

На правах рукописи

Алжадли Мохаммед



**ВОССТАНОВЛЕНИЕ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ С
ТРЕЩИНОПОДОБНЫМИ ДЕФЕКТАМИ
МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ**

*Специальность 2.8.5. Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Щипачев Андрей Михайлович

Официальные оппоненты:

Криони Николай Константинович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», кафедра «Технология машиностроения», профессор;

Гумеров Айдар Кабирович

кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», кафедра «Транспорт и хранение нефти и газа», доцент.

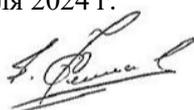
Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **11 сентября 2024 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.11 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, **аудитория № 1171а**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 11 июля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ФЕТИСОВ
Вадим Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В процессе эксплуатации магистральных нефтегазопроводов в их структуре возникают дефекты сплошности: поры, расслоения, трещины и др. Особенность данных дефектов обусловлена тем, что они при воздействии эксплуатационных нагрузок служат концентраторами напряжений, что приводит к увеличению количества дефектов и их геометрических размеров с последующим слиянием дефектов и образованием крупных несплошностей, и, как следствие, снижаются эксплуатационные и прочностные свойства, а также срок службы нефтегазопроводов, находящихся в эксплуатации. Нефтегазопроводы постоянно находятся в сложном напряженном состоянии, подвергаясь воздействию множественных переменных и статических нагрузок (колебания давления, гидроудары, вибрационные процессы, температурные воздействия и др.), что обеспечивает благоприятные условия для накопления повреждений и их быстрого роста вплоть до разрушения. Проведенный анализ причин аварийных ситуаций на объектах трубопроводного транспорта свидетельствует о том, что возникновение, накопление и распространение дефектов сплошности в металле трубопроводов являются основными причинами преждевременного выхода их из строя.

Таким образом, выявление дефектов сплошности металла и их устранение на ранних стадиях их развития до того, как они достигнут критического размера, является актуальной задачей, решение которой значительно повысит надёжность трубопроводов и продлит их ресурс.

Степень разработанности темы исследования

Ремонт дефектных участков нефтегазопроводов в большинстве случаев выполняется путем их замены. Однако, данная технология является трудоемкой и высокочрезвычайно затратной. В целях сокращения времени и стоимости ремонтных работ были разработаны методы ремонта, которые позволяют восстановить дефектные участки без необходимости их замены. Из применяемых методов для восстановления сплошности металлических конструкций, в частности, в трубопроводах, можно выделить следующие: электронно-лучевая обработка, термическая обработка, обработка лазерными ударными

импульсами и др. Практика показала, что разработанные методы являются эффективными только для восстановления поверхностных и подповерхностных слоев из-за малой глубины проникновения. Кроме того, их можно применить только в лабораторных и стендовых условиях.

Одним из перспективных методов обработки дефектных участков нефтегазопроводов, является магнитно-импульсная обработка (МИО), при которой на образец оказывается интенсивное комплексное теплосиловое воздействие. В области исследования магнитно-импульсного метода обработки металлов известные работы Ю.Н. Алексеева, М.А. Анучина, О.Д. Антоненкова, К.Н. Богоявленского, В.К. Борисевича, Ш.У. Галиева, Г.А. Гулого, А.А. Дерибаса, В.И. Завьяловой, Е.И. Исаченкова, В.Г. Кононенко, В.М. Корнеева, В.М. Кудинова, Г.С. Писаренко, Р.В. Пихтовникова, С.Н. Поляка, Е.А. Попова, О.В. Попова, В.Г. Степанова, М.В. Сторожева, А.Г. Угодчикова, Черникова Д.Г., Л.А. Шофмана, В.П. Чачина, В. Гольдсмита, В. Прагера, Д. Пирсона, Д. Райнхарта, Курлаев, Н.А. Рынгач, К.Н. Бобин, К.В. Кукуджанов, В. А. Глуценков и другие учёные. Однако, указанные работы основаны на принципе смыкания дефектов сплошности давлением магнитно-импульсного поля, что оказалось эффективным для восстановления дефектных участков металлических конструкций, изготовленных из материалов с относительно высокой пластичностью, таких как алюминий и титан. В то время как для менее пластичных элементов, таких как элементы нефтегазопроводов, применение данного подхода зачастую является нерациональным из-за необходимости создания высоких значений давления, которые могут превышать пределы разрушения металла.

Исследованиями возможности восстановления сплошности индукционным нагревом, создаваемым высокоэнергетическим электромагнитным импульсом, занимались зарубежные ученые, такие как X. Chen, R. Zhu, H. Gao, W. Xu, G. Xiao, W. Xu Y. Wang, H. Gao, Z. Li, Y. Ping, Z. Jin, Z. Hong. Однако экспериментальные исследования проводились только на тонких металлических пластинах (толщиной до 1 мм), изготовленных из сплавов с низколегированной трубной стали, титанового сплава и алюминиевого сплава. Данные эксперименты не позволили изучить эффективность магнит-

но-импульсной обработки в зависимости от глубины залегания дефектов и их локализации относительно поверхности трубопровода вследствие значительно большей толщины реальных промышленных трубопроводов. В связи с этим, для оценки эффективности магнитно-импульсной обработки необходимо провести экспериментальные исследования с использованием образцов, вырезанных из магистральных нефтегазопроводов, содержащих трещиноподобные дефекты различных форм, размеров и глубин залегания.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует паспорту научной 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».

