

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

На правах рукописи

Алжадли Мохаммед



ВОССТАНОВЛЕНИЕ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ С ТРЕЩИНОПОДОБНЫМИ
ДЕФЕКТАМИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Специальность 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и
хранилищ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Щипачев А.М.

Санкт-Петербург – 2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТРАНЕНИЯ ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА И ОЦЕНКА ИХ ОПАСНОСТИ.....	12
1.1 Анализ процессов зарождения и роста усталостных трещин в элементах конструкций трубопроводного транспорта.....	13
1.1.1 Зарождение усталостных трещин.....	13
1.1.2 Анализ напряженно – деформированного состояния (НДС) в окрестности трещин.....	16
1.2 Оценка степени опасности дефектов сплошности элементов конструкций трубопроводного транспорта.....	23
1.3 Анализ существующих методов устранения дефектов сплошности нагруженных металлических конструкциях.....	30
1.3.1 Электронно-лучевой метод обработки (ЭЛО).....	31
1.3.2 Метод термической обработки.....	34
1.3.3 Восстановление сплошности металлов методом лазерной обработки (ЛО).....	35
1.3.4 Обработка несплошностей металлов давлением.....	37
1.4 Выводы по главе 1.....	39
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДЕФЕКТЫ СПЛОШНОСТИ МЕТАЛЛОВ.....	41
1.1 Состав магнитно-импульсной установки (МИУ) и принцип её работы.....	42
2.2 Механизм воздействия магнитно-импульсной обработки на дефекты сплошности металлов.....	48
2.3 Индукторы для магнитно-импульсной обработки.....	56

2.4 Выводы по главе 2.....	59
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТА МЕТАЛЛА НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ	60
3.1 Материалы и методика исследования.....	61
3.1.1 Приготовление образцов	61
3.1.2 Характеристики методов исследования.....	69
3.2 Анализ полученных результатов исследования.....	72
3.3 Выводы по главе 3	82
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДЕФЕКТЫ СПЛОШНОСТИ МЕТАЛЛА НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ	84
4.1 Методологические основы и методы исследования.....	85
4.1.1 Материалы исследования и их характеристики.....	85
4.1.2 Характеристики методов исследования и применяемых приборов	87
МИУ-40	88
4.2 Исследование влияния МИО на дефектное состояние микротрещины	90
4.3 Исследование влияния МИО на микроструктуры металла	109
4.4 Выводы по главе 4.....	112
ГЛАВА 5 ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	115
5.1 Технологические особенности магнитно-импульсной обработки (МИО).....	115
5.2 Технологические рекомендации по обработке деталей магнитно-импульсным воздействием.....	119
5.3 Выводы по главе 5	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	124
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения результатов диссертационной работы ..	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патенты на объекты интеллектуальной собственности	140

ВВЕДЕНИЕ

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 [86].

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 [86].

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 [86].

Одним из перспективных методов обработки дефектных участков нефтегазопроводов, является магнитно-импульсная обработка (МИО), при которой на образец оказывается интенсивное комплексное теплосиловое воздействие [86]. 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. Глушченков 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 [86]. Данные эксперименты не позволили изучить эффективность магнитно-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.

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 интенсивного 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 (Приложение А).

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.

На защиту выносятся следующие 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 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 совпадением экспериментальных данных с результатами общепризнанных исследований по теме диссертации.

Апробация результатов исследования

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 (пункты списка литературы № 86 ,87 ,88 ,118 ,119), 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, в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 2 патента (Приложение Б).

Структура работы. 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.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТРАНЕНИЯ ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА И ОЦЕНКА ИХ ОПАСНОСТИ

В современных условиях эксплуатации нефтегазопроводов постоянно возрастают требования к их работоспособности. Одной из важнейших задач является предотвращение ранних усталостных разрушений их элементов [47]. Однако, зачастую традиционные методы ремонта не позволяют существенно повысить надежность и долговечность элементов трубопроводного транспорта. Таким образом, возникает крупная проблема, заключающаяся в необходимости разработки более эффективных методов ремонта, направленных на повышение работоспособности элементов конструкций трубопроводов с минимальными затратами и временем ремонтных работ.

Одними из основных широко распространенных технологических дефектов в металле конструкций трубопроводного транспорта являются дефекты сплошности – как исходные, так и деформационные, зарождающиеся и увеличивающиеся при пластическом деформировании [47]. Особенность дефектов сплошности заключается в том, что эти дефекты в процессе нагружения вызывают концентрацию напряжений вблизи их вершин, что приводит к быстрому увеличению их количества и геометрических размеров с последующим слиянием последних и образованием крупных несплошностей [86]. При длительном воздействии нагрузок, таких как циклические нагрузки в условиях эксплуатации, эти участки с повышенными напряжениями могут вызвать развитие усталостных трещин и как следствие, снижаются эксплуатационные, прочностные свойства и срок службы конструкций трубопроводов, находящихся под нагрузкой [86].

Проведенные анализы причин аварийных ситуаций на объектах трубопроводного транспорта свидетельствуют о том, что возникновение, накопление и распространение дефектов сплошности в металле трубопроводов являются основной причиной снижения их надёжности и преждевременного выхода из строя [86]. Таким образом, глубокое изучение механизма возникновения

и роста данных дефектов, их преждевременная диагностика и компетентное устранение способствуют снижению риска аварий и трудозатрат на ремонтные работы, а также увеличению срока службы элементов трубопроводного транспорта.

Усталостное разрушение представляет собой сложный физический процесс, состоящий из двух стадий: стадии зарождения и стадии стабильного роста дефектов. Особую опасность представляют микротрещины, которые могут в течение срока эксплуатации расти и перейти во вторую стадию роста [92,106,122]. С целью оценки ресурса эксплуатационных конструкций, содержащих усталостные микротрещины, было разработано множество математических моделей и формул. Эти модели позволяют провести расчеты, определяющие количество циклов нагружения, в течение которого микротрещины могут достичь критического размера, при котором происходит разрушение [47, 107, 112, 115, 116].

1.1 Анализ процессов зарождения и роста усталостных трещин в элементах конструкций трубопроводного транспорта.

1.1.1 Зарождение усталостных трещин

Дефекты кристаллической структуры металла, такие как скольжение, двойники, дислокации, включения и др., служат концентратором напряжений. Это делает их источником зарождения микротрещин, которые могут под нагрузкой расти до критического размера, при котором происходит разрушение [77]. Соответственно, нарушение сплошности металла рассматривается как элемент дефектной структуры, конечной стадией развития которого, является разрушения деталей.

Процесс возникновения и развития трещин включает следующие стадии [56, 81]:

- зарождение трещин субмикроскопических размеров;
- стабильный рост трещины (слияние отдельных субмикротрещин в микротрещины);

- Дальнейшее развитие трещин до критических размеров и разрушения металла.

Следует отметить, что способность зародившихся микротрещин расти и перейти

во вторую стадию развития тесно связано с напряженно-деформированным состоянием эксплуатационного элемента.

В металлических материалах, в частности, в трубопроводах, подвергающихся воздействию циклическим нагружением, возникают микропластические деформации, которые всегда предшествуют зарождению трещин.

Известно, что кристаллизация металлов происходит при их охлаждении из жидкого состояния в твердое. При этом формируется кристаллическая решетка, пример которой показан на рисунке 1.1.

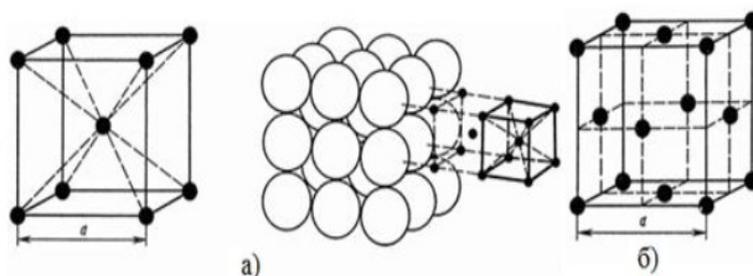


Рисунок 1.1– Кристаллические решетки металлов:

а) объемно центрированная кубическая (ОЦК); б) гранецентрированная кубическая (ГЦК) [30]

Выше представленные решетки являются идеальными. Однако, в реальности, кристаллические решетки часто обладают различными дефектами, в том числе точечными и линейными дефектами [14, 31].

На рисунке 1.2 изображены разные дефекты точечного вида.

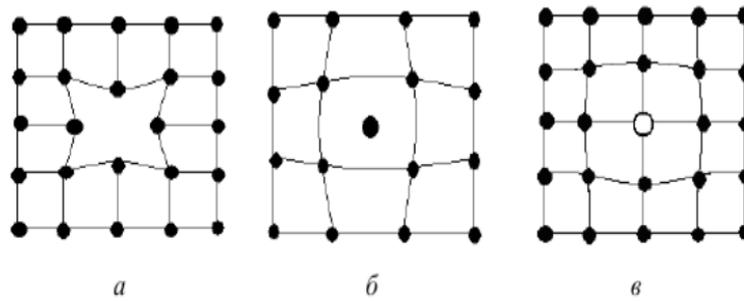


Рисунок. 1.2 – Кристаллические решетки с различными точечными дефектами
[14]

а) вакансия; б) межузельный атом; в) примесный атом

Вышеуказанные дефекты могут, при определенных условиях, служить источником зарождения трещин.

Механизм возникновения и развития несплошностей в металлах привлек внимание многих исследователей в том числе Бюргера Д.М., Рида Б.Т., Стро А.Н., а также советских ученых Ивановой В.С., Владимирова В.И., Гуревича С.Е.

Разнородные дислокационные механизмы зарождения трещин были предложены. Однако наиболее распространенным считается дислокационный механизм, основанный на принципе слиянии дислокаций (дислокационный механизм образования трещин). Согласно данной модели, дислокации движутся под действием напряжений, пока не встретят препятствия в кристаллической структуре. Этими препятствиями могут служить включения избыточных фаз, границы зерен, двойников, сидячие дислокации и т.д. [61].

Наличие препятствий приводит к блокированию продвижения дислокаций и их скоплению в окрестности этих препятствий. У вершины такого скопления дислокаций происходит локальная концентрация напряжения приводя к образованию микротрещин.

Данная модель предполагает необходимость осуществления пластической деформации, достаточной для формирования плоского скопления дислокаций.

На рисунке 1.3 показано наиболее известные дислокационные модели зарождения микротрещин.

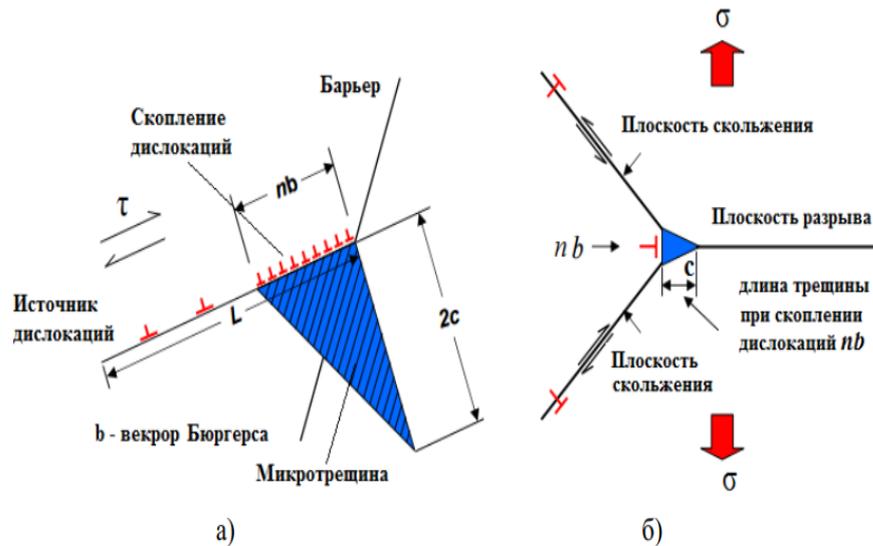


Рисунок 1.3 – Дислокационные модели зарождения микротрещин

а) Зинера - Стро; б) Котрелла [52]

Модели Зинера – Стро предполагает, что границы зерен служит препятствиями для скоплений дислокаций. Дислокации тесно прижимаются друг к другу под действием напряжений. В результате, экстраплоскости дислокации могут оказаться настолько близко, что могут сливаться, образуя микротрещины [27].

