное влияние на структуру металла. Исследования продемонстрировали, что она уменьшает размер зёрен аустенита на 3,8 % [9, 10, 30].

Результаты исследований показывают значительное улучшение усталостной прочности сварных соединений из стали 12X18H10T на 24 - 26 % после обработки.

Экспериментально установлено, что (УЗУО) эффективно повышает механические свойства кольцевых сварных соединений как в стандартных условиях, так и при воздействии коррозионной среды. Основным механизмом данного эффекта связан с формированием сжимающих остаточных напряжений в поверхностном и подповерхностном слое сварного соединения [34, 35].

Дополнительно было установлено, что:

- в низкоуглеродистых ферритно-перлитных сталях (например, 12Х1МФ) глубина структурных изменений достигает 150 мкм в основном металле;
- в сварном шве глубина структурных изменений аналогичный составляет до 1,5 мм;
- в зоне термического влияния глубина структурных изменений достигает до 1,24 мм.

Такие структурные преобразования способствуют увеличению твердости сварного соединения на 25 - 30 %.

Ультразвуковая ударная обработка, подобно термической, также способствует возникновению сжимающих напряжений в пределах, прилегающих к сварному шву, заменяя ранее существующие растягивающие напряжения. Это повышает надёжность конструкций при использовании. Кроме того, метод УЗУО гораздо эффективнее перераспределяет остаточные сварочные напряжения по сравнению с термической обработкой. [77, 90].

Методы снижения остаточных напряжений имеют свои особенности и оптимальные условия применения. Но на практике часто возникают задачи, которые нельзя решить известными способами устранения остаточных напряжений в сварных соединениях, особенно когда нужно обработать большие объёмы в условиях массового производства.

Данный факт подчеркивает важность оптимизации и совершенствования современных технологий обработки сварных швов, направленных на более эффективное устранение остаточных напряжений.

1.5 Анализ математических моделей для оценки распределения остаточных напряжений в сварных соединениях

На данный момент существует огромное количество математических моделей для оценки распределения остаточных напряжений в сварном соединении.

Выделяют следующие математические модели:

1. Термомеханические модели;
2. Аналитические модели;
3. Полуэмпирические модели.

1. Термомеханические модели

Полные термомеханические модели построены на основе метода конечных элементов, являются наиболее точными и комплексными подходами для анализа распределения остаточных напряжений в сварных соединениях. Данные модели учитывают взаимосвязанные тепловые, металлургические и механические процессы, происходящие при сварке [150, 155].

При использовании данных моделей используют следующие этапы численного моделирования [153]:

а) тепловой анализ осуществляется по уравнению (1.4):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_{\text{сварка}} - Q_{\text{конвекция}} - Q_{\text{излучение}}, \quad (1.4)$$

где: ρ – плотность материала, кг/м³; C_p – теплоемкость, Дж/К; k – теплопроводность, Вт/м·К; T – температура, К; t – время, с; ∇T – градиент температуры, К/м; ∇ – оператор дивергенции; $\nabla \cdot (k \nabla T)$ – перенос тепла за счет теплопроводности в трехмерном пространстве, Вт/м³; $Q_{\text{сварка}}$ – тепловыделение при сварке, Вт/м³; $Q_{\text{конвекция}}$ – тепловые потери за счет конвекции, Вт/м³; $Q_{\text{излучение}}$ – тепловые потери за счет излучения, Вт/м³.

б) механический анализ происходит с использованием следующих уравнений:

- дифференциальное уравнение механического равновесия сплошной среды (1.5):

$$\nabla \cdot \sigma + F = 0, \quad (1.5)$$

где: σ – тензор напряжений (второго ранга), характеризующий внутренние силы в материале, Н; $\nabla \cdot \sigma$ – дивергенция тензора напряжений (векторная величина), Н; F – вектор массовых (объемных) сил, действующих на единицу объема тела, Н.

- деформационное уравнение (1.6):

$$\epsilon = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl} + \epsilon_{th} + \epsilon_{ph}, \quad (1.6)$$

где: ϵ_{el} – упругая деформация, МПа; ϵ_{pl} – пластическая деформация, МПа; ϵ_{th} – термическая деформация, МПа; ϵ_{ph} – деформация из-за фазовых превращений, МПа.

Для критериев пластичности в термомеханических моделях используется модель изотропного упрочнения для сталей (1.7):

$$\sigma_y = \sigma_{y_0} + K \cdot \epsilon_{pl}^n, \quad (1.7)$$

где: σ_{y_0} – начальный предел текучести, Па; K – коэффициент упрочнения; n – показатель упрочнения.

2. Аналитические модели

Аналитические модели разделяют на три основные группы:

- а) термоупругие модели, основанные на решении уравнений теплопроводности;
- б) термопластические модели (учитывают пластические деформации);
- в) модели с фазовым превращениями (для сталей с мартенситным превращением).

Сравнительный анализ данных моделей приведен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнительный анализ моделей (составлено автором)

Модель	Учет пластичности	Учет фазовых превращений	Сложность	Точность
Термоупругая	нет	нет	низкая	±40%
Термопластичная	да	нет	высокая	± 20%
Фазовых превращений	да	да	очень высокая	± 15%

3. Полуэмпирические модели

Полуэмпирические модели представляют из себя гибридный подход:

- физические основы термомеханики сварки;
- статистическую обработку экспериментальных данных;

- упрощенную аналитическую зависимость.

Характерными особенностями таких моделей являются:

- эмпирические коэффициенты, которые определяются экспериментально;
- использование безразмерных критериев подобия;
- охватывают ограниченный диапазон технологических параметров [145].

После проведенного анализа основных математических моделей оценки распределения остаточных напряжений составлена сравнительная таблица 1.3.

Таблица 1.3 – Сравнительная таблица математических моделей распределения остаточных напряжений (составлено автором)

Критерий	Термомеханическая модель	Аналитическая модель	Полуэмпирическая модель
точность (%)	90 - 95	50 - 70	70 - 80
время расчета	часы-дни	минуты	минуты
учет фазовых превращений	да	нет	Частично
требуемые входные данные	максимальные	минимальные	средние
гибкость применения	любые материалы	простые случаи	серийные технологии

1.6 Анализ устройств для ультразвуковой ударной обработки

В настоящее время существует большая разновидность устройств для ультразвуковой ударной обработки сварного соединения с целью снижения остаточных сварочных напряжений. Ряд таких устройств проанализирован и представлены их недостатки.

Одно из таких устройств представлено на рисунке 1.8 [109]. Рассмотренное устройство эффективно для стационарной обработки деталей в машиностроении, но имеет ряд недостатков:

- низкая адаптивность к сложным поверхностям без ручной перенастройки;
- высокие эксплуатационные затраты по причине быстрого износа рабочих элементов;
- не подходит для автономного использования вне станков.

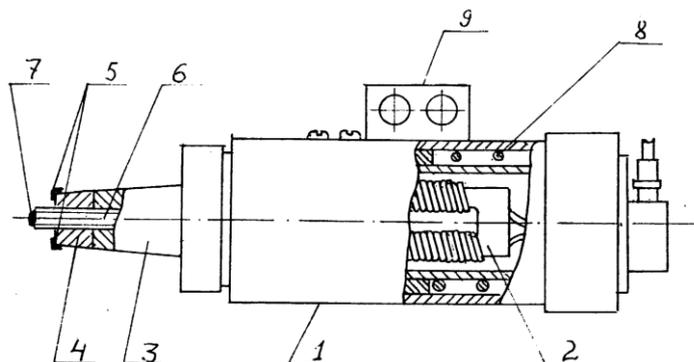


Рисунок 1.8 – Устройство для ультразвуковой упрочняющей чистовой обработки поверхности: 1 – корпус; 2 – магнитострикционный преобразователь; 3 – концентратор; 4 – излучатель ультразвука; 5 – приливы; 6 – шпилька; 7 – наконечник; 8 – упругий элемент; 9 - крепление в виде приливов [109]

Следующее устройство проиллюстрировано на рисунке 1.9 [110]. Оно улучшает поверхность сварного соединения по сравнению с аналогами, но имеет ряд недостатков:

- износ направляющих и риск люфта при длительной эксплуатации;
- недостаточная адаптивность для сложных поверхностей;
- зависимость от условий окружающей среды.

Рассмотрим следующее устройство (рисунок 1.10) [111]. Данное устройство позволяет повысить производительность и глубину упрочнения, но практическое применение может быть затруднено из-за сложности конструкции, высоких требований к точности изготовления и обслуживанию, а также присутствует риск неравномерной обработки.

Следующее рассмотренное устройство (рисунок 1.11) [112], которое позволяет контролировать и регулировать ультразвуковое воздействие на сварной шов в реальном времени, а применение на практике весьма ограничено:

- сильно зависит от свойств металла сварного шва;
- высокая стоимость и сложность электронной системы.

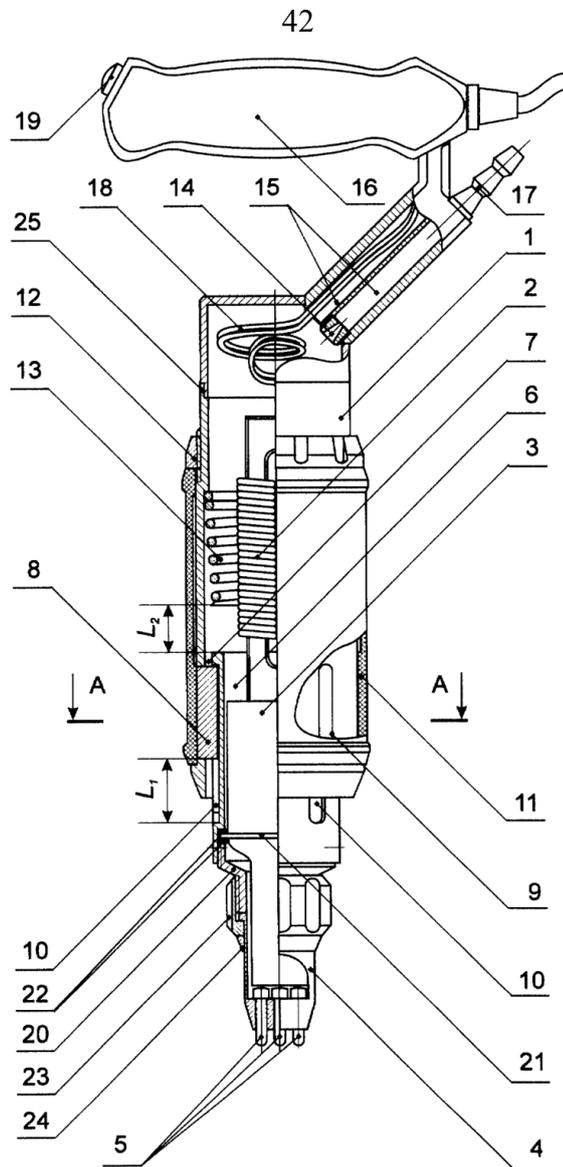


Рисунок 1.9 – Виброударный инструмент с ультразвуковым возбуждением:
 1 - корпус; 2 – магнестрикционный преобразователь; 3 – акустический трансформатор; 4 - обойма; 5 - бойки; 6 - втулка; 7 – корпус с зазором; 8 – направляющие скольжения; 9 – сквозной паз; 10 – глухой паз; 11 - кожух; 12 - гайки; 13 – пружинные амортизаторы; 14 - дроссель; 15 - каналы; 16 - рукоятка; 17 - штуцер; 18 - провода; 19 – система дистанционного пуска-остановки ультразвукового генератора; 20 – переходный патрубок; 21 - фланец; 22 – эластичные прокладки; 23 – накидные гайки; 24 – стопорные кольца [110]

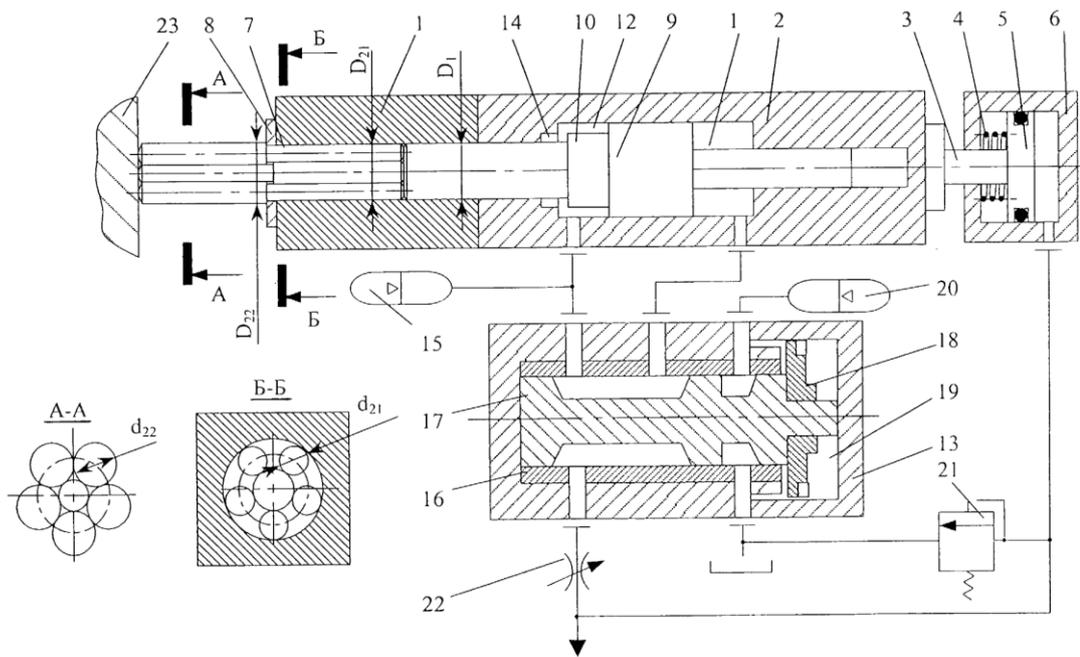


Рисунок 1.10 – Многостержневое устройство для упрочнения поверхностным пластическим деформированием: 1 - корпус; 2 – цилиндр; 3 – шток; 4 - пружина; 5 - поршень; 6 - гидроцилиндр; 7 – волновод; 8 – упорная шайба; 9 – поршень-боек; 10 – тормозная шейка; 11 – поршневая полость; 12 – штоковая полость; 13 – вращающийся распределитель; 14 – тормозная камера; 15 - гидропневмоаккумулятор; 16 - гильзы; 17 - ротор; 18 - турбина; 19 – камера распределителя; 20 – гидропневмоаккумулятор; 21 – предохранительный клапан; 22 – регулируемый дроссель; 23 – заготовка [111]

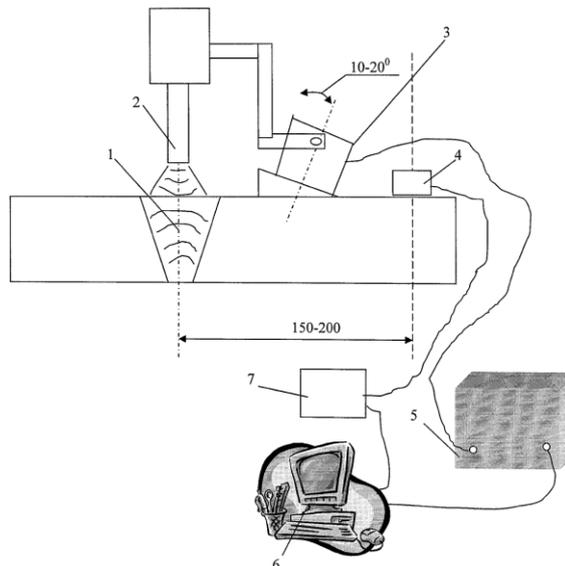


Рисунок 1.11 – Устройство для ультразвуковой обработки сварного соединения в процессе сварки: 1 – сварное соединение; 2 – сварочная головка электрода; 3 – магнитострикционный преобразователь; 4 – ультразвуковой измерительный преобразователь (приемник); 5 – ультразвуковой генератор; 6 - ЭВМ; 7 – блок обработки сигнала [112]

На рисунке 1.12 представлено следующее устройство [113].

Данное устройство помогает автоматизировать процесс ультразвуковой обработки сварных швов, но практическое применение ограничено следующим:

- сложностью синхронизации и позиционирования;
- зависимостью ультразвуковой обработки от стабильности сварочной дуги;
- недостаточной глубиной воздействия;
- высокой стоимостью и требованиями к обслуживанию.

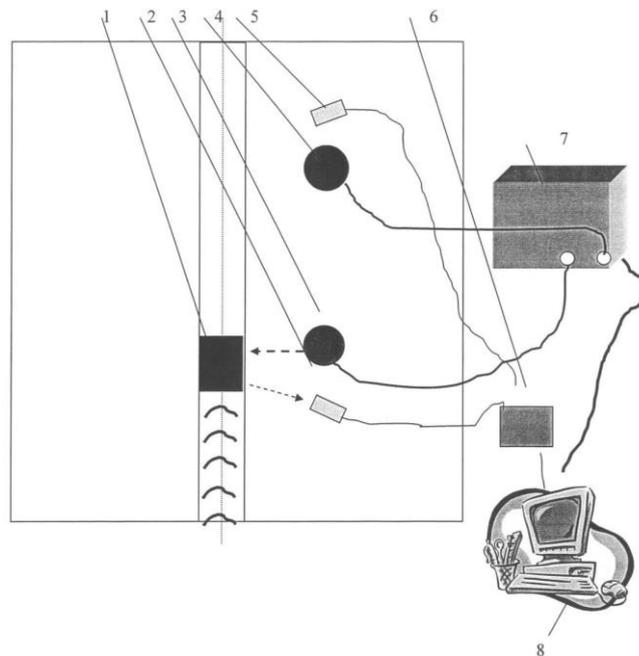


Рисунок 1.12 – Ультразвуковое устройство для обработки сварных соединений металлов аустенитного класса в процессе автоматической сварки: 1 – зона сварки;

2 - фотоприемник; 3, 4 – магнитострикционный преобразователь; 5 - фотоприемник; 6 – электрический блок; 7 – ультразвуковой генератор; 8 – ЭВМ

[113]

Следующее рассмотренное устройство (рисунок 1.13) [114]. Данное устройство эффективно для поверхностного упрочнения и снятия напряжений, но имеет ряд недостатков:

- сложность настройки;
- ручная зависимость в юстировке;
- проблемы с износом и перегревом.

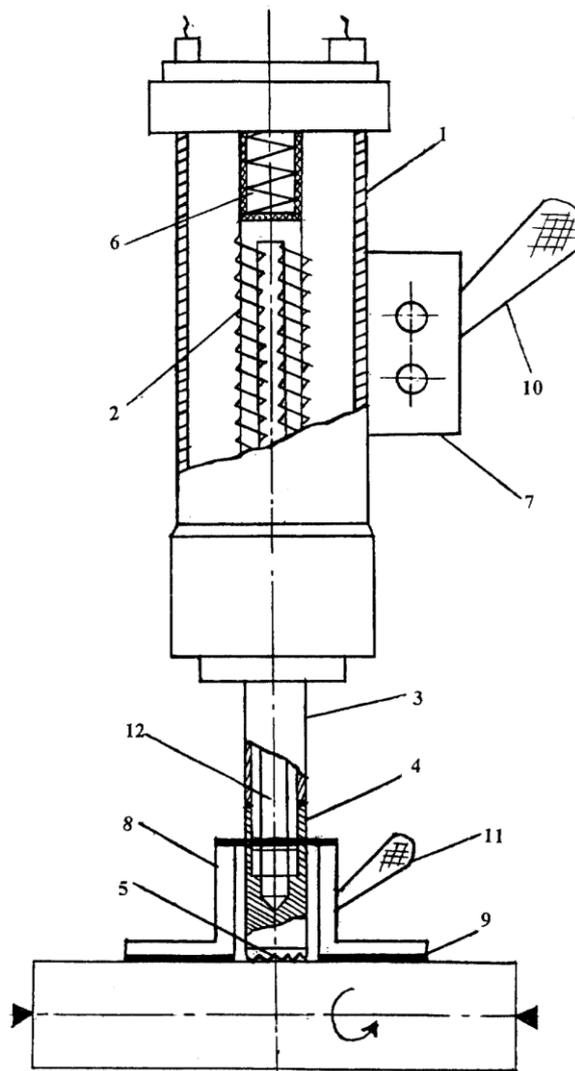


Рисунок 1.13 – Ультразвуковой инструмент для снятия остаточных напряжений и упрочнения поверхностей металлов:

1 - корпус; 2 – магнитострикционный преобразователь; 3 - концентратор; 4 – ультразвуковой излучатель; 5 – рабочий наконечник; 6 – поджимающие пружины; 7 - прилив; 8 - втулка; 9 – кольцевой тормозной элемент; 10, 11 – ручка; 12 - шпилька [114]

Ультразвуковой инструмент для деформационной обработки поверхностей и сварных соединений продемонстрирован на рисунке 1.14 [115]. Данное устройство эффективно для снижения остаточных напряжений, но имеет ряд недостатков:

- сложность регулировки усилия прижатия;
- сложность обслуживания и ремонта;
- ограничения по производительности;
- ограниченный контроль качества обработки.

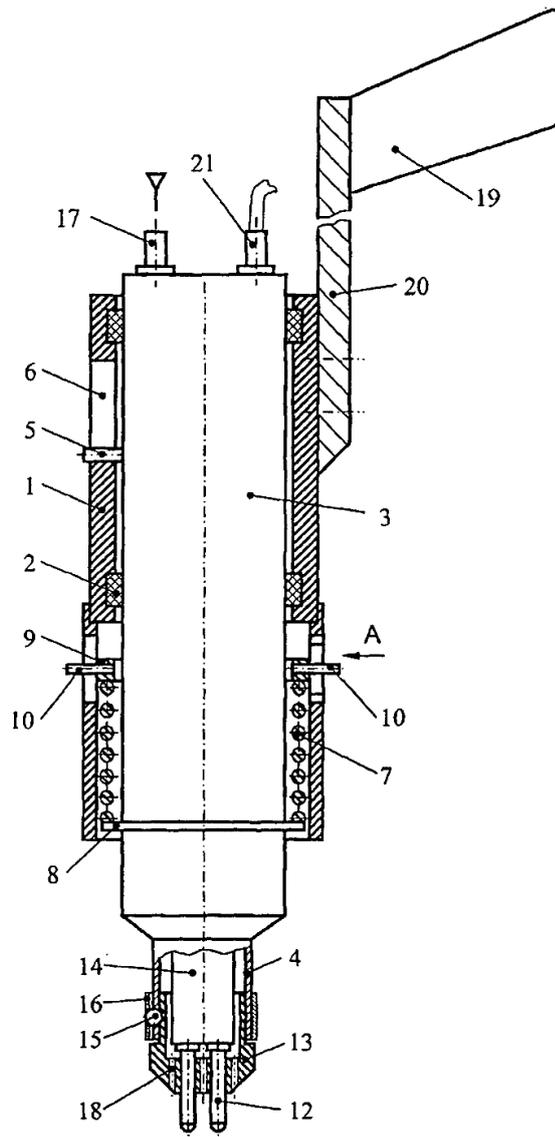


Рисунок 1.14 – Ультразвуковой инструмент для деформационной обработки поверхностей и сварных соединений:

1 - корпус; 2 – направляющие скольжения; 3 – установленный стакан; 4 - насадка;
 5 - штифт; 6 -кромка паза; 7 – пружина; 8 – фланец; 9 –подвижная втулка; 10 –
 штифт; 11 – фигурные пазы; 12 - бойки; 13 – державка; 14 – трансформатор
 колебательной скорости; 15 - шарик; 16 – цилиндрическая пружина; 17 - штуцер;
 18 – отверстие; 19 – ручка; 20 – удлинитель; 21 - уплотнение [115]

Рассмотрим следующее устройство [116] (рисунок 1.15). В устройстве предлагается инновационный подход к снижению остаточных напряжений, но присутствуют следующие недостатки: высокая стоимость лазерной технологии; низкая надежность в тяжелых климатических условиях.

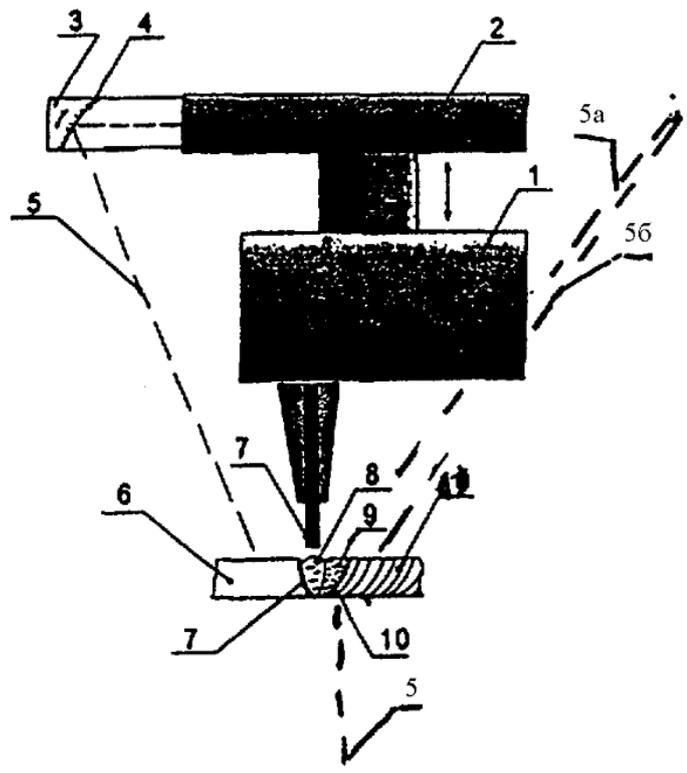


Рисунок 1.15 – Ультразвуковое устройство для снятия остаточных напряжений в сварных соединениях: 1 – сварочный автомат; 2 – импульсный лазер; 3 – объектив; 4 – фокусирующая линза; 5, 5(а), 5(б) – лазерный луч; 6 - жидкий металл; 7 – сварочный электрод; 8 – сварочная дуга; 9 – сварочная ванна, 10 – зона термического влияния [116]

1.7 Выводы по Главе 1

Анализ состояния вопроса влияния остаточных напряжений на срок эксплуатации сварных соединений и их снижение позволил сформулировать следующие выводы:

1. Магистральные трубопроводы являются важной энергетической инфраструктурой. При сооружении, ремонте и реконструкции магистральных трубопроводов используют сварку. Сварные соединения занимают 1,0–1,5 % от общего объема магистральных трубопроводов, на них приходится до 70–80 % всех отказов, в основном по причине образования ОСН и наличие дефектов. Выявлено, что существует прямо пропорциональная зависимость между растягивающими остаточными сварочными напряжениями в кольцевых сварных соединениях и

пределом выносливости. Необходимость их снижения на магистральных трубопроводах представляет собой важную научно-практическую задачу.

2. В ходе анализа методов снижения остаточных напряжений выявлено, что наиболее эффективным методом их снижения является ультразвуковая ударная обработка. В настоящее время нет достаточных экспериментальных исследований об оптимальной частоте ультразвуковой ударной обработки кольцевых сварных соединений для снижения остаточных напряжений. Также не в полной мере освещены вопросы влияния ультразвуковой обработки на физико-механические характеристики сварных соединений.

3. Проведенный анализ математических моделей показал, что существует множество разработанных моделей для оценки распределения остаточных напряжений. Выявлено, что одной из точных моделей распределения остаточных напряжений является термомеханическая модель. Однако отсутствует численная математическая модель для оценки распределения тепловых полей и остаточных сварочных напряжений в кольцевых сварных соединениях.

4. Анализ существующих запатентованных устройств ультразвуковой ударной обработки сварных соединений свидетельствует о наличии большого количества вариации конструктивных решений. Однако при этом отсутствуют конструкции устройств, которые могут использоваться при сооружении и ремонте для снижения остаточных напряжений в кольцевых сварных соединениях магистральных трубопроводов.

По результатам проведенного анализа сформулированы задачи диссертационной работы:

1. Проанализировать литературные источники и патенты отечественных и зарубежных ученых по теме диссертации.

2. Разработать численную модель для оценки остаточных напряжений, возникающих при сварке в кольцевых соединениях трубопроводов.

3. Провести экспериментальные исследования влияния УЗУО различной частоты на величину остаточных напряжений, микроструктуру и механические

свойства металла сварного соединения образцов, имитирующих кольцевое сварное соединение трубопровода.

4. Разработать конструкцию устройства, позволяющего проводить УЗУО внутренней поверхности кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов на стадии сооружения и ремонта.