Объект исследования – магистральные нефтегазопроводы, содержащие трещиноподобные дефекты: микротрещины, поры, расслоения и коррозионное растрескивание под напряжением (КРН).

Предмет исследования – надежность (эксплуатационные и прочностные свойства) нефтегазопроводов.

Цель работы – восстановление работоспособности дефектных участков нефтегазопроводов, повышение их надежности и долговечности методом магнитно-импульсной обработки.

Идея работы – восстановление структуры поврежденной области трубопровода путем заваривания микротрещин индукционным локальным нагревом, создаваемым высокоэнергетическим электромагнитным импульсом.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения следующих задач:

1. Провести анализ и обобщение результатов отечественных и зарубежных исследований по теме диссертации.
2. Разработка индукторных устройств для реализации эффективных режимов магнитно-импульсной обработки магистральных нефтегазопроводов.
3. Экспериментальное исследование влияния магнитно-импульсной обработки на прочностные свойства дефектных участков нефтегазопроводов.
4. Экспериментальные исследования влияния магнитно-импульсной обработки на дефектное состояние нефтегазопроводов, содержащих трещины различных форм и геометрических размеров.
5. Разработка рекомендаций по наиболее эффективным областям применения магнитно-импульсной обработки, с учетом формы и геометрических размеров дефектов.

Научная новизна работы:

1. В результате металлографических исследований экспериментально установлен эффект заваривания вершин трещин в металле трубопровода под воздействием локального индукционного нагрева, вызываемого высокоэнергетическим электромагнитным импульсом. Исследовано влияние на указанный эффект формы, геометрических размеров трещин, а также их расположения относительно поверхности трубопровода.
2. Экспериментально установлено повышение ударной вязкости (на 14%) поврежденного участка металла трубопровода после магнитно-импульсной обработки вследствие образования более однородной структуры.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Обнаружен эффект заваривания, расплавления вершин трещин и уменьшения их размеров после проведения магнитно-импульсной обработки, что приводит к уменьшению коэффициента интенсивности напряжений в области этих вершин и к повышению ударной вязкости поврежденной области трубопровода.

2. Разработан технологический процесс обработки дефектных участков нефтегазопроводов, включающий в себя выбор соответствующего режима работы магнитно-импульсной установки и технологической оснастки.

3. Установлено повышение прочности и остаточного ресурса дефектных участков нефтегазопроводов после проведения магнитно-импульсной обработки.

4. Разработано индукторное устройство для реализации магнитно-импульсной обработки магистральных нефтегазопроводов разного диаметра.

5. Результаты диссертации использованы в деятельности ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» в области восстановления дефектных участков газопроводов с целью повышения остаточного ресурса, что подтверждается актом внедрения № ББ/2960 от 15.03.2024.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач был применен комплексный метод исследований, включающий анализ теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации. Использовалось аттестованное и поверенное специализированное оборудование, на котором исследовались вырезанные из магистральных газопроводов образцы с различными видами дефектов.

Основные защищаемые положения:

1. Экспериментально обоснована возможность применения магнитно-импульсной обработки для восстановления нефтегазопроводов с трещиноподобными дефектами.

2. Магнитно-импульсная обработка приводит к повышению прочностных свойств и остаточного ресурса дефектных участков нефтегазопроводов за счет структурных изменений в виде измельчения зерен с образованием более однородной равномерной структуры.

Степень достоверности и обоснованность научных положений и рекомендаций обусловлена тем, что защищаемые положения, выводы и рекомендации, разработанные в диссертации, базируются на строгих теоретических подходах, теоретически и экспериментально обоснованных математических моделях. Досто-

верность результатов работы подтверждается совпадением экспериментальных данных с результатами общепризнанных исследований по теме диссертации.

Апробация результатов

Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: XVI Международная учебно-научная конференция "Трубопроводный транспорт-2021" (Уфа, 2021); Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям (Владивосток, 2021); Международная конференция "Рассохинские чтения-2022,г (Ухта, 2022); VI Международной молодежной научной конференции «Tatarstan UpExPro 2022» (Казань, 2022); XVIII Международная учебно-научная конференция "Трубопроводный транспорт-2021" (Уфа, 2023).

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 магнитно-импульсной обработки на прочностные свойства дефектных участков нефтегазопроводов, участии в написании научных работ по теме диссертации.

Публикации. Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 2 патента.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 125 наименований. Диссертация изложена на 141 странице машинописного текста, содержит 78 рисунков и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе осуществлен аналитический обзор предполагаемых моделей зарождения и роста дефектов сплошности в металлических конструкциях, а также теоретический анализ напряженно-деформированного состояния в области данных дефектов. Проведен анализ причин аварийных ситуаций на объектах трубопроводного транспорта. Выполнен анализ существующих методов восстановления сплошности в металлических конструкциях в целом, и в магистральных нефтегазопроводах в частности, с учетом преимуществ и недостатков каждого метода.