Модель Котрелла предполагает, что в качестве препятствий служит пересечение двух плоскостей скольжения, на которых скапливаются дислокации. Трещина образуется в плоскости скольжения дислокаций под действием растягивающих напряжений в верхней части скопления [50].

Таким образом, трещины могут образоваться различными механизмами в зависимости от типа кристаллической решетки минерала и природы микроструктуры. При этом, устойчивость металла к разрушению и характер разрушения определяются условиями, в которых оказалась трещина, а также особенностями ее дальнейшего развития.

1.1.2 Анализ напряженно – деформированного состояния (НДС) в окрестности трещин

Особенность усталостных трещин обусловлена тем, что данные дефекты, в процессе нагружения, вызывают концентрацию напряжений вблизи их вершин, что

стимулирует их быстрый рост вплоть до разрушения деталей. Таким образом, анализ напряженно - деформированного состояния (НДС) в окрестностях трещин представляет собой неотъемлемую необходимость для более глубокого понимания механизма развития трещин и прогнозирования их поведения под нагрузкой.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования процессов зарождения и роста микротрещин подтверждают, что вероятность стабильного роста трещин в конструкциях, подверженных переменным нагрузкам, высока. Это объясняется возможностью слияния микротрещин между собой и, в конечном итоге, так как микротрещин могут сливаться друг с другом и, в итоге, образованием магистральных трещин.

Зарождение и развитие микротрещин - это многоэтапный процесс, конечной стадией которого является разрушение. Важно подчеркнуть, что зафиксированные физическими методами неразрушающего контроля трещины, как правило, не являются началом процесса разрушения. На самом деле, этот процесс начинается гораздо раньше, но несовершенство применяемых методов контроля препятствует их раннему выявлению, ограничивая возможности предупреждения о возможных будущих проблемах, связанных с наличием и ростом указанных дефектов [53].

На рисунке 1.4 представлены периоды зарождения и роста трещин.



Рисунок. 1.4 – Периоды зарождения и роста трещин [53]

В случае нахождения металла под действием циклических нагрузок, определяется число циклов от момента обнаружения трещин до момента достижения критического размера, соответствующего условию $K_1 = K_{1c}$, где K_1 — коэффициент интенсивности напряжений, зависящий от номинальных напряжений тела с трещиной и её размеров ; K_{1c} коэффициент интенсивности напряжений в

момент разрушения. Полученный результат определяет цикловую долговечность металла [11]. На рисунок 1.5 представлена зависимость скорость роста трещин da/dn (мм/цикл или м/цикл) от размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK . Размаха коэффициента интенсивности напряжений определяется как разность максимального и минимального значения коэффициента интенсивности напряжений $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ [64,18].

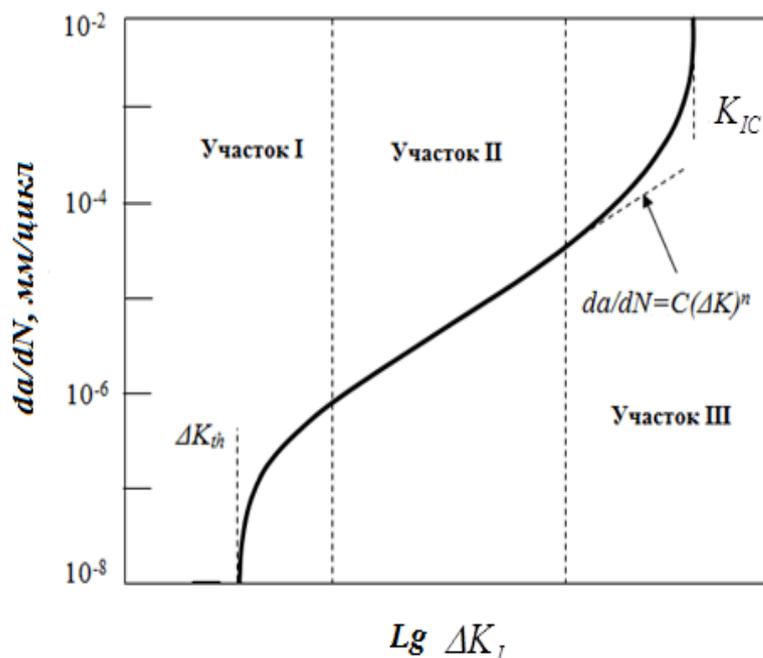


Рисунок 1.5 – Диаграмма усталостного разрушения [18]

Представленная диаграмма состоит из трёх зон. Первая зона, или так называемая зона припорогового роста усталостной трещины, характеризуется скоростью роста трещин находится в диапазоне $10^{-8} \dots 10^{-6}$ мм/цикл и ниже [17]. Скорость роста трещины в этой зоне чувствительна к микроструктуре материала. В случае, если коэффициент напряжения ниже порогового значения K_{th} , то усталостные трещины не будут распространяться [92,95].

Вторая зона представляет собой период стабильного роста. Скорость роста трещины варьируется от $10^{-5} \dots 10^{-3}$ мм/цикл. На данном этапе доминирует циклическое скольжение и сдвиг.

Третья зона, или так называемая зона ускоренного роста усталостной трещины, начинается при достижении напряжений значений, близких к значению

K_{1c} . Скорость роста трещины в этой зоне превышает 10^{-3} мм/цикл. У вершины трещины наблюдаются значительные пластические деформации, связанные с высоким уровнем напряжений.

Диаграмма усталостного разрушения ограничена двумя основными значениями: пороговое значение K_{th} , ниже которого усталостная трещина не будет развиваться, и критическое значение K_{1c} , при котором металл разрушается.

Пороговое значение K_{th} имеет большое значение при эксплуатации конструкций. Так как оно представляет собой безопасную границу уровня переменных напряжений σ_{th} .

Коэффициент интенсивности напряжений K_1 , является ключевым параметром в механике разрушения, определяющим уровень напряжений в окрестности трещины, где развивается зона пластических деформаций [26, 57, 82].

Величина коэффициент K_1 зависит от величины и характера внешних нагрузок, формы и размеров тела, расположения и длины трещин, а также от условий нагружения (температуры, скорости, среды и т.д.).

С помощью коэффициента интенсивности напряжений K_1 было получено важнейшее критерие оценки прочности металлов с трещиной, получившее название «коэффициент интенсивности напряжений в момент разрушения K_{1c} , которое характеризует предельные условия прочности материалов с дефектами, такими как трещины, при нагружении [39, 96, 104]. Т.е. разрушение произойдет когда коэффициент интенсивности напряжений K_1 достигнет значения K_{1c} согласно выражению (1.1) [38].

$$K_1 = K_{1c} \quad (1.1)$$

Прочности металлов с трещиной можно также оценить с помощью коэффициента раскрытия трещин КРТ [59, 75].

Взаимосвязь между коэффициентом раскрытия трещин КРТ и вязкостью разрушения K_{1c} можно выразить следующем уравнением (1.2) [79]:

$$K_{PT} = \frac{4 K_{Ic}^2}{\Pi E \sigma_t} \quad (1.2)$$

Значение коэффициента раскрытия трещины зависит от значений пластических деформаций у вершины трещины при разрушении [3, 54].

В случае малых пластических деформаций, раскрытие трещины определяется упругими деформациями по следующей формуле (1.3) [58]:

$$K_{PT} = 2V = \frac{4\sigma}{\Pi E} \sqrt{a^2 - x^2} \quad (1.3)$$

На рисунке 1.6 изображена система раскрытия трещины при малых пластических деформациях.

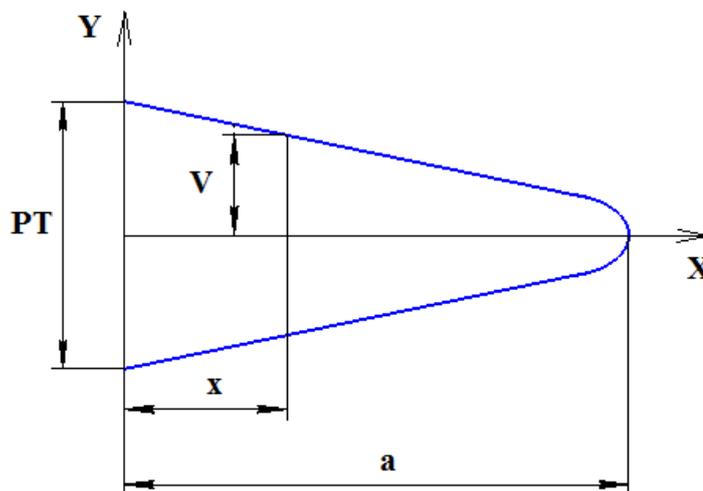


Рисунок 1.6 – Система раскрытия трещины при малых пластических деформациях [58]

При значительных деформациях коэффициент раскрытия трещины определяется, учитывая величину зоны пластических деформаций r_p^* . Таким образом, для определения коэффициента раскрытия используется длина (x) трещины, прибавлена к ней величина r_p^* .

С учетом изложенного, раскрытие трещин у их вершины может быть выражена следующей формулой (1.4) [63]:

$$K_{PT} = \frac{2K}{E} \sqrt{\frac{2r_p^{*2}}{\Pi}} \quad (1.4)$$

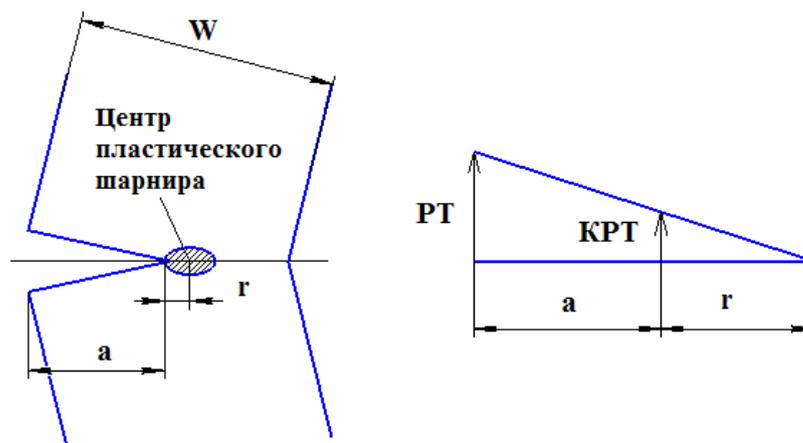


Рисунок 1.7 – Геометрическая зависимость раскрытия трещины от центра пластических деформаций [63]

В работах [108,123] был проведен анализ напряженно - деформированного состояния (НДС) в вершине трещины с помощью метода конечных элементов (рисунок 1.8).

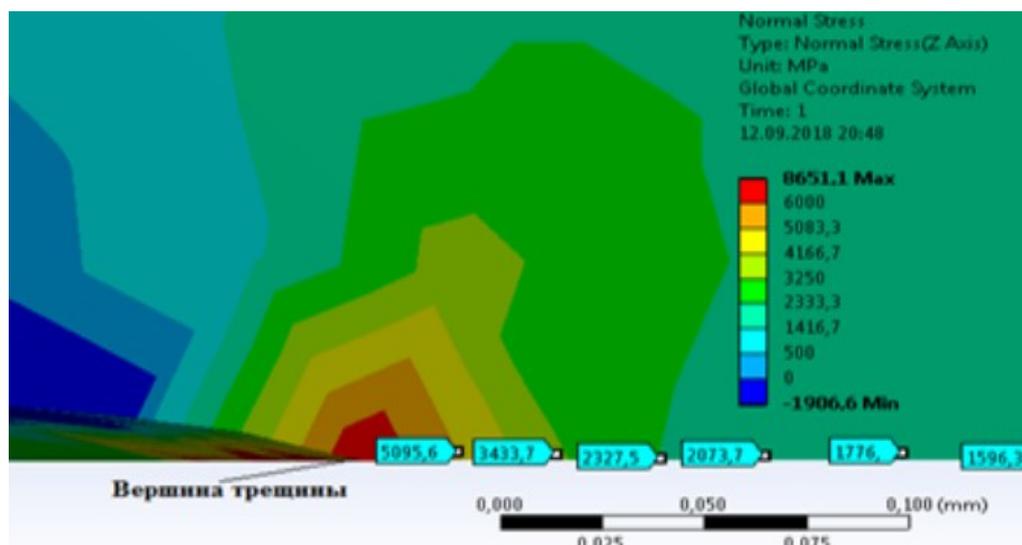


Рисунок 1.8 – Анализ напряженно-деформированного состояния у вершины трещины [108]

В результате проведенного исследования была построена диаграмма изменений напряжений в окрестности трещины в зависимости от расстояния относительно её вершин. Соответствующий график представлен на рисунке 1.9.