ГЛАВА 2 МЕТОДИКИ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Материалы исследования

В рамках экспериментальных исследований были выбрана две марки стали - сталь 20 и низколегированная сталь 09Г2С, различающиеся по химическому составу и механическим характеристикам (таблицы 2.1 и 2.2). Выбор именно этих марок стали позволяет получить сопоставимые данные о влиянии различных факторов на их эксплуатационные характеристики [3], что имеет важное значение для практического применения результатов исследования.

Таблица 2.1 - Химический состав (в процентах) исследуемых сталей [33]

Марка стали	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	V	Nb	Ti	Al	Cu
Сталь 20	0,20	0,19	0,62	0,62	0,02	0,02	0,1	-	-	-	-	-	0,15
09Г2С ГОСТ 19381-89	до 0,12	0,5- 0,8	1,3- 1,7	до 0,3	До 0,04	До 0,035	До 0,3	До 0,008	-	-	-	-	До 0,3

Таблица 2.2 - Механические характеристики исследуемых марок стали [33]

Марка стали	Средние значения механических характеристик		
	Временное сопротивление σ_b , МПа	Пределе текучести σ_t , МПа	Относительное удлинение δ , %
Сталь 20	430±5,6	280±3,7	32
09Г2С	480±5,4	330±3,8	30...38

Выбор этих марок сталей объясняется использованием их при сооружении магистральных трубопроводов.

Сварные соединения выполнены с использованием сварочного материала, представленного в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Химический состав и механические свойства сварочного материала (составлено автором)

Марка электрода	C, %	Si, %	Mn, %	Ni, %	Mo, %	S, %	P, %	KCV, Дж/см ²	σ_b , МПа	δ_5 , %
ESAB Св.- 08Г2С	0,11	0,95	2,1	0,25	-	0,025	0,03	109	560	26

Химический состав. Химический состав основного и наплавленного металлов устанавливался в соответствии с нормативно-техническим документом [36] с применением оптико-эмиссионного анализатора «Foundry-Master».

Концентрации химических элементов выявлялись посредством сравнения с аттестованными эталонными образцами. Перед началом анализа поверхность образцов тщательно очищалась и обрабатывалась на шлифовальном станке для достижения ровной, гладкой поверхности. Все результаты анализа затем обрабатывались с применением программного обеспечения на базе операционной системы Windows.

2.2 Разработка установки для имитации процесса сварки линейной части магистрального трубопровода

Для имитирования процесса сварки линейной части магистрального трубопровода разработана установка, представленная на рисунке 2.1.

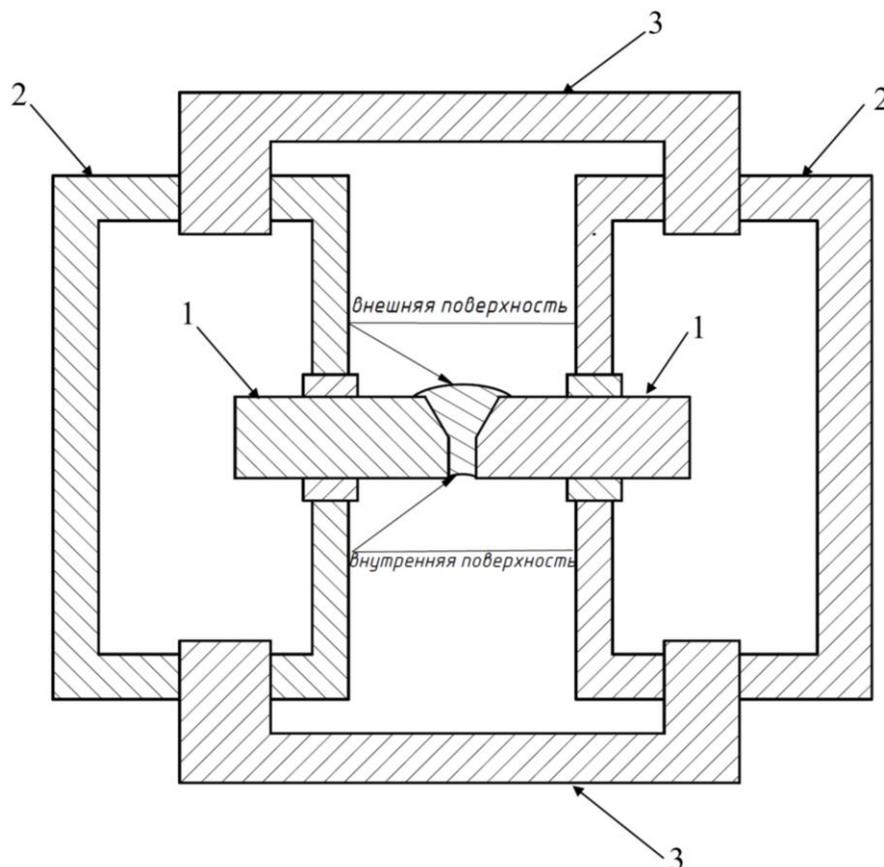


Рисунок 2.1 – Схема установки для сварки образцов:

1 – свариваемые пластины; 2 – струбцины; 3 – фиксаторы струбцин
(составлено автором)

Необходимые условия для имитирования процесса сварки на линейной части магистрального трубопровода следующие:

- жесткое закрепление свариваемых элементов перед сваркой;

- использование полуавтоматической дуговой сварки в среде защитных газов;
- изготовление сварных соединений из сталей 20 и 09Г2С;
- используемые образцы имеют толщину (8 мм), характерную для стенки магистральных трубопроводов ($DN = 720$ мм);
- количество сварочных проходов – 3.
- размеры сварных образцов – 215x100x8 мм.

2.3 Методика определения остаточных и действующих механических напряжений

Остаточные сварочные напряжения, рассматриваемые в данном исследовании, являются макронапряжениями первого рода, которые характеризуются равновесным распределением в объеме соизмеримые с размерами самого изделия.

В данном исследовании акцент сделан на процесс перераспределения остаточных напряжений под действием внешних нагрузок, что требует применения неразрушающих методов контроля. Такой подход позволяет зафиксировать начальные значения остаточных напряжений и оценить их состояние после ультразвуковой ударной обработки сварных соединений. Из всех перечисленных методов наиболее подходящим для целей данного исследования стал метод, использующий принципы магнитоанизотропии, в дальнейшем называемый магнитным методом.

Поскольку исследуется процесс перераспределения остаточных напряжений под воздействием внешних факторов, для анализа был выбран метод, не требующий повреждения образцов. Это позволяет установить начальные значения напряжений и отследить их изменения после ультразвуковой ударной обработки сварного соединения.

В исследованиях отечественных и зарубежных ученых активно используется магнитный метод для оценки остаточных сварочных напряжений, включая анализ влияния ультразвуковой ударной обработки на их перераспределение.

В данной работе был использован магнитоанизотропный метод, суть которого заключается в измерении ЭДС, наводимой в измерительных катушках датчика под действием слабого переменного магнитного поля (рисунок 2.2). В основе метода лежит магнитоупругий эффект, заключающийся в изменении магнитных свойств ферромагнитных материалов (магнитной индукции, проницаемости и др.) при механических деформациях. При этом степень изменения этих параметров зависит от направления в образце. Данное явление – магнитная анизотропия – и легло в основу магнитоанизотропного метода [81].

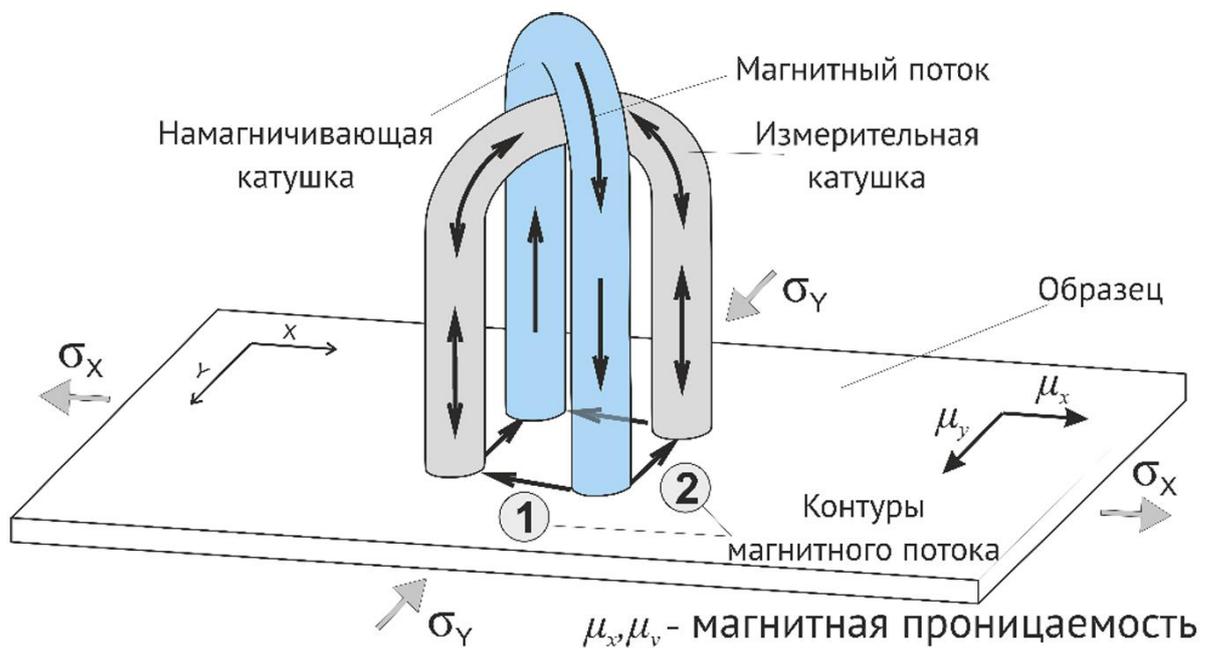


Рисунок 2.2 – Схема электромагнитных измерений при использовании магнитоанизотропного метода [81]

Данная методика обладает универсальностью для всех видов ферромагнитных сталей и функционирует на основе анализа углового отклонения вектора магнитной индукции, что позволяет количественно оценить разность механических напряжений в условиях плосконапряженного состояния.

Критические участки с повышенной локальной концентрацией напряжений идентифицируются по увеличенной разнице между главными механическими напряжениями ($\sigma_1 - \sigma_2$). Данный параметр отражает экстремальные значения нормальных напряжений, действующих в различных сечениях конструкции [81].

В основе метода лежит магнитоупругая связь – зависимость магнитных свойств материала от механических напряжений. Именно этот принцип используется в работе прибора Stress Vision Expert (рисунок 2.3) [103].

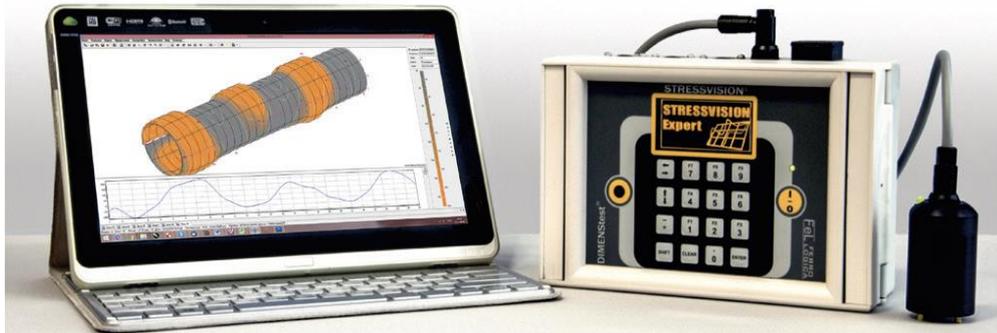


Рисунок 2.3 – Прибор Stress Vision Expert [103]

Распределение основных механических напряжений в металле определяется посредством анализа его магнитных характеристик, в частности показателей магнитоупругой чувствительности [86] по формуле (2.1) [5]:

$$\lambda_B = \frac{\partial B}{\partial \sigma}, \quad (2.1)$$

где: λ_B – линейная магнитострикция, характеризующая магнитоупругую чувствительность, Тл/МПа; B – магнитная индукция, характеризующаяся величиной и направлением, Тл; σ – нормальное механическое напряжение, МПа.

В основу экспериментальной методики положен анализ магнитоупругого эффекта, проявляющегося в изменении электромагнитных характеристик материала под механическим воздействием. Ключевым параметром исследования выступает выходной сигнал измерительной обмотки, количественная взаимосвязь которого с механическими напряжениями выражается уравнением (2.2) [5]:

$$U = K \cdot B \cdot S \cdot f \cdot \omega \cdot \sin \beta, \quad (2.2)$$

где: K – коэффициент пропорциональности; B – усредненное значение индукции; S – сечение магнитопровода, мм; f – частота переменного тока, Гц; ω – количество витков на измерительной обмотке; β – угол между измерительной плоскостью обмотки и вектором магнитной индукции.

Для количественной оценки разности главных механических напряжений (РГМН) ($\sigma_x - \sigma_y$) применяется уникальный магнитоанизотропный преобразователь крестообразной конструкции, принцип действия которого основан на зависимости

магнитных свойств материала от приложенных механических нагрузок. Выходной параметр данного датчика описывается выражением (2.3) [5]:

$$U = K'(\sigma_x - \sigma_y), \quad (2.3)$$

где: K' – коэффициент, характеризующий магнитные свойства материала; σ_x, σ_y – главные механические напряжения при условии $\sigma_x > \sigma_y$, МПа.

Согласно критерию предельного состояния материала, основанного на теории Треска, пластическая деформация возникает при достижении максимальных касательных напряжений и рассчитывается по формуле (2.4) [5]:

$$\tau_{max} = \frac{(\sigma_T - \sigma_B)}{2} = \frac{\sigma_0}{2}, \quad (2.4)$$

где: σ_0 – предельное напряжение состояния, МПа; σ_T – предел текучести, МПа; σ_B – временное сопротивление материала при одноосном растяжении, МПа.

Дополнительное условие перехода в пластическое состояние выражается через эквивалентные напряжения при $\sigma_0 = \sigma_T$ (2.5) [5]:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sigma_x - \sigma_T, \quad (2.5)$$

где $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ — эквивалентное напряжение, при котором материал в условиях одноосного растяжения достигает такого же предельного состояния, как и в рассматриваемой точке при сложном напряженном состоянии, соответствующем пределу текучести.

Данная методика обеспечивает неразрушающий контроль напряженного состояния с высокой чувствительностью к анизотропии напряжений и возможность оценки локальных механических напряжений в материале.

Для исследования взаимосвязи между сигналом РГМН и напряжением в конструкции, вызывающим его изменение, проводились испытания стальных образцов методом одноосного растяжения. В ходе эксперимента осуществлялись измерения сигнала магнитоанизотропного преобразователя (ММА) в центральной части образцов при различных уровнях растягивающих напряжений σ_p .

Экспериментальные исследования выполнялись в следующей последовательности:

1. Образцы подвергались одноосному растяжению в упругой области с применением испытательной машины Zwick Roell (рисунок 2.4 (а)).

2. Нагружение осуществлялось ступенчато с шагом по нагрузке 5 кН.
3. На каждой ступени образец выдерживался не менее одной минуты для стабилизации напряжённого состояния.
4. В центральной части исследуемой пластины выполнялось не менее 10 измерений РГМН при помощи специализированного сканера (рисунок 2.4 (б)).
5. Далее вычислялось среднее арифметическое значение измерений.
6. Полученные значения нагрузок пересчитывались в эквивалентные напряжения растяжения по формуле (2.6):

$$\sigma_p = N_i / S, \quad (2.6)$$

где N_i – осевая растягивающая сила, Н; S – площадь поперечного сечения образца, м^2 ; величина σ_p сопоставлялась с соответствующим усредненным значением РГМН с построением зависимости $\text{РГМН} = f(\sigma_p)$.

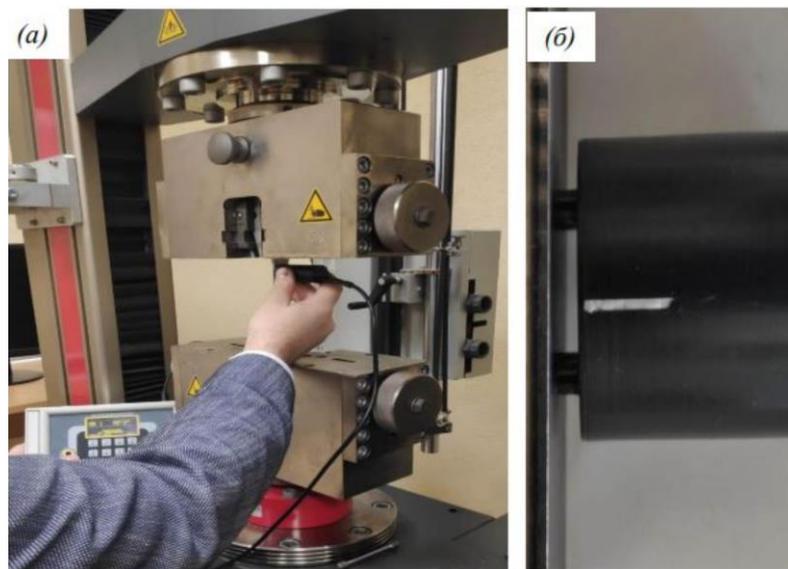


Рисунок 2.4 – Испытательная машина Zwick Roell (а) и вид головки сканера Stress Vision Expert (б) в момент замера сигнала РГМН с растягиваемой трубной стали [81]

Для построения тарировочного графика подготовлены образцы из марки стали 20 и 09Г2С со следующими параметрами.

1. Объект контроля: образец после проката.
2. Габариты образцов: 70x420x8 мм.

3. На образцах отсутствовали: следы химического (коррозии и др.), механического (вмятины, царапины и т.п.) воздействия и следы от режущих инструментов.

4. На образцы не было оказано воздействие сильных магнитных полей коэрцитиметра.

2.4 Методика ультразвуковой ударной обработки сварного соединения

Метод ультразвуковой ударной обработки сварного соединения с целью снижения механических напряжений, возникающих после процесса сварки, а также применение ультразвукового инструмента в достаточной степени освещены в научных публикациях и патентных источниках, начиная с 1970-х гг. [95-96, 109-112, 113-116, 117, 118].

Ультразвуковая ударная обработка - это метод холодного воздействия на металл, представляющий собой технологию упрочнения, основанную на ударном поверхностном пластическом деформировании. Исследования показывают, что наиболее эффективный способ реализации этого процесса - использование виброинструмента. Работа данного инструмента основана на генерации механических волн ультразвуковой частоты, колебания передаются через бойки, создавая ударные импульсы. [1, 2].

На рисунке 2.5 представлена схема распределения зон ультразвукового воздействия в поперечном сечении сварного соединения [9].

Ключевыми эффектами обработки являются:

1. Образование в поверхностном слое (0,02-0,1 мм) защитного «белого слоя», повышающего коррозионную стойкость сварного соединения.

2. Структурные преобразования на глубине 1,0-1,5 мм, вызванные пластической деформацией.

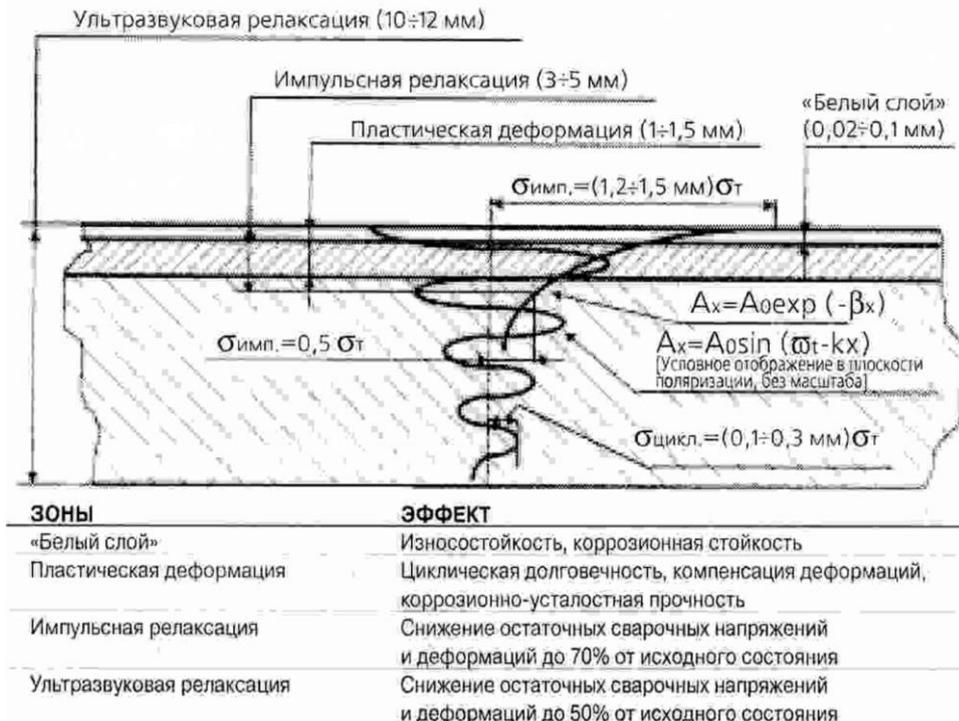


Рисунок 2.5 – Зоны физического влияния ультразвуковой ударной обработки [9]

Данные изменения приводят к следующим улучшениям эксплуатационных характеристик сварных соединений: увеличению ресурса при циклических нагрузках; снижению величины остаточных напряжений [2, 8].

В процессе применения технологии ультразвуковой ударной обработки металла происходит преобразование сигнала в несколько этапов:

- этап 1: электрический ток промышленной частоты 50-60 Гц преобразуется в электрический ток ультразвуковой частоты в ультразвуковом генераторе;
- этап 2: электрический ток ультразвуковой частоты в магнитострикционном преобразователе преобразуется в механические колебания той же частоты.

Для проведения экспериментальных исследований влияния ультразвуковой ударной обработки был использован ультразвуковой генератор мощностью 200 Вт, для которого разработан специальный ударный инструмент, который представлен на рисунке 2.6.

Оборудование, используемое в процессе ультразвуковой ударной обработки, включая генератор и магнитострикционный преобразователь. Ультразвуковой генератор служит источником переменного напряжения ультразвуковой частоты.

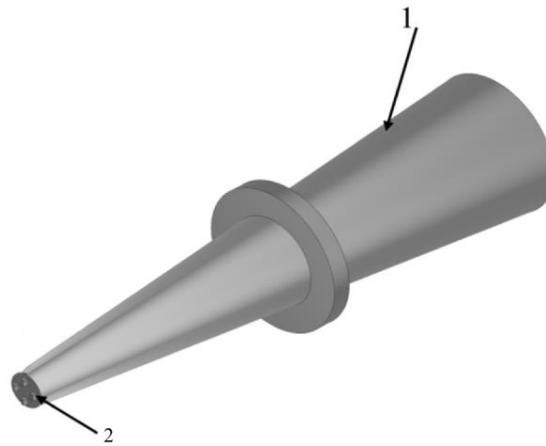


Рисунок 2.6 – Схема разработанного ударного инструмента для УЗУО:

1- волновод; 2 – деформирующие элементы (составлено автором)

Использованные параметры ультразвуковой ударной обработки:

- выходная мощность 200 Вт и рабочая частота 20 ± 1 кГц, 37 ± 1 кГц, 44 ± 1 кГц.
- разработанный волновод с диаметром выходного излучателя 6 мм;
- способ ультразвуковой ударной обработки – контактный;
- скорость перемещения бойка по поверхности - 0,5 м/мин;
- материал деформирующего элемента – сплав ВК6;
- объект обработки: внутренняя и внешняя поверхность сварного соединения

(рисунок 2.7).

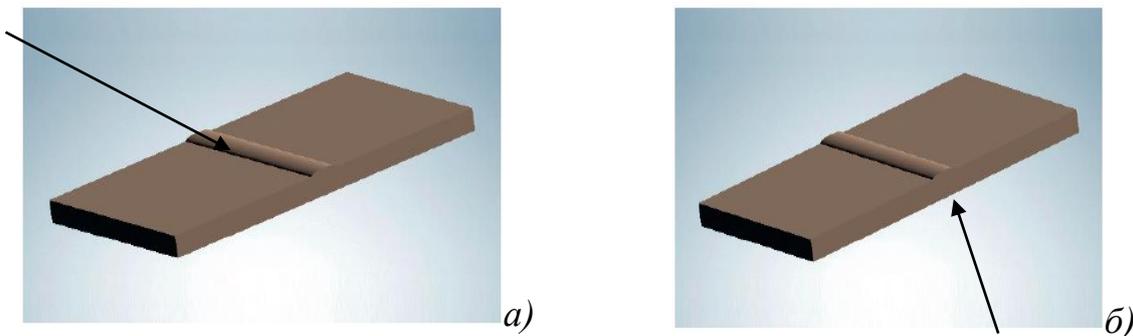


Рисунок 2.7 – Схема ультразвуковой ударной обработки сварного соединения:

а) на внешней поверхности; *б)* на внутренней поверхности [148]

2.5 Методика проведения исследований микроструктуры и механических характеристик

Микроструктура. Анализ микроструктуры основного металла, зоны термического влияния и сварного шва выполнялся с применением оптического микроскопа Leika DM (рисунок 2.8).

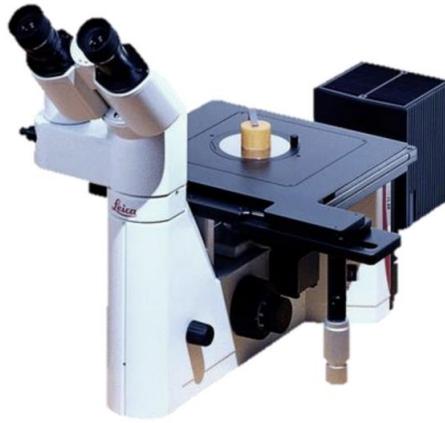


Рисунок 2.8 – Вид микроскопа Leica DM (составлено автором)

Подготовка образцов для металлографического исследования микроструктуры образцов состояла из 4 основных операций согласно нормативному документу [41]:

1. Вырезка образцов.
2. Шлифовка образцов.
3. Полировка образцов.
4. Травление образцов (выявление микроструктуры).

1. Вырезка образцов. Металлографический образец был вырезан из образцов, которые были использованы выше в экспериментальных исследованиях. Место вырезки образцов указано на рисунке 2.9.

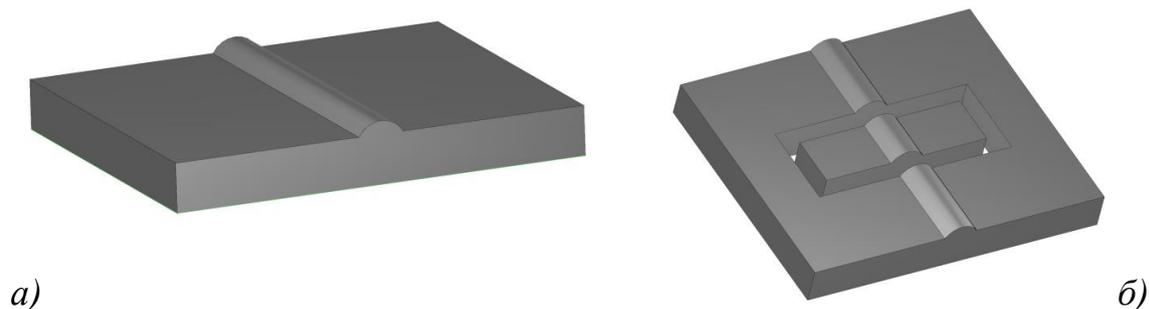


Рисунок 2.9 – Образец для металлографического исследования:
а) общий вид образца; *б)* участок вырезки (составлено автором)

Вырезка образцов осуществлялась методом фрезерования с применением охлаждающей жидкости для того, чтобы не было теплового воздействия, которое ведет к изменению микроструктуры.

2. Шлифовка является наиболее важной операцией в технологии подготовки образцов. Данная операция проводилась с использованием абразивного материала на установке, показанной на рисунке 2.10.



Рисунок 2.10 – Шлифовальный станок (составлено автором)

3. Полировка образца. Полировка металлографических шлифов без деформации металла.

4. Оценка качества металлографического шлифа. Готовый шлиф не должен иметь царапин и других загрязнений. Подготовленные металлографические образцы продемонстрированы на рисунке 2.11.