Во второй главе подробно описаны состав магнитно-импульсной установки и принцип её работы, проведен анализ выбора материалов для изготовления индукторов для магнитно-импульсной обработки, изложены физические основы процесса магнитно-импульсной обработки, а также выполнено теоретическое исследование механизма воздействия высокоэнергетического электромагнитного поля на дефекты сплошности металлов.

В третьей главе проведены экспериментальные исследования по определению влияния магнитно-импульсной обработки на прочностные свойства магистральных газопроводов, содержащих коррозионное растрескивание под напряжением (КРН). Описана методика проведения исследования, а также представлены технические характеристики используемого оборудования. Определялось влияние магнитно-импульсной обработки при различных режимах работы на ударную вязкость дефектных участков газопроводов. Выполнены металлографические исследования для оценки влияния магнитно-импульсной обработки на микроструктуру обработанных участков газопроводов.

В четвертой главе проведены экспериментальные исследования с целью оценки возможности залечивания микротрещин в стенках нефтегазопроводов магнитно-импульсной обработкой.

Описана методика проведения исследования, а также представлены технические характеристики используемого оборудования. Эксперименты осуществлялись при разных режимах обработки с использованием образцов, содержащих микротрещины различных форм и геометрических размеров. Определены границы применения магнитно-импульсной обработки с учетом размеров и формы трещин, при которых данный метод является наиболее эффективным.

В пятой главе представлены технологические особенности магнитно-импульсной обработки с учетом её преимуществ и недостатков. Также составлены рекомендации по практическому использованию и опытно-промышленному внедрению результатов исследований.

В заключении представлены обобщенные выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решенными задачами.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях.

1. Экспериментально обоснована возможность применения магнитно-импульсной обработки для восстановления нефтегазопроводов с трещиноподобными дефектами.

Для оценки возможности восстановления участков нефтегазопроводов с трещиноподобными дефектами методом магнитно-импульсной обработки, а также для определения области эффективного применения рекомендуемой технологии, были проведены экспериментальные исследования, включающие в себя обработку дефектных участков нефтегазопроводов магнитно-импульсным воздействием с различными параметрами импульсной нагрузки. Магнитно-импульсная обработка образцов производилась на магнитно-импульсной установке МИУ-40кДж-СУ с помощью многовиткового цилиндрического индуктора. В качестве материала для исследования из бывшего в эксплуатации магистрального газопровода $\varnothing 1220 \times 18,0$ мм, изготовленного из низколегированной стали 17Г1С, была изготовлена серия образцов размерами 55×15 мм. Образцы содержали центральную макротрещину, распространяющуюся от внешней поверхности вглубь металла газопровода. Глубина тре-

щины составила 13 мм, а среднее раскрытие – 2.3мм. Концам макротрещины присвоены номера 1 и 2 (рисунок 1).

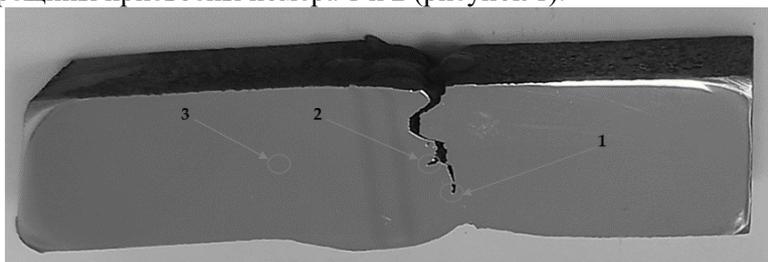


Рисунок 1– Боковая поверхность образца №1 после процессов шлифовки и полировки

С помощью оптического микроскопа Olympus BX51 осуществлялась съемка состояния вершин трещин до и после каждого режима обработки. Для более детального анализа изменений состояния вершин трещины после магнитно-импульсного воздействия были проведены металлографические исследования с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ-NANO SEM3000).

Рисунок 2 показывает изображение исходного состояния конца макротрещины №1 (рисунок 1), полученное микроскопом при 100-кратном увеличении. На рисунке 2 наблюдается микротрещина, распространяющаяся от конца №1 вглубь металла, длина которой составила 711.2 мкм, а среднее раскрытие - 65 мкм. Также на микротрещине выделены две зоны: зона, а – вершина микротрещины, и зона (б), расположенная ближе к области инициации микротрещины.

Состояние зоны (а) (рисунок 2) до и после магнитно-импульсной обработки с параметрами: энергия 10 кДж, амплитуда разрядного тока 76 кА, изображено на рисунке 3.

Рисунок 3 показывает, что режим МИО-10кДж вызвал локальный нагрев, приведший к точечному расплавлению краев микротрещины и образованию оксидов (рисунок 3–б). Кроме того, наблюдается отделение микроучастков с краев трещины (обозначено номером 1). Это явление можно объяснить воздействием на поверхность образца высокого импульсного давления, образовавшегося в рабочей зоне индуктора в результате отталкивания магнитных полей индуктора и вихревых токов.