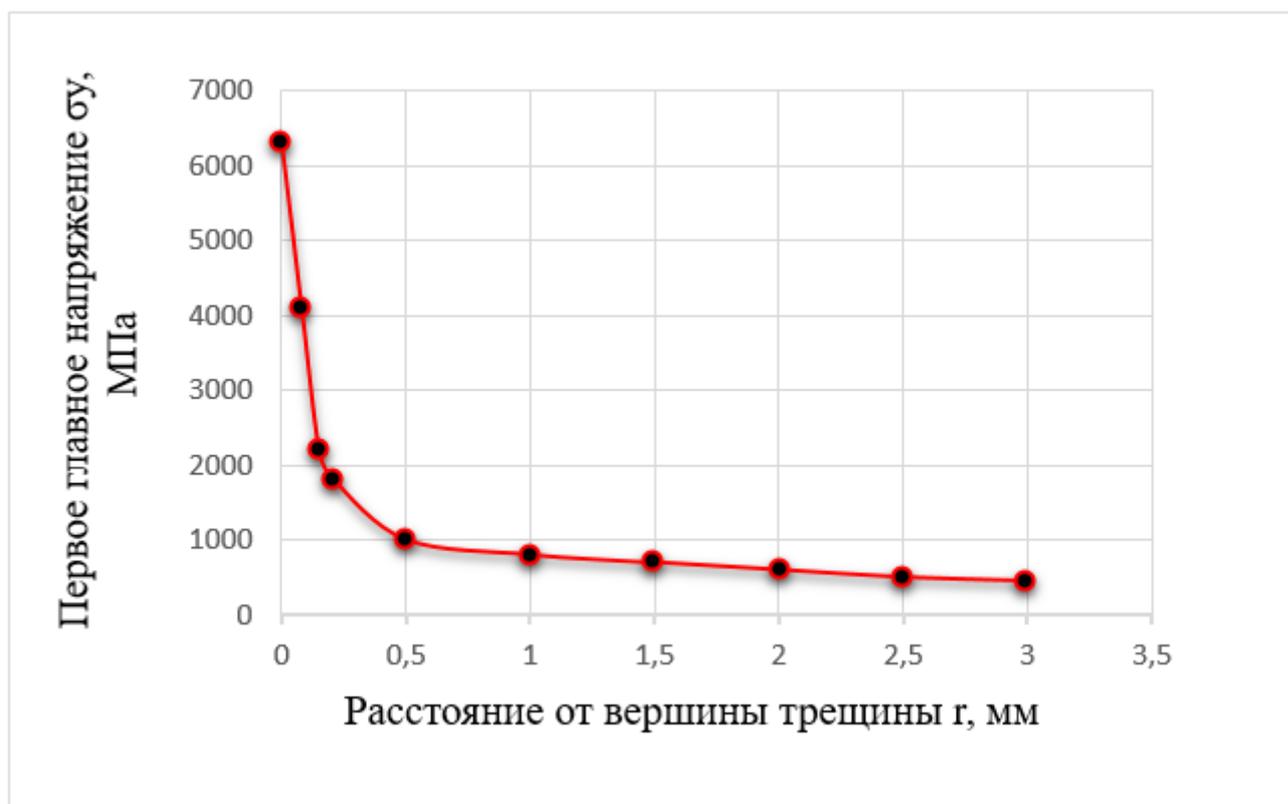


Рисунок 1.9 – Распределения напряжений в окрестности трещины [121]

Из полученного графика можно отметить, что напряжение вблизи вершины трещины значительно превышает средние напряжения на достаточном расстоянии от неё. Полученные результаты свидетельствуют о том, что трещины вызывают концентрации напряжений в своих окрестностях, преимущественно кольцевых напряжений, обусловленных внутренним давлением в трубопроводе. Концентрация напряжений способствует быстрому развитию трещин с последующим переходом в более опасную стадию, и, в конечном итоге, разрушение металла.

В свете проведенного анализа аналитических и экспериментальных исследований можно отметить, что скорость роста трещин связана с характеристиками нагрузки, такими как её величина, форма и механизм её приложения к детали. Кроме того, распространения трещин тесно связано с механическими свойствами металла, в частности его пластическими свойствами. Высокая пластичность стали приводит к большим затратам энергии на

формирование пластической зоны в устье трещины, что в свою очередь может увеличивать продолжительность роста трещины при одинаковых силовых воздействиях.

1.2 Оценка степени опасности дефектов сплошности элементов конструкций трубопроводного транспорта

Анализ аварийных ситуаций на объектах нефтегазовой промышленности способствует определению их причин и, соответственно, уменьшению их количества, что обеспечивает безопасную долговечную эксплуатацию трубопроводов.

Одним из главных путём решения стоящей задачи являются исследование дефектного состояния конструкций трубопроводного транспорта, определение причин возникших дефектов и оценки их опасности.

В работе [34], проводились гидравлические испытания участка магистрального газопровода, изготовленного из низколегированной стали 17Г1С, содержащего микродефекты с наибольшим средним диаметром трещин в пределах 10-15 мкм. Магистральный газопровод находился в эксплуатации в течение 25 лет и имеет габаритные размеры $\text{Ø}1220 \times 18,0$ мм. Гидравлические испытания проводились в ступенчато-циклическом режиме, включающем несколько блоков нагружения внутренним давлением до разрушения. Разрушением труб произошло в месте расположения дефектов на 8-й ступени при давлении 10,9 Мпа [88].

Исследования механических характеристик показали, что предел прочности трубы в зоне дефектов снизилась на 20% по сравнению с бездефектной зоной той же трубы (рисунок 1.10).

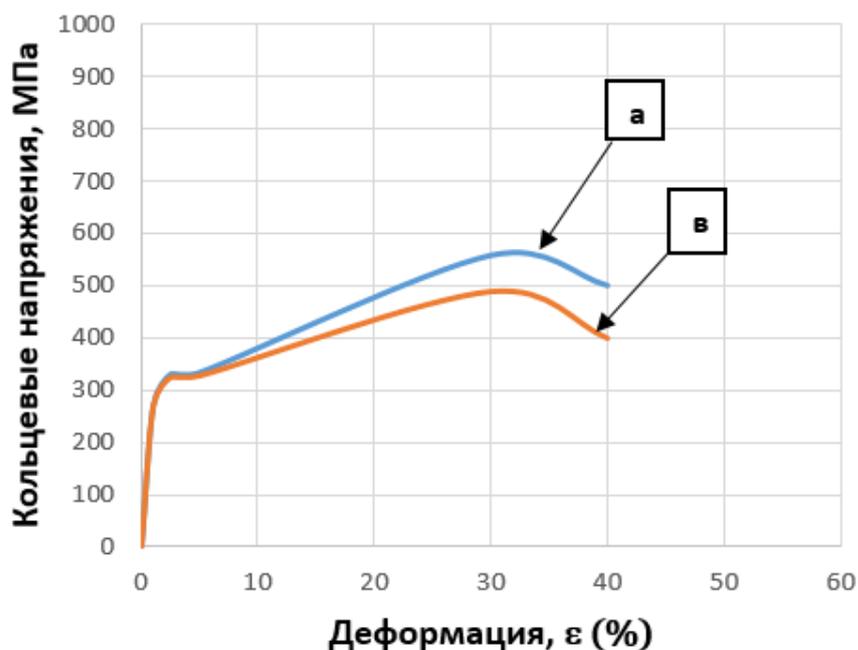


Рисунок 1.10 – Диаграммы напряжение – деформация испытанных образцов из стали 17Г1С [88]

а – бездефектные образцы; б – образцы с дефектами

В работе [37] были проведены экспериментальные испытания труб диаметром 1420 мм и толщиной 16.6 мм, вырезанных их линейной части МГ «Ухта - Торжок III». Участки трубопровода содержали расслоения и микропоры. Гидравлические испытания проводились в ступенчато-циклическом режиме до разрушения труб [88]. Полученные результаты свидетельствовали о том, что дефектная зона трубы деформировалась более интенсивно по сравнению с бездефектными участками. Дефектная зона подвергалась упругопластическим деформациям при значениях кольцевых и продольных напряжений, составляющих 70% и 35 % соответственно от среднего фактического предела текучести, стали [88].

В работе [76], с целью оценки сопротивляемости трубопроводов разрушению от воздействия внутреннего давления, были проведены гидравлические испытания. В качестве материала исследования использовалась трубная плетень, вырезанная из участка 634-661 км МГ «Оренбург – Новопсков» с диаметром 1200 мм и толщиной стенки 14,1мм. Указанная труба находилась в эксплуатации в течение 32 лет и

содержала внутренние несплошности, расположенные на разной глубине по толщине стенки, включая зоны коррозионных дефектов (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Распределение зон дефектов по участку трубопровода [76]

Номер дефектной зоны	Протяженность дефектной зоны, мм	Глубина дефектной зоны, мм
№ 1	670	3,1
№ 2	520	2,5
№ 3	420	3,6
№ 4	620	2,2
№ 5	430	2,6
№ 6	310	5,1

Гидравлические испытания проводились в статическом режиме, последовательно увеличивая давление до рабочего (75 атм.), затем до испытательного (82,5 атм.) с целью контроля пластической деформации в зоне дефектов и, в конечном итоге, до разрушения.

Разрушение трубы произошло в дефектные зоны №3 при внутреннем давлении 139 атм (рисунок 1.11).



Рисунок 1.11 – Зона разрушения трубы, где а – общий вид разрушившейся трубы; б – очаг разрушения [76]

Исследование излома разрушения показало неоднородность (рисунок 1.12).



Рисунок 1.12 – Излом разрушения трубы, где
 а – участки хрупких сколов; б, в – отрыв слоев металла; г – расслоение
 металла в зоне разрушения [76]

В исследовании [15] рассмотрены причины аварийной ситуации, произошедшей в 2003 году на участке магистрального газопровода (МГ) в Ухте. Трубопровод, изготовленный из стали 09Г2С, эксплуатировался более 25 лет. Расчетное внутреннее давление в момент разрушения составляло 4,54 МПа.

Анализ поверхности разрушения показал, что начальная точка разрушения находилась на внутренней стороне трубы, перпендикулярно кольцевому шву, в зоне термического влияния на соединении основного металла и сварного шва. Обширность очага разрушения указывает на длительный процесс роста трещины.

Трещина развивалась постепенно и равномерно вдоль основного металла, перпендикулярно максимальным растягивающим (окружным) напряжениям, что подтверждается наличием усталостных бороздок. Рост трещины прекратился в области сварного шва.

Схема излома с усталостной трещиной длиной 30 мм и глубиной 3,5 мм с тремя характерными основными зонами изображена на рисунке 1. 13.