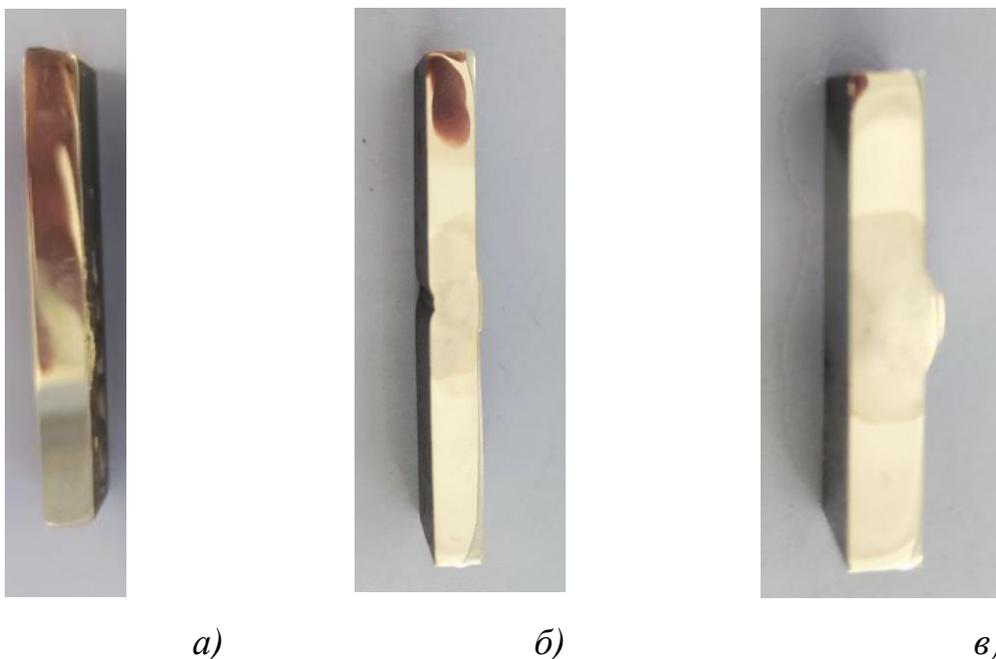


Рисунок 2.11 – Подготовленные образцы для металлографического исследования:

а) исходный образец без сварки (основной металл); *б)* исходный образец со сваркой до УЗУО; *в)* образец после УЗУО (составлено автором)

Для определения размера зерен использовался метод подсчета пересечений зерен по [42].

Микротвердость. Измерение микротвердости основного металла, зоны термического влияния и сварного шва проводилась с использованием прибора ПМТ-3М (рисунок 2.12) в соответствии с нормами [43].



Рисунок 2.12 – Вид прибора ПМТ-3М (составлено автором)

Поверхность образца подготовлена с шероховатостью R_a не более 0,32 мкм. Измерение твердости осуществлялось по методу Виккерса путем измерения диагоналей отпечатка, который оставила алмазная четырёхгранная пирамида, угол при вершине которой равен $\alpha = 136^\circ$. (рисунок 2.13).

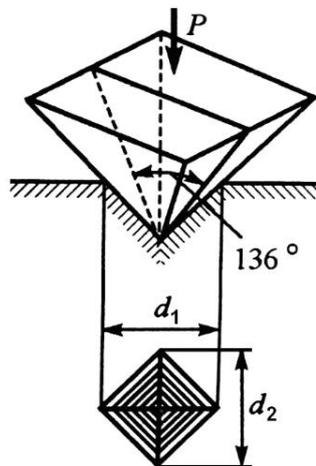


Рисунок 2.13 – Схема определения твердости металла по методу Виккерса:

P – нагрузка, кгс; d_1 и d_2 – диагонали отпечатка, мм (составлено автором)

Значение твердости по Виккерсу определяется как нагрузка, распределенная на единицу площади поверхности пирамидального отпечатка. Для расчета твердости по Виккерсу используются формулы (2.7) и (2.8):

$$HV = \frac{0.102 \cdot 2F \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 0.189 \frac{F}{d^2}, \quad (2.7)$$

где F – нагрузка, Н.

$$HV = \frac{2P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1.854 \frac{F}{d^2}, \quad (2.8)$$

где: P – нагрузка, кгс; α – угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равный 136° ; d – среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

Диагонали измеряются с помощью шкалы микроскопа. Ключевыми характеристиками для вычисления твердости согласно методу Виккерса являются: приложенная нагрузка – 50 кгс и продолжительность выдержки – 15 секунд.

Схема проведения исследований по определению микротвердости приведена на рисунке 2.14.

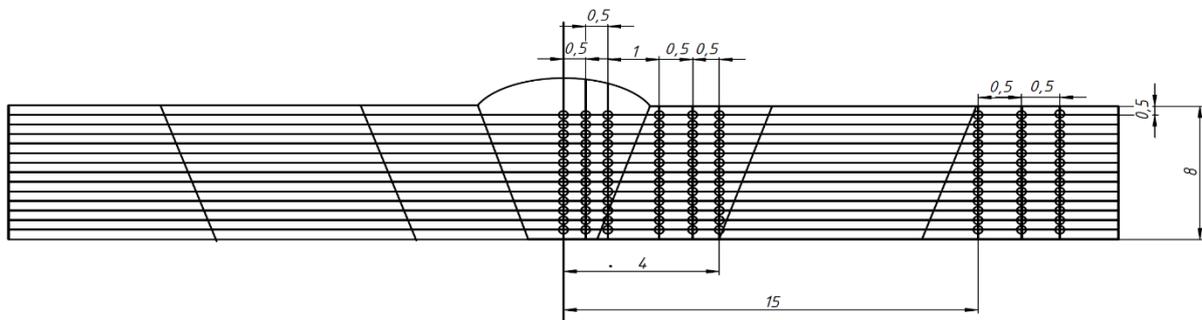


Рисунок 2.14 – Схема изучения микроструктуры и микротвердости по толщине образца (составлено автором)

Ударная вязкость. Исследование ударной вязкости материалов проводилось на современном маятниковом копре модели РКР 450 GE (рисунок 2.15), который представляет собой высокоточное испытательное оборудование с расширенным функционалом. Данная установка позволяет выполнять испытания как по методу Шарпи, так и по методике Менаже, обеспечивая максимальную энергию удара до 450 Дж. Ключевой особенностью оборудования является наличие интегрированной измерительной системы, которая в режиме реального времени регистрирует

динамику нагрузки, траекторию движения маятника и временные параметры процесса разрушения. Полученные данные автоматически обрабатываются специализированным программным обеспечением, что гарантирует высокую точность и воспроизводимость результатов.

Для проведения испытаний на ударную вязкость сварного соединения были подготовлены образцы: исходные (без обработки) и подвергнутые ультразвуковой ударной обработке (УЗУО). Все образцы изготовлены в полном соответствии с требованиями стандарта [39], предусматривающего наличие V-образного концентратора напряжений, расположенного непосредственно в зоне сварного соединения. Геометрические параметры образцов, включая точные размеры и характеристики надреза (угол раскрытия, глубина, радиус скругления), представлены на рисунке 2.16. Особое внимание при подготовке уделялось обеспечению полной идентичности геометрии сравниваемых образцов, что позволяет исключить влияние конструкционных факторов и объективно оценить эффект от применения УЗУО.



Рисунок 2.15 – Инструментальный маятниковый копер маятниковый RKP 450 GE
(составлено автором)

Геометрические параметры образцов и характеристики надреза представлены на рисунке 2.16.

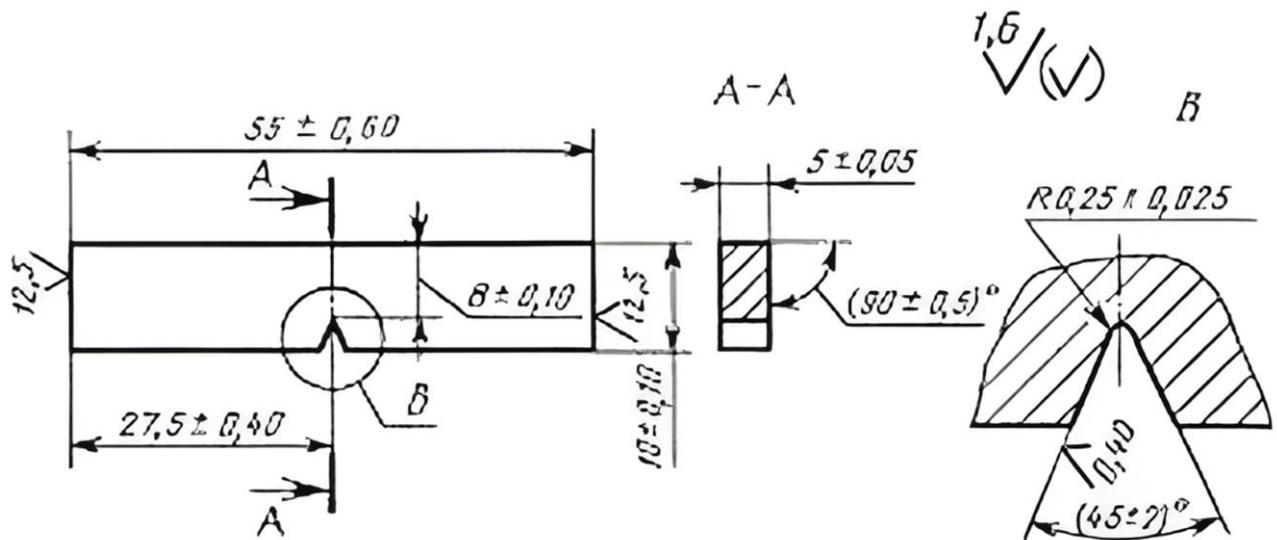


Рисунок 2.16 – Схема подготовки образцов для определения ударной вязкости [43]

Расчет ударной вязкости по итогам всех видов замеров выполнен по формуле (2.9) [39]:

$$a_k = \frac{A_k}{F}, \quad (2.9)$$

где: A_k – работа, затраченная на разрушение образца, Дж; F – площадь поперечного сечения образца, по которому произошло разрушение, см².

2.6 Выводы по Главе 2

1. Проведен анализ физико-химических характеристик исследуемых трубных сталей, включающий определение химического состава и механических характеристик.

2. Разработана экспериментальная методика измерения остаточных напряжений с использованием метода магнитной анизотропии на образцах трубных сталей до и после ультразвуковой ударной обработки.

3. Приведена методика и технологическая оснастка для проведения ультразвуковой ударной обработки на сварных соединениях трубных сталей.

4. Спроектирована и реализована экспериментальная установка, имитирующая процесс сварки на линейных участках магистральных трубопроводов.

5. Описана комплексная методика исследования, включающая сравнительный анализ микроструктуры и механических характеристик сварных соединений до и после применения ультразвуковой ударной обработки.

ГЛАВА 3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

3.1 Численное моделирование распределение температурных полей и напряжений в сварном соединении с применением ANSYS

Численное моделирование сварочных процессов в настоящее время широко используется с целью создания систем прогнозирования качества сварных соединений и оптимизации управления сварочным производством. При этом в силу существенной сложности процесса сварки его описание математическими зависимостями является крайне затруднительным из-за высокого порядка уравнений, описывающих задачи управления, отсутствия универсальных математических методов решения и ограниченных возможностей вычислительных машин.

Моделирование тепловых полей и термических напряжений в зоне кольцевых сварных соединений стальных труб при сварке зависит от множества параметров. Как правило, их можно объединить в следующие блоки, связанные между собой [1]:

- температурные параметры (источник сварки, распределение температуры в зоне сварного соединения и т.д.);
- микроструктурные характеристики (изменение микроструктуры в зоне сварного соединения);
- механические свойства (механическое поведение материала в зависимости от температуры и микроструктуры).

Упрощения на всех этапах создания цифровой модели возможны и часто необходимы, поскольку присутствует множество взаимодействий, которые нелегко описать. В большинстве случаев в процессе моделирования пренебрегают влиянием термического превращения внутри стали.

Моделирование распределения тепловых полей включает в себя решение задач передачи тепла от сварочной ванны к остальной части свариваемого образца за счет теплопроводности. Граничными условиями в данном случае являются теплопотери за счет конвекции и излучения тепла с поверхности образца в окружающую среду. Простые модели решаются в 2D и игнорируют влияние тепловых потерь. При использовании 3D-моделей должны быть известны зависимости температурных параметров от материала.

Для численного моделирования использован программный продукт ANSYS Workbench. Модель проанализирована с использованием встроенных подсистем: Transient Thermal Analysis и Transient Structural Analysis.

Transient Thermal Analysis (переходный тепловой анализ) позволяет оценить, как система реагирует во времени на фиксированные и изменяющиеся граничные условия. Применяя анализ переходных процессов, можно определить временной период, требуемый для формирования установившейся температуры и то, как долго при этом могут поддерживаться рабочие условия системы. Для изменяющихся граничных условий данный анализ показывает результирующую тепловую реакцию системы.

Transient Structural Analysis (нестационарный структурный анализ, или гибкий динамический анализ) позволяет определить реакцию системы на действие любых общих нестационарных нагрузок. Гибкий динамический анализ является наиболее универсальным, его можно использовать для оценки изменяющихся параметров (перемещений, деформаций, напряжений), реагирующих на любые переходные нагрузки.

Объектом исследования являлся образец со сварным соединением, выполненный по технологии трехпроходной сварки из марки стали 20 и 09Г2С. Образцы сварены встык. Геометрически параметры пластин – 50×70×5 мм. Цифровая модель исследуемого образца выполнена в системе проектирования Autodesk Inventor (рисунок 3.1).

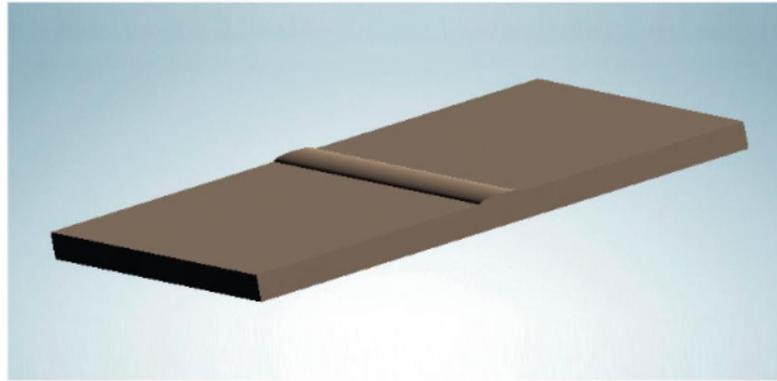


Рисунок 3.1 – Цифровая модель образца, выполненная в программе Autodesk Inventor (составлено автором)

Принятые в расчетах теплофизические и прочностные характеристики стали указаны в таблице 3.1. Предполагается, что они одинаковы для сварного соединения и основного металла. В ходе моделирования распределения тепловых полей свойства материала принимались одинаковыми для всех фаз исходного материала. Химический состав стали представлен в таблице 2.1.

Таблица 3.1 - Теплофизические и прочностные характеристики стали (составлено автором)

Марка стали	Характеристики								
	Плотность, ρ , кг/м ³	Температура, T , °C	Удельная теплоемкость, C_p , кДж/кг·°C	Удельная теплопроводность, λ , Вт/м·°C	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности при растяжении, σ_b , МПа	Коэффициент линейного расширения, α , 10^{-6} 1/°C	Пластичность, ψ , %	Модуль нормальной упругости, E , ГПа
Сталь 20	7859	20	486	51	280	430	12,3	67	212
	7834	100	498	51	230	405	13,1	67	208
	7803	200	514	49	170	415	13,8	67	203
	7770	300	533	44	150	340	14,3	64	197
	7736	400	555	43	140	245	14,8	81	189
	7699	500	584	39	140	130	15,1	86	177
	7659	600	636	36	100	89	15,2	94	163
	7917	700	703	32	60	75	-	96	140
	7624	800	703	26	30	47	-	100	-
	7600	900	695	26	-	30	-	100	-

Продолжение таблицы 3.1

Марка стали	Характеристики								
	Плотность, ρ , кг/м ³	Температура, T , °C	Удельная теплоемкость, C_p , кДж/кг·°C	Удельная теплопроводность, λ , Вт/м·°C	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности при растяжении, σ_b , МПа	Коэффициент линейного расширения, α , 10^{-6} 1/°C	Пластичность, ψ , %	Модуль нормальной упругости, E , ГПа
09Г2С	7850	20	496	33	330	480	11,5	66	209
	7827	100	517	33	295	405	11,8	68	202
	7804	200	533	32	270	415	12,7	-	194
	7781	300	546	31	265	430	13,4	-	190
	7758	400	575	20	220	435	13,9	63	181
	7717	500	609	20	205	410	14,7	63	174
	7689	600	638	28	185	315	14,9	-	162
	7662	700	676	27	-	-	12,3	-	147
	7635	800	-	27	-	-	-	-	137
	7609	900	-	-	-	-	-	-	-

Моделирование процесса сварки может занимать значительное время. В этой связи размеры ячеек расчетной сетки, находящихся вдали от сварного соединения, были увеличены, так как требования к точности результатов в этих областях ниже. Кроме того, элементы сетки растянуты в направлении, параллельном сварочной линии. После дополнительного анализа сходимости установлено, что размер ячейки вдалеке от сварного шва не оказывает влияния на результаты распределения напряжений. При построении расчетной сетки использовался увеличивающийся коэффициент – минимальный размер элемента. Для моделирования выбрана сетка СС1 с минимальным размером элемента в зоне термического влияния 0,357 мм, а также вариант сетки СС4 для сварного шва с размером 0,045 мм (таблица 3.2).

Таблица 3.2 - Характеристика расчетной сетки [147]

Размер сетки	Фактор сетки	Минимальный размер элемента, мм	Минимальное расчетное время для коротких компонентов, мин	Количество элементов для коротких компонентов	Использование основной памяти ПК, Гб
СС1	1	0,357	7	16,325	12
СС4	4	0,045	121	251,706	24

Получена расчётная сетка (рисунок 3.2) [147].

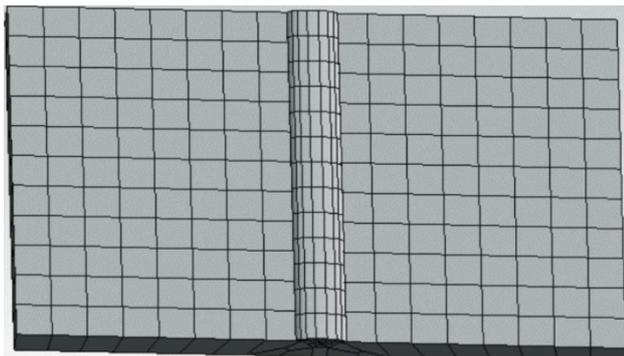


Рисунок 3.2 – Расчетная сетка [147]

Для численного моделирования процесса распределения температурных полей в образцах от момента плавления и образования сварочной ванны до ее кристаллизации и охлаждения до комнатной температуры, использовалось известное дифференциальное уравнение (3.1):

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T_{пл}}{\partial t} + v_x \frac{\partial T_{пл}}{\partial x} + v_y \frac{\partial T_{пл}}{\partial y} + v_z \frac{\partial T_{пл}}{\partial z} \right) = Q_G + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T_{пл}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T_{пл}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T_{пл}}{\partial z} \right), \quad (3.1)$$

где: ρ , c_p – плотность и удельная теплоемкость свариваемого металла кг/м³, Дж/К; $T_{пл}$ – температура плавления основного металла, К; t – время остывания сварочной ванны, с; λ_x , λ_y , λ_z – коэффициенты теплопроводности металла направлениях x , y , z , Вт/м·°C; Q_G – удельная мощность электрической дуги, Дж; v_x , v_y , v_z – скорости переноса тепла в направлениях x , y , z , м/с.

Отвод тепла за счет конвекции от поверхности сварочной ванны при ее кристаллизации рассчитывался с использованием уравнения Ньютона-Рихмана (3.2):

$$\frac{q}{A} = h_f (T_s - T_b), \quad (3.2)$$

где: q/A – скорость отвода тепла, м/с; h_f – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К; T_s – температура на поверхности ванны, К; T_b – температура в объеме жидкости, К.

При моделировании теплового переходного процесса применялся переходный температурный анализ. В ходе данного моделирования использовалась подсистема Ansys Workbench «Death and Live Elements», чтобы имитировать заполнение сварочной ванны электродом. Имитирование необходимо для того, чтобы понять, как влияет заполнение сварочной ванны на распределение

термических напряжений по всей плоскости образца. Температура окружающей среды принималась равной 22°C. Теплопотери за счет излучения тепла с поверхности образца вдали от зоны сварки пренебрегали [148].

Скорость сварки составляла 25-150 мм/мин. Мощность источника сварки – 10 кВт. При моделировании учитывалось термическое влияние процесса кристаллизации сварочной ванны.

Распределение термических напряжений в сварном соединении моделировалось с использованием подсистеме Transient Structural Analysis. Для исследуемого образца выбрано билинейное изотропное поведение материала. Теоретический профиль остаточных сварочных напряжений в зоне сварного соединения проиллюстрирован на рисунке 3.3.

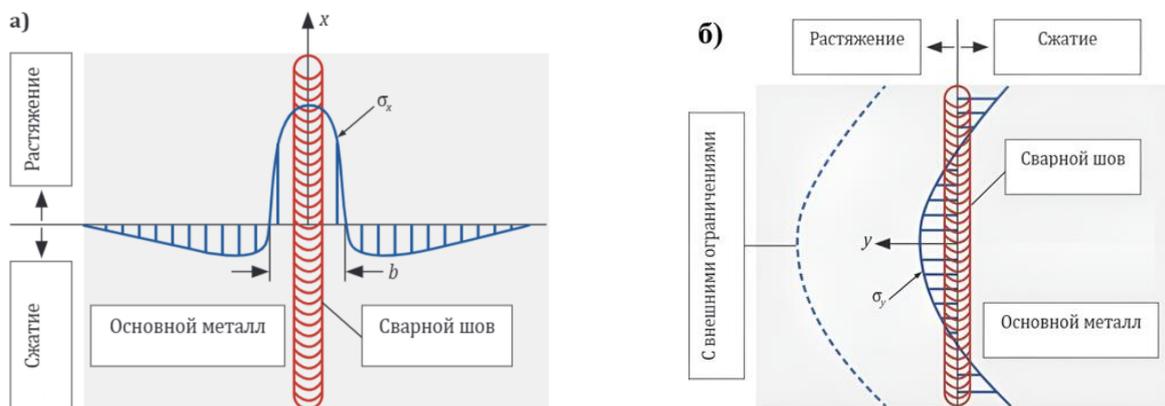


Рисунок 3.3 – Теоретический профиль распределения остаточных напряжений в сварном соединении: а) σ_x – продольные остаточные сварочные напряжения (b – квадратичное отклонения); б) σ_y – поперечные остаточные сварочные напряжения (с внешней связью для случая неподвижных сторон образца) [147]

Коэффициент теплового расширения при различных значениях температуры ($\alpha^{se}(T)$) рассчитывается косвенно в ANSYS из термических напряжений (ϵ^{th}) по формуле (3.3):

$$\epsilon^{th} = \alpha^{se}(T) \cdot (T_{пл} - T_{ref}) \quad (3.3)$$

где T_{ref} – температура восстановления, К.

Термическое напряжение и предел текучести вычисляются с применением линейного правила смесей для фазового состава для каждого температурного значения. При расчете учитываются коэффициент Пуассона, плотность, модуль

Юнга и касательный модуль, который зависит от температуры и является общим для всех микроструктурных фаз.

В процессе моделирования в подсистеме Transient Structural Analysis история температурного изменения каждого узла из теплового моделирования применялась как узловая нагрузка.

При моделировании образец был закреплен с помощью функции Remote Displacement программного продукта ANSYS Workbench для предотвращения возможных перемещений в пространстве [147].

Результаты моделирования распределения тепловых полей в зоне сварного соединения представлены на рисунке 3.4.

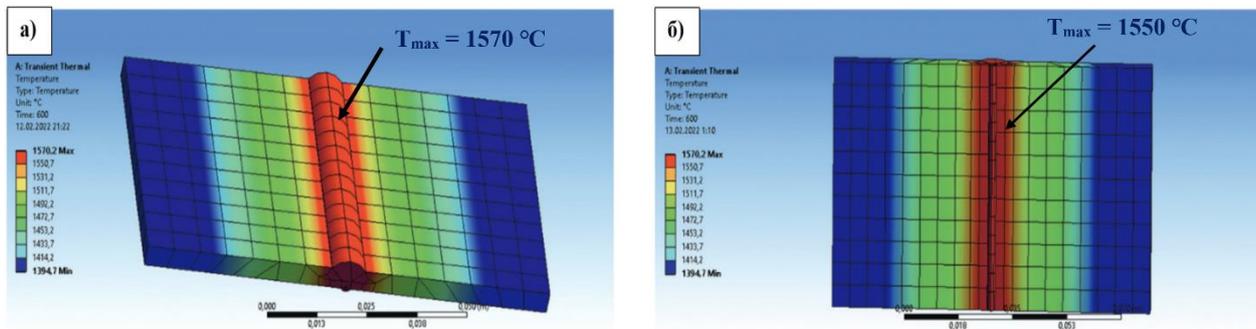


Рисунок 3.4 – Распределение тепловых полей по результатам моделирования на внешней (а) и на внутренней (б) поверхности образца [147]

Установлено, что максимальная температура наблюдается в центре сварочной ванны и составляет 1570 °С в сталях марки 20 и 09Г2С [147].

Результаты распределения термических напряжений представлены на рисунке 3.5. Определено, что на внутренней поверхности сварного соединения возникают максимальные термические напряжения, для стали 20 достигают 202 МПа, а для стали 09Г2С - 250 МПа.

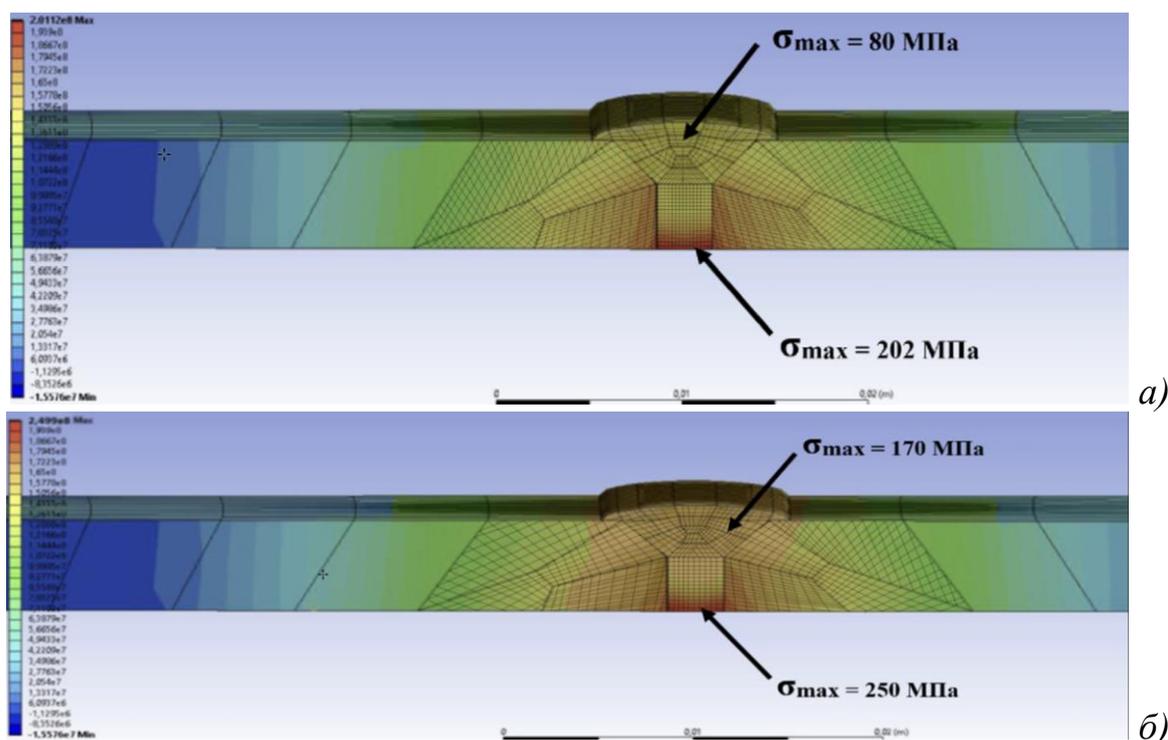


Рисунок 3.5 – Распределение основных напряжений по результатам моделирования: *а)* распределение термических напряжений в сварном соединении стали 20; *б)* распределение термических напряжения в сварном соединении стали 09Г2С [147]

3.2 Установление зависимости сигнала магнито-анизотропного метода от величины растягивающих напряжений в исследуемых трубных сталях

Для измерения остаточных напряжений в сварном соединении использовался прибор Stress Vision Expert (рисунок 2.3). Данный прибор регистрирует остаточные напряжения в условных единицах (у.е.) для перевода этих значений в мегапаскали (МПа) необходим тарировочный график. Для составления тарировочного графика использовалась схема (рисунок 2.4). Полученные значения для стали 20 (таблица 3.3) и графическая зависимость (рисунок 3.6), а для стали 09Г2С (таблица 3.4) и графическая зависимость (рисунок 3.7).