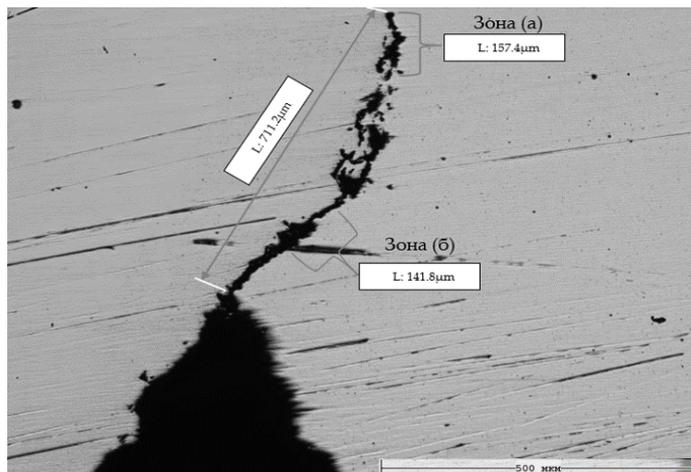


Рисунок 2 – Изображение исходного состояния конца макротрещины №1

Изображение состояния конца макротрещины №1 (рисунок 1) после магнитно-импульсной обработки с параметрами: энергия 20 кДж, амплитуда разрядного тока 88 кА, представлено на рисунке 4.

Рисунок 4 иллюстрирует последствия локального нагрева в области вершины макротрещины №1, проявленные возникновением зоны термического влияния. Это подтверждается появлением цветов побежалости стали. Температура у вершины микротрещины №1 достигла значения плавления стали, что подтверждается расплавлением микроучастков, отделившихся от краев вершины после первого режима обработки (обозначены номером 1 на рисунке 3-б), а также закристаллизовавшимися микробрызгами от расплавленного металла на поверхности микрошлифа.

Рисунок 5 показывает состояние зоны (а) (рисунок 2) после применения магнитно-импульсной обработки с энергией 20 кДж. Изображение получено с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ-NANO SEM3000) при 250-ом увеличении.

На рисунке 5 наблюдается заполнение вершины микротрещины (зона а – рисунок 2) расплавленным металлом после проведения магнитно-импульсной обработки с энергией 20 кДж. Длина зоны, заполненной расплавленным металлом, составила 214.4 мкм. Более того, отмечается выброс расплавленного металла с краев внутрь трещины что подтверждает возникновение термических сжимающих напряжений, вызванных неоднородным локальным нагревом в области вершины трещины.

Состояние зоны, расположенной ближе к области инициации микротрещины №1 (зона б – рисунок 2) до и после магнитно-импульсной обработки с параметрами: энергия 20 кДж, амплитуда разрядного тока 88 кА, представлено на рисунке 6. Изображения были получены с помощью растрового электронного микроскопа при 250-кратном увеличении.

Рисунок 6 демонстрирует последствия локального нагрева краев трещины, при этом признаки расплавления металла не были обнаружены.

Рисунки 6 и 5 показывают, что расплавление металла произошло в области вершины микротрещины (зона а – рисунок 2), в то время в то время как на более удаленных от вершины участках (зона б – рисунок 2), признаки плавления отсутствовали. Данное наблюдение свидетельствует о том, что наибольшая активность индуцированных электромагнитных полей сосредотачивается именно у вершин микротрещин, где происходит концентрация вихревых токов. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что данная технология эффективна для восстановления микродефектов на ранних стадиях их развития, поскольку трещина заварилась в области вершины на протяжении 241 мкм, в то время как у начала трещины не были обнаружены признаки плавления. Следовательно, постоянное совершенствование методов диагностики с использованием специальных методов контроля для раннего выявления таких дефектов является необходимым для повышения эффективности магнитно-импульсной обработки.

Изображения состояния конца макротрещины №2 (рисунок 1) после магнитно-импульсной обработки представлены на рисунке 7.

Изображения получены с помощью микроскопа при 500-кратном увеличении.

На рисунке 7 также наблюдаются последствия значительного повышения температуры, отраженные в появлении цветов побежалости. При этом признаки плавления металла при МИО-10кДж отсутствовали (рисунок 7-а). Это можно объяснить тем, что вершина №2 имеет широкую невытянутую форму (маленькая глубина относительно раскрытия), что привело к рассеиванию вихревых токов и, как следствие, температура возле вершины при обработке с энергией 10 кДж не достигла значения, необходимого для расплавления металла. После магнитно-импульсной обработки с энергией 20 кДж было отмечено расплавление краев вершины №2 с образованием кратера (рисунок 7-б). Это можно объяснить тем, что плотность вихревых токов достигла значений, необходимых для повышения температуры до точки плавления металла. Однако, было зафиксировано увеличение длины микротрещины, при этом произошло затупление вершины, так как шероховатый рельеф поверхность края трещины стал более сглаженным (рисунок 7-б), что, в свою очередь, вызывают более равномерное распределение напряжений вдоль трещины при нагрузке, приводя к снижению коэффициента интенсивности напряжений и, соответственно, снижению риска дальнейшего роста.