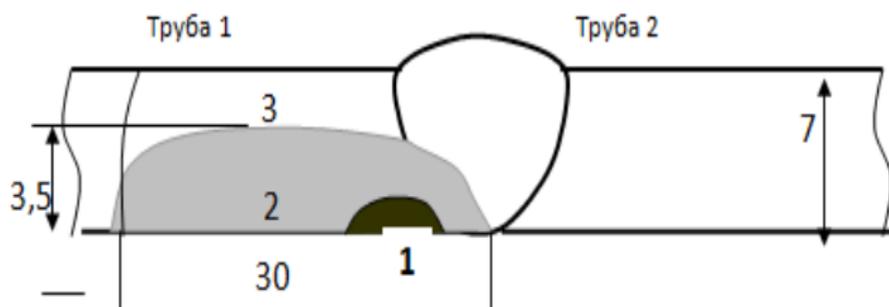


Рисунок 1.13 – Схема развития усталостной трещины:

1 – очаг возникновения трещины; 2 – зона усталостного распространения трещины; 3 – зона ускоренного развития трещины [15]

Исследования показали, что причиной аварии стало зарождение и накопление усталостных трещин в процессе эксплуатации в условиях Республики Коми (Ухта). Также было установлено деформационное старение металла трубопровода, который был построен более 25 лет назад.

В работе [114] проведен анализ причин аварии на одном участке МГ Республики Саха (Якутия) (2008 г.). Авария представляла собой разрушения коренной задвижки фонтанной арматуры. Задвижка находилась в эксплуатации более 20 лет.

Разрушение произошло в области перехода от корпуса задвижки к фланцевому соединению, излома задвижки представлен на рисунке 1.14.



Рисунок 1.14 – Излом задвижки фонтанной арматуры [114]

Исследования излома разрушения установили, что авария произошла вследствие образования усталостных микротрещин и их развития в течение длительной эксплуатации, что привело к хрупкому разрушению металла.

В момент разрушения давление на устье арматуры составило 10,5 МПа, а температура окружающего воздуха равнялась – 34°C. Схема разрушения представлена на рисунке 1.15.



Рисунок 1.15 – Схема разрушения задвижки [114]

Рисунок 1.15 показывает два расположенных рядом очага разрушения, зону ускоренного развития трещины и зону долома. Очаг разрушения, расположенный с внутренней стороны задвижки, состоит из слившихся многочисленных очагов усталостных микротрещин. Усталостное разрушение развивалось под влиянием пульсирующего внутреннего давления.

В работе [78] проведен анализ причин аварийного разрушения газопровода, изготовленного из спирально-шовной трубы диаметром 377 и толщиной стенки 6 мм. Газопровод находился в эксплуатации более 25 лет.

По результатам исследования было установлено наличие магистральной трещиной, которая возникла в основном металле трубы и распространялся вдоль тела трубы, охватывая границы сварного шва. Также был выявлен короткий участок излома длиной 45 мм, толщина которого (составила 5 мм) меньше толщины

соседних участков, что может свидетельствовать о большей степени пластической деформации, предшествующей разрушению.

Исследователи предположили, что очагом разрушения служило данный участок, поскольку из него первоначально исходили усталостные микротрещины при пластическом деформировании по толщине стенки. Затем, в течение длительной эксплуатации, эти дефекты распространялись в обе стороны от очага в продольном направлении.

На рисунке 1.16 представлен общий вид излома стенки газопровода.

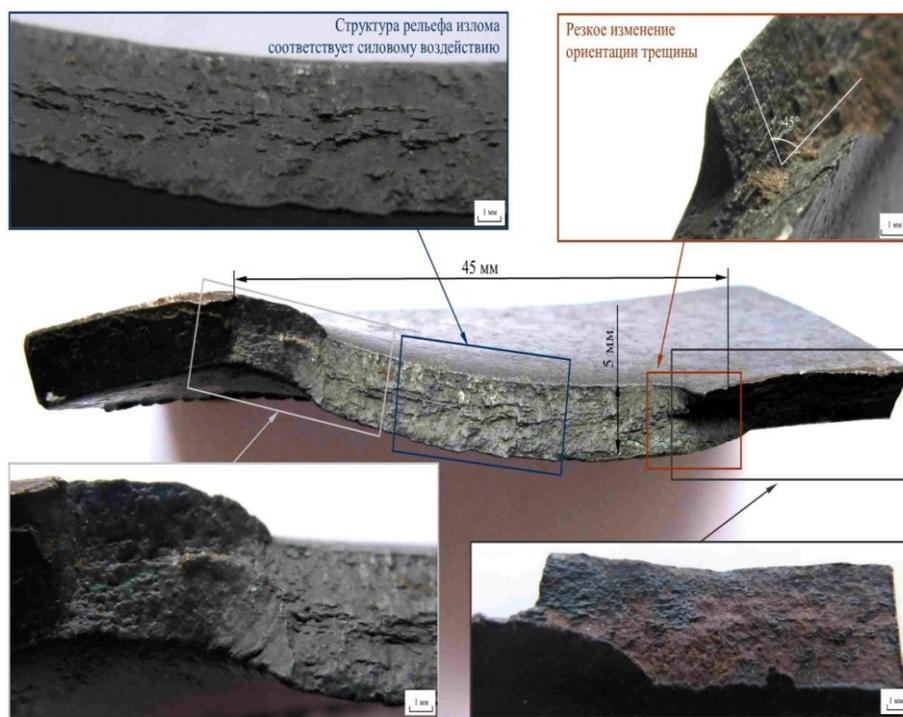


Рисунок 1.16 – общий вид излома стенки газопровода [78]

Анализ аварийных ситуаций на объектах нефтегазовой промышленности, а также исследования изменений физико-механического состояния и прочностных свойств металла трубы при длительной эксплуатации позволяет сделать вывод о том, что дефекты сплошности конструкций трубопроводного транспорта, в частности, усталостных микротрещин, представляют собой серьезную угрозу, обусловлена их широким распространением, трудностью их выявления и высокой способностью роста под нагрузкой, что может привести к разрушению деталей.

Проведенный выше анализ подтверждает необходимость преждевременного выявления дефектов и их устранения на ранней стадии их развития, прежде чем как они достигнут критического размера, единственным выходом после которого становится замена дефектного участка. Решение стоящей перед нами задачи требует регулярного мониторинга трещин с использованием более эффективных методов, что позволяет отслеживать рост трещин и определять момент, когда они становятся неустойчивыми. Кроме этого, необходимо постоянное совершенствование процессов ремонта с применением более эффективных методов, которые могли бы принимать не только в стендовых и лабораторных условиях, но и также в полевых условиях.

1.3 Анализ существующих методов устранения дефектов сплошности нагруженных металлических конструкций

Дефекты сплошности структуры материала, не смотря на их микроразмеры, представляет собой большую опасность, поскольку они являются микроконцентраторами напряжений, местами повышенных локальных деформаций, приводящих к развитию усталостных трещин при эксплуатации деталей [47]. Дефекты сплошности, напрямую снижают усталостную долговечность деталей, соответственно их эксплуатационные свойства. Таким образом, необходимо решить проблему, связанную с возникновением и ростом данных дефектов в металле рабочих элементов [47].

Решение представленной задачи может существенно повысить эксплуатационные свойства деталей и узлов, в первую очередь, их усталостную долговечность.

Для решения стоящей перед нами задачи необходимо находить наиболее эффективные технологические методы раннего выявления дефектов, отслеживания их роста, а также их устранения перед, тем как они становится нестабильными.

На сегодняшний день был разработан ряд методов выявления дефектов сплошности, включая контроль проникающими веществами, ультразвуковой

метод, рентгеновский метод, магнитопорошковый и вихретоковый контроль и другие.

Ремонт дефектных участков конструкций трубопроводного транспорта в большинстве случаев выполняется путем их замены: технология ремонта трудоемкая и дорогостоящая [16,86,101, 121].

В целях сокращения времени и стоимости ремонтных работ был разработан ряд методов ремонта, которые позволяют восстановить дефектные участки без необходимости их замены. Выбор метода ремонта или используемой комбинации методов определяется в зависимости от многих факторов, в том числе: характер, положение, ориентация и доступность дефектов, применение компонентов, ожидаемая точность ремонта, доступность инструментов, марки стали, толщины изделия и необходимого опыта.

Ниже представлен анализ существующих, на сегодняшний день, методов устранения дефектов сплошности металлических конструкций в целом и элементов трубопроводного транспорта в частности, с учетом преимуществ и недостатков каждого метода. Из применяемых методов ремонта рассмотрены следующие: электронно-лучевая обработка, термическая обработка, обработка лазерными ударными волнами, и также импульсные методы обработки.

1.3.1 Электронно-лучевой метод обработки (ЭЛО)

Данный метод основан на принципе взаимодействия поверхности обрабатываемой детали с направленным на неё электронным лучом. При столкновении лучей с поверхностью детали, значительная часть кинетической энергии электронного луча преобразуется в тепловую энергию в тонком приповерхностном слое [96]. Этот процесс приводит к оплавлению с последующим затвердеванием металла с высокой скоростью). $10^3 \dots 10^7$ °C/с. В результате, количество поверхностных структурных дефектов снижается [88].

Толщина слоя, в котором происходит выделение энергии определяется по формуле (1.5) [96]:

$$h = 2.1 \cdot 10^{-12} \frac{V}{\rho} \quad (1.5)$$

где h – толщина слоя, см; V – ускоряющее напряжение, В; ρ – плотность материала, г/см³.

В работе [113] были проведены экспериментальных исследований влияния ЭЛО на плотность дефектов сплошности. В качестве материала заготовки была использована нержавеющая сталь AISI 310. В ходе исследований, металл был подвергнут облучению электронным пучком с различными катодными напряжениями (15, 25 и 35 кВ) [88]. В результате было установлено, что напряжение 15 кВ представляет собой минимальное значение, необходимое для заметного изменения поверхности металлических образцов. Графики изменения плотности трещин представлены на рисунке 1.17.

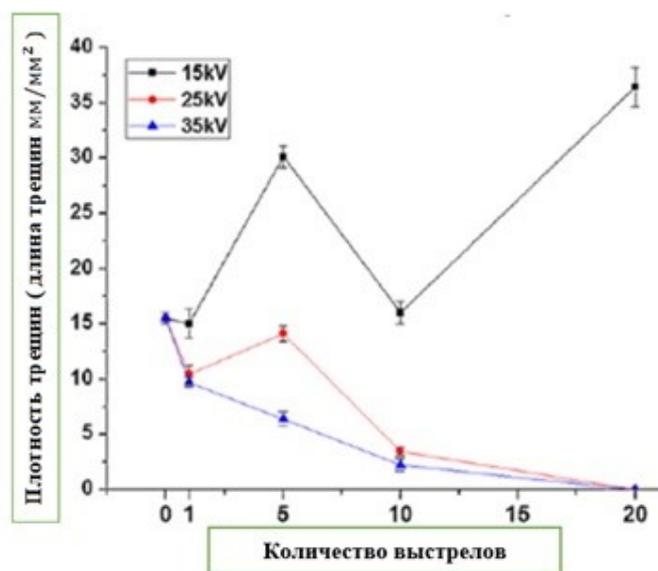


Рисунок 1.17 – Изменение плотности трещин в зависимости от катодного напряжения и количества выстрелов [113]

На рисунке 1.17 наблюдается увеличение плотности трещин после пяти выстрелов при катодном напряжении 15 кВ увеличилась. Данное явление можно объяснить тем, что испарение материала на приповерхностном слое привело к выявлению подповерхностных трещин. При напряжении 20 плотность трещин

существенно снижается после 10 выстрелов. При напряжении 35 кВ трещины полностью устраняются после 20 выстрелов.

Изменение плотности трещин при разных напряжениях представлены на рисунке 1.18.