Таблица 3.3 – Зависимость величины РГМН от напряжений при одноосном растяжении пластины марки стали 20 (составлено автором)

№ номер испытания	Испытания на машине, МПа	Значение Stress Vision
1	2,00	-12
2	4,00	-10

Продолжение таблицы 3.3

№ номер испытания	Испытания на машине, МПа	Значение Stress Vision
3	8,87	-5
4	16,00	0
5	23,20	2
6	28,70	3
7	36,80	4
8	40,00	7
9	50,70	10
10	60,30	20
11	74,40	25
12	83,30	33
13	89,10	40
14	101,00	45
15	111,00	50
16	117,00	55
17	126,00	60
18	133,00	65
19	143,00	70
20	151,00	75

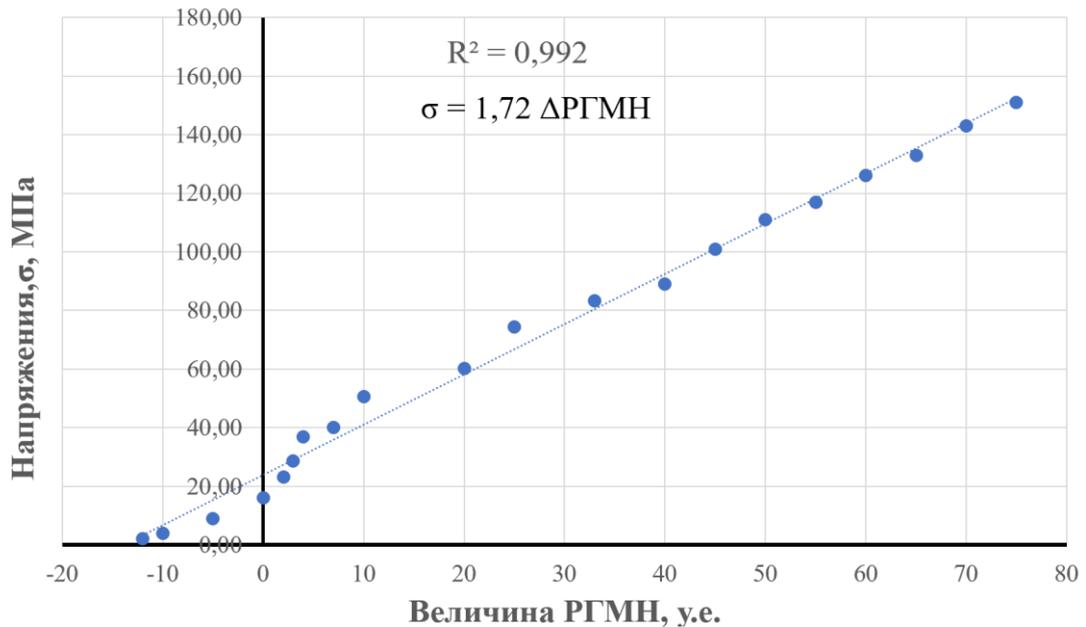


Рисунок 3.6 - Зависимость величины РГМН от напряжения при одноосном растяжении пластины из стали 20 (составлено автором)

Таблица 3.4 – Зависимость величины РГМН от напряжений при одноосном растяжении пластины марки стали 09Г2С (составлено автором)

№ номер испытания	Испытания на машине, МПа	Значение Stress Vision
1	2,00	-12
2	4,00	-10

Продолжение таблицы 3.4

№ номер испытания	Испытания на машине, МПа	Значение Stress Vision
3	8,87	-5
4	16,00	0
5	24,20	2
6	31,70	3
7	40,80	4
8	48,50	7
9	57,70	10
10	65,30	20
11	74,40	25
12	83,30	33
13	89,10	40
14	101,00	45
15	111,00	50
16	117,00	55
17	126,00	60
18	133,00	65
19	143,00	70
20	151,00	75

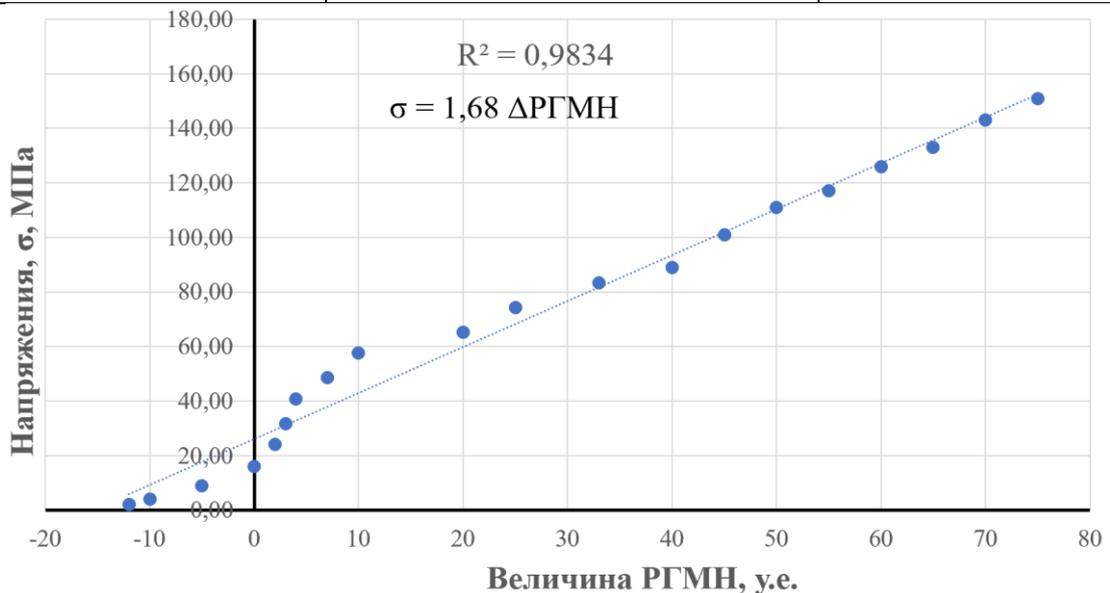


Рисунок 3.7 - Зависимость величины РГМН от величины растягивающих напряжений при одноосном растяжении пластин из стали 09Г2С (составлено автором)

Из графических зависимостей, представленных на рисунках 3.6 и 3.7, можно заключить, что значение $\Delta \text{РГМН}$ прямо пропорциональны напряжению возникающих в пластине представленной формуле (3.4):

$$\Delta \text{РГМН} = K * \sigma_p, \quad (3.4)$$

где: $\Delta \text{РГМН}$ – разница главных механических напряжений, у.е; K – коэффициент пропорциональности, у.е/МПа; σ_p – растягивающие напряжения, МПа.

3.3 Верификация модели распределения напряжений в сварном соединении при численном моделировании с экспериментальными значениями

Для верификации результатов моделирования подготовлены образцы со сварными соединениями. Подготовленные образцы со сварными соединениями стали марки 20 и 09Г2С представлены на рисунке 3.8. Для достоверности экспериментальных значений подготовлены по 3 образца из каждой марки стали.

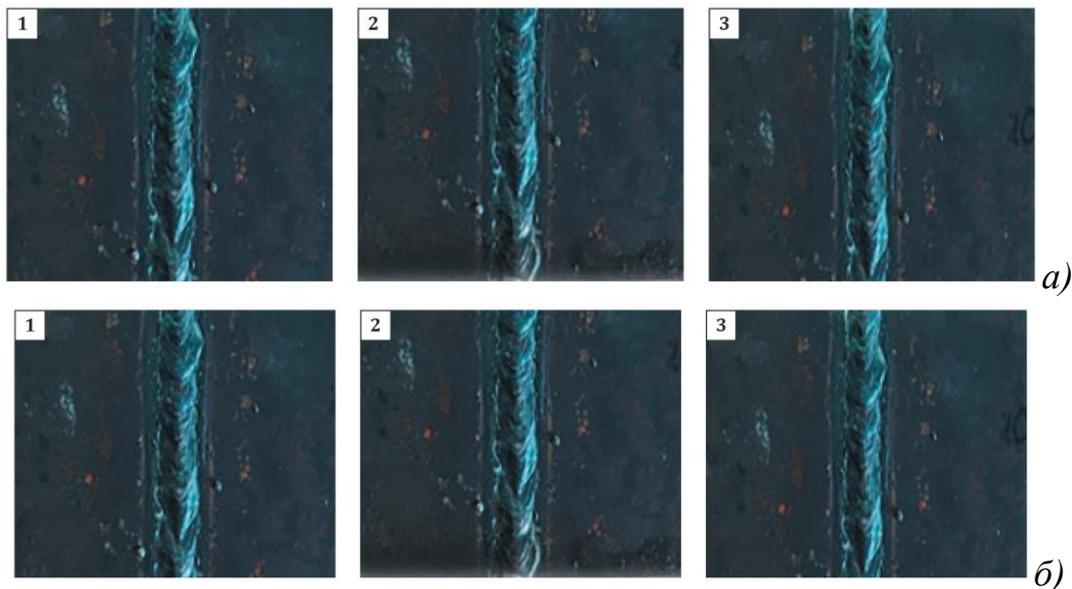


Рисунок 3.8 – Экспериментальные образцы для определения остаточных напряжений:

а) подготовленные образцы из стали 20; *б)* подготовленные образцы из стали 09Г2С (составлено автором)

После определения остаточных напряжений в экспериментальных образцах проводилось сравнение со значениями, полученными расчетным способом. Сравнительные графики представлены на рисунках 3.9 и 3.10.

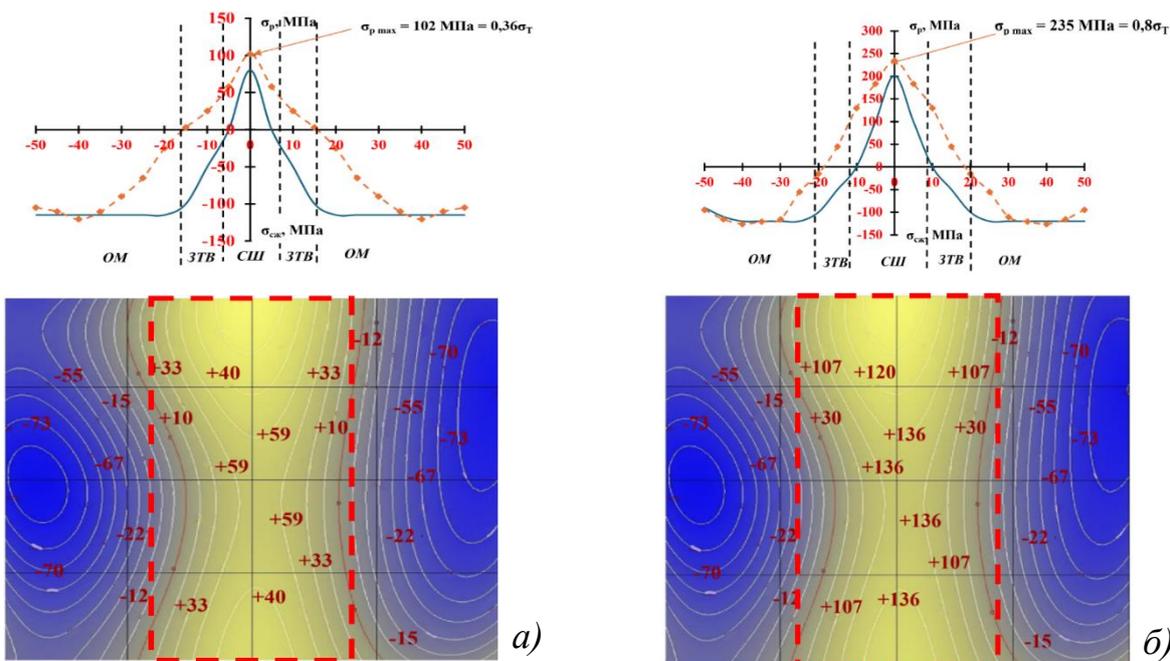


Рисунок 3.9 – Распределение расчетных (—●—) и экспериментальных напряжений (---●---) на внутренней и внешней поверхности сварного соединения стали 20:
 а) карта РГМН и график распределения расчетных и экспериментальных значений на внешней поверхности; б) карта РГМН и график распределения расчетных и экспериментальных значений на внутренней поверхности [148]

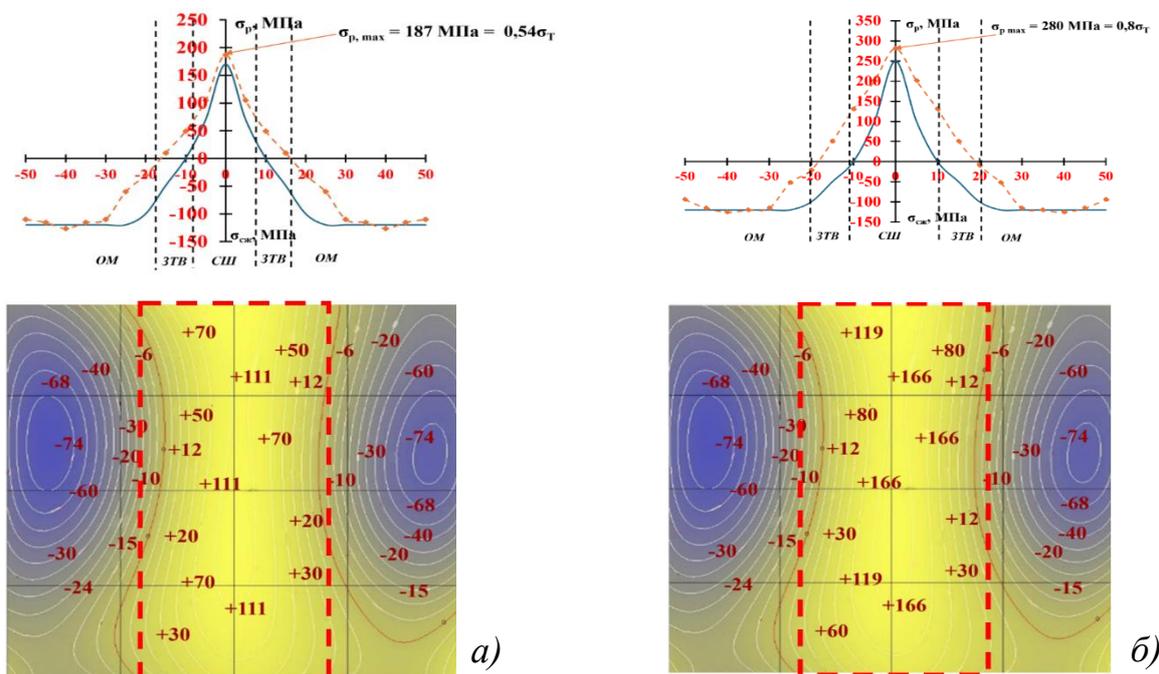


Рисунок 3.10 – Распределение расчетных (—●—) и экспериментальных напряжений (---●---) на внутренней и внешней поверхности сварного соединения стали 09Г2С:
 а) карта РГМН и график распределения расчетных и экспериментальных значений на внешней поверхности сварного соединения; б) карта РГМН и график распределения расчетных и экспериментальных значений напряжений на внутренней поверхности сварного соединения [148]

Из сопоставления расчетных и экспериментально установленных распределений напряжений по поверхностям сварных соединений (рисунки 3.9 и 3.10) видна их удовлетворительная сходимость (расхождение расчетных и экспериментальных значений $\sigma_{p \max} \leq 10 \%$), что свидетельствует о правомочности предложенной расчетной модели.

3.4 Исследования зависимости снижения остаточных напряжений в сварном соединении при ультразвуковой ударной обработке на внешней и внутренней поверхности

Для выполнения исследований подготовлены образцы со сварными соединениями с габаритными размерами $215 \times 100 \times 8$ мм (соответственно длина, ширина, толщина) из стали марки 20 и 09Г2С, которые затем сварены встык полуавтоматической сваркой по разработанной схеме, показанной на рисунке 2.1, а ультразвуковая ударная обработка проводилась по схеме, проиллюстрированной на рисунке 2.7 [148].

Распределения остаточных напряжений до и после ультразвуковой ударной обработки на образцах из стали 20 показаны на рисунках 3.11 и 3.12.

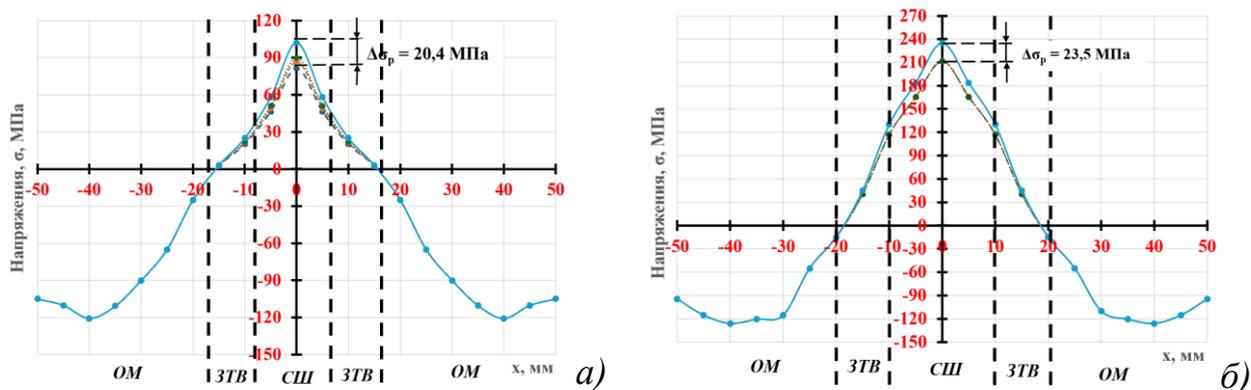


Рисунок 3.11 - Распределение напряжений до обработки (—●—) и после обработки на внешней поверхности (····· $\nu = 44$ кГц; - - - $\nu = 37$ кГц; -▲- $\nu = 20$ кГц) для внешней (а) и внутренней (б) поверхности сварного соединения (составлено автором)

В ходе экспериментальных исследований выявлено, что максимальное снижение остаточных напряжений при ультразвуковой ударной обработке на частоте 20 кГц на внешней поверхности составляет 20 % [104].

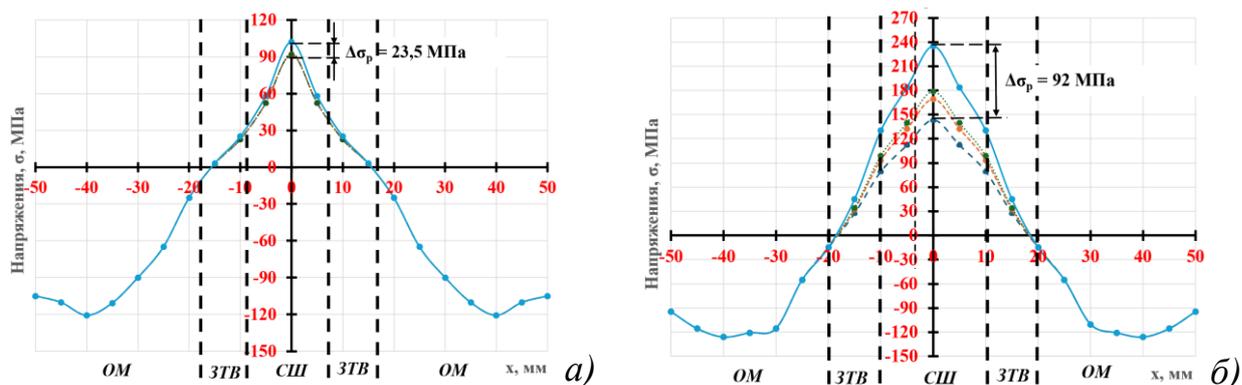


Рисунок 3.12 - Распределение напряжений до обработки (—●—) и после обработки на внутренней поверхности (...●... $\nu = 44$ кГц; -●- $\nu = 37$ кГц; -▲- $\nu = 20$ кГц) для внешней (а) и внутренней (б) поверхности сварного соединения (составлено автором)

Экспериментальные исследования демонстрируют, что максимальное снижение остаточных напряжений происходит при ультразвуковой ударной обработке на частоте 20 кГц на внутренней поверхности и составило 39 % [104].

Распределения остаточных напряжений до и после ультразвуковой ударной обработки на образцах из стали 09Г2С показаны на рисунках 3.13 и 3.14.

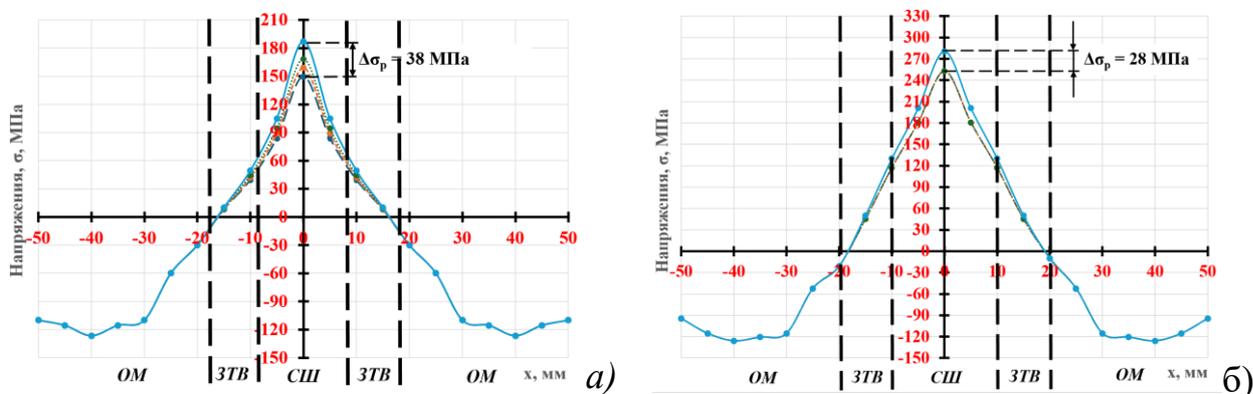


Рисунок 3.13 - Распределение напряжений до обработки (—●—) и после обработки на внешней поверхности (...●... $\nu = 44$ кГц; -●- $\nu = 37$ кГц; -▲- $\nu = 20$ кГц) для внешней (а) и внутренней (б) поверхности сварного соединения (составлено автором)

В ходе экспериментальных исследований выявлено, что снижение остаточных напряжений при ультразвуковой ударной обработке на частоте 20 кГц на внешней поверхности составляет 20 % [104].

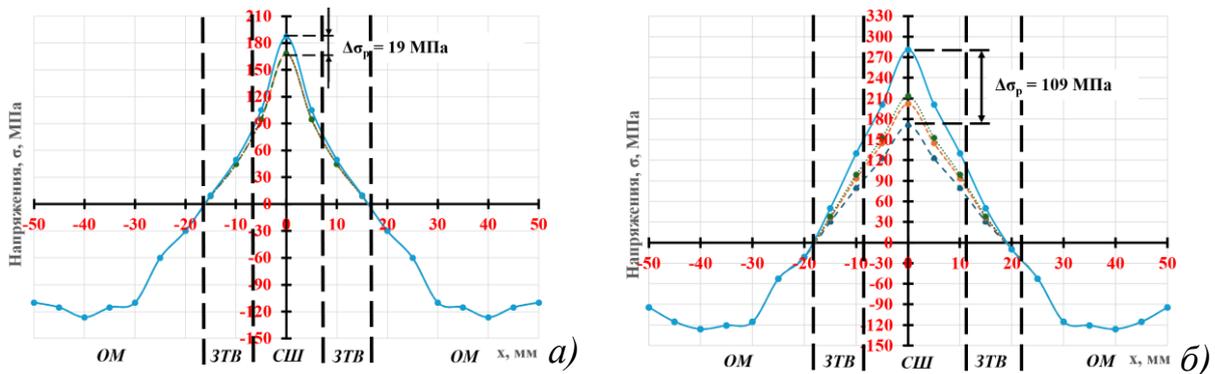


Рисунок 3.14 - Распределение напряжений до обработки (—●—) и после обработки на внутренней поверхности (...●... $v = 44$ кГц; ---◆--- $v = 37$ кГц; -▲- $v = 20$ кГц) для внешней (а) и внутренней (б) поверхности сварного соединения (составлено автором)

При экспериментальных исследованиях выявлено, что максимальное снижение остаточных напряжений происходит при ультразвуковой ударной обработке на частоте 20 кГц на внутренней поверхности и составляет 39 % [104].

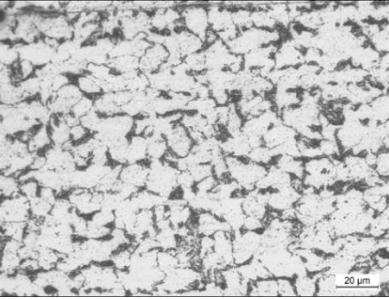
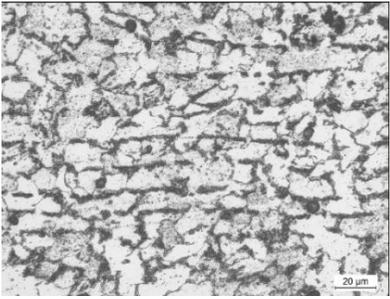
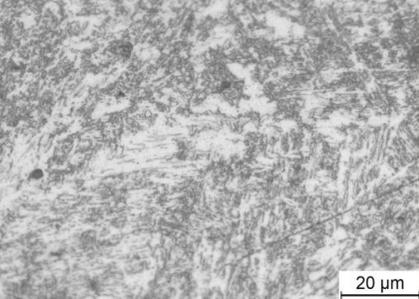
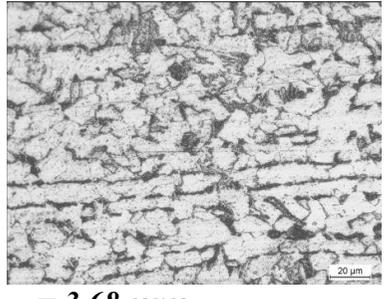
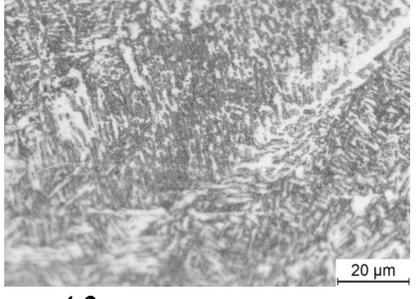
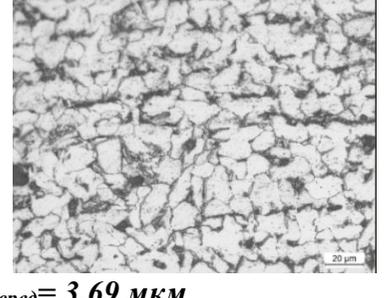
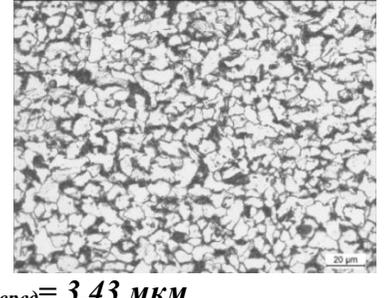
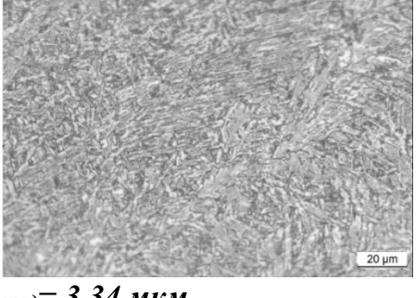
После проведенных исследований можно сделать вывод, что максимальное снижение остаточных напряжений происходит при ультразвуковой ударной обработке на частоте 20 кГц на внутренней поверхности [104].