На основе выше представленных результатов можно сделать вывод о том, что предлагаемая технология является более эффективным методом для восстановления нефтегазопроводов, содержащих трещины с более узкой и вытянутой вершиной, где создаются более благоприятные условия для протекания вихревых токов и их концентрации. С другой стороны, для трещин с широкой круглой формой данная технология способствует замедлению дальнейшего роста, поскольку она приводит к затуплению этих вершин и, как следствие, к снижению концентрации напряжений при нагрузке.

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния магнитно-импульсной обработки, проведенной при различных параметрах импульсной нагрузки, на дефектные участки газопроводов, содержащих микротрещины различных форм и раз-

меров. Определены области эффективного применения рекомендуемой технологии с учетом формы и размеров дефектов.

Таким образом, первое положение, вынесенное на защиту, считается доказанным.

2. Магнитно-импульсная обработка приводит к повышению прочностных свойств и остаточного ресурса дефектных участков нефтегазопроводов за счет структурных изменений в виде измельчения зерен с образованием более однородной равномерной структуры.

В рамках исследования влияния магнитно-импульсной обработки на прочностные свойства дефектных участков нефтегазопроводов была проведена серия испытаний на ударную вязкость по методу Шарпи в соответствии с ГОСТ 9454-78. В качестве материала для испытаний из бывшего в эксплуатации магистрального газопровода Ø720×16,0 мм, изготовленного из низколегированной стали 17Г1С, была изготовлена серия образцов размерами 50×15 мм. Образцы содержали поверхностные продольные трещины, по внешним признакам соответствующие коррозионному растрескиванию под напряжением (КРН). Глубина трещин составила до 1,5 мм, а ширина раскрытия – менее 0,1 мм. Образцы были разделены на две группы. Образцы группы №1 были испытаны на ударную вязкость без предварительной магнитно-импульсной обработки. Образцы группы №2 были подвергнуты магнитно-импульсному воздействию при энергии, запасенной в конденсаторах магнитно-импульсной установки, составившей 5 кДж, после чего проходили испытания на ударную вязкость. Магнитно-импульсная обработка образцов группы №2 производилась на магнитно-импульсной установке МИУ-5кДж-ЗВЭЖ с помощью многовиткового цилиндрического индуктора. Испытания на ударную вязкость проводились на маятниковом копре ИО 5003-03 одиночным ударом при комнатной температуре 25 °С, скорость движения маятника в момент удара составила 5,32 м.с⁻¹.

Расчет ударной вязкости по итогам всех видов замеров был выполнен по формуле (1):

$$a_k = \frac{A_k}{F} \quad (1)$$

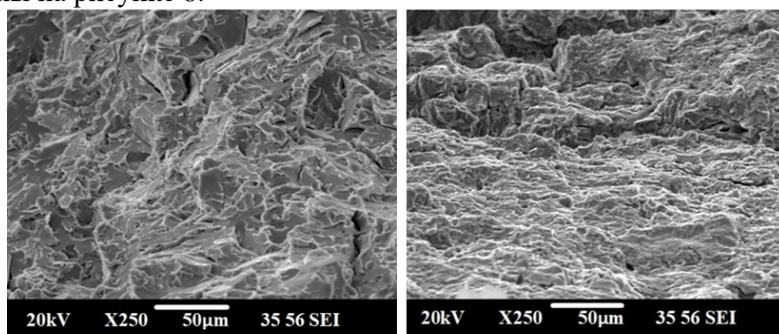
где – работа, затраченная на разрушение образца, Дж; F– площадь поперечного сечения образца, по которому произошло разрушение см².

По полученным результатам испытаний на ударную вязкость были составлены таблицы 1 и 2.

Рассмотрев полученные результаты, отмечается повышение ударной вязкости обработанных образцов магнитно-импульсным воздействием на 14% по сравнению с необработанными образцами.

С целью обоснования полученных результатов испытаний на ударную вязкость было исследовано поперечное сечение образцов, по которому произошло разрушение. Исследования проводились при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ-NANO SEM3000) при 250-кратном увеличении.

Полученные снимки поверхности излома образцов изображены на рисунке 8.



– а –

– б –

Рисунок 8 – Изображения поверхности излома образцов после испытания на ударную вязкость
а – без МИО; б – после МИО-5кДж

На рисунке 8. наблюдаются заостренные кромки границ излома необработанного образца (рисунок 8 – а), что соответствует признакам хрупкого разрушения. В то время как, снимок излома обработанного образца (рисунок 8 – б) показывает более сглаженные поверхности излома по сравнению с необработанным образцом, о чем свидетельствуют признаки вязкого разрушения (элементы ча-

шечного рельефа). Таким образом, полученные снимки излома до и после магнитно-импульсной обработки дают возможность говорить о том, что воздействие на металл образцов высокоэнергетическим электромагнитным воздействием привело к структурным изменениям, так как разрушение металла после обработки стало более вязким, т.е. материал образца стал более устойчивым к разрушению.

Также была исследована микроструктура металла образцов с помощью оптического микроскопа Olympus VX51. Металлографические снимки микроструктуры металла образцов, представлены на рисунке 9.