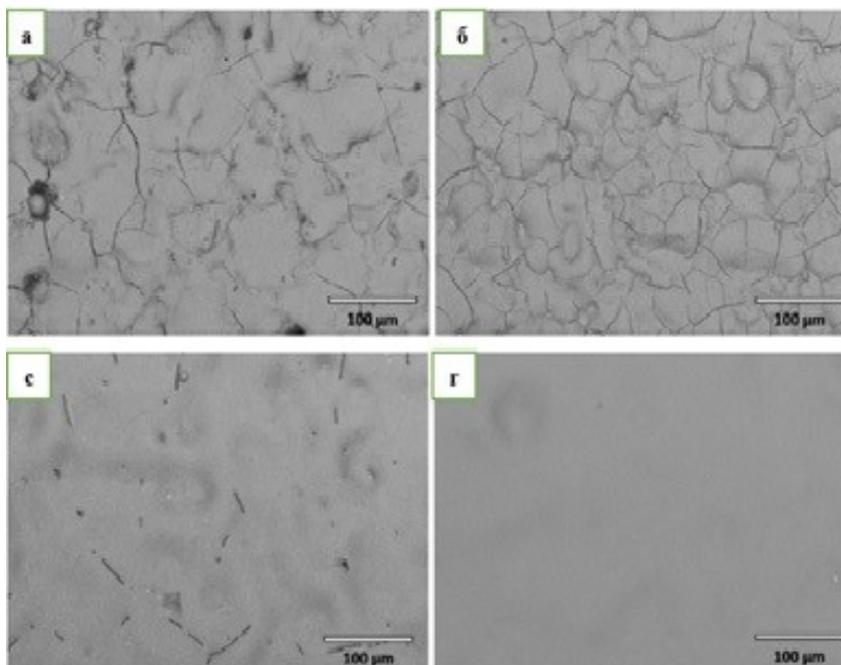


Рисунок 1.18 – Микроскопическое изображение изменения плотности трещин при разных значениях катодных напряжений

а – исходное состояние; б–напряжение 15 кВ, 20 выстрелов;

с – напряжение 25 кВ, 20 выстрелов; г– напряжение 35 кВ, 20 выстрелов [113]

Исследования показали, что электронно-импульсная обработка улучшает прочностные свойства и коррозионную стойкость металла [88]. Однако, опыт работы выявил, что данный метод может быть эффективным для устранения поверхностных и приповерхностных дефектов сплошности из-за небольшой глубины проникновения электронных лучей. Кроме этого, было установлено, что этот метод ограничивается эффективностью в отношении трещин микронных размеров [88].

1.3.2 Метод термической обработки

Данный метод основан на принципе самовосстановления металла, согласно которому атомная диффузия является источником материала, необходимого для залечивания дефектов структуры.

Обрабатываемая деталь нагревается до высокой температуры (в случае стали, от 1000 до 1300 °С), время выдержки при данной температуре – 40 часов. В связи с низкой атомной подвижностью металла и с целью повышения эффективности данного метода, образцы одновременно подвергаются значительной пластической деформации сжатия до 120 Н/мм². Затем образцы медленно охлаждаются со скоростью охлаждения. В данном методе ликвидация микродефектов происходит за счёт активации движения границ зёрен и стимуляции роста новых зёрен [95, 125].

На рисунке 1.19 изображена последовательность процесса залечивания трещин во время термообработки.

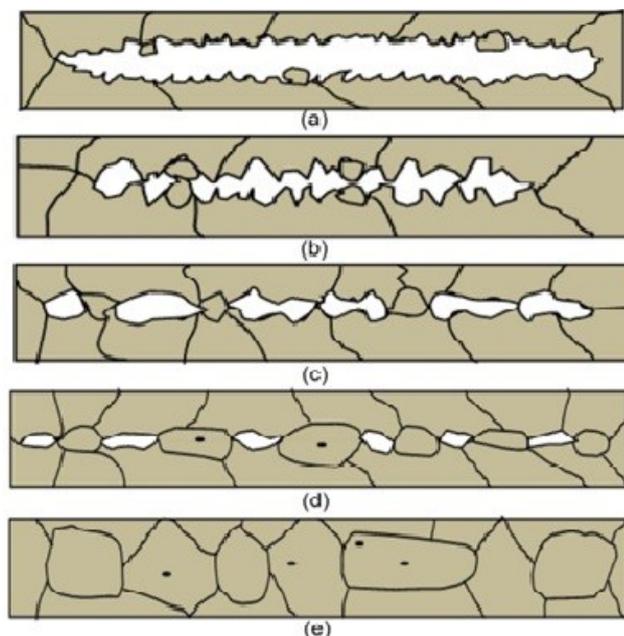


Рисунок 1.19 – Последовательность процесса залечивания трещин термической обработкой [125]

Рекристаллизация инициируется на поверхности трещин под воздействием высокой температуры, что иллюстрировано на рисунке 1.19 (а). В результате этого процесса формируются и увеличиваются мелкие кристаллические зёрна,

направленные к поверхности трещин, что приводит к их постепенному уменьшению, как показано на рисунке 1.19 (b). Ввиду неровной и выпуклой структуры поверхности трещины, начальное залечивание происходит в точках соприкосновения. Таким образом, исходная трещина претерпевает деление на более короткие трещины, как представлено на рисунке 1.19 (с,д). Процесс роста мелких кристаллических зерен продолжается до полного залечивания трещин, что отображено на рисунке 1.19 (е).

Трещины приводят к приросту свободной поверхностной энергии в металлах. Повышение уровня свободной поверхностной энергии, связанной с наличием трещин, может быть рассмотрен как внутреннюю движущую силу в процессе залечивания трещин. В то время как, пластическая деформация и нагрев действуют в качестве внешних движущих сил, процесс охлаждения после обработки дополнительно способствует облегчению процесса залечивания трещин.

В процессе залечивания можно выделить две стадии:

1. Движение атомов из матрицы к поверхности трещин;
2. Соединение берегов трещин.

Низкая атомная подвижность, высокая температура плавления металла трубопроводов, необходимость длительной выдержки при высокой температуре, вместе с большими затратами времени на ремонт, делают данный метод не рациональным для восстановления элементов трубопроводного транспорта.

1.3.3 Восстановление сплошности металлов методом лазерной обработки (ЛО)

В процессе лазерной обработки на поверхность металла направляется мощный лазерный луч, плотность и длительность его воздействия определяются в зависимости от характера обработки: нагрев или лазерный удар. В случае лазерного удара требуется максимальная плотность энергии излучения $10^8 \dots 10^{10}$ Вт/см² при времени воздействия $10^{-9} \dots 10^{-6}$ [88].

При лазерной ударной волне (ЛУВ) поверхность металла обрабатывается с целью избежания ее нагрева [13, 55]. Это достигается покрытием поверхности

непрозрачным, для лазерного излучения, материалом с низкой температурой испарения, таким как черная краска или металлическая фольга [69, 70]. Этот слой поглощает лазерную энергию и мгновенно испаряется, образуя высокотемпературную плазму, ограниченную с одной стороной поверхностью металла, а с другой – непрозрачным слоем (рисунок 1.20) [88]. Давление газа в этом ограниченном объеме резко возрастает до высоких значений (более 2 ГПа) и переходит в металл, создавая ударную волну, которая распространяется как в среде, так и в конструкции, что приводит к возникновению сжимающих напряжений в металле. Под действием этих напряжений микродефектные зоны пластически деформируются и их размер уменьшается. При повторных воздействиях лазерного импульса наблюдается дальнейшее уменьшение размеров дефектов, вплоть до их «схлопывания» [88].

Исследования проводились на стали 304 с использованием импульсного лазера, генерирующего выходную мощность 80-100 Дж с продолжительностью импульса около 20 нс. Исследования установили улучшение прочностных характеристик обрабатываемых образцов, включая увеличение предела упругости, текучести и прочности [88].

После обработки, образцы были испытаны на ударную вязкость с последующем исследованием изломов разрушения. Образцы, обработанные и необработанные, демонстрировали ямочный характер изломов

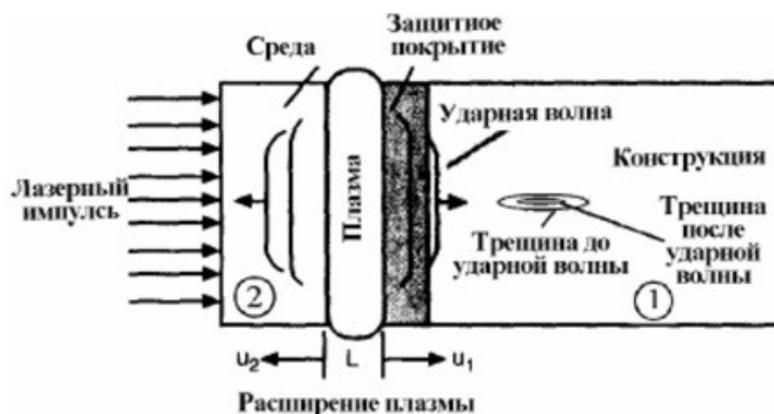


Рисунок 1.20 – Схема экспериментальной установки по залечиванию дефектов лазерной ударной волной [111]

Применение данного метода сопровождается повышенной опасностью, связанной с воздействием лазерных лучей, что требует строгого соблюдения санитарных норм и правил по использованию лазеров, что ограничивает применение данного метода в лабораторных и стендовых условиях. Кроме этого, данный метод эффективен для заличивания поверхностные и приповерхностные дефекты [88].

Упомянутые выше недостатков делают данный метод неэффективным для устранения несплошностей рабочих элементов трубопроводного транспорта.

1.3.4 Обработка несплошностей металлов давлением

Исследование возможности смыкания дефектов структуры металлов давлением, как статическим, так и импульсным, привлекло внимание многих ученых, в числе которых следует упомянуть В.М. Финкеля, Ю.И. Головина, А.М. Дмитриева, Б.В. Слезов, В.И. Бетехтина, В.И. Куманина, О.В. Попова, Н.Н. Беклемишева, В.Б. Юдаева, С.В. Власенкова, В.Е.Громова, Л.Б. Зуева, А.А. Буренина, Л.В. Ковтанюка, М.Кэррола, А. Холта, В. Херрмана и др. [47].

Для устранения дефектов сплошности необходимы высокие значения давления (до 2500 МПа), которые требуют использования специального оборудования. Это значительно увеличивает стоимость метода и делает его неприменимым для восстановления сплошности металла нефтегазопроводов. Кроме того, требование специализированного оборудования, сложности в мобилизации и необходимость тщательного контроля температуры создают значительные трудности для применения указанного метода в полевых условиях [47].

Одним из эффективных методов восстановления дефектных участков металлических конструкций является поверхностное пластическое деформирование (ППД). Этот метод вызывает пластическую деформацию поверхностного слоя, приводя к созданию остаточных сжимающих напряжений, изменению микрорельефа и улучшению структуры поверхности. ППД способствует повышению прочности и износостойкости конструкций, однако

высокая стоимость этого метода и небольшая глубина обработки делают его нерациональным для восстановления нефтегазопроводов [47].

Одним из направлений обработки металлов давлением является деформирование деталей с использованием высокоскоростных импульсов, создаваемых различными энергоносителями, такими как электрический разряд, электромагнитное поле и другие. Наиболее распространенным методом обработки под давлением является магнитно-импульсная обработка (МИО) [7, 51].

При МИО, на образец оказывается интенсивное комплексное теплосиловое воздействие. С одной стороны, давление магнитного поля распространяется по объему металла образца в виде волны сжатия, вызывая пластическую деформацию несплошностей и уменьшение их размеров [45, 96]. С другой стороны, в связи с тем, что электрический ток стремится протекать по направлению, обладающему наименьшим сопротивлением, а также при резкой смене его направления происходит концентрация индукционных токов и повышение их плотности у вершин трещины. Концентрация вихревых токов приводит к локальному неоднородному нагреву вершин дефектов, сопровождающемуся тепловым расширением и, как следствие, в контуре дефекта возникает термические сжимающие напряжения [86].

В области магнитно-импульсного метода обработки металлов особенно заметную роль играют работы Ю.Н. Алексеева, М.А. Анучина, О.Д. Антоненкова, К.Н. Богоявленского, В.К. Борисевича, Ш.У. Галиева и других учёных [47]. Однако, указанные работы основаны на принципе смыкания дефектов сплошности давлением магнитно-импульсного поля. В то время, как залечивание несплошностей путем их заваривания под воздействием индукционного нагрева не было рассмотрено.

Анализ предшествующих работ по возможности устранения дефектов сплошности металла с помощью МИО показал, что ученые базировались на функции давления, в то время как, залечивание несплошностей путем высокотемпературного нагрева их вершин вплоть до расплавления с последующем выбросом расплавленного металла внутрь дефектов под действием образующихся

сжимающих напряжений не было рассмотрено. Следовательно, в диссертации ставится задача изучения возможности заваривания дефектов сплошности индукционным нагревом и определения параметров МИО, необходимых для достижения температуры плавления металла.