3.5 Анализ микроструктуры до и после ультразвуковой ударной обработки на внешней и внутренней поверхности трубной стали

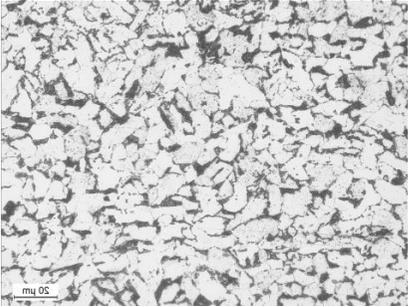
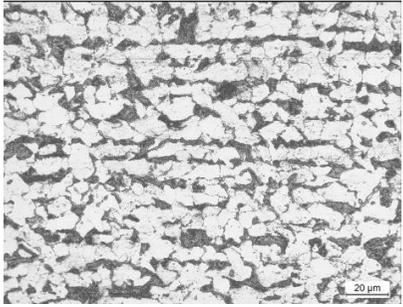
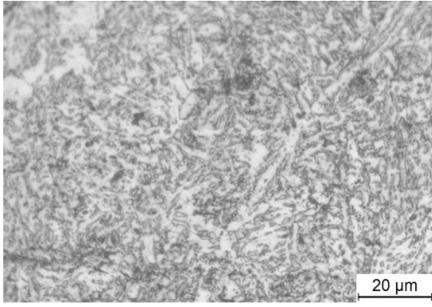
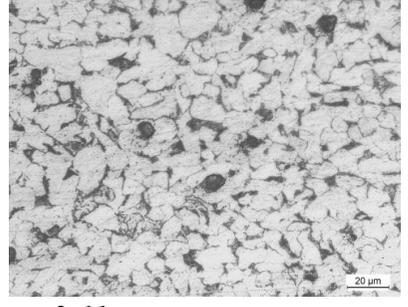
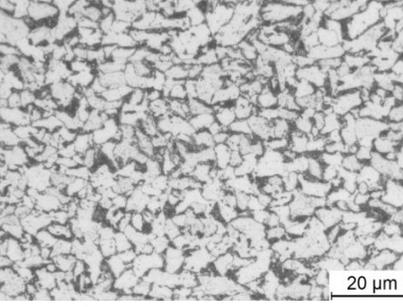
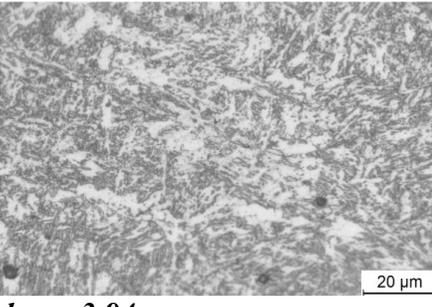
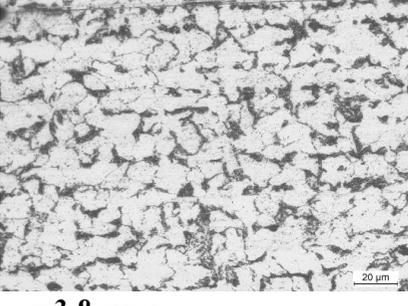
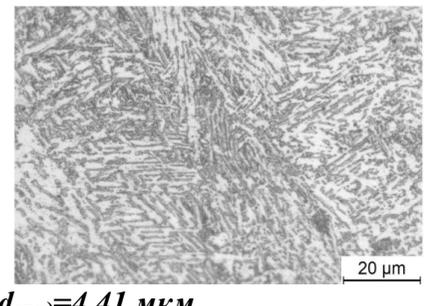
Для определения размера зерна в микроструктуре использовался метод подсчета пересечений зерен по [41]. Для этого выполнена съемка микроструктуры подготовленных образцов из стали 09Г2С показанных на рисунке 2.11. Схема изучения микроструктуры по толщине образца показана на рисунке 2.14. После съемки микроструктуры составлена таблица 3.5, в которой представлена микроструктура: основного металла, зоны термического влияния и сварного шва.

По результатам подсчета размера зерен по толщине сварного соединения выявлено, что максимальное уменьшение размера зерен достигает при ультразвуковой ударной обработке на частоте 20 кГц [104] на внутренней поверхности в подповерхностном слое толщиной 2 мм.

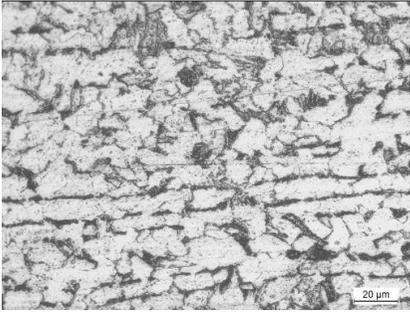
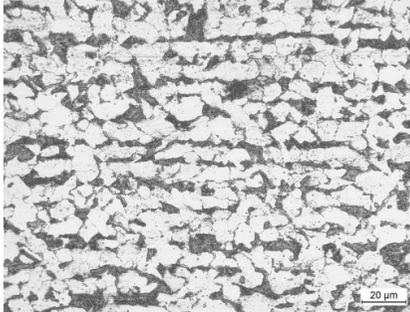
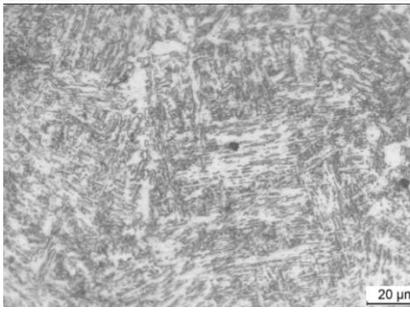
Таблица 3.5 – Установленная микроструктура подповерхностного слоя образцов (составлено автором)

Вид обработки	Основной металл	Зона термического влияния	Зона сварного шва
до ультразвуковой ударной обработки	 <p>$d_{\text{сред}} = 3,67 \text{ мкм}$</p>	 <p>$d_{\text{сред}} = 5,43 \text{ мкм}$</p>	 <p>$d_{\text{сред}} = 5,43 \text{ мкм}$</p>
после ультразвуковой ударной обработки на частоте 20 кГц на внешней поверхности	 <p>$d_{\text{сред}} = 3,68 \text{ мкм}$</p>	 <p>$d_{\text{сред}} = 4,3 \text{ мкм}$</p>	 <p>$d_{\text{сред}} = 4,2 \text{ мкм}$</p>
после ультразвуковой ударной обработки на частоте 20 кГц на внутренней поверхности	 <p>$d_{\text{сред}} = 3,69 \text{ мкм}$</p>	 <p>$d_{\text{сред}} = 3,43 \text{ мкм}$</p>	 <p>$d_{\text{сред}} = 3,34 \text{ мкм}$</p>

Продолжение таблицы 3.5

Вид обработки	Основной металл	Зона термического влияния	Зона сварного шва
<p>после ультразвуковой ударной обработки на частоте 37 кГц на внешней поверхности</p>	 <p>$d_{\text{сред}}=3,84 \text{ мкм}$</p>	 <p>$d_{\text{сред}}= 4,41 \text{ мкм}$</p>	 <p>$d_{\text{сред}}= 4,31 \text{ мкм}$</p>
<p>после ультразвуковой ударной обработки на частоте 37 кГц на внутренней поверхности</p>	 <p>$d_{\text{сред}}=3,61 \text{ мкм}$</p>	 <p>$d_{\text{сред}}= 4,25 \text{ мкм}$</p>	 <p>$d_{\text{сред}}= 3,94 \text{ мкм}$</p>
<p>после ультразвуковой обработки на частоте 44 кГц на внешней поверхности</p>	 <p>$d_{\text{сред}}=3,8 \text{ мкм}$</p>	 <p>$d_{\text{сред}}=4,52 \text{ мкм}$</p>	 <p>$d_{\text{сред}}=4,41 \text{ мкм}$</p>

Продолжение таблицы 3.5

Вид обработки	Основной металл	Зона термического влияния	Зона сварного шва
<p>после ультразвуковой ударной обработки на частоте 44 кГц на внутренней поверхности</p>	 <p>$d_{\text{сред}}=3,7 \text{ мкм}$</p>	 <p>$d_{\text{сред}}= 4,21 \text{ мкм}$</p>	 <p>$d_{\text{сред}}= 4,11 \text{ мкм}$</p>

Распределение среднего размера зерен при ультразвуковой ударной обработке на частотах 20, 37 и 44 кГц представлено на рисунке 3.15.

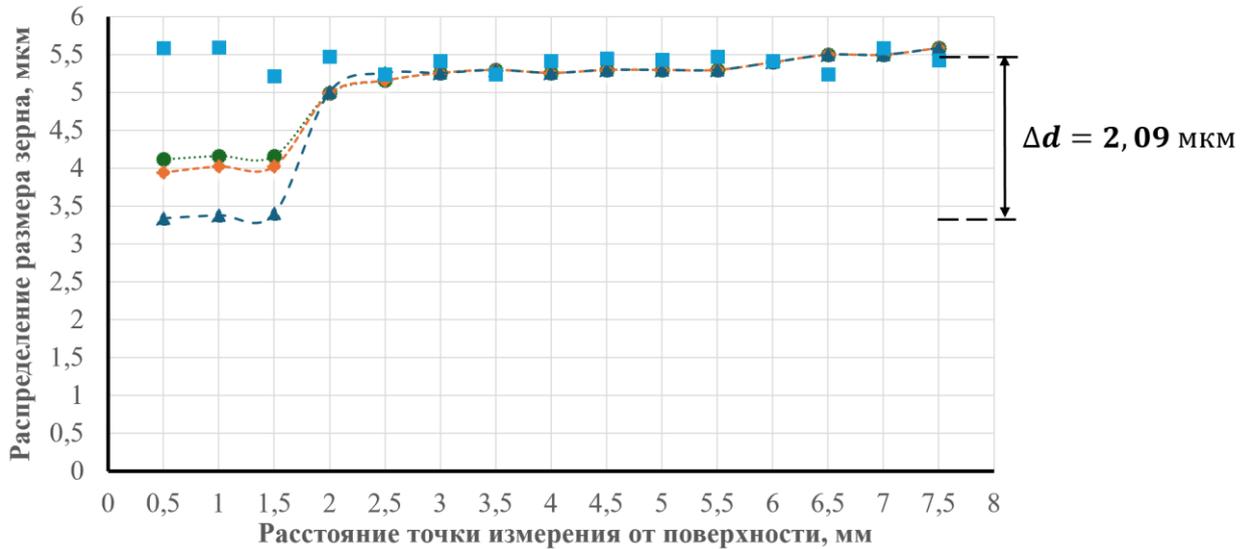


Рисунок 3.15 – Распределение величины зерна по толщине шва сварного соединения после УЗУО внутренней поверхности при частоте 44 кГц (.....), 37 кГц (---), 20 кГц (-▲-) (составлено автором)

3.6 Исследование микротвердости образцов со сварными соединениями по толщине до и после ультразвуковой ударной обработки на внешней и внутренней поверхности трубной стали

1. Распределение микротвердости в исходных образцах со сварным соединением до ультразвуковой ударной обработки.

По полученным значениям распределения микротвердости в сварных соединениях по толщине образцов составлена таблица 3.6.

2. Распределение микротвердости в образцах после ультразвуковой ударной обработки на частоте 20 кГц на внешней и внутренней поверхности.

На основании результатов измерений распределения микротвердости по толщине сварных соединений после УЗУО внешней поверхности составлена таблица 3.7.

В таблице 3.8 представлены данные распределения микротвердости в сварных соединениях по толщине образцов после УЗУО на внутренней поверхности.

Таблица 3.6 – Усредненные значения микротвердости сварных соединений по толщине исходных образцов до УЗУО (составлено автором)

Расстояние точки измерения от поверхности, мм	Сварной шов				Зона термического влияния				Основной металл			
	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа
0,5	59,11	62,49	51,78	57,79	60,76	59,11	62,49	60,79	60,76	60,76	72,31	64,61
1	62,49	62,49	48,01	57,66	57,52	59,11	64,29	60,31	60,76	64,29	68,12	64,39
1,5	62,49	64,29	46,85	57,87	59,11	57,52	64,29	60,31	54,54	56,00	81,95	64,16
2	53,13	57,52	57,52	56,06	59,11	56,00	66,16	60,42	62,49	66,16	66,16	64,94
2,5	57,52	56,00	50,47	54,67	59,11	56,00	66,16	60,42	62,49	59,11	72,31	64,64
3	60,76	54,54	56,00	57,10	57,52	57,52	66,16	60,40	60,76	56,00	76,90	64,56
3,5	56,00	57,52	59,11	57,54	54,54	59,11	68,12	60,59	56,00	60,76	76,90	64,56
4	57,52	56,00	50,47	54,67	59,11	56,00	66,16	60,42	62,49	59,11	72,31	64,64
4,5	60,76	54,54	56,00	57,10	57,52	57,52	66,16	60,40	60,76	56,00	76,90	64,56
5	56,00	57,52	59,11	57,54	54,54	59,11	68,12	60,59	56,00	60,76	76,90	64,56
5,5	57,52	56,00	50,47	54,67	59,11	56,00	66,16	60,42	62,49	59,11	72,31	64,64
6	60,76	54,54	56,00	57,10	57,52	57,52	66,16	60,40	60,76	56,00	76,90	64,56
6,5	56,00	57,52	59,11	57,54	54,54	59,11	68,12	60,59	56,00	60,76	76,90	64,56
7	56,00	57,52	59,11	57,54	54,54	59,11	68,12	60,59	56,00	60,76	76,90	64,56
7,5	56,00	57,52	59,11	57,54	54,54	59,11	68,12	60,59	56,00	60,76	76,90	64,56

Таблица 3.7 – Усредненные значения микротвердости сварных соединений по толщине образцов после УЗУО на внешней поверхности (составлено автором)

Расстояние точки измерения от поверхности, мм	Сварной шов				Зона термического влияния				Основной металл			
	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа
0,5	79,37	84,65	68,12	77,91	76,12	70,17	74,31	75,20	70,17	64,29	59,11	64,52
1	79,37	84,65	68,12	77,05	76,12	70,17	74,31	75,20	62,49	64,29	66,16	64,31
1,5	79,37	84,65	68,12	75,62	76,12	70,17	74,31	75,20	60,76	66,16	66,16	64,36
2	64,29	60,76	66,16	63,74	74,56	66,16	59,11	66,61	60,76	62,49	70,17	64,47
2,5	57,52	59,11	59,11	58,58	64,29	60,76	60,76	61,94	59,11	60,76	74,56	64,81
3	59,11	56,00	56,00	57,04	57,52	62,49	60,76	60,26	60,76	57,52	74,56	64,28
3,5	56,00	57,52	57,52	57,02	59,11	62,49	60,76	60,79	59,11	51,78	81,95	64,28
4	57,52	59,11	59,11	58,58	64,29	60,76	60,76	61,94	59,11	60,76	74,56	64,81
4,5	59,11	56,00	56,00	57,04	57,52	62,49	60,76	60,26	60,76	57,52	74,56	64,28
5	56,00	57,52	57,52	57,02	59,11	62,49	60,76	60,79	59,11	51,78	81,95	64,28
5,5	57,52	59,11	59,11	58,58	64,29	60,76	60,76	61,94	59,11	60,76	74,56	64,81
6	60,76	54,54	56,00	57,04	57,52	62,49	60,76	60,26	60,76	57,52	74,56	64,28
6,5	56,00	57,52	59,11	57,02	59,11	62,49	60,76	60,79	59,11	51,78	81,95	64,28
7	56,00	57,52	59,11	57,04	57,52	62,49	60,76	60,26	60,76	57,52	74,56	64,28
7,5	56,00	57,52	59,11	57,02	59,11	62,49	60,76	60,79	59,11	51,78	81,95	64,28

Таблица 3.8 – Усредненные значения микротвердости сварных соединений по толщине образцов после УЗУО на внутренней поверхности (составлено автором)

Расстояние точки измерения от поверхности, мм	Сварной шов				Зона термического влияния				Основной металл			
	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа
0,5	111,00	113,13	110,02	112,37	112,14	112,14	112,14	112,14	76,90	57,52	59,11	64,51
1	111,00	113,13	110,02	112,37	112,14	112,14	112,14	112,14	76,90	57,52	59,11	64,51
1,5	111,00	113,13	110,02	112,37	112,14	112,14	112,14	112,14	76,90	57,52	59,11	64,51
2	90,95	92,12	90,02	91,03	93,64	87,50	87,50	90,55	76,90	57,52	59,11	64,51
2,5	90,95	92,12	90,02	91,03	93,64	87,50	87,50	73,55	76,90	57,52	59,11	64,51
3	74,56	76,90	64,29	76,94	72,31	72,31	68,12	70,92	76,90	57,52	59,11	64,51
3,5	68,12	66,16	57,52	66,19	68,12	68,12	66,16	67,47	76,90	57,52	59,11	64,51
4	57,52	60,76	57,52	58,60	68,12	68,12	66,16	67,47	76,90	57,52	59,11	64,51
4,5	57,52	60,76	57,52	58,60	68,12	68,12	66,16	62,47	87,50	49,22	57,52	64,75
5	57,52	60,76	57,52	58,60	68,12	68,12	66,16	60,42	76,90	62,49	54,54	64,64
5,5	57,52	60,76	57,52	58,60	68,12	68,12	66,16	60,40	76,90	57,52	59,11	64,51
6	57,52	60,76	57,52	58,60	68,12	68,12	66,16	60,31	76,90	57,52	59,11	64,51
6,5	57,52	60,76	57,52	58,60	68,12	68,12	66,16	60,31	81,95	54,54	57,52	64,67
7	57,52	60,76	57,52	58,60	68,12	68,12	66,16	60,31	79,37	56,00	59,11	64,83
7,5	57,52	60,76	57,52	58,60	68,12	68,12	66,16	60,31	79,37	56,00	59,11	64,83

3. Распределение микротвердости в образцах после ультразвуковой ударной обработки на частоте 37 кГц на внешней и внутренней поверхности.

По полученным значениям распределения микротвердости в сварных соединениях по толщине образцов после УЗУО на внешней поверхности составлена таблица 3.9.

На основании измерений микротвердости по толщине сварных образцов после УЗУО на внутренней поверхности составлена таблица 3.10

4. Распределение микротвердости в образцах после ультразвуковой ударной обработки на частоте 44 кГц на внешней и внутренней поверхности.

Результаты измерения распределения микротвердости по толщине сварных соединений после УЗУО на внутренней поверхности представлены в таблице 3.11.

На основании измерений микротвердости по толщине сварных образцов после УЗУО на внутренней поверхности составлена таблица 3.12.

Таблица 3.9 – Усредненные значения микротвердости сварных соединений по толщине образцов после УЗУО на внешней поверхности (составлено автором)

Расстояние точки измерения от поверхности, мм	Сварной шов				Зона термического влияния				Основной металл			
	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа
0,5	74,91	74,91	74,91	74,91	68,12	70,17	74,31	72,20	70,17	64,29	59,11	64,52
1	74,05	74,05	74,05	74,05	68,12	70,17	74,31	72,20	62,49	64,29	66,16	64,31
1,5	73,62	73,62	73,62	73,62	68,12	70,17	74,31	72,20	60,76	66,16	66,16	64,36
2	64,29	60,76	66,16	63,74	74,56	66,16	59,11	66,61	60,76	62,49	70,17	64,47
2,5	57,52	59,11	59,11	58,58	64,29	60,76	60,76	61,94	59,11	60,76	74,56	64,81
3	59,11	56,00	56,00	57,04	57,52	62,49	60,76	60,26	60,76	57,52	74,56	64,28
3,5	56,00	57,52	57,52	57,02	59,11	62,49	60,76	60,79	59,11	51,78	81,95	64,28
4	57,52	59,11	59,11	58,58	64,29	60,76	60,76	61,94	59,11	60,76	74,56	64,81
4,5	59,11	56,00	56,00	57,04	57,52	62,49	60,76	60,26	60,76	57,52	74,56	64,28
5	56,00	57,52	57,52	57,02	59,11	62,49	60,76	60,79	59,11	51,78	81,95	64,28
5,5	57,52	59,11	59,11	58,58	64,29	60,76	60,76	61,94	59,11	60,76	74,56	64,81
6	59,11	56,00	56,00	57,04	57,52	62,49	60,76	60,26	60,76	57,52	74,56	64,28
6,5	56,00	57,52	57,52	57,02	59,11	62,49	60,76	60,79	59,11	51,78	81,95	64,28
7	59,11	56,00	56,00	57,04	57,52	62,49	60,76	60,26	60,76	57,52	74,56	64,28
7,5	56,00	57,52	57,52	57,02	59,11	62,49	60,76	60,79	59,11	51,78	81,95	64,28

Таблица 3.10 – Усредненные значения микротвердости сварных соединений по толщине образцов после УЗУО на внутренней поверхности (составлено автором)

Расстояние точки измерения от поверхности, мм	Сварной шов				Зона термического влияния				Основной металл			
	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа
0,5	102,00	100,13	100,02	101,45	100,93	100,93	100,93	100,93	76,90	57,52	59,11	64,51
1	102,00	100,13	100,02	101,45	100,93	100,93	100,93	100,93	76,90	57,52	59,11	64,51
1,5	100,14	98,14	98,02	99,98	100,14	98,14	98,02	99,64	76,90	57,52	59,11	64,51
2	80,00	80,00	80,00	80,00	74,55	74,55	74,55	74,55	76,90	57,52	59,11	64,51
2,5	74,95	75,00	75,00	75,00	70,31	70,31	70,31	70,92	76,90	57,52	59,11	64,51
3	60,95	68,12	64,02	65,54	67,47	67,47	67,47	67,47	76,90	57,52	59,11	64,51
3,5	57,52	60,76	57,52	58,60	67,47	67,47	67,47	67,47	76,90	57,52	59,11	64,51
4	57,52	60,76	57,52	58,60	67,47	67,47	67,47	67,47	87,50	49,22	57,52	64,75
4,5	57,52	60,76	57,52	58,60	62,47	62,47	62,47	62,47	76,90	62,49	54,54	64,64
5	57,52	60,76	57,52	58,60	60,42	60,42	60,42	60,42	76,90	57,52	59,11	64,51
5,5	57,52	60,76	57,52	58,60	60,42	60,42	60,42	60,42	76,90	57,52	59,11	64,51
6	57,52	60,76	57,52	58,60	60,42	60,42	60,42	60,42	76,90	57,52	59,11	64,51
6,5	57,52	60,76	57,52	58,60	60,31	60,31	60,31	60,31	81,95	57,52	56,00	64,16
7	57,52	60,76	57,52	58,60	60,31	60,31	60,31	60,31	81,95	54,54	57,52	64,67
7,5	57,52	60,76	57,52	58,60	60,31	60,31	60,31	60,31	79,37	56,00	59,11	64,83

Таблица 3.11 – Усредненные значения микротвердости сварных соединений по толщине образцов после УЗУО на внешней поверхности (составлено автором)

Расстояние точки измерения от поверхности, мм	Сварное шов				Зона термического влияния				Основной металл			
	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа
0,5	66,95	66,50	66,29	66,22	62,12	60,17	64,31	63,92	70,17	64,29	59,11	64,52
1	66,95	66,50	66,29	66,22	62,12	60,17	64,31	63,92	62,49	64,29	66,16	64,31
1,5	66,95	66,50	66,29	66,22	62,12	60,17	64,31	63,92	60,76	66,16	66,16	64,36
2	60,29	62,76	64,16	63,74	62,12	60,17	64,31	63,61	60,76	62,49	70,17	64,47
2,5	57,52	59,11	59,11	58,58	64,29	60,76	60,76	61,94	59,11	60,76	74,56	64,81
3	59,11	56,00	56,00	57,04	57,52	62,49	60,76	60,26	60,76	57,52	74,56	64,28
3,5	56,00	57,52	57,52	57,02	59,11	62,49	60,76	60,79	59,11	51,78	81,95	64,28
4	57,52	59,11	59,11	58,58	64,29	60,76	60,76	61,94	59,11	60,76	74,56	64,81
4,5	59,11	56,00	56,00	57,04	57,52	62,49	60,76	60,26	60,76	57,52	74,56	64,28
5	56,00	57,52	57,52	57,02	59,11	62,49	60,76	60,79	59,11	51,78	81,95	64,28
5,5	57,52	59,11	59,11	58,58	64,29	60,76	60,76	61,94	59,11	60,76	74,56	64,81
6	59,11	56,00	56,00	57,04	57,52	62,49	60,76	60,26	60,76	57,52	74,56	64,28
6,5	56,00	57,52	57,52	57,02	59,11	62,49	60,76	60,79	59,11	51,78	81,95	64,28
7	59,11	56,00	56,00	57,04	57,52	62,49	60,76	60,26	60,76	57,52	74,56	64,28
7,5	56,00	57,52	57,52	57,02	59,11	62,49	60,76	60,79	59,11	51,78	81,95	64,28

Таблица 3.12 – Усредненные значения микротвердости сварных соединений по толщине образцов после УЗУО на внутренней поверхности (составлено автором)

Расстояние точки измерения от поверхности, мм	Сварной шов				Зона термического влияния				Основной металл			
	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа	HV ₁ , МПа	HV ₂ , МПа	HV ₃ , МПа	Среднее значение микротвердости, МПа
0,5	90,18	90,18	90,18	90,18	88,71	88,71	88,71	88,71	76,90	57,52	59,11	64,51
1	90,18	90,18	90,18	90,18	88,71	88,71	88,71	88,71	76,90	57,52	59,11	64,51
1,5	88,87	88,87	88,87	88,87	88,61	88,61	88,61	88,61	76,90	57,52	59,11	64,51
2	72,83	72,83	72,83	72,83	74,55	74,55	74,55	74,55	76,90	57,52	59,11	64,51
2,5	68,12	66,16	64,29	66,94	72,31	72,31	68,12	70,92	76,90	57,52	59,11	64,51
3	68,12	66,16	64,29	66,19	68,12	68,12	66,16	67,47	76,90	57,52	59,11	64,51
3,5	57,52	60,76	57,52	58,60	68,12	68,12	66,16	67,47	76,90	57,52	59,11	64,51
4	57,52	60,76	57,52	58,60	62,47	62,47	62,47	62,47	76,90	57,52	59,11	64,51
4,5	57,52	60,76	57,52	58,60	60,40	60,40	60,40	60,40	76,90	57,52	59,11	64,51
5	57,52	60,76	57,52	58,60	60,40	60,40	60,40	60,40	87,50	49,22	57,52	64,75
5,5	57,52	60,76	57,52	58,60	60,40	60,40	60,40	60,40	76,90	62,49	54,54	64,64
6	57,52	60,76	57,52	58,60	60,40	60,40	60,40	60,40	76,90	57,52	59,11	64,51
6,5	57,52	60,76	57,52	58,60	60,40	60,40	60,40	60,40	81,95	54,54	56,00	64,16
7	57,52	60,76	57,52	58,60	60,40	60,40	60,40	60,40	81,95	54,54	57,52	64,67
7,5	57,52	60,76	57,52	58,60	60,40	60,40	60,40	60,40	79,37	56,00	59,11	64,83

Графическая интерпретация полученных усредненных значений распределения микротвердости по толщине сварного соединения при ультразвуковой ударной обработки внешней поверхности представлена на рисунках 3.16 и 3.17.