Рисунок 9 демонстрирует структурные изменения в виде измельчения микроструктуры после проведения магнитно-импульсной обработки (рисунок 9 –б). Измельчение структуры металла сопровождается увеличением числа межзеренных границ, что, в свою очередь, может улучшить его прочностные характеристики. Увеличение числа межзеренных границ может предотвращать или замедлять развитие трещин и деформацию материала, что также может способствовать повышению его вязкости. Кроме того, наблюдается сформирование более однородной и равномерной структуры металла после обработки, что делает его более устойчивым к различным видам разрушения, включая ударное разрушение.

Таким образом, опираясь на полученные результаты исследования, первое положение, вынесенное на защиту, считается доказанным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной задачи восстановления работоспособности дефектных участков нефтегазопроводов, повышения их надежности и долговечности методом магнитно-импульсной обработки.

1. Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований показали, что на сегодняшний день отсутствуют методы восстановления сплошности нефтегазопроводов, которые могли бы применяться в полевых условиях без необходимости замены дефектных участков.

2. Анализ аварийных ситуаций на объектах трубопроводного транспорта показывает регулярное обнаружение дефектов сплошности в очагах разрушения нефтегазопроводов, что свидетельствует о высокой опасности данных дефектов и необходимости их устранения на ранних стадиях их развития.

3. Экспериментально установлено повышение прочностных свойств дефектных участков нефтегазопроводов после проведения магнитно-импульсной обработки: ударная вязкость обработанных образцов повысилась на 14% по сравнению с необработанными образцами. Более того, металлографические исследования микроструктуры металла образцов показали, что магнитно-импульсная обработка вызвала структурные изменения, приводящие к упрочнению металла.

4. Разработано индукторное устройство для реализации эффективных режимов магнитно-импульсной обработки нефтегазопроводов.

5. Экспериментально обоснована возможность применения магнитно-импульсной обработки для восстановления нефтегазопроводов, содержащих трещиноподобные дефекты, с определением наиболее эффективных областей её применения с учетом формы и геометрических размеров дефектов.

Перспективы дальнейшего развития темы заключаются в проведении дополнительных экспериментальных исследования возможности применения данной технологии в сложных полевых условиях. Такие испытания дадут более точную оценку целесообразности применения данной технологии.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Щипачев, А.М. Современные методы заживления микродефектов в трубопроводах / А.М. Щипачев, М. Алжадли // Газовая промышленность. - 2021. - №7. - С.110 – 6.

2. Щипачев, А.М. Повышение эксплуатационных свойств дефектных участков нефтегазопроводов с помощью магнитно-импульсной / А.М. Щипачев, М. Алжадли // Транспорт и хранение

нефтепродуктов и углеводородного сырья– 2021. -№ (5-6) -С.48–53.
DOI:10.24412/0131-4270-2021-5-6-48-53

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Щипачев, А.М. Магнитно-импульсная обработка для повышения прочностных свойств дефектных участков нефте-и газопроводов/ А.М. Щипачев, **М. Алжадли** // Известия Томского политехнического университета. - 2023. -№334(5) - С.7–16. DOI: 10.18799/24131830/2023/5/4011

4. Schipachev, A. Evaluating the Effectiveness of Magnetic-Pulse Treatment for Healing Continuity Defects in the Metal of Oil and Gas Pipelines/A. Schipachev, **М. Aljadly**, O. Ganzulenko, D. Chernikov, V. Razzhivin, R. Yusupov// Metals.- 2023. №13(11) – 1875
<https://doi.org/10.3390/met13111875>

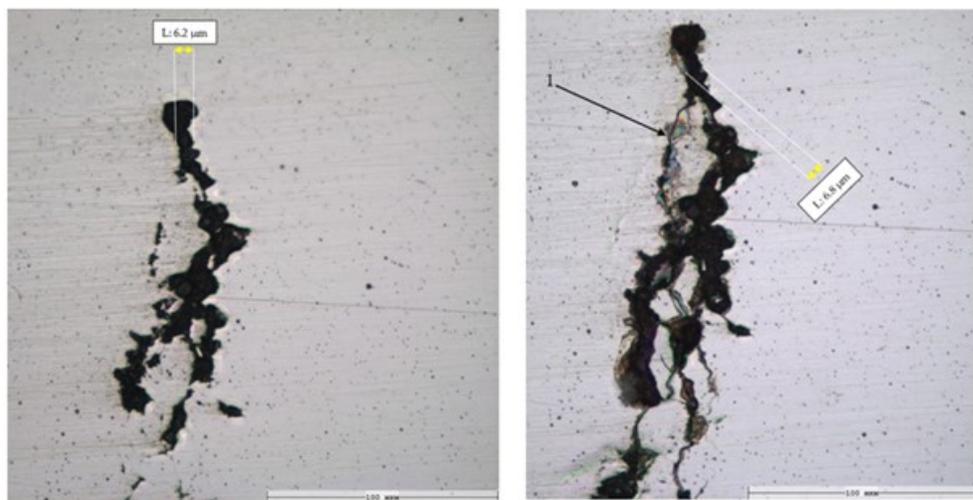
Публикации в прочих изданиях:

5. Schipachev, A. M. Restoration of the Serviceability of Defective Sections of Oil and Gas Pipelines Using the Magnetic-Pulse Method/ A. M. Schipachev, O. N. Koshkur, **М. Aljadly**, S.O. Mikhin, A.E Korchikov// In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2022. - №988 (2). – 022064. – DOI 10.1088/1755-1315/988/2/022064

Патенты:

6. Патент на полезную модель № 213592 U1 Российская Федерация, МПК В23Р 6/00, Н05В 6/36, С21D 9/08. устройство для магнитно-импульсной обработки трубопроводов: № 2022115485: заявл. 08.06.2022: опубл. 16.09.2022 / А. М. Щипачев, **М. Алжадли**; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет".