1.4 Выводы по главе 1

1. Проведен литературный обзор механизмов зарождения и роста дефектов сплошности в металле. Установлено что, дефекты кристаллической структуры металла, такие как скольжение, двойники, дислокации, включения и др. вызывают концентрации напряжений от действия приложенных нагрузок, что делает их источником зарождения микротрещин.

2. Выполнен теоретический анализ напряженно – деформированного состояния в окрестности трещин. Представлена диаграмма скорости роста трещин в зависимости от параметров напряженного состояния. Установлено, что роста трещины начинается при превышении напряжении в её вершине порогового значения ΔK_{th} .

3. Окрестность трещин испытывает пластические деформации при напряжении у их вершин выше предел текучести. Форма и размер зона пластических деформаций тесно связаны с размером трещины и характером приложенного нагружения.

3. Скорости роста усталостных трещин обусловлена развитием пластических деформаций металла в зоне их вершин, формированием полей остаточных напряжений и деформаций, а также влиянием размеров образцов и характера нагружения.

4. Проведен анализ аварийных ситуаций на магистральные трубопроводы, в результате которого было выявлено, что одной из основных причин аварий является развитие усталостных микротрещин в процессе длительной эксплуатации. Так как, экспериментально было установлено, что разрушение произошло в зоне дефектов сплошности. Кроме того, испытания показали, снижение прочностных

свойств металла в зоне несплошностей на 20 % по сравнению с бездефектной зоной.

5. Также проведен анализ существующих методов устранения дефектов сплошности в металлических конструкциях в целом, и в магистральных трубопроводах в частности, с учетом преимуществ и недостатков каждого метода.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДЕФЕКТЫ СПЛОШНОСТИ МЕТАЛЛОВ

Магнитно-импульсная обработка (МИО) относится к группе импульсных методов обработки, которые характеризуются высокой энергией и кратковременностью силового воздействия, не превышающего миллисекунд, высокими скоростями деформирования деталей. В процессах МИО силовое воздействие осуществляется бесконтактно давлением магнитного поля, создаваемым индуктором [28, 35].

Процесс деформирования сопровождается наведением в обрабатываемой заготовке вихревых токов, составляющих от десятка до сотни килоампер. Такие параметры воздействия определяют особенности магнитно-импульсной обработки, отличающие ее от других импульсных методов, например, повышение технологической пластичности материала заготовки, возможности регулирования распределения давления импульсного магнитного поля на заготовку.

Первые работы по МИО относятся к 1950-м годам. Магнитно-импульсная технология быстро развивалась с течением времени и на сегодняшний день широко применяется в промышленном производстве. Практика применения технологии МИО показала, что наиболее рациональными областями её применения в производстве являются сборочные операции путем наружного обжима деталей, внутренней раздачи обечаек и плоской листовой штамповки изделий [62, 72, 73, 83].

Более того, данная технология оказалась эффективной при борьбе с асфальтосмолистыми и парафиновыми отложениями, образующимися в процессе транспортировке нефти [104].

Применение данной технологии положительно сказалось на прочности и долговечность металлических конструкций. Так как, теоретические и экспериментальные исследования показали, что высокоэнергетическое электромагнитное воздействие вызывает существенные структурные изменения в

металлических изделиях, приводящие к их упрочнению. Также было установлено, что объем дефектов сплошности металла уменьшается при воздействии высокоэнергетического электромагнитного импульса [94, 95].

Практика применения данной технологии свидетельствует о том, что МИО во многом отвечает требованиям ремонтных работ. Так как, в отличие от других методов, данный метод можно применять как в лабораторных условиях, так и в полевых и производственных условиях благодаря относительно небольшому размеру оборудования и возможности его перевозки на рабочее место [88]. Метод можно использовать в труднодоступных местах, подключив индуктор к гибкому шинопроводу. Высокая проницаемость позволяет провести ремонтную обработку даже в случае наличия защитного покрытия без необходимости отчистки обрабатываемого места, что сокращает трудоемкость и затраты времени [88]. Кроме того, данным методом можно устранить не только поверхностные дефекты, но и дефекты, расположенные на разной глубине относительно поверхности металла, путем выбора правильного режима работы магнитно-импульсной установки (МИУ) [84].

В данном разделе подробно описаны состав магнитно-импульсной установки (МИУ) и принцип её работы, проведен анализ по выбору материалов для изготовления индукторов для МИО, изложены физические основы процесса МИО, а также выполнен теоретическое исследование механизма воздействия высокоэнергетического электромагнитного импульса на дефекты сплошности металлов.

1.1 Состав магнитно-импульсной установки (МИУ) и принцип её работы

МИО производится на серийных и опытных высокоэнергетических магнитно-импульсных установках, создающих высокоэнергетический электромагнитный импульс с различными параметрами (напряженность, длительность, частота разрядного тока и др.).

Основные характеристики МИУ и организации-изготовители представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные характеристики МИУ [29, 91]

Тип установки	Разработчик	Энергоемкость, кДж	Напряжение зарядки, кВ	Частота, кГц	Индуктивность, нГн
МИУ 3.5	НИИТМАШ	3.5	5	39	60
МИУ-7	НИИТМАШ	7	5	30	60
МИ-1	ЛПИ	17.5	5	27	25
МИУ-10	ЗВЭК «ПРОГРЕСС»	10	5	28	33
МИУ-20/6	ХПИ	20	20	60	80
МИУ-40	СГАУ	43.2	6	14	70
МИУ-60	СГАУ	60	10	8.7	250
МИУ-80/10	ЭНИКМАШ	80	10	20	–
МИУ-20/5	ЭНИКАМАШ	20	5	25	28

Основными параметрами магнитно-импульсных установок (МИУ) являются: энергоемкость, рабочее напряжение и собственная частота разрядного контура. Магнитно-импульсные установки можно разделить на три основные группы в зависимости от их рабочей частоты: низкочастотные (5–20кГц), среднечастотные(20–50кГц), высокочастотные с рабочей частотой 20–200 кГц [47].

Тип установки зависит в большой степени от пластичности, электропроводимости и толщины обрабатываемых деталей. Высокочастотные установки применяются при обработке толстостенных деталей с низкой пластичностью и электропроводимостью [46, 45].

Принцип действия МИУ основан на прямом преобразовании электрической энергии, запасаемой накопителем энергии НЭ, в электромагнитное поле, действующее в рабочей зоне индуктора при разряде импульсных конденсаторов накопителей энергии. Электромагнитное поле индуктора наводит в

обрабатываемом материале вихревые токи. Вихревые токи, в свою очередь, создают электромагнитное поле, взаимодействие которого с электромагнитным полем индуктора приводит к деформации обрабатываемой детали. С другой стороны, вихревые токи вызывают импульсный нагрев детали в окрестностях дефектов сплошности [86, 88].

На рисунке 2.1 представлена Функциональная схема МИУ. Установка состоит из накопителя энергии, содержащего ряд импульсных конденсаторов C_1, C_2, \dots, C_n , зарядного устройства и индуктора. Заряд конденсаторов накопителя энергии производится от общего зарядного устройства до заданного уровня. При достижении напряжения на конденсаторах C_1, C_2, \dots, C_n заданного уровня [87, 88], блок задания энергии прекращают заряд командой «Стоп». Разряд запасенной энергии синхронно, мгновенно и однократно осуществляется с помощью встроенных вакуумных или газовых разрядников, которые запускаются стартовым сигналом от блока запуска. Данные разрядники обладают высокой пропускной способностью (до нескольких МА), низким собственным индуктивным и активным сопротивлением, а также сравнительно легко синхронизируются при параллельной работе нескольких коммутаторов на общую нагрузку [86, 87, 88].

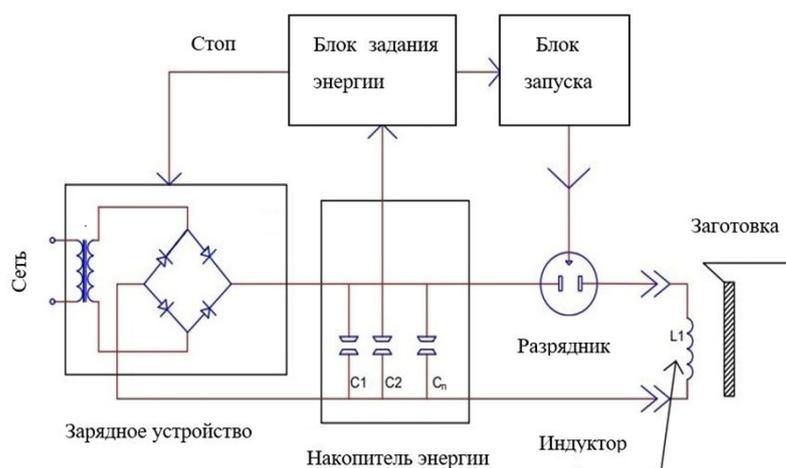


Рисунок 2.1– Принципиальная схема магнитно-импульсной установки МИУ-10-СГАУ [10]

При разряде конденсаторов в контуре индуктора протекает синусоидальный затухающий ток. Параметры разрядного тока (амплитуды 50...500 кА и

длительности 50...1000 мкс) меняются в зависимости от энергии, запасаемой в конденсаторах накопителя энергии.

На рисунке 2.2 представлены характеристики изменения разрядного тока (I) для МИУ-10 кДж в зависимости от времени (t) при различных значениях запасаемой энергии в конденсаторах НЭ [87, 88].

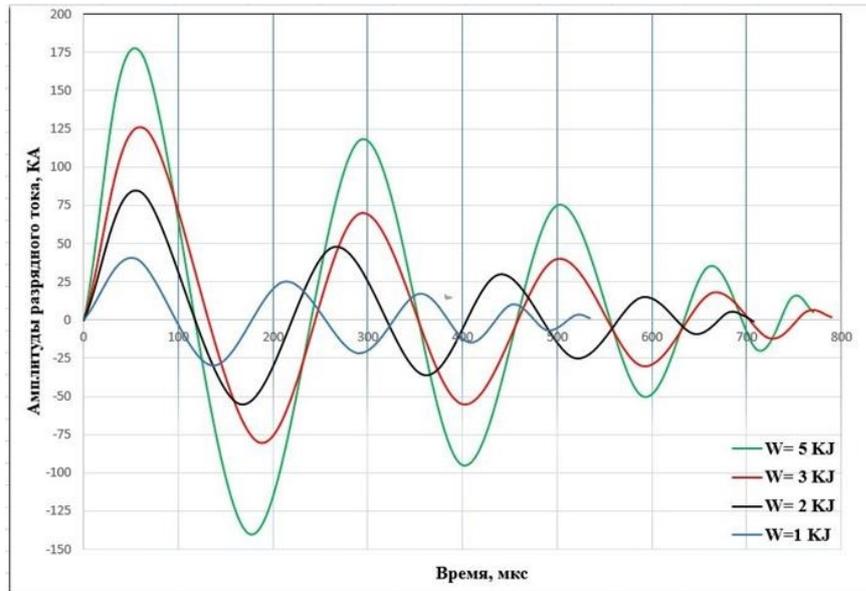


Рисунок 2.2 – Осциллограмма разрядного тока при различных значениях запасаемой энергии магнитно-импульсной установки МИУ-10кДж [10]

Энергия W_H , запасенная в конденсаторах накопителей энергии НЭ, можно определить по формуле (2.1) [1, 8, 86]:

$$W_H = \frac{CU_H^2}{2} \quad (2.1)$$

где C – емкость накопителей энергии, Ф; U_H – рабочее напряжения накопителей энергии, кВ [87].