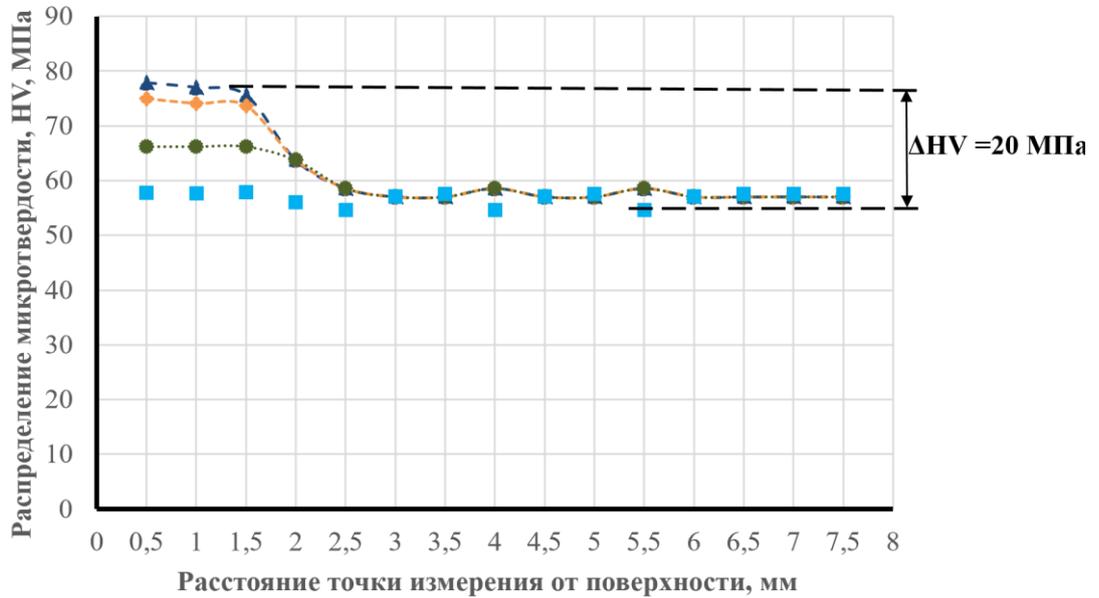


Рисунок 3.16 – Усредненное значение распределения микротвердости в сварном шве после УЗУО при частоте 44 кГц (.....), 37 кГц (---●---), 20 кГц (---▲---)
(составлено автором)

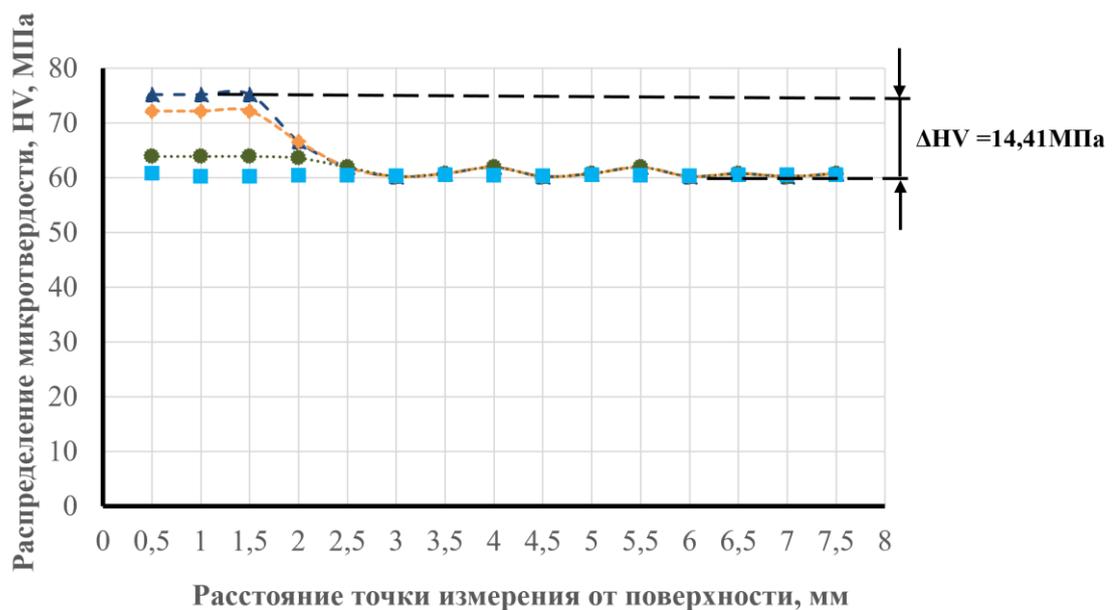


Рисунок 3.17 – Усредненное значение распределения микротвердости в зоне термического влияния после УЗУО при частоте 44 кГц (.....), 37 кГц (---●---), 20 кГц (---▲---)
(составлено автором)

Результаты измерения распределения микротвердости по толщине сварного соединения после УЗУО на внутренней поверхности представлены на рисунках 3.18 и 3.19.

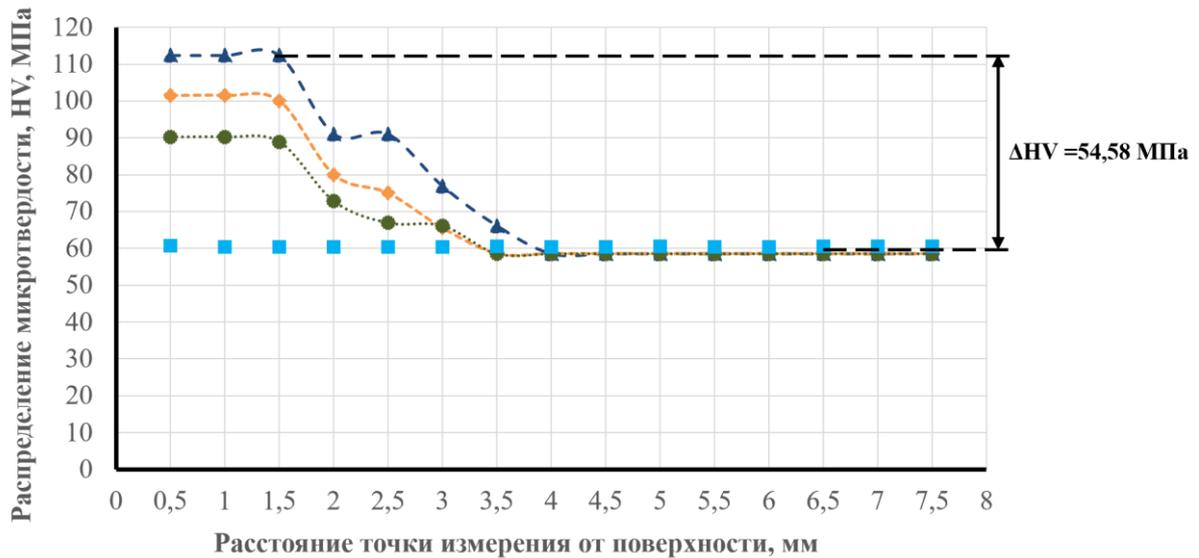


Рисунок 3.18 – Усредненное значение распределения микротвердости в сварном шве после УЗУО при частоте 44 кГц (.....), 37 кГц (-.-.-), 20 кГц (-▲-) (составлено автором)

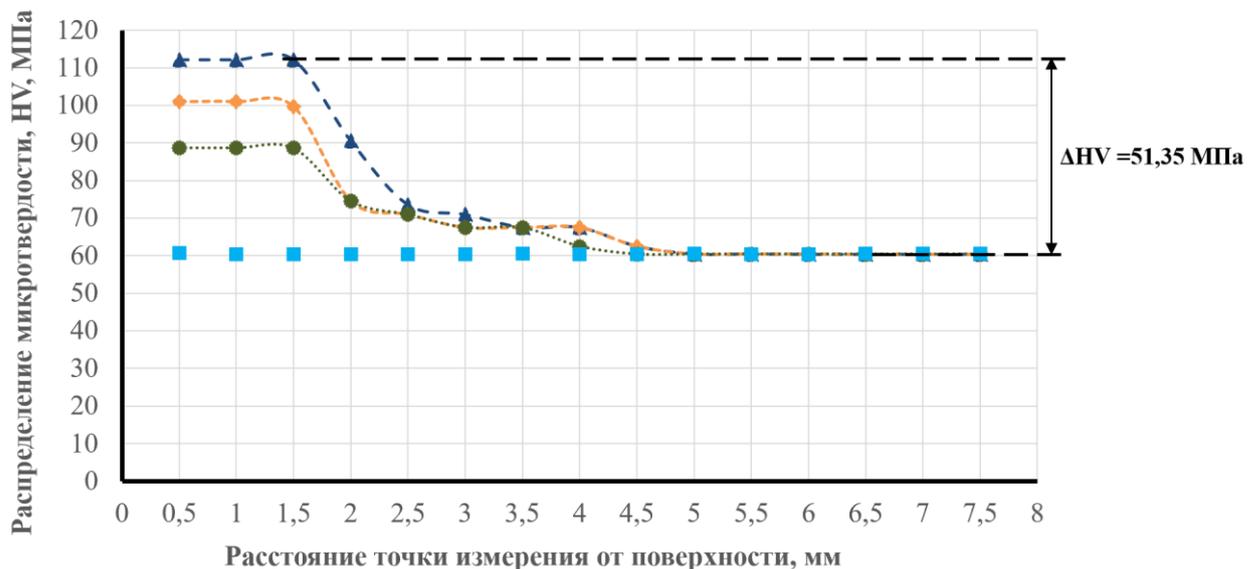


Рисунок 3.19 – Усредненное значение распределения микротвердости в зоне термического влияния после УЗУО при частоте 44 кГц (.....), 37 кГц (-.-.-), 20 кГц (-▲-) (составлено автором)

3.7 Исследование механических свойств образцов со сварными соединениями до и после ультразвуковой ударной обработки на внешней и внутренней поверхности трубной стали

Для исследования использовались образцы из стали марки 09Г2С до и после ультразвуковой ударной обработки на частотах 20, 37 и 44 кГц после обработки на внешней и внутренней поверхности и подготовлены по схеме, представленной на рисунке 2.15.

1. Результаты испытаний на ударную вязкость образцов со сварными соединениями до ультразвуковой ударной обработки

Полученные результаты испытаний образцов на ударную вязкость образцов со сварным соединением с V-образным надрезом до УЗУО представлены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Результаты испытаний на ударную вязкость образцов со сварными соединениями до УЗУО (составлено автором)

№ образца	A _к (Дж)	F, (см ²)	a _к , (Дж/см ²)	Среднее значение, (Дж/см ²)
1	43,82	0,48	91,3	91
2	43,34	0,48	90,3	
3	44,016	0,48	91,7	

2. Результаты испытаний на ударную вязкость образцов со сварными соединениями после ультразвуковой ударной обработки на частоте 20 кГц на внешней и внутренней поверхности

Результаты испытаний на ударную вязкость образцов со сварными соединениями, имеющими V-образный надрез, после ультразвуковой ударной обработки внешней поверхности представлены в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Результаты испытаний на ударную вязкость образцов со сварными соединениями после УЗУО на внешней поверхности (составлено автором)

№ образца	A _к (Дж)	F, (см ²)	a _к , (Дж/см ²)	Среднее значение, (Дж/см ²)
1	60,14	0,48	125,3	126
2	60,48	0,48	126	
3	60,82	0,48	126,7	

В таблице 3.15 приведены данные испытаний на ударную вязкость образцов с V-образным надрезом в зоне сварного соединения после УЗУО на внутренней поверхности.

Таблица 3.15 – Результаты испытаний на ударную вязкость образцов со сварными соединениями после УЗУО на внутренней поверхности (составлено автором)

№ образца	A _к (Дж)	F, (см ²)	a _к , (Дж/см ²)	Среднее значение, (Дж/см ²)
1	63,50	0,48	132,3	134
2	64,51	0,48	134,4	
3	64,18	0,48	133,7	

3. Результаты испытаний на ударную вязкость образцов со сварными соединениями после ультразвуковой ударной обработки на частоте 37 кГц на внешней и внутренней поверхности.

По полученным результатам испытаний образцов на ударную вязкость образцов со сварным соединением с V-образным надрезом после УЗУО на внешней поверхности составлена таблица 3.16.

Таблица 3.16 – Результаты испытаний на ударную вязкость образцов со сварными соединениями после УЗУО на внешней поверхности (составлено автором)

№ образца	A _к (Дж)	F, (см ²)	a _к , (Дж/см ²)	Среднее значение, (Дж/см ²)
1	58,46	0,48	121,8	122
2	58,8	0,48	122,5	
3	58,13	0,48	121,1	

По результатам испытаний на ударную вязкость образцов сварных соединений с V-образным концентратором напряжений после УЗУО на внутренней поверхности составлена таблица 3.17.

Таблица 3.17 – Результаты испытаний на ударную вязкость образцов со сварными соединениями после УЗУО на внутренней поверхности (составлено автором)

№ образца	A _к (Дж)	F, (см ²)	a _к , (Дж/см ²)	Среднее значение, (Дж/см ²)
1	61,15	0,48	127,4	128
2	61,49	0,48	128,1	
3	61,82	0,48	128,8	

4. Результаты испытаний на ударную вязкость образцов со сварными соединениями после ультразвуковой ударной обработки на частоте 44 кГц на внешней и внутренней поверхности

В таблице 3.18 приведены данные испытаний на ударную вязкость образцов с V-образным надрезом в зоне сварного соединения после УЗУО внешней поверхности.

Таблица 3.18 – Результаты испытаний на ударную вязкость образцов со сварными соединениями после УЗУО на внешней поверхности (составлено автором)

№ образца	A _к (Дж)	F, (см ²)	a _к (Дж/см ²)	Среднее значение, (Дж/см ²)
1	56,78	0,48	118,3	119
2	57,12	0,48	119	
3	57,46	0,48	119,7	

По полученным результатам испытаний образцов на ударную вязкость образцов со сварным соединением с V-образным надрезом после УЗУО на внутренней поверхности составлена таблица 3.19.

Таблица 3.19 – Результаты испытаний на ударную вязкость образцов со сварными соединениями после УЗУО на внутренней поверхности (составлено автором)

№ образца	A _к (Дж)	F, (см ²)	a _к (Дж/см ²)	Среднее значение, (Дж/см ²)
1	58,46	0,48	121,8	123
2	58,8	0,48	122,5	
3	58,13	0,48	121,1	

Увеличение ударной вязкости после ультразвуковой ударной обработки на частоте 20 кГц внутренней поверхности сварного соединения:

$$\frac{KCV_{20\text{кГц}}}{KCV_0} = \frac{134}{91} \approx 1,5 \text{ раза}$$

3.8 Оценка ресурса сварных соединений магистрального трубопровода, исходя из ударной вязкости металла сварного шва

Оценка ресурса магистрального трубопровода осуществлялась согласно [124].

Снижение ударной вязкости материала трубопровода с увеличением времени эксплуатации определяется по формуле (3.4):

$$KCV(t) = KCV_0 \cdot e^{-kt} \quad (3.4)$$

где $KCV(t)$ – ударная вязкость в момент t ; KCV_0 – начальная ударная вязкость, Дж/см²; k – коэффициент старения, зависящий от условий эксплуатации принимается равным ($k \approx 0,001 - 0,02$ год⁻¹).

Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений магистральных трубопроводов определяется по формуле (3.5):

$$T_r = \frac{\ln(KCV_0/KCV_{критич})}{k} \quad (3.5)$$

где $KCV_{критич}$ – критическое значение ударной вязкости, для трубной стали 09Г2С принимается от 30–50 Дж/см².

Для оценки увеличения ресурса безопасной эксплуатации проведены расчеты по максимальной допустимому критическому значению ударной вязкости ($KCV_{критич} = 50$ Дж/см²) и максимальному значению коэффициента старения ($k = 0,02$ год⁻¹), Полученные значения внесены в таблицу 3.20.

Таблица 3.20 – Расчетные значения ресурса безопасной эксплуатации сварных соединений магистральных трубопроводов (составлено автором)

Частота обработки сварных соединений	Вид обработанной поверхности	T _r , лет
<i>до ультразвуковой ударной обработки</i>		30
<i>после ультразвуковой ударной обработки поверхности</i>		
v = 44 кГц	внешней поверхности	43
	внутренней поверхности	45
v = 37 кГц	внешней поверхности	45
	внутренней поверхности	47
v = 20 кГц	внешней поверхности	46
	внутренней поверхности	50

Для того чтобы понять, во сколько раз увеличился ресурс, использовалось отношение, представленное в формуле (3.6):

$$\frac{T_{\text{частота и поверхность обработки}}}{T_0} = \frac{\ln(KCV_{\text{частота и поверхность обработки}}/KCV_{\text{критич}})}{\ln(KCV_0/KCV_{\text{критич}})}, \quad (3.6)$$

Расчеты показали следующие:

$$\frac{T_{44\text{кГц}} \text{ внешняя обработка}}{T_0} = 1,5 \text{ раза}$$

$$\frac{T_{44\text{кГц}} \text{ внутренняя обработка}}{T_0} = 1,44 \text{ раза}$$

$$\frac{T_{37\text{кГц}} \text{ внешняя обработка}}{T_0} = 1,56 \text{ раза}$$

$$\frac{T_{37\text{кГц}} \text{ внутренняя обработка}}{T_0} = 1,49 \text{ раза}$$

$$\frac{T_{20\text{кГц}} \text{ внешняя обработка}}{T_0} = 1,54 \text{ раза}$$

$$\frac{T_{20\text{кГц}} \text{ внутренняя обработка}}{T_0} = 1,64 \text{ раза}$$

Также результаты расчетов были сравнены с циклическими испытаниями, проведенными в работе [23] и с результатами оценки состояния образцов, выполненных с позиции информационно-кинетического подхода АЭ диагностирования до и после упрочняющих обработок проведенными в работе [44] и представлено в таблице 3.21.

Таблица 3.21 – Результаты испытаний на определение количества циклов до разрушения сварных соединений [23] и измерения акустико-эмиссионного концентрационно-кинетического показателя прочности G_{AE} до и после упрочняющих обработок [44]

	Исходный образец	Термообработка	Ультразвуковая ударная обработка
Количество циклов до разрушения	2951	10399	4246
Показатель G_{AE}	1	3.4	1,2

Выявлено, что после УЗУО происходит увеличение ресурса сварных соединений и приведенные результаты исследований выше сопоставимы с рассматриваемыми.

3.9 Выводы по Главе 3

1. Разработана численная модель для оценки распределения остаточных напряжений в сварном соединении. Определено, что расхождение

экспериментальных значений с расчетными составляет $\sigma_p \leq 10\%$, что свидетельствует о правомочности предложенной расчетной модели.

2. В ходе экспериментальных исследований распределения остаточных сварочных напряжений после ультразвуковой ударной обработки на частотах 20 кГц, 37 кГц и 44 кГц установлено, что максимальное снижение остаточных напряжений достигается при обработке на частоте 20 кГц [104] на внутренней поверхности – σ_p снижается в 1,6 раза.

3. Как показали результаты металлографических исследований, УЗУО приводит к измельчению зерна металла в поверхностном, глубиной до 2 мм, слое шва сварных соединений трубных сталей. Причем наиболее эффективна обработка (снижение размера зерна в 1,6 раз) внутренней поверхности соединения с частотой $\nu = 20$ кГц.

4. Выявлено, что в процессе ультразвуковой ударной обработки сварного соединения трубной стали 09Г2С наблюдается увеличение микротвердости в подповерхностном слое толщиной 2 мм. Максимальное увеличение составило 50 МПа.

5. Как показали испытания, измельчение зерна поверхностного слоя сварного шва в результате УЗУО сопровождается увеличением ударной вязкости KCV всего сварного соединения, которая при внутренней обработке шва возрастает от 91 Дж/см² для исходного соединения до 123, 128 и 134 Дж/см² при обработке на частоте 44 кГц, 37 кГц, 20 кГц соответственно.

6. Результаты расчета ресурса безопасной эксплуатации сварных соединений магистральных трубопроводов по ударной вязкости показали, что максимальное увеличение ресурса до 1,6 раза достигается при УЗУО на внутренней поверхности с частотой воздействия 20 кГц.

7. На основании результатов проведенного исследования разработана конструкция устройства для ультразвуковой ударной обработки внутренней поверхности кольцевых сварных соединений для снижения остаточных напряжений.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

В связи с проведенным выше патентным поиском и экспериментальными исследованиями принято решение о разработки модификационных устройств ультразвуковой ударной обработки на внутренней поверхности кольцевых сварных соединений для применения их при строительстве и эксплуатации магистральных трубопроводов.

4.1 Разработанное ультразвуковое ударное устройство для снижения остаточных напряжений на внутренней поверхности сооруженного нефтепровода, перемещаемое за счет движения жидкости

В результате проведенного анализа установлено, что в настоящее время отсутствуют устройства для внутритрубной ультразвуковой ударной обработки кольцевых сварных соединений с внутренней поверхности.

Разработанное устройство (рисунок 4.1) предназначено для выполнения УЗУО на внутренней поверхности сварных швов нефтепроводов и перемещается вдоль трубопровода под действием потока перекачиваемой жидкости.

Устройство ультразвуковой ударной обработки кольцевых сварных соединений состоит из корпуса устройства 2. В свою очередь, он состоит из двух частей, которые выполнены, в виде разделенного полого цилиндра. На поверхности корпуса 2 установлены подвижные ударные элементы устройства 4 в шахматном порядке. В элементах, соединяющих устройство с направляющими и балансирующими скребками 3, выполнено отверстие 10 для болтового соединения 12 двух половин. Прокладка для герметичного соединения 11 выполнена в виде резиновой прокладки, которая необходима для герметичного соединения.

Внутри корпуса устройства 2 установлены аккумуляторы 5, выход аккумуляторов соединен со входом инвертора для преобразования постоянного тока в переменный 6.

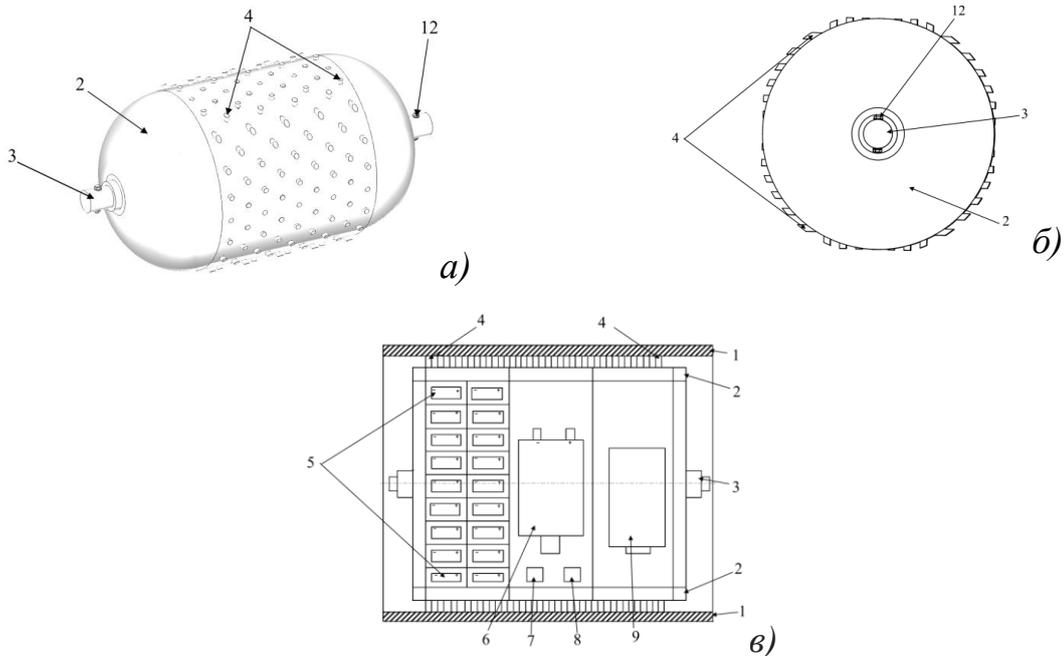


Рисунок 4.1 – Разработанное устройство ультразвуковой ударной обработки с внутренней поверхности сварного соединения сооруженного нефтепровода, перемещаемое за счет движения жидкости:

а) общий вид; б) вид сбоку; в) вертикальный разрез

1 – стенки трубопровод; 2 – корпус устройства; 3 – элементы, соединяющие устройство с направляющими и балансирующими скребками; 4 – подвижные ударные элементы устройства; 5 – аккумуляторы; 6 – инвертор для преобразования постоянного тока в переменный; 7 – блок управления с запланированной программой; 8 – одомер, фиксирующий путь, пройденный устройством; 9 – ультразвуковой генератор; 10 – отверстия; 11 – прокладка для герметичного соединения; 12 – болтовое соединение [118]

Выход инвертора для преобразования постоянного тока в переменный 6 соединен со входом блока управления с запланированной программой 7. Выход блока управления с запланированной программой 7 соединен со входам одометра, фиксирующий путь, пройденный устройством 8.

Выход одометра фиксирующий путь, пройденный устройством 8 соединен со входом ультразвукового генератора 9. Выход ультразвукового генератора 9 соединен со входом подвижных ударных элементов устройства 4.

Для того чтобы устройство работало, необходимо зарядить аккумуляторы, Устройство устанавливается в камеру пуска. Камеру пуска заполняют перекачиваемой жидкостью, и происходит выравнивания давления с давлением в магистральном трубопроводе и затем за счет открытия задвижки запускается во внутреннюю часть трубопровода 1.

Блок управления с запланированной программой 7 внутри камеры пуска запускают при помощи пульта - дистанционно, он не представлен. Блок управления запрограммирован таким образом, что при прохождении определенного расстояния он запускает ультразвуковой генератор 9. отчет расстояния ведется с использованием одометра 8 и GPS-навигации, установленной в блоке управления 7. Блок управления 7 дает команду на включение ультразвукового генератора 9 и начинается обработка внутренней поверхности сварного соединения с использованием подвижных ударных элементов устройства 4 и тем самым происходит ультразвуковая ударная обработка. Ультразвуковой генератор 9 включается за счет инвертора 6, который преобразует постоянный ток в переменный, приходящий с аккумуляторов 5. После прохождения заданного расстояния он выключается, затем он включается при прохождении этого же расстояния, и все это происходит циклично до достижения камеры приема, Устройство вынимается из магистрального трубопровода путем прихода устройства в камеру приема за счет потока флюида.

4.2 Разработанное ультразвуковое ударное устройство для снижения остаточных напряжений на внутренней поверхности строящегося трубопровода, перемещаемое методом протаскивания

Разработано устройство для ультразвуковой ударной обработки для снижения остаточных напряжений на внутренней поверхности строящегося трубопровода, перемещаемое методом протаскивания с использованием троса (рисунок 4.2) [52].

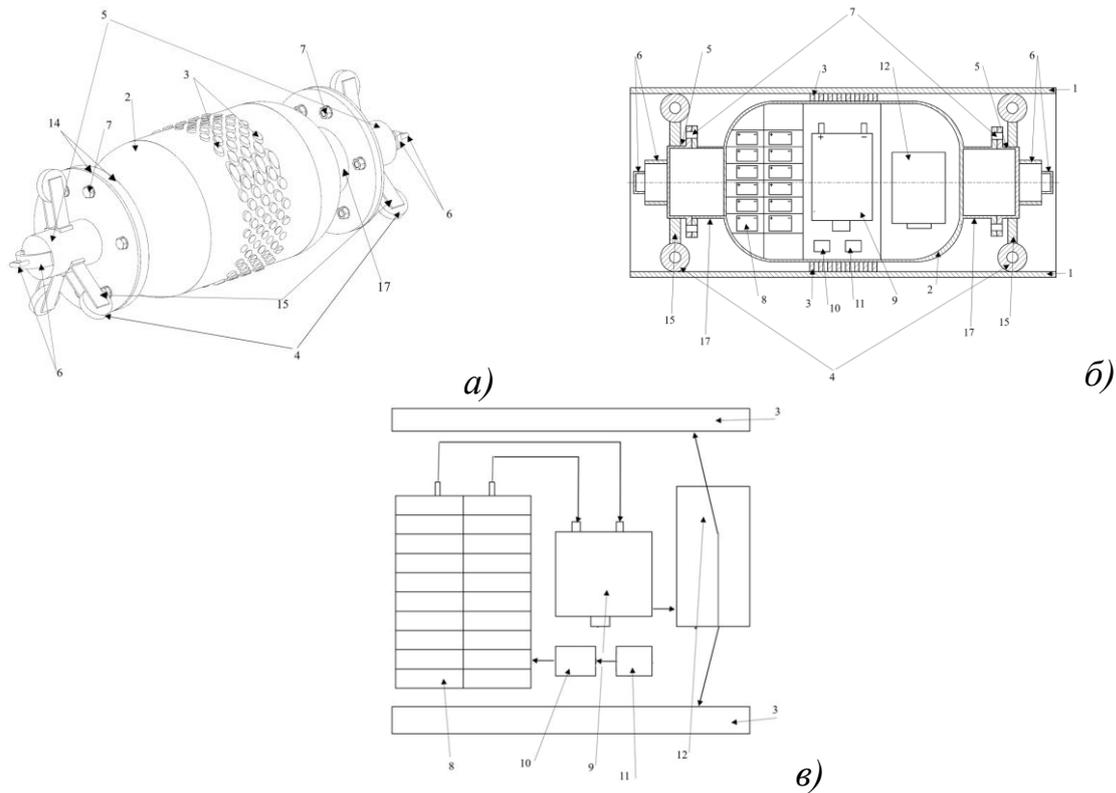


Рисунок 4.2 – Устройство ультразвуковой обработки магистральных трубопроводов с внутренней стороны сварных соединений методом протаскивания:

а) общий вид устройства; *б)* вертикальный разрез устройства внутри трубы;

в) блок-схема устройства

1 – стенки трубопровода; 2 – корпус устройства; 3 – подвижные ударные элементы устройства; 4 – ролики; 5 – цилиндрическая вставка; 6 – крепежная система; 7 – соединительные элементы; 8 – аккумуляторы; 9 – инвертор для преобразования постоянного тока в переменный; 10 – блок управления с запланированной программой; 11 – одометр, фиксирующий путь, пройденный устройством; 12 – ультразвуковой генератор; 13 – отверстие; 14 – соединительный диск; 15 – крепление для роликов; 16 – соединительный кабель; 17 – соединительная цилиндрическая вставка [52]

Устройство для ультразвуковой ударной обработки кольцевых сварных соединений содержит корпус 2, состоящий из двух половинок полого цилиндра. Края корпуса выполнены в виде пазов, за исключением участков крепления к соединительной цилиндрической вставкой 17. Края корпуса соединяются между

собой системой пазов. На поверхности корпуса устройства 2 выполнены отверстия, в которые закреплены подвижные ударные элементы устройства 3. С двух сторон к корпусу устройства 2 жестко закреплена соединительная цилиндрическая вставка 17, а к нему присоединены соединительные диски 14, в центре которых выполнены отверстия 13. Соединительные диски 14 соединены между собой с возможностью съема соединительными элементами 7, которые установлены в отверстия 13. Подвижная часть состоит из цилиндрической вставки 5, выполненной в форме полого цилиндра, один конец которой жестко соединен с соединительным диском 14, а на другом конце закреплены крепежные системы 6. На боковой поверхности цилиндрической вставки 5 жестко закреплены крепления для роликов 15, в которые установлены ролики 4. Диаметр торцевых отверстий корпуса 2 совпадает с диаметрами отверстий соединительных дисков 14.