7. Патент № 2805733 С1 Российская Федерация, МПК В23Р 6/00, С21D 9/08, Н05В 6/36. Устройство для устранения дефектов структуры металла на внутренних стенках трубопровода магнитно-импульсной обработкой: № 2023103918: заявл. 21.02.2023: опубл. 23.10.2023 / А. М. Щипачев, **М. Алжадли**, А. И. Соломенникова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет".



– а –

– б –

Рисунок 3 – Изображения состояния зоны (а), получены оптическим микроскопом при 500-кратном увеличении
а – до МИО; б – после МИО-10кДж

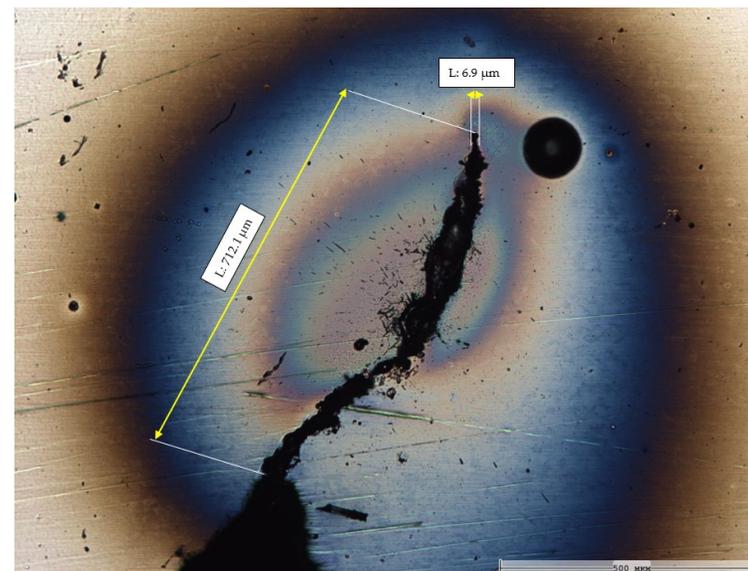
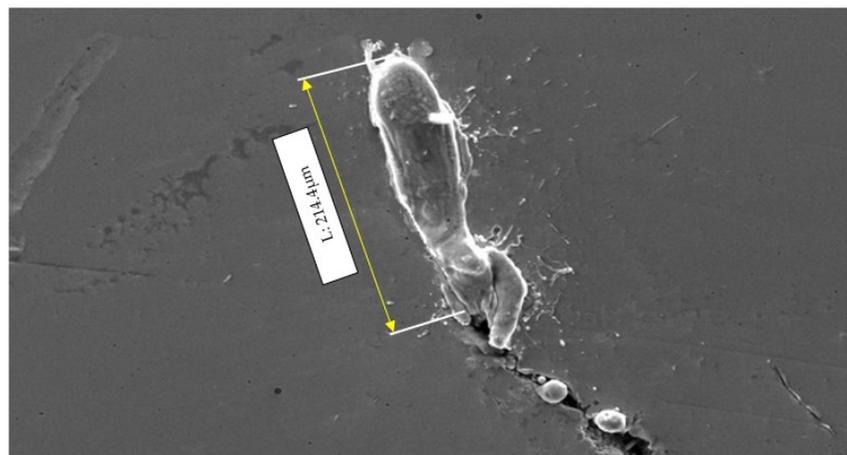
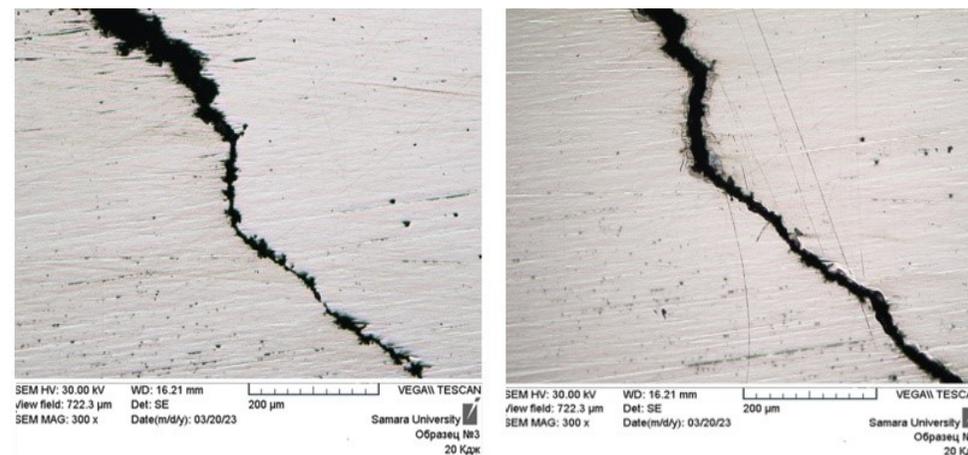