Коэффициент передачи энергии, запасенной в конденсаторах накопителей в контур индуктора, описывается следующим выражением (2.2) [60]:

$$\frac{W_c}{W_H} = \frac{L_c}{L_c + L_{ds}} \left(\frac{i_m}{i_0} \right)^2 \quad (2.2)$$

где W_c – электрическая энергия, передана в контур индуктора, L_c – индуктивность индуктора, нГн, L_{ds} – разрядной цепи МИУ, нГн, i_m – амплитудное

значения разрядного тока, протекающего в контуре индуктора, кА, i_0 – амплитудное значения разрядного тока, протекающего в контуре идуктора без потерь (сопротивление разрядной цепи равно нулю $R=0$).

Рабочая частота разрядного тока, протекающего в контуре индуктора, определяется следующей формой (2.3) [71]:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{(L_c + L_{ds})C} - \frac{(R_c + R_{ds})^2}{4(L_c + L_{ds})^2}} \quad (2.3)$$

Где R_{ds}, R_c – сопротивление разрядной цепи и индуктора, соответственно, Ом.

Из выражения (2.2) можно заметить, что повышение индуктивности индуктора приводит к повышению коэффициента передачи энергии в его контур, но при этом, согласно выражению (2.3), рабочая чистота разрядного тока, протекающего в контуре индуктора снижается с увеличением индуктивности индуктора, что в свою очередь снижает коэффициента полезного действия индуктора. Практика применения МИО показала, что данная технология наиболее эффективна при значениях коэффициента передачи энергии в контур индуктора в пределах от 0.8 до 0.9.

Рабочим инструментом МИУ является индуктор, его назначение заключается в преобразовании электрической энергии, протекающей в нём в электромагнитное поле, действующее в зоне индуктора-заготовки [87].

Эффективность преобразования электрической энергии индуктором в электромагнитное поле, совершающее работы деформации заготовки, характеризуется коэффициентом полезного действия индуктора η_m .

Коэффициент полезного действия можно выразить следующем выражением (2.4) [113]:

$$\eta_m = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_r \quad (2.4)$$

где η_m – безразмерный коэффициент, который характеризует эффективность преобразования электрической энергии, протекающей в контуре индуктора, в

электромагнитную энергию, действующее на обрабатываемую деталь, η_1 – безразмерный коэффициент, который характеризует ограничение разрядного тока внутренней индуктивностью контура $\eta_1 = 0.85 \dots 0.95$, η_2 – безразмерный коэффициент, который характеризует уменьшение усилий при увеличении зазора $\eta_2 = 0.6 \dots 0.7$, η_3 – безразмерный коэффициент, характеризующий проникновение магнитного поля сквозь поверхность заготовки $\eta_3 = 0.9 \dots 0.95$, η_r – безразмерный коэффициент, который учитывает джоулевые потери в разрядной цепи МИУ и индуктора $\eta_r = 0.5 \dots 0.65$ [87].

Следовательно, электрическая энергия, преобразующаяся в электромагнитное поле, совершающее работы деформации заготовки, может быть определена следующей формулой (2.5) [22]:

$$W_m = \eta_m W_c \quad (2.5)$$

Оценку эффективности МИУ можно установить с помощью уравнения баланса энергии в системе разрядной цепи-индуктора для момента времени t (2.6) [22, 36].

$$\begin{aligned} \frac{CU_0^2}{2} = & \frac{CU^2(t)}{2} + \frac{L_{ds}I^2(t)}{2} + \frac{1}{2} \int_0^t I^2(t) \frac{dL_{ds}}{dt} dt + \frac{L_c I^2(t)}{2} \\ & + \frac{1}{2} \int_0^t I^2(t) \frac{dL_c}{dt} dt + \int_0^t R_{ds} I^2(t) dt + \int_0^t R_c I^2(t) dt \end{aligned} \quad (2.6)$$

Составляющие уравнения 2.6 характеризуют следующие физические величины:

$\frac{CU_0^2}{2}$ – запасенная энергия в конденсаторах накопителей МИУ в момент времени $t=0$ (до разряда);

$\frac{CU^2(t)}{2}$ – энергия в конденсаторах МИУ в момент время t (после разряда);

$\frac{L_{ds}I^2(t)}{2}$ – магнитная энергия, запасаемая в собственной индуктивности установки;

$$\frac{1}{2} \int_0^t I^2(t) \frac{dL_{ds}}{dt} dt - \text{кинетическая энергия, связанная с работой деформации}$$

элементов МИУ;

$$\frac{L_c I^2(t)}{2} - \text{магнитная энергия, запасаемая в собственной индуктивности}$$

индуктора;

$$\frac{1}{2} \int_0^t I^2(t) \frac{dL_c}{dt} dt - \text{кинетическая энергия, действующая на заготовку и}$$

совершающая её деформацию;

$$\int_0^t R_{ds} I^2(t) dt - \text{потери энергии в элементах МИУ;}$$

$$\int_0^t R_c I^2(t) dt - \text{потери энергии в системе индуктора-заготовки.}$$

Анализ уравнения баланса энергии показывает, что повышение коэффициента полезного воздействия МИУ можно достичь путем увеличения члена уравнения, характеризующего передачу энергию заготовке [87]. В то время как, остальные члены уравнения описывают потери энергии, следовательно, необходимо стремиться к максимальному снижению их величин. Снижение собственной индуктивности элементов МИУ и индуктора способствуют снижению потерь энергии, при этом необходимо повысить прочность и жесткость элементов МИУ и индуктора, в целях предотвращения их деформации.

2.2 Механизм воздействия магнитно-импульсной обработки на дефекты сплошности металлов

Принцип действия МИО основан на прямом преобразовании электрической энергии, запасенной накопителями энергии, в электромагнитное импульсное поле с индукцией $B(x, t)$, действующее в рабочей зоне индуктора [86].

Таким образом, на образец оказывается интенсивное комплексное теплосиловое воздействие. С одной стороны, давление магнитного поля распространяется по объему металла обрабатываемого образца в виде волны сжатия, вызывая пластическую деформацию несплошностей и уменьшение их

размеров. С другой стороны, магнитное поле наводит в обрабатываемом образце вихревые токи (токи Фуко) [87]. В связи с тем, что электрический ток стремится протекать по направлению, обладающему наименьшим сопротивлением, а также при резкой смене его направления происходит концентрация токов и повышение их плотности у вершин трещин. Концентрация вихревых токов приводит к локальному неоднородному нагреву вершин трещин, сопровождающемуся тепловым расширением и, как следствие, в контуре дефекта возникает термические сжимающие напряжения, приводящие к смыканию трещин [86, 88].

Электромагнитная сила магнитно-импульсного поля, действующая на единицу объёма заготовки, может быть выражена следующей формулой (2.7) [4, 33, 67]:

$$f_i = B_i j_i \quad (2.7)$$

где f_i – сила, действующая на единицу объёма в скин-слое, Н;

j_i – плотность индукционных токов в обрабатываемом металле, $A \cdot m^{-2}$; B_i – индукция магнитного поля, Тесла.

Применяется что электромагнитная сила магнитного поля действует в направлении (x), перпендикулярном поверхности заготовки. Поэтому остальные составляющие f_i будут равны нулю.

Таким образом, индукция магнитного поля $B(x, t)$ и плотность вихревых токов в скин-слое $j(x, t)$ имеют следующий вид (2.8) [19, 24, 110]:

$$\begin{cases} B(x, t) = B_m \exp\left(-\frac{x}{\Delta_s}\right) \sin\left(\omega t - \frac{x}{\Delta_s}\right) \\ j(x, t) = \frac{B_m \sqrt{2}}{\mu_0 \cdot \Delta_s} \exp\left(-\frac{x}{\Delta_s}\right) \sin\left(\omega t - \frac{x}{\Delta_s} + \frac{\pi}{4}\right) \end{cases} \quad (2.8)$$

где Δ_s – глубина проникновения вихревых токов в заготовку (толщина скин-слоя), мм; x – глубина на которой амплитуды магнитного поля и плотности индукционных токов уменьшается в e раз, мм; B_m – максимальная магнитная индукция на поверхности металла; j_m – максимальная величина плотности

вихревых токов в заготовке; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, $\mu_0 = 1,257$ мкГн/м

Максимальная магнитная индукция на поверхности металла B_m выражается следующей формулой (2.9) [19]:

$$B_m = \frac{\mu_0 I_t n_c}{l_I} \quad (2.9)$$

где n_c – число витков индуктора, l_c – длина рабочей части индуктора, мм.

Плотность тока в заготовке может быть выражена следующей формулой (2.10) [19]:

$$j_m = \frac{B_m \sqrt{2}}{\mu_0 \Delta_s} \quad (2.10)$$

Индуктивность системы "индуктор - заготовка" выражается следующей формулой (2.11) [24]:

$$L_{I-S} = \mu_0 V_M n_c^2 l_I^{-2} \quad (2.11)$$

где V_M – магнитном объёме между индуктором и заготовкой, тесла.

Магнитный объем можно определить следующем выражением (2.12) [67]:

$$V_M = S_I (h_g + \Delta_I + \Delta_w) \quad (2.12)$$

где Δ_I – глубина проникновения магнитного поля по толщине индуктора, мм;

Δ_w – глубина проникновения магнитного поля по толщине заготовки, мм;

S_I – рабочая площадь индуктора, мм²; h_g – зазор между индуктором и заготовки, мм.

Глубина проникания вихревых токов в материал заготовки (толщина скин-слоя), вычисляется по формуле (2.13) [33]:

$$\Delta_s = \sqrt{2(\mu_0 \gamma_w \gamma_I \omega)^{-1}} \quad (2.13)$$

где γ_w, γ_I – удельная электропроводимость материала заготовки и индуктора соответственно, С/м.

Давление магнитного поля, действующее на поверхность заготовки, можно вычислить в зависимости от параметров МИУ и индуктора следующим образом (2.14) [44]:

$$P = \frac{\mu_0 n_c^2}{l_I^2 L_E} W_m e^{-2B_m t} \sin^2(\omega t) \quad (2.14)$$

где L_E – эквивалентная индуктивность индуктора и заготовки, нГн.

Выражение (2.4) показывает, что зависимость давления магнитного поля от времени имеет квадратичный затухающий синусоидальный характер. Таким образом, давление магнитного поля действует на заготовку в виде упругих короткодействующих волн, которые распространяются по объему металла заготовки вызывая, в случае превышения предела текучести металла, пластическую деформацию металла заготовки и, соответственно, смыкание дефектов сплошности.

Между тем было установлено, что в местах неоднородности материала заготовки происходит концентрация вихревых токов, что приводят к локальному увеличению плотности токов в этих зонах.

Концентрация вихревых токов в зонах неоднородности, в частности вблизи дефектов сплошности, вызывают электромагнитные, термические и динамические процессы, приводящие к изменению физико-механических свойств и структуры материала [20, 43, 44, 65, 66].

Механизм концентрации вихревых токов у вершин трещин представлен на рисунке 2.3.

Локальное увеличение плотности вихревых токов у вершин трещин вызывает тепловое нагрев этих зон. Температура у вершин трещин может, в зависимости от параметров МИУ и физических свойств материала заготовки, увеличиться вплоть до расплавления металла [86]. При этом образуется кратер, диаметр которого может достичь несколько миллиметров (рисунок 2.4).