Внутри корпуса устройства 2 расположен блок управления 10, связанный с аккумуляторами 8 с помощью электрических проводов. От аккумуляторов питание подается на инвертор 9, для преобразования постоянного тока в переменный, который подключен к ультразвуковому генератору 12. Выход ультразвукового генератора соединен с подвижными ударными элементами 3 устройства. Выход одометра 11 соединен с входом модулем GPS-навигации, который установлен в блоке управления 10.

Для работы устройства необходимо зарядить аккумуляторы 8, которые после полной зарядки устанавливаются внутрь корпуса устройства 2. После этого соединяют две половины корпуса устройств 2 путем скрепления пазов, а затем устанавливают соединительные цилиндрические вставки 17, а к ним соединительные диски 14, которые соединяют между собой соединительными элементами 7. Затем закрепляют цилиндрические вставки 5 с креплением для роликов 15 и ролики 4. После соединения всех элементов устройство устанавливается в трубопровод. На блок управления 10 подается сигнал на вход ультразвукового генератора 12, который передает сигнал на вход инвертора 9, который преобразует постоянный ток в переменный, проходящий с аккумуляторного блока 8. Устройство начинает движение. Движение устройство

осуществляется за счет того, что к крепежной системе 6 прикреплен трос. Трос тянут, и ролики 4 вращаются и тем самым осуществляется движение устройства. Через определенное расстояние до оси сварного шва, которое определяет одометр 11, с выхода которого передается информация о позиции на вход GPS-навигации, который установлен в блоке управления 10. Блок управления 10 дает команду на включение аккумуляторов 8, от которого ток поступает на вход инвертора 9, в котором происходит преобразование постоянного в переменный ток, ток частотой 50 Гц, который подает ток в ультразвуковой генератор 12. В ультразвуковом генераторе 12 происходит преобразование тока низкой частоты в ток ультразвуковой частоты. Ток ультразвуковой частоты через соединительные кабеля 16 идет на подвижные ударные элементы устройства 3, через которые происходит снижение остаточных сварочных напряжений. Работа устройства осуществляется в циклическом режиме: при помощи троса оно доставляется к оси сварного соединения, где система позиционирования (одометр 11 и GPS-навигация) обеспечивает точное выравнивание. После позиционирования включаются подвижные ударные элементы, выполняющие ультразвуковую обработку. По завершении обработки устройство перемещается к следующему участку или в камеру приема.

4.3 Разработанное самоходное ультразвуковое ударное устройство для снижения остаточных напряжений на внутренней поверхности строящегося трубопровода

Разработано самоходное устройство для ультразвуковой ударной обработки для снижения остаточных напряжений на внутренней поверхности строящегося трубопровода представлено на рисунке 4.3 [51].

Подвижная часть состоит из цилиндрической вставки 8, выполненной в форме полого цилиндра, один конец которой жестко соединен с соединительным диском 16, а на другом конце закреплены ребра жесткости 6, в которые установлено с возможностью съема колесо 4. На боковой поверхности цилиндрической вставки 8 жестко закреплены крепление для роликов 17, в которые установлены ролики 5.

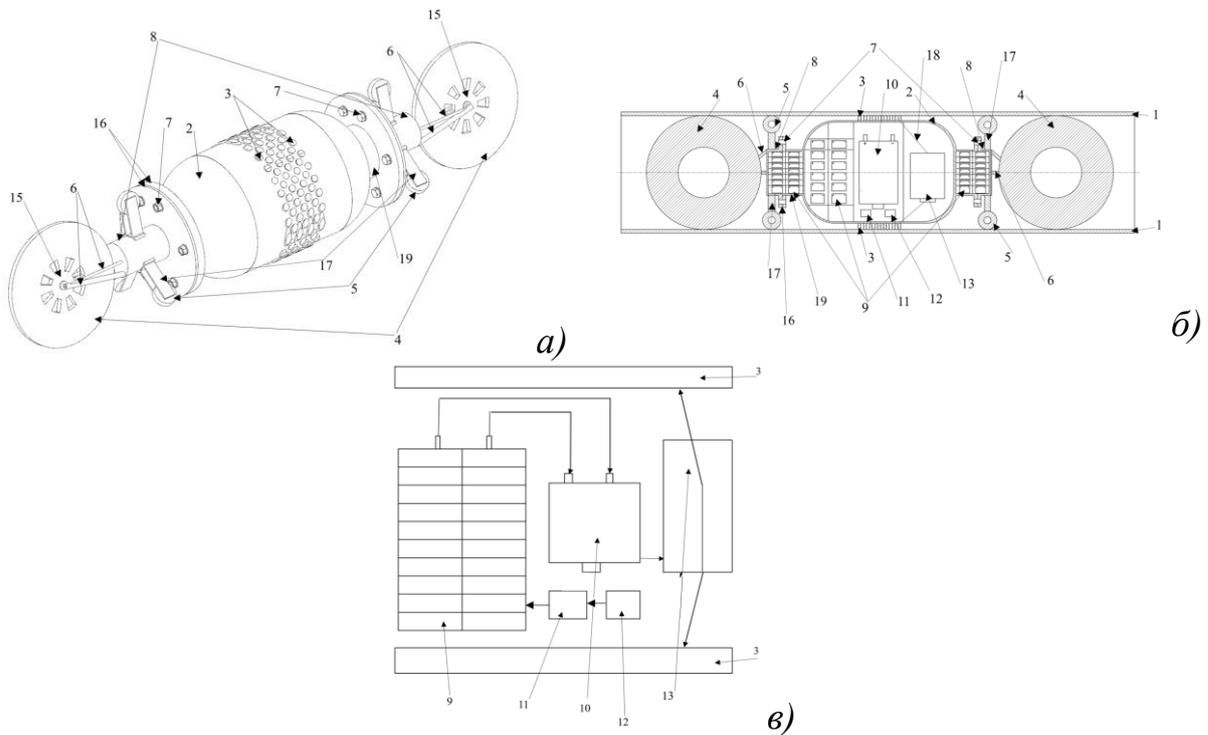


Рисунок 4.3 – Самоходное устройство для ультразвуковой обработки сварных соединений с внутренней стороны магистральных трубопроводов:

а) общий вид устройства; *б)* вертикальный разрез устройства;

в) блок-схема устройства:

1 – стенки трубопровода; 2 – корпус устройства; 3 – подвижные ударные элементы устройства; 4 – колесо; 5 – ролики; 6 – ребра жесткости; 7 – соединительные элементы; 8 – цилиндрическая вставка; 9 – аккумуляторы; 10 – инвертор для преобразования постоянного тока в переменный; 11 – блок управления с запланированной программой; 12 – одометр, фиксирующий путь, пройденный устройством; 13 – ультразвуковой генератор; 14 – отверстие; 15 – электромотор с прямым приводом; 16 – соединительный диск; 17 – крепление для роликов; 18 – соединительный кабель; 19 – аккумуляторный отсек [51]

Диаметр торцевых отверстий корпуса 2 совпадает с диаметрами отверстий соединительных дисков 16. В центре колеса 4 выполнено отверстие, в которое установлен электромотор с прямым приводом 15, который соединен через кабели с аккумуляторным блоком 9.

Внутри корпуса устройства 2 размещен блок управления 11, связанный с аккумуляторами 9 с помощью электрических проводов. Аккумуляторы 9

подключены к инвертору 10 для преобразования постоянного тока в переменный. Инвертор 10 подключен к ультразвуковому генератору 13, который, в свою очередь, подключен к подвижным ударным элементам 3, обеспечивающим ультразвуковую ударную обработку. Для точного позиционирования устройства система оснащена одомером 12), выходные данные которого передаются на вход модуля GPS-навигации, интегрированного в блок управления 11, что позволяет осуществлять точное выравнивание устройства относительно оси сварного соединения.

Для работы устройства необходимо зарядить аккумуляторы 9, которые после полной зарядки устанавливаются внутрь корпуса устройства 2 и аккумуляторный отсек 19. После этого соединяют две половины корпуса устройства 2 путем скрепления пазов, а затем устанавливают соединительные цилиндрические вставки 8, а к ним соединительные диски 16, которые соединяют с аккумуляторным блоком 9 соединительными элементами 7. Затем закрепляют аккумуляторный отсек 19 с креплениями для роликов 17 и ролики 5. Затем с торцевой части аккумуляторного отсека 9 крепят ребра жесткости 6, в которые крепится колесо 4. После соединения всех элементов устройство устанавливается в трубопровод. На блок управления 11 подается сигнал на вход ультразвукового генератора 13, который передает сигнал на вход инвертора 10, который преобразует постоянный ток в переменный проходящий с аккумуляторного блока 9.

Устройство начинает движение. Движение устройства осуществляется за счет того, что на блок управления 11 подается сигнал с пульта управления (на фигуре не показан). С помощью пульта управления начинает работать электромотор с прямым приводом 15, который вращает колесо 4 и за счет этого начинают вращаться ролики 5. Через определенное расстояние до оси сварного шва, которое определяется одомером 12, с выхода которого передается информация о позиции на вход GPS-навигации (на фигуре не показан), который установлен в блоке управления 11. Блок управления 11 дает команду на включение аккумуляторов 9, от которых ток поступает на вход инвертора 10, в котором происходит преобразование постоянного в переменный ток, ток 50 Гц, который подает ток в ультразвуковой генератор 13. В ультразвуковом генераторе 13

происходит преобразование тока низкой частоты в ток ультразвуковой частоты, Ток ультразвуковой частоты через соединительные кабеля 18 идет на подвижные ударные элементы устройства 3 через, за счет которых происходит снижение остаточных сварочных напряжений. Данный процесс происходит циклично, то есть с помощью пульта управления устройство доставляется к оси сварного соединения срабатывает за счет одометра 12 и GPS-навигации (на фигуре не показан) осуществляется позиционирование, за счет подвижных ударных элементов устройства происходит ультразвуковая ударная обработка и так далее до камеры приема.

Самоходное устройство для ультразвуковой обработки сварных соединений с внутренней стороны магистральных трубопроводов за счет установки подвижной части, которая состоит из аккумуляторного отсека, один конец которой жестко соединен с соединительным диском, по бокам закреплены крепежные системы с роликами и на конце аккумуляторного отсека закреплены ребра жесткости, на которые установлен электромотор с прямым приводом, на который надето колесо, позволяет снизить остаточные сварочные напряжения в кольцевых сварных соединениях.

4.4 Рекомендации по применению разработанных устройств для снижения остаточных напряжений в магистральных трубопроводах

Разработаны три устройства для внутритрубной ультразвуковой ударной обработки кольцевых сварных соединений магистральных, а именно:

1. Перемещаемое потоком жидкости.
2. Перемещаемое методом протаскивания.
3. Самоходное устройство.

1. Рекомендации по применению устройства перемещаемое потоком жидкости

Условия применения:

- применяется в сооруженных нефтепроводах, находящихся на стадии завершения сооружения и после ремонта;

- перемещение устройства осуществляется гидродинамическим способом за счет перекачиваемой нефти;
- рекомендуется применять на трубопроводах диаметром от 300 до 1220 мм;
- скорость перемещения устройства должна быть 0,5 м/с,

Порядок применения:

1. Устройство размещается в камере пуска.
2. Ультразвуковая ударная обработка активируется с помощью запрограммированного блока управления.
3. При достижении сварного соединения, определяемого с помощью одометра, происходит ультразвуковая ударная обработка [104].
4. Устройство продвигается по трубопроводу до камеры приема, где извлекается [104].

Особенности:

- не требует остановки потока в действующих магистральных трубопроводах [104].

2. Рекомендации по применению устройства, перемещаемого методом протаскивания

Условия применения:

- применяется в сооружаемых или ремонтируемых магистральных трубопроводах;
- подходит для опорожненных магистральных трубопроводов;
- перемещение осуществляется вручную с помощью троса или лебедки;
- скорость перемещения устройства должна быть 0,5 м/с в трубопроводе;
- ультразвуковая ударная обработка кольцевых сварных соединений осуществляется 5 - 10 минут.

Порядок применения:

1. Устройство полностью собирается и заряжаются аккумуляторы.
2. Устанавливается в трубопровод в открытом торце.
3. Протаскивается к сварному соединению.

4. При достижении нужной позиции автоматически запускается ультразвуковая ударная обработка (синхронизация с GPS и одометром).

Особенности:

- подходит для локальной ультразвуковой ударной обработки сварных соединений;
- возможно использование при низких температурах до -30°C ;
- позволяет гибко регулировать цикл ультразвуковой ударной обработки.

3. Рекомендации по применению самоходного устройства

Условия применения:

- применяется в сооружаемых или ремонтируемых магистральных трубопроводах;
- подходит для опорожненных магистральных трубопроводов;
- оснащено электроприводом и не требует внешнего перемещения;
- скорость перемещения устройства должна быть 0,5 м/с в трубопроводе;
- ультразвуковая ударная обработка кольцевых сварных соединений осуществляется 5-10 минут.

Порядок применения:

1. Заряжаются аккумуляторы и собирается устройство.
2. Устанавливается в трубопровод в открытом торце.
3. Дистанционно запускается электромотор, обеспечивающий движение устройства.
4. Ультразвуковая ударная обработка происходит по сигналу от одометра и GPS, синхронизированного с блоком управления.
5. После завершения ультразвуковой ударной обработки устройство извлекается из магистрального трубопровода через камеру приема средств очистки и диагностики (СОД).

Особенности:

- автоматизация процесса и высокая производительность;
- возможно использование при низких температурах до -30°C ;
- удобство при многократной обработке сварных соединений;

- требует минимальное вмешательство персонала.

4.5 Выводы по Главе 4

1. Разработанные устройства защищены патентами и внедрены на предприятии ООО НПФ «ЭнТехМаш», которое занимается обеспечением безопасной эксплуатацией оборудования в нефтегазовой отрасли.

2. По разработанным устройствам представлены рекомендации по их применению, В основном данные устройства необходимо использовать при сооружении и ремонте магистральных трубопроводах на ответственных участках категории В (согласно СП 36,13330,2012 «Магистральные трубопроводы»), а также вблизи нефтеперекачивающих и компрессорных станций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной задачи - повышение ресурса магистральных трубопроводов путем снижения остаточных напряжений в кольцевых сварных соединениях.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Проведенный анализ и обобщения теоретических и экспериментальных исследований указывают, что остаточные растягивающие напряжения в сварных соединениях являются одним из существенных факторов, снижающих срок службы магистральных трубопроводов.

2. С использованием разработанной численной модели в программном продукте ANSYS, учитывающей ключевые характеристики сварного соединения, показано, что в процессе сооружения и ремонта магистральных трубопроводов в их кольцевых сварных соединениях возникают остаточные растягивающие напряжения, достигающие на внутренней поверхности соединения величины (до $0,8\sigma_T$ использованной трубной стали).

3. Экспериментально установлено, что ультразвуковая ударная обработка внутренней поверхности сварного соединения трубной стали на частоте 20 кГц способствует снижению (до 1,6 раза) остаточных сварочных напряжений в сварном шве, измельчению зерна (до 1,6 раза) металла в его подповерхностном слое глубиной 2 мм и повышению (до 1,5 раза) ударной вязкости сварного соединения, способствующему повышению (до 1,6 раза) ресурса сварного соединения трубопровода.

4. Разработаны технология и устройство для ультразвуковой ударной обработки внутренней поверхности кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов на стадии их сооружения и ремонта.

Дальнейшее развитие темы диссертационного исследования может быть связано с проведением дополнительных экспериментальных исследований по расширению возможности применения данной технологии, а также внедрению ее на стадии сооружения и ремонта магистральных трубопроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапов, С.И. Физические аспекты ультразвуковой механической обработки // Известия ВолгГТУ. – С. 5-8.
2. Андреев, В. Ультразвуковая ударная обработка, как метод повышения долговечности сварных соединений // Оборудование. – 2006. – № 3. – С. 32-33.
3. Анучкин, М.П. Горицкий, В.Н. Мироненко, Б.И. Трубы для магистральных трубопроводов. – М. : Недра, 1986. – 231 с.
4. Антонов, А.А. Стеклов, О.И. [и др.] Исследование технологических остаточных напряжений в сварных соединениях магистральных трубопроводах // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – № 3. – С.13-19.
5. Антонов, А.А. Разработка комплекса технических и методических средств для оценки уровня остаточных напряжений в сварных магистральных трубопроводах методом лазерной интерференции: дис. доктор техн. наук – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 2019. 377 с.
6. Антипов, Б.Н. Оборудование для контроля напряжённо-деформированного состояния трубопроводов и конструкций / Б.Н. Антипов, А.М. Ангалев, В.Л. Венгринович и др. // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2008. – № 3. – С. 66-69.
7. Аммосов, А.П., Яковлева С.П., Голиков, Н.И. [и др.] Перераспределение остаточных напряжений при взрывной обработке кольцевых сварных соединений магистрального трубопровода // Сварочное производство. – 1997. – № 1. – С. 13-15.
8. Арафьев, И.В. Пермяков, И.Л. [и др.] Влияние параметров ручной дуговой наплавки на остаточные механические свойства наплавленного металла и околошовной зоны // Известия ВолгГТУ. – 2008. – № 2. – С. 77-80.
9. Аснис, А.Е. Иващенко, Г.А. Повышение прочности сварных конструкций. – Киев : Наук. Думка, 1985. – 256 с.
10. Ахтямов, Р.М. Повышение прочности сварных соединений из стали 12Х18Н10Т применением низкочастотной вибрационной обработки в процессе

сварки / Р.М. Ахтямов, И.Г. Ибрагимов, М. З. Зарипов [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 1. – С. 38-41.

11. Бабаев, А.В. Влияние остаточных напряжений на зарождение и скорость развития усталостных трещин в сварных соединениях с непроварами // Автоматическая сварка. – 1977. – № 12. – С. 30-32.

12. Багрянский, К.В., Добротина, З.А., Хренов, К.К. Теория сварочных процессов. – Киев : Изд-ое объединение «Вища школа». – 1976. – 424 с.

13. Безбородов, В.П., Клименов, В.А., Плешанов, В.С. [и др.]. Влияние ультразвуковой ударной обработки на структуру и свойства сварных соединений теплостойкости стали 12Х1МФ // Сварочное производство. – 2000. – № 7. – С. 17-21.

14. Белкин, А.А., Мирочник, В.Л., Мякишева, С.У. Опыт исследования причин разрушения трубопроводов // Промышленная безопасность. – 2002. – № 1. – С. 22-25.

15. Березин, И.Я., Чернявский, О.Ф. Сопротивление материалов. Усталостное разрушение металлов и расчеты на прочность, и долговечность при переменных напряжениях. – Челябинск : изд. ЮУрГУ. – 2003. – 76 с.

16. Большаков, А.М., Голиков, Н.И., Иванов, А.Р., Алексеев, А.А. Исследование причин аварий магистрального газопровода Бэргэ- Якутск // Т.2.: Тр.: научных конференций. – Красноярск : ИВМ СО РАН, 2003. – С. 62-68.

17. Большаков, А.М., Голиков, Н.И., Сыромятникова, А.С. [и др.] Анализ катастрофического разрушения газопровода из труб, изготовленных методом контактной сварки токами высокой частоты // Газовая промышленность. – 2010. – № 4. – С. 72-74.

18. Большаков, А.М. Разрушения и повреждения при длительной эксплуатации объектов нефтяной и газовой промышленности / А.М. Большаков, Н.И. Голиков, А.С. Сыромятникова, А.А. Алексеев, Р.П. Тихонов, Н.М. Литвинцев // Газовая промышленность. - 2007, - №7. - С. 89-91.

19. Ботвин, Л.Р.; отв. ред. Новиков И.И. Разрушение: кинетика, механизмы, общие материаловедения им. А.А. Байкова РАН. – М. : Наука, 2008. – 334 с.

20. Биргер, И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
21. Буторов, В.С. Влияние вибрационной обработки на хладостойкость сварных металлоконструкций : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Якутск, 1987. – 16 с.
22. Вагапов, И.К., Ганиев, М.М., Шинкарев, А.С. Исследование влияния ультразвуковой ударной обработки на значение и распределение напряжений в сварной заготовке // Авиационная техника. – 2005. – № 2. – С. 56-59.
23. Васильев, Д.М. Методика рентгенографического измерения напряжения // Заводская лаборатория. – 1965. – № 8. – С. 972-978.
24. Вержбицкий, К.Д. Обеспечение ресурса вертикального стального резервуара путем дополнительной обработки сварных соединений нижнего пояса: дис. канд. техн. наук – Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 2018.103 с.
25. Винокуров, В.А., Гитлевич А.Д. [и др.] Сварка в машиностроении : справочник: в 4-х т. –М.: Машиностроение, 1979. – Т. 3. – 567 с.
26. Винокуров, В.А. Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений. –М. : Машиностроение, 1973. – 213 с.
27. Винокуров, В.А., Григорьянц, А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. –М. : Машиностроение, 1984. – 284 с.
28. Винокуров, В.А. Сварочные деформации и напряжения. –М. : Машиностроение, 1968. – 236 с.
29. Вишняков, Я.Д., Пискарев, В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. –М.: Металлургия, 1989. –254 с.
30. Гаврилова, Т.М., Пегашкин, В.Ф., [и др.]. Формирование микропрофиля в процессе обработки поверхностным пластическим деформированием с наложением ультразвуковых крутильных колебаний // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 10. – С.33-35.
31. Гатовский, К.М. Определение сварочных деформаций и напряжений с учетом структурных превращений металла / К.М. Гатовский // Сварочное производство. – 1973. – № 11. – С. 3-6.

32. Гиренко, В.С., Котенко, Э.В. Влияние остаточных напряжений и деформационного старения на сопротивляемость стали образованию хрупких трещин // Автоматическая сварка. – 1968. – № 2. – С. 34-37.

33. Голиков Н.И. Причины разрушения, повышение хладостойкости и эксплуатационной прочности сварных соединений в условиях Северо-Востока России: дис. доктора техн. наук – Ин-т физико-техн. Проблем Севера СО РАН, Якутск, 2015. 315 с.

34. Голиков, Н.И., Сидоров, М.М. Перераспределение остаточных сварочных напряжений при ультразвуковой ударной обработке сварных соединений стыков труб // Сварочное производство. – 2011. – № 5. С. 3-6

35. Голиков, Н.И., Сидоров, М.М. Влияние ультразвуковой ударной обработки на ударную вязкость сварных соединений стыков труб, изготовленных из сталей 09Г2С и 13Г1С-У // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 7. – С. 3-6.

36. Голиков, Н. И., Сидоров М.М. Исследование перераспределений остаточных напряжений при циклическом нагружении сварных соединений // Сварочное производство. – 2013. – № 12. – С. 18-20.

37. Голиков, Н.И. Прочность сварных соединений резервуаров и трубопроводов, эксплуатирующихся в условиях Севера: монография / Н.И. Голиков, А.П. Аммосов; Ин-т физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН. – Якутск : Изд-во СВФУ, 2012. – 232 с.

38. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ : учеб. пособие для вузов. – М. : МИСИС, 1994. – 328 с.

39. ГОСТ 18895-97. Сталь. Метод фотоэлектрического спектрального анализа. М. : Изд-во стандартов. – 1997. – 15 с.

40. ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. М.: Стандартиформ. – 2005. – 45 с.

41. ГОСТ 5640-2020 Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры проката стального плоского.

42. ГОСТ 21073.3-75. Металлы цветные. Определение величины зерна методом подсчета пересечений зерен. М.: Стандартиформ. -2023-45 с.
43. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. М.: Стандартиформ. – 2023 – 45 с
44. Григорьев, Е.В. Обоснование метода контроля влияния упрочняющих обработок сварных соединений на основе результатов регистрации сигналов акустической эмиссии: дис. канд. техн. наук – Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург. 2024. 131 с.
45. Гумеров, А.Г., Воробьев, В.А., Александров, А.А. Формирование и снятие сварочных напряжений при приварке усиленных элементов на нефтепродуктопроводах // Нефтегазовое дело [эл. ресурс]. – 2004. – №2. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Gumerov/Gumerov_1.pdf
46. Гузь, А.Н. Введение в акустоупругость / А.Н. Гузь, О.И. Гуца, Ф.Г. Махорт. – Киев: Наукова думка. – 1977. – 156 с.
47. Доронин, С.В., Москвичев, В.В. Нормирование долговечности и дефектности сварных конструкций // проблемы машиностроения и надежности. – 1998. – №1. – С. 44-49.
48. Дробышевский, Н.И., Филиппов, А.С. Расчет сварочных напряжений в трубе и их снятие внешним давлением // Изв. РАН. МТТ. – 1993. – №6. – С. 156-163.
49. Ефименко, Л.А. Традиционные и перспективные стали для строительства магистральных газонефтепроводов / Л.А. Ефименко, О.Ю. Елагина, Е.М. Вышемирский, О.Е. Капустин, А.В. Мурадов, А.К. Прыгаев. – М.: Логос, 2011. — 304 с.
50. Зарипов, М.З., Ибрагимов, И.Г., Ризванов, Р.Г. [и др.] Исследование влияния вибрационных и ультразвуковых колебаний в процессе сварки на свойства сварных соединений нефтегазового оборудования из стали 12X18H10T // Нефтегазовое дело. – 2010. – №2.
51. Заявка на патент на изобретение № 2024138241 Российская Федерация. Самоходное устройство для ультразвуковой обработки сварных соединений с

внутренней стороны магистральных трубопроводов. Заявл. 18.12.2024 / А.Г. Палаев, **А.А. Красников**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 7с.

52. Заявка на патент на изобретение № 2024138241 Российская Федерация. Устройство для ультразвуковой обработки сварных соединений с внутренней стороны магистральных трубопроводов методом протаскивания. Заявл. 18.12.2024 / А.Г. Палаев, **А.А. Красников**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 7с.

53. Земзин, В.В., Шрон, Р.З. Термическая обработка и свойства сварных соединений / Ленингр. отд-ние, 1978. – 367 с.

54. Зуев, Л.Б., Псахье, С.Г., Оришич, А.М. [и др.]. Структура и свойства сварных соединений, выполненных лазерной и точечной сваркой // Физическая мезомеханика. – 2005. – №8. – С. 87-90.

55. Зорин, Е.Е. Работоспособность трубопроводов: В 3-х ч. / Е.Е. Зорин, Г.А. Ланчаков, А.И. Степаненко, А.В. Шибнев. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. – Ч. 1. Расчетная и эксплуатационная надежность. – 244 с.

56. Иванцов, О.М. Низкотемпературные газопроводы / О.М. Иванцов, А.Д. Двойрис. – М.: Недра, 1980. – 303 с.

57. Иванов, С.А. Методы и аппаратура практической рентгеновской тензометрии / С.А. Иванов // Научно-технические ведомости. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006. – № 3. – С. 125-134.

58. Игнатьева, В.С. Влияние остаточных напряжений на развитие усталостной трещины в области сварного стыкового шва / В.С. Игнатьева, Р.Р. Кулахметьев, В.В. Ларионов // Автоматическая сварка. – 1985. – № 1. – С. 1-4.

59. Идрисов, Р.Х., Идрисова, К.Р., Кормакова, Д.С. Анализ аварийности магистральных трубопроводов России // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2019. № 2. С. 44–46.