Рисунок 4 – Изображение конца макротрещины №1 после МИО-20 кДж, получено при 100– кратном увеличении микроскопа



SEM HV: 30.00 kV WD: 16.21 mm VEGA\\ TESCAN
view field: 722.3 micrometers Det: SE 200 micrometers
SEM MAG: 300 x Date(m/d/y): 03/20/23
Samara University
Образец №3
20 Кдж

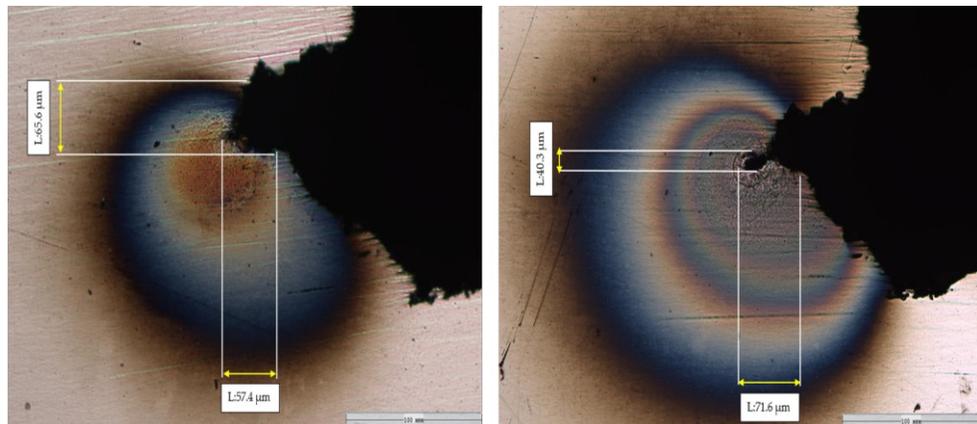
Рисунок 5 – Состояние зоны (а) после МИО-20кДж



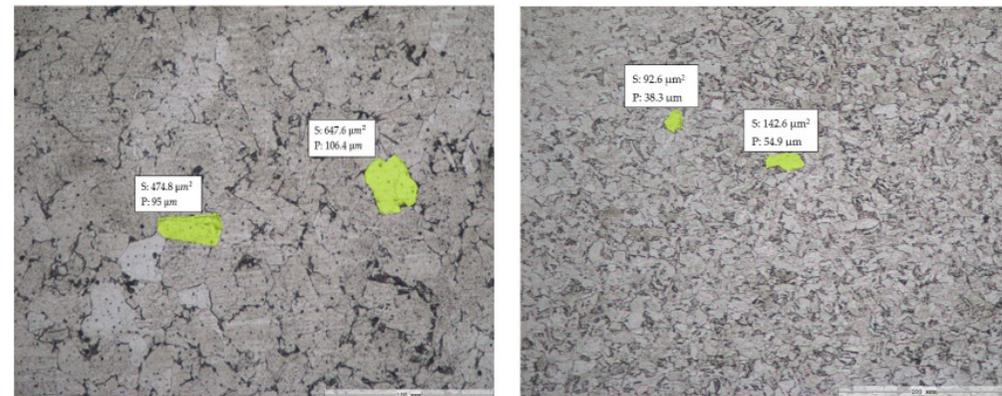
– а –

– б –

Рисунок 6 – Изображения состояния зоны (б), расположенной ближе к области инициации микротрещины №1
а – исходное состояние до МИО; б – после МИО-20кДж



– а –
 – б –
 Рисунок 7– Изображения состояния конца макротрещины №2 после магнитно-импульсной обработки
 а – после МИО-10кДж; б – после МИО-20кДж



– а –
 – б –
 Рисунок 9 – Металлографические снимки микроструктуры металла образцов, получены оптическим микроскопом при 500-ом увеличении
 а – без МИО; б – после МИО-5кДж

Таблица 1– Результаты испытаний на ударную вязкость для образцов группы №1 (без магнитно-импульсной обработки)

№ образца	Ак, (Дж)	F,(см²)	ак,(Дж/см²)	Среднее значение, Дж/см²
1	48.2	0.82	58.8	61
2	49	0.822	59.6	
3	50.06	0.823	60.82	
4	51	0.824	62	
5	51.3	0.825	62.2	
6	51.7	0.827	62.5	

Таблица 2 – Результаты испытаний на ударную вязкость для образцов группы №4 (после магнитно-импульсной обработки МИО-5 кДж)

№ образца	Ак,(Дж)	F,(см²)	ак,(Дж/см²)	Среднее значение, Дж/см²
1	55,5	0,819	67,7	68,4
2	56,2	0,82	68,5	
3	56,5	0,823	68,65	
4	55,8	0,822	68	
5	56,7	0,825	68,7	
6	57,2	0,828	69	