60. Каменская, Н.И., Антонов, А.А. Влияние технологии монтажной сварки на уровень остаточных напряжений в сварных соединениях труб из стали 12Х1МФ // Автоматическая сварка. – 1992. – № 7-8. – С.10-12.
61. Карзов, Г.П., Марголин, Б.З., Швецова, В.А., Карзов, Г.П. Физикомеханическое моделирование процессов разрушения. – СПб : Политехника, 1993. – 391 с.
62. Китаев, А.М., Губин, А.И. Сварка и пайка тонкостенных трубопроводов. – М. : Машиностроение, 1972. – 133 с.
63. Коломийцев, Е.В., Серенко, А.Н. Влияние ультразвуковой и лазерной обработки на сопротивление усталости стыковых сварных соединений в воздушной и коррозионной в средах // Автоматическая сварка. – 1990. – №11. – С. 13-15.
64. Копельман, Л.А. Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. – Л. : Машиностроение, 1978. – 232 с.
65. Копельман, Л.А. Основы теории прочности сварных конструкций. – СПб: издательство «Лань». – 2010. – 464 с.
66. Корольков, П.М. Термическая обработка сварных соединений трубопроводов и аппаратов, работающих под давлением. – М. : Стройиздат, 1982. – 136 с.
67. Кох, П.И. Климат и надежность машин / П.И. Кох. – М.: Машиностроение, 1981. – 175 с.
68. Кныш, В.В. Влияние коррозионных повреждений на циклическую долговечность тавровых сварных соединений, обработанных высокочастотной механической проковкой / В.В. Кныш, С.А. Соловей, Л.И. Ныркова и др. // Автоматическая сварка. – 2016. – № 9. – С. 46-51.
69. **Красников, А.А.** Ультразвуковая обработка сварного соединения с внешней, внутренней и с двух сторон, на снижение остаточных сварочных напряжений // XVII Всероссийская конференция «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых», Пермь, 5-8 ноября 2024 года. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2024. – Т. 1 - С. 96 – 99.

70. Кретов, Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия энергомашиностроения. – Спб: Радиоавионика, 1995. – 309 с.
71. Кудрявцев, П.И. Остаточные сварочные напряжения и прочность соединений. – М.: Машиностроение, 1964. – 93 с.
72. Кудрявцев, И.В., Наумченков, Н.Е. Усталость сварных конструкций. – М.: Машиностроение, 1976. – 270 с.
73. Кузьмин, В.Р. Прогнозирование хладостойкости конструкций и работоспособности техники на Севере / В.Р. Кузьмин, А.М. Ишков. – М.: Машиностроение, 1996. – 304 с.
74. Кузнецов, П.В., Панин, В.Е. [и др.] Влияние ударной ультразвуковой обработки на распределение усталостных повреждений в области сварного шва // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – №4. – С. 46-52.
75. Кучук-Яценко, С.И., Кривенко, В.Г. [и др.] Контактная стыковая сварка трубопроводов. – Киев : Наук. думка, 1986. – 208 с.
76. Ларионов, В.П. Электродуговая сварка конструкций в северном исполнении. – Новосибирск : Наука, 1986. – 256 с.
77. Ларионов, В.П. [и др.] Сварка и проблемы вязкохрупкого перехода. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. – 595 с.
78. Ларионов, В.П., Апросимов, В.С., Егоров, Ю.И. Влияние роста дефекта на прочность трубопроводов, эксплуатируемых в условиях низких климатических температур // Прочность материалов и конструкций при низких температурах. – Киев, 1990. – С.127-130.
79. Ларионов, В.П., Петушков, В.Г., Яковлев, Г.П. О влиянии остаточных напряжений на хладостойкость и выносливость сварных соединений // Проблемы прочности. – 1989. – № 7. – С. 53-57.
80. Ларионов, В.П., Кузьмин, В.Р. [и др.] Хладостойкость материалов и элементов конструкций : Результаты и перспективы. – Новосибирск : Наука, 2005. – 290 с.
81. Латипов, И.У. Разработка метода исследования и контроля структуры материала дефектных зон трубопроводов: дис. канд. техн. наук – Санкт-

Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, 2024.100 с.

82. Лащенко, Г.И. Энергосберегающие технологии снижения остаточных напряжений в сварных конструкциях // Сварщик в России. – 2006. – №1. – С. 15-19.

83. Леонов, В.П., Мизецкий, А.В. Влияние локальных остаточных сварочных напряжений на начальную стадию развития трещин в сварных соединениях/ Вопросы материаловедения. – 2008. – №4 (56). – С. 54-65.

84. Лившиц, Л.С., Хакимов, А.Н. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений. – М. : Машиностроение, 1989. – 336 с.

85. Лобанов, Л.М., Кирьянов, В.И. [и др.] Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой // Автоматическая сварка. –2006. – №9. – С. 3-11.

86. МаксUTOва, А.Ф., Амирова, Л.М., Ганиев М.М. Влияние ультразвуковой обработки на технологические свойства эпоксидного олигомера // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2005. – №2. – С. 8-10.

87. Мазур, И.И., Иванцов, О.М. Безопасность трубопроводных систем. – М. : ИЦ «ЕЛИМА», 2004. – 114 с.

88. Мазур, И.И. Конструктивная надежность и экологическая безопасность трубопроводов / И.И. Мазур, О.М. Иванцов, О.И. Молдаванов. – М.: Недра, 1990. – 264 с.

89. Макаров, Г. И. Протяженные разрушения магистральных газопроводов. М. : Академия, 2002. – 208 с.

90. Махненко, В.И., Великоиваненко, Е.А., Шекер, В.М. [и др.] Остаточные сварочные напряжения в зоне кольцевых сварных стыков трубопроводов из аустенитной стали // Автоматическая сварка. –1998. –№11. –С.32-39.

91. Махненко, В.И. Влияние остаточных напряжений на распространение усталостных трещин в элементах сварных конструкций // Автоматическая сварка. –1979. –№4. –С.1-3.

92. Махненко, В.И., Великоиваниненко, Е.А., Дыхно, С.Л. Регулирование остаточных деформаций в зоне кольцевых швов тонкостенных оболочек вращения // Автоматическая сварка. – 1992. – №11-12. – С.7-9.
93. Махненко, В.И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – Киев : Наукова думка, 1976. – 320 с.
94. Михеев, П.П., Недосека, А.Я., Пархоменко, И.В. [и др.] Эффективность применения ультразвуковой ударной обработки для повышения сопротивления усталости сварных соединений // Автоматическая сварка. – 1984. – №3. – С. 4-7.
95. Нехорошков, О.Н., Першин, В.П., Семухин, Б.С. Применение метода ультразвуковой ударной обработки для сварных соединений конструкционных сталей // Вестник ТГАСУ. – 2006. – №2.
96. Николаев, Г.А. Сварные конструкции. – М. : Машгиз, 1962. – 552 с.
97. Николаев, Г.А., Куркин, С.А., Винокуров, В.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкции. – М. : Высш. школа, 1982. – 272 с.
98. Окерблом, Н.О. Расчет деформаций металлоконструкций при сварке. Машгиз, 1955. 212 с.
99. Окерблом, Н.О. Сварочные деформации и напряжения. Теория и применения. М.: Машгиз. – 1948. – 248 с.
100. Орехов, Г.Т. Определение остаточных сварочных напряжений магнитоупругим методом / Г.Т. Орехов // Автоматическая сварка. – 1974. – № 4. – С.30-32.
101. Оськин, И.Э. Оценка влияния особенностей процесса сварки на сварочные напряжения в неповоротных стыках магистральных трубопроводах / И.Э. Оськин, М.А. Шолохов, А.С. Куркин и др. // Сварка и Диагностика. – 2012. – № 5. – С. 37-41.
102. Палаев, А.Г., **Красников, А.А.** Анализ причин возникновения остаточных сварочных напряжений и методов их выявления и снижения // Территория «НЕФТЕГАЗ». - 2023. - № 11–12. - С. 72–84.

103. Палаев, А.Г., Николаев, А.К., Духневич, Л.Н., **Красников, А.А.** Исследование снижения остаточных сварочных напряжений в результате ультразвуковой обработки сварного соединения на частоте 20, 37 и 44 кГц // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2023. – Т. 13, № 6. – С. 530-538.

104. Палаев, А.Г., **Красников, А.А.** Исследование снижения остаточных сварочных напряжений в результате ультразвуковой обработки сварного соединения на частоте 20 кГц, 37 кГц и 44 кГц // Актуальные проблемы недропользования : тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–21 мая 2022 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – С. 196-197.

105. Палаев, А.Г., **Красников, А.А.** Обоснование метода повышения надежности магистральных трубопроводов, эксплуатируемых в условиях Крайнего севера с применением ультразвуковой обработки сварных соединений // Трубопроводный транспорт – 2024 : Материалы IX Международной научно-практической конференции, приуроченной к 95-летию со дня рождения профессора В.Ф. Новоселова и к 15-летию со дня образования ООО "НИИ Транснефть", Уфа, 20-22 ноября 2024. – Уфа: УНПЦ "Издательство УГНТУ", 2024. - Том 2. – С. 207-209.

106. Панин, В.Е. Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий: учебное пособие / В.Е. Панин, В.П. Сергеев, А.В. Панин. - Томск: Изд-во Томский политехнический университет, 2010. – 254 с.

107. Панин, В.Е., Клименов, В.А., Безбородов, В.А. [и др.] Субструктурные и фазовые превращения при ультразвуковой ударной обработке мартенситной стали // Физика и химия обработки материалов. – 1993. – №6. – С. 77-83.

108. Панин, В.Е., Каблов, Е.Н., Плешанов, В.С. [и др.] Влияние ультразвуковой ударной обработки на структуру и сопротивление усталости сварных соединений высокопрочной стали ВКС-12 // Физическая мезомеханика. – 2006. – №9. – С. 85-96.

109. Патент 2124430 РФ. Устройство для ультразвуковой упрочняющей чистовой обработки/ Ю.В. Холопов. - Заявл. 20.01.1998 ; опубл. 10.01.1999, бюл. №1. – 3 с.

110. Патент 2179919 РФ. Виброударный инструмент с ультразвуковым возбуждением/ С.Д. Шестаков. - Заявл. 14.07.1998; опубл. 27.02.2002.

111. Патент 2219042 РФ. Многостержневое устройство для упрочнения поверхностным пластическим деформированием / Ю.С. Степанов и др. - Заявл. 11.12.2002 ; опубл. 20.12.2003, бюл. №35.

112. Патент 2469108 РФ. Устройство для ультразвуковой обработки сварного соединения в процессе сварки/ А.И. Трофимов, С.И. Минин - Заявл. 10.11.2010 ; опубл. 10.12.2012, бюл. №34. – 5 с.

113. Патент 2469109 РФ. Ультразвуковое устройство для обработки сварных соединений металлов аустенитного класса в процессе автоматической сварки/ А. И. Трофимов, С. И. Минин. - Заявл. 10.11.2010 ; опубл. 10.12.2012, бюл. №34. – 5 с.

114. Патент 2252859 С2 РФ. Ультразвуковой инструмент для снятия остаточных напряжений и упрочнения поверхностей металлов/ Ю.В. Холопов. - Заявл. 23.07.2004; опубл. 27.05.2005, бюл. № 15. – 7 с.

115. Патент 2540230 РФ. Ультразвуковой инструмент для деформационной обработки поверхностей и сварных соединений / Ю. Кудрявцев, Я. Клейман, О. Луговский, А. Мовчанюк - Заявл. 20.04.2014 ; опубл. 10.02.2015, бюл. №4.

116. Патент 87380 U1 РФ. Ультразвуковое устройство для снятия остаточных напряжений в сварных соединениях/ А.В. Сурков, Е.Г. Старченко, С.И. Носов, Л.А. Бастаков, В.Н. Смирнов, И.В. Смирнов, М.А. Храмцов. Заявл. 06.07.2009 ; опубл. 10.10.2009, бюл. №28. – 2 с.

117. Патент 2224247 С1 РФ Ультразвуковой дефектоскоп для неразрушающего контроля/ А.В. Смирнов, В.Н. Елисеев. Заявл. 27.03.2003; опубл. 20.02.2004 – 20 с.

118. Патент № 2805006 Российская Федерация, МПК В23R 9/02 (2006.01); СПК В23К 9/02 (2023.08). Устройство для снижения остаточных напряжений.

Заявка № 2023116690: заявл. 26.06.2023; опубл. 10.10.2023 / А.Г. Палаев, **А.А. Красников**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 11 с.

119. Петров, И.П. Надземная прокладка трубопроводов / И.П. Петров, В.В. Спиридонов. – М.: Недра, 1973. – 472 с.

120. Полтавцев, С.И. Проблемы и пути повышения долговечности и надежности сварных конструкций объектов повышенной опасности / С.И. Полтавцев, О.И. Стеклов // Сварочное производство. – 1996. – № 5. – С. 2-3.

121. Прохоров, Н.Н. Физические процессы металлов при сварке / Н.Н. Прохоров. – М.: Металлургия, 1976. – Т. 2. – 600 с.

122. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; под ред. В.И. Труфякова. – Киев: Наук. думка, 1990. – 256 с.

123. Пригоровский, Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений. – М. : Машиностроение, 1983. – 248 с.

124. РД-12-411-01. Инструкция по диагностированию технического состояния подземных стальных газопроводов. Сер. 12. – М.: Науч.-техн. центр исследований проблем промышленной безопасности, 2011. – Вып. 3. – 104 с.

125. Рыкалин, Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М. : Машгиз, 1961. – 298 с.

126. Сараев, Ю.Н. Распределение остаточных напряжений в сварных соединениях из стали 09Г2С методами адаптивной импульсно-дуговой сварки / Ю.Н. Сараев Ю.Н., В.П. Безбородов, Н.И. Голиков и др. // Сварочное производство. – 2014. – № 2. – С. 3-7.

127. Сидоров М.М. Влияние ультразвуковой ударной обработки на механические свойства и перераспределение остаточных напряжений сварных соединений трубопроводов, эксплуатируемых в условиях Сибири и Крайнего Севера: дис. канд. техн. наук – Ин-т физико-техн. Проблем Севера СО РАН, Якутск, 2015.132 с.

128. Семухин, Б.С. Определение напряжений вблизи сварных швов / Б.С. Семухин // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 1. – С. 28-30.
129. Слепцов, О.И. Технологическая прочность сварных соединений при низких температурах. – Новосибирск: Наука, 1984. – 92 с.
130. Слепцов, О.И., Петров, П.П. Оценка влияния длительной эксплуатации на механические свойства материала газопроводов в условиях Крайнего Севера // Труды XV Международной научно-технической конференции Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций. – СПб: СПбГУНиПТ, 2009. – С. 39-48.
131. Слепцов, О.И., Михайлов, В.Е., Петушков, В.Г., Яковлев, Г.П., Яковлева С.П. Повышение прочности сварных конструкций для Севера. – Новосибирск: Наука, 1989. – 223 с.
132. Статников, Е.Ш., Муктепавел, В.О. Технология ультразвуковой ударной обработки как средство повышенной надежности и долговечности производство. – 2003. – №4. – С. 25-29.
133. Стеклов, О.И. Надежность магистральных газопроводов в условиях интенсификации процессов коррозии и старения / О.И. Стеклов // Сварочное производство. – 2010. – № 5. – С. 40-43.
134. Стеклов, О.И. Безопасная эксплуатация системы магистральных газопроводов при наличии дефектов КРН / О.И. Стеклов, Д.П. Варламов // Газовая промышленность. – 2013. – № 1. – С. 46-49.
135. Трочун, И.П. Внутренние усилия и деформации при сварке. – М.: Машгиз, 1964. – 276 с.
136. Труфяков, В.И. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках. Ин-т электросварки им. Е.О. Патона. Киев : Наукова думка, 1990. – 256 с.
137. Труфяков, В.И. Усталость сварных соединений. – Киев : Наукова думка, 1973. – 216 с.

138. Труфьяков, В.И. Михеев, П.П. Кузьменко, А.З. Влияние остаточных сварочных напряжений на развитие усталостных трещин в конструкционной стали // Автоматическая сварка. – 1977. – №10. – С. 6-7.

139. Харионовский, В.В. Повышение прочности газопроводов в сложных условиях / В.В. Харионовский. – Л.: Недра, 1990. – 180 с.

140. Хафизова, О.Ф. К влиянию вибрационной обработки на механические свойства разнородных сварных соединений / О.Ф. Хафизова, В.И. Болобов, А.М. Файрушин, А.Ю. Кузькин // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. – 2011. – № 1. – С. 210-219.

141. Шоршоров, М.Х. Металловедение сварки стали и сплавов титана / М.Х. Шоршоров. – М.: Наука, 1965. – 336 с.

142. Яковлев, Г.П. Влияние обработки взрывом на остаточные сварочные напряжения и температуру вязко-хрупкого перехода сварных соединений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Якутск, 1989. – 22 с.

143. Brickstad, B., Josefson, B. L. A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 1998. - 75(1), pp. 11–25. doi:10.1016/s0308-0161(97)00117-8

144. Dong, P. An IIW residual stress profile estimation scheme for girth welds in pressure vessel and piping components / P. Dong, S. Song, X. Pei // *Welding in the World*. – 2016. - Vol. 60, iss. 2. - P. 283-298.

145. Hasan, F. Stress corrosion failure of high-pressure gas pipeline / F. Hasan, J. Iqbal, F. Ahmed // *Engineering Failure Analysis*. – 2007. -Vol. 14, iss. 5. - P. 801-809.

146. Masubuchi, K. *Analysis of welded structures: residual stresses, distortion, and their consequences*. Oxford; New York: Pergamon Press, 1980.

147. Palaev, A.G., Nosov, V.V., **Krasnikov, A.A.** Simulating distribution of temperature fields and stresses in welded joint using ANSYS. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2022. Vol. 12, No. 5. PP. 461–469. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2022-12-5-461-46912>.

148. Palaev, A.G., **Krasnikov, A.A.** Ultrasonic Treatment of Welded Joint from External, Internal and Two Sides on Reduction of Residual Welding Stresses.

International Journal of Engineering, TRANSACTIONS B: Applications. – 2024. – Vol. 37, Issue 11. – pp. 2171-2180. doi: 10.5829/ije.2024.37.11b.04

149. Radaj, D. Reduction of welding residual stresses and distortion. Heat Effects of Welding. – 1992, pp. 247–313. doi:10.1007/978-3-642-48640-1_4

150. Rossini, N.S. Methods of measuring residual stresses in components / N.S. Rossini, M. Dassisti, K.Y. Benyounis, A.G. Olabi // Materials and Design. – 2012. – Vol. 35. –P. 572–588.

151. Sadeghi, Meresht E. Failure analysis of stress corrosion cracking occurred in a gas transmission steel pipeline / E. Sadeghi Meresht, T. Shahrabi Farahani, J. Neshati // Engineering Failure Analysis. – 2011. -Vol. 18, iss. 3. - P. 963-970.

152. Song, S. A framework for estimating residual stress profile in seam welded pipe and vessel components Part II: Outside of weld region / S. Song, P. Dong // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2016. – Vol. 146.- P. 65-73.

153. Goldak, J., Chakravarti, A., Bibby, M. (1984). A new finite element model for welding heat sources. Metallurgical Transactions B. – 1984. - 15(2), 299–305. doi:10.1007/bf02667333

154. Guan, Q. Liu, J.D. Residual stress and distorsion in culindrical sheels caused by a single-pass circumferential butt weld, IIW, X-929-72. – P.12.

155. Ueda, Y. Welding deformation and residual stress prevention / Y. Ueda, H. Murakawa, N. Ma. Kidlington, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. – 292 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент на изобретение «Устройство для снижения остаточных напряжений»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2805006

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Палаев Александр Григорьевич (RU), Красников
Антон Андреевич (RU)*

Заявка № 2023116690

Приоритет изобретения 26 июня 2023 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 10 октября 2023 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 26 июня 2043 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Заявка на изобретение «Устройство для ультразвуковой ударной обработки сварных соединений с внутренней стороны магистральных трубопроводов методом протаскивания»

Форма № 94 ИЗ,ПМ,ПО-2016

Федеральная служба по интеллектуальной собственности
Федеральное государственное бюджетное учреждение



«Федеральный институт промышленной собственности»
(ФИПС)

Бережковская наб., д. 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП - 3, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЕМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

18.12.2024 <i>Дата поступления (дата регистрации)</i>	W24084733 <i>Входящий №</i>	2024138241 <i>Регистрационный №</i>
---	---------------------------------------	---

ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ <small>(дата регистрации) оригинала документов заявки</small>	(21) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ №	ВХОДЯЩИЙ №
(85) ДАТА ПЕРЕВОДА международной заявки на национальную фазу		
<input type="checkbox"/> (86) <small>регистрационный номер международной заявки и дата международной подачи, установившие первоначальную приоритетность</small> <input type="checkbox"/> (87) <small>номер и дата международной публикации международной заявки</small> <input type="checkbox"/> (89) <small>номер европейской заявки и дата ее подачи</small> <input type="checkbox"/> (97) <small>номер и дата публикации европейской заявки</small>	АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ <small>(почтовый адрес, фамилия и инициалы или наименование адресата)</small> 199106, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, д. 2, Патентно-лицензионный отдел (199106, Rossiya, 199106, g. Sankt-Peterburg, V.O., 21 liniya, d. 2) Телефон: 3288484 Факс: Адрес электронной почты: patent@spmi.ru АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕПИСКИ <small>(указывается при подаче заявки на секретное изобретение)</small>	
ЗАЯВЛЕНИЕ о выдаче патента на изобретение		
В Федеральную службу по интеллектуальной собственности Бережковская наб., д. 30, корп. 1, г. Москва, Г-59, ГСП-3, 125993, Российская Федерация		
(54) НАЗВАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ УСТРОЙСТВО ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ВНУТРЕННЕЙ СТОРОНЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ МЕТОДОМ ПРОТАСКИВАНИЯ		
(71) ЗАЯВИТЕЛЬ <small>(фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (согласно учредительному документу), место жительства или место нахождения, название страны и почтовый индекс)</small> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (federalnoe gosudarstvennoe biudzhethnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniia «Sankt-Peterburgskii gornyi universitet imperatritsy Ekateriny II»)	ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ ОГРН 1 02 78 00 50759 1 КПП ИНН СНИЛС ДОКУМЕНТ <small>(вид, серия, номер)</small> КОД СТРАНЫ <small>(если он установлен)</small> RU	
<input checked="" type="checkbox"/> изобретение создано за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> муниципальным заказчиком исполнитель работ <small>(указать наименование)</small> <input checked="" type="checkbox"/> исполнителем работ по: <input checked="" type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> муниципальному контракту <input type="checkbox"/> соглашению о предоставлении субсидии <input type="checkbox"/> гранту <input checked="" type="checkbox"/> государственному заданию <input type="checkbox"/> инициативному заданию заказчик работ <small>(указать наименование)</small> Министерство науки и высшего образования РФ		

Общее количество документов в листах	36	Лицо, зарегистрировавшее документы
Из них: - количество листов комплекта изображений изделия (для промышленного образца)		Автоматизированная система
Количество платежных документов	1	
Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются в Открытых реестрах на сайте ФИПС по адресу: www.fips.ru/registers-web		

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Заявка на изобретение «Самоходное устройство для ультразвуковой ударной обработки сварных соединений с внутренней стороны магистральных трубопроводов»

Форма № 94 ИЗ,ПМ,ПО-2016

Федеральная служба по интеллектуальной собственности
Федеральное государственное бюджетное учреждение



«Федеральный институт промышленной собственности»
(ФИПС)

Бережковская наб., д. 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП - 3, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЕМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

18.12.2024	W24084700	2024138234
<i>Дата поступления (дата регистрации)</i>	<i>Входящий №</i>	<i>Регистрационный №</i>

ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ (дата регистрации) <small>оригиналов документов заявки</small>	(21) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ №	ВХОДЯЩИЙ №
(85) ДАТА ПЕРЕВОДА международной заявки на национальную фазу		
<input type="checkbox"/> (86) <small>регистрационный номер международной заявки и (дата международной подачи, установленные локальным законодательством)</small>	АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ <small>(личный адрес, факс и почтовый или электронный адреса)</small> 199106, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, д. 2, Патентно-лицензионный отдел (199106, Rossiya, 199106, g. Sankt-Peterburg, V.O., 21 liniya, d. 2)	
<input type="checkbox"/> (87) <small>номер и дата международной публикации международной заявки</small>	Телефон: 3288484 Факс: Адрес электронной почты: patent@fips.ru	
<input type="checkbox"/> (89) <small>номер отечественной заявки и дата ее подачи</small>	АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕПИСКИ <small>(указывается при подаче заявки на секретное изобретение)</small>	
<input type="checkbox"/> (97) <small>номер и дата публикации отечественной заявки</small>		
ЗАЯВЛЕНИЕ о выдаче патента на изобретение	В Федеральную службу по интеллектуальной собственности Бережковская наб., д. 30, корп. 1, г. Москва, Г-59, ГСП-3, 125993, Российская Федерация	
(54) НАЗВАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ САМОХОДНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ВНУТРЕННЕЙ СТОРОНЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ		
(71) ЗАЯВИТЕЛЬ (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (согласно учредительному документу), место жительства или место нахождения, название страны и почтовый индекс) Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (Federalnoe gosudarstvennoe budzhetnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vuzovogo obrazovaniya «Sankt-Peterburgskii gornyi universitet imperatritsy Ekateriny II») 199106, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, д. 2 (199106, Rossiya, 199106, g. Sankt-Peterburg, V.O., 21 liniya, d. 2)	ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ ОГРН 1 02 78 00 50759 1 КПП ИНН СНИЛС ДОКУМЕНТ (вид, серия, номер) КОД СТРАНЫ (если он установлен) RU	
<input checked="" type="checkbox"/> изобретение создано за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> муниципальным заказчиком исполнитель работ (указать наименование) <input checked="" type="checkbox"/> исполнителем работ по: <input checked="" type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> муниципальному контракту <input type="checkbox"/> соглашению о предоставлении субсидии <input type="checkbox"/> гранту <input checked="" type="checkbox"/> государственному заданию <input type="checkbox"/> инициативному заданию заказчик работ (указать наименование) Министерство науки и высшего образования РФ		

Общее количество документов в листах	35	Лицо, зарегистрировавшее документы
Из них: - количество листов комплекта изображений изделия (для промышленного образца)		Автоматизированная система
Количество платежных документов	1	
Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются в Открытых реестрах на сайте ФИПС по адресу: www.fips.ru/registers-web		

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт о промышленном внедрении результатов диссертации

ЭНТЕХМАШ

Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственная фирма «ЭНТЕХМАШ» (ООО НПФ «ЭНТЕХМАШ»)
 Юридический адрес: 191021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Изберяевых Роща Фонтанная, дом № 59, литер А, помещение 4-11, офис 129.
 Почтовый адрес: 188682, Ленинградская область, Всеволожский район, арт. ин. Сосновское, д. 66Д, ш/а 33.
 тел: +7 (812) 655-77-11, факс: +7 (812) 655-77-12, e-mail: ent@entmach.com, info@entmach.com.
 ОКПО 54302654, ОГРН 1037843077360, ИНН 7814085474, КПП 7814085007.



УТВЕРЖДАЮ
 Генеральный директор
 А.В. Семаков
 "10" 02 2025г.

АКТ № 12

о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертации
Красникова Антона Андреевича
 на тему: «Обоснование метода ультразвуковой обработки сварных соединений
 магистральных трубопроводов для снижения остаточных сварочных напряжений»
 по научной специальности

2.8.5. «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ»

Комиссия в составе:

Председатель: Семаков А.В.

Члены комиссии: Большаков О.В., Лукашенко О.В., Панфилов В.И.

Составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Обоснование метода ультразвуковой обработки сварных соединений магистральных трубопроводов для снижения остаточных сварочных напряжений», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы ООО НПФ «ЭНТЕХМАШ» для снижения остаточных напряжений сварных конструкций.

Диссертационные исследования, принятые к внедрению, подкреплены данными, полученными в ходе натурных экспериментов по ультразвуковой обработке, в результате которых наблюдается снижение остаточных напряжений в зоне сварного соединения.

Использование результатов, полученных Красниковым А.А. позволяет снизить остаточные сварочные напряжения сварных конструкций до 39 %.

Председатель комиссии
 Генеральный директор

А.В. Семаков

Члены комиссии:

1. Директор по производству
2. Начальник участка сборки
3. Начальник участка сварки

Большаков О.В.

Лукашенко О.В.

Панфилов В.И.



Член Ассоциации



СЕРТИФИКАЦИЯ
 СЕРТИФИКАЦИЯ