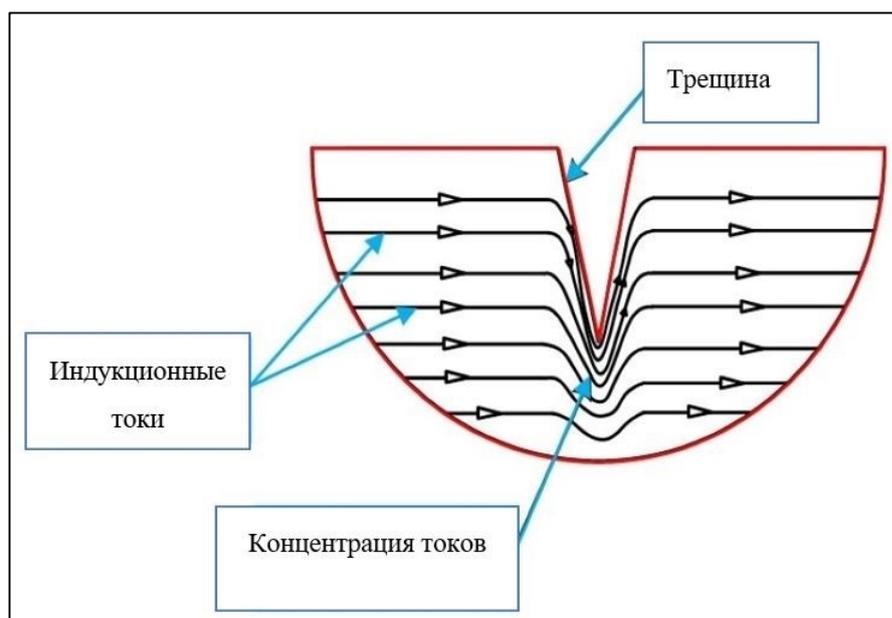


Рисунок 2.3 – Концентрация индукционных токов вблизи вершин трещин [119]

Нагрев окрестностей трещин сопровождается тепловым расширением и, как следствие, в контуре дефекта возникает термические сжимающие напряжения σ_T , приводящие к выбросу расплавленного материала из вершины внутрь трещин, в результате чего происходит заваривание трещин расплавленным материалом.

Термические напряжения можно определить по формуле (2.15) [86]:

$$\sigma_T = E_0 a_L T_t \quad (2.15)$$

где E_0 – модуль Юнга; a_L – коэффициент термического расширения, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

T_t – температура, достигнутая в момент времени t , $^{\circ}\text{C}$.

Экспериментальные исследования процесса заваривания трещин магнитно-импульсным воздействием проводились в работе [41]. В качестве материала исследования была использована тонкая пластина из хромоникелевой нержавеющей стали 12Х18Н10Т с толщиной 1 мм, содержащая трещину глубиной 0.4 мм и раскрытием 0.1 мм. Эксперименты проводились с помощью магнитно-импульсной обработки 20 кДж.

Фазы образования кратера представлены на рисунке 2.4.

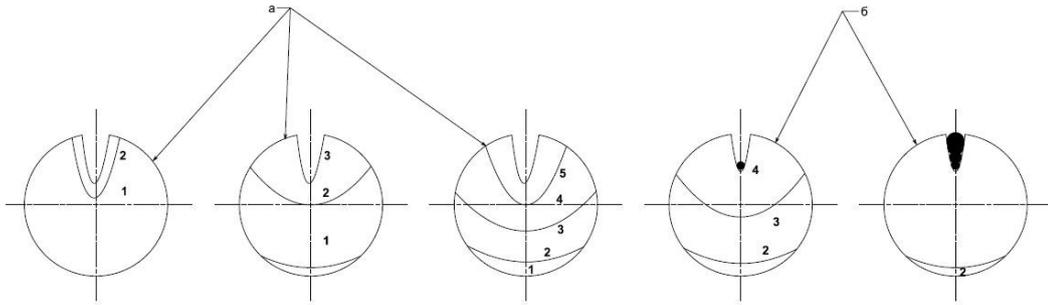


Рисунок 2.4 – Фазы образования кратера вблизи вершины трещины при МИО-20кДж:

а – трещина; б – кратер

1 – концентрация вихревых токов у вершины трещины; 2,3 – повышение температуры; 4 – Образование микрократера; 5 – увлечение размера кратера и выброс расплавленного материала внутрь трещины [41]

Плотность индукционных токов у вершины трещины j_{mel} , необходимая для достижения температуры плавления металла, может быть выражена следующей формулой (2.16) [42, 116] :

$$j_{mel} = \frac{\sqrt{(T_{mel} - T_0)(C_V \cdot \gamma)}}{(1 + k) \cdot \tau^{0.5}} \quad (2.16)$$

где T_{mel} – температура плавления металла, °C; τ – время импульсного воздействия, мс; T_0 – исходная температура, °C; C_V – теплоемкость материала, Дж.К⁻¹; γ – удельная электропроводность материала, Сименс.М⁻¹; k – коэффициент раскрытия трещины, характеризующий отношение длины дефекта к его ширине [85].

Формула (3) показывает, что плотность индуцированных токов у вершин трещины зависит не только от термофизических свойств металла, но также от геометрии трещины и её формы. Поскольку форма и размер дефекта значительно влияют на распределение плотности индуцированных токов, более гладкие и широкие формы могут создавать более благоприятные условия для протекания тока, приводя к более равномерному распределению линий тока и, как следствие,

уменьшению их концентрации. В то время как у острых вершин происходит резкое изменение направления токов, с последующей концентрацией в этих зонах и, соответственно, увеличение их плотности.

При исследовании многофакторного процесса взаимодействия электромагнитного поля с дефектами сплошности материала, наиболее рациональным методом является численное моделирование.

В работе [46] была представлена физическая модель для исследования процесса сварки трещин в металле под воздействием электромагнитного импульсного поля. Нагреваемый объект представлял собой двусторонне бесконечно протяженную пластину толщиной $L = 20$ мм, а частота магнитного поля составляла $f = 440$ кГц. Теплофизические и электромагнитные параметры модельного материала были приближены к соответствующим параметрам цинка [42]. Результаты математического моделирования показали значительное повышение напряженности магнитного поля и плотности индукционных токов в окрестности трещины, что вызвало локальный неоднородный нагрев этих зон. Температура у вершин трещин повысилась до температуры плавления металла, и произошел выброс расплавленного металла внутрь трещин, что в конечном итоге привело к соединению краев трещин и их закрытию. На рисунке 2.5 изображены графики распределения тепловых полей в разные моменты времени, полученные численным моделированием при магнитном импульсном воздействии на заготовку [42].

Рисунок 2.5 показывает, что точкой интенсивного теплового воздействия при магнитно-импульсном воздействии являются вершины трещин, где отмечается повышение температуры до 600 °С в момент времени $t = 71,0$ мкс (темно-серым цветом показана область плавления ($T \geq 419$ °С)).

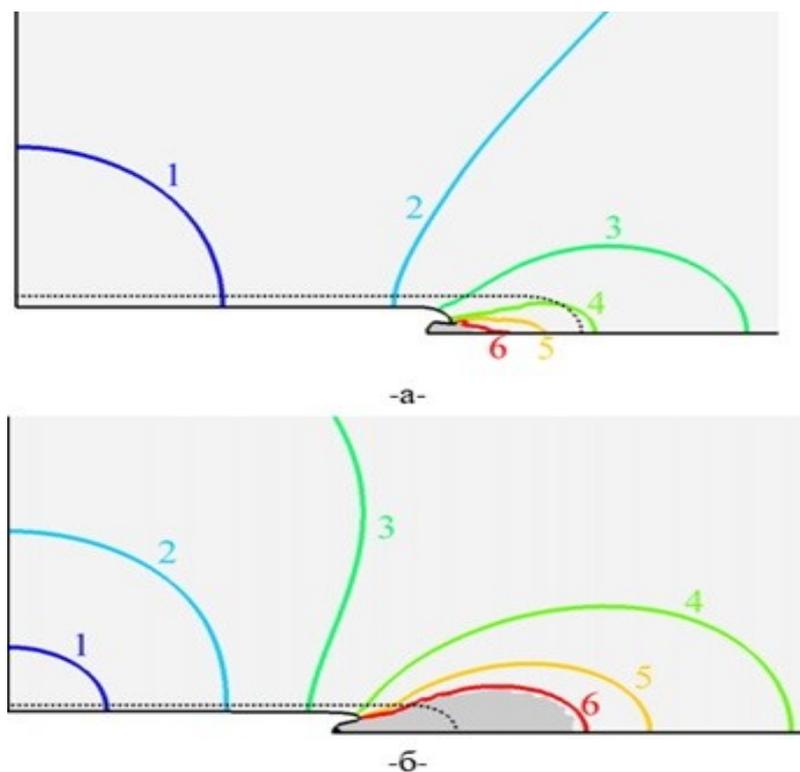


Рисунок 2.5 – Графики распределения тепловых полей при МИО в разные моменты времени

а– момент времени $t=19,2$ мкс, **б** – момент времени $t= 71,0$ мкс

1 = 25°C ; 2 = 50°C ; 3 = 100°C ; 4 = 200°C ; 5 = 300°C ; 6 = 600°C [42]

Результаты численного моделирования, полученные как в работе [108], так и в других исследованиях [40, 68, 105, 109, 118, 125], подтверждают гипотезы о взаимодействии электромагнитного поля с дефектами сплошности металла о том, что в окрестности дефекта возникают значительные градиенты электромагнитного поля, приводящие к значительному локальному увеличению напряженности магнитного поля и плотности вихревых токов, что влечет за собой нагрев этих зон.

Однако важно отметить, что математические моделирования, базировалось на образцах, содержащих трещины равномерной формы, что затрудняет с помощью численного моделирования предсказание поведения реальных дефектов при воздействии электромагнитно поля, поскольку построение модели, точно имитирующей реальные трещины, является недостижимой задачей. Данное ограничение затрудняет прогнозирование влияния магнитно-импульсного воздействия на детали с реальными трещинами неправильной формы при помощи

численного моделирования. Следовательно, для более точной оценки эффективности МИО необходимо провести экспериментальные исследования на стандартных образцах, содержащих трещины, образовавшиеся в процессе длительной эксплуатации.

Следует отметить, что электродинамические напряжения σ_{ED} , возникающие в области вершин трещин, могут при высоких параметрах электромагнитного поля (давление и плотность вихревых токов) превышать пределы разрушения металла. Это может привести к общему разрушению образца в следствии дальнейшего роста трещин и увеличения их размеров.

Ю. И. Головином было предложено критерие разрушения металла по силовому механизму (2.17)[24, 25]:

$$\sigma_{ED} = 0,7E_0 a_L j_m r k \leq \sigma_{FR} \quad (2.17)$$

где σ_{FR} – предельные динамические напряжения материала, Мпа ; r– радиус кривизны трещины в его вершине .

Особенность магнитно-импульсной обработки, обусловленная многочисленными факторами, влияющими на механизм её действия, подчеркивает необходимость проведения широких многофакторных исследований процессов магнитно-импульсной обработки. Это позволит определить наиболее эффективные параметры обработки и границы их применения с учётом свойств обрабатываемых деталей.

2.3 Индукторы для магнитно-импульсной обработки

Индуктор является рабочим инструментом МИУ, его задача заключается в преобразовании электрической энергии, протекающей в него, в электромагнитное поле, действующее в зоне индуктора-заготовки [84].

Индуктор состоит из токоведущей спирали, создающей магнитное поле, оказывающее воздействие на обрабатываемую деталь, электрической изоляции, выводов для подключения к МИУ, а также элементов механического усиления для обеспечения надежности и прочности устройства.

Токопровод индуктора изготавливают из материала с высокой электропроводностью. Однако материал токопровода должен обладать и высокой механической прочностью. Эти два требования противоречивы, так как хорошие проводники имеют худшие механические свойства. Чаще всего индукторы изготавливаются из меди и алюминия из-за их высокой электропроводности [8]. Однако данные материалы обладают низкой механической прочностью, что снижает стойкость и долговечность индуктора. Попытки применения углеродистых и легированных сталей для изготовления токоведущих элементов индуктора не дали удовлетворительных результатов из-за низкого коэффициента полезного передачи энергии в заготовку. Опыты работы показывают, что наилучшим материалом для изготовления индуктора является бериллиевая бронза. Этот материал обладает хорошей электропроводностью и удовлетворительными механическими характеристиками [2, 74].

По конструкции индукторы делятся на одновитковые и многовитковые. Конструкция одновитковых индукторов проста по сравнению с многовитковыми. Однако многовитковые индукторы обладают высоким коэффициентом полезного действия благодаря их большой собственной индуктивности.

Важным параметром при конструкции индуктора является число его витков.

При конструировании индуктора важно правильно выбрать число его витков. Опыт показывает, что оптимальное число витков индуктора лежит в пределах от 4 до 20.

По технологическим операциям, выполняемым МИУ, индукторы, в зависимости от их расположения относительно обрабатываемой детали, можно делить на три группы [85]:

- Индуктор для раздачи (индуктор расположен внутри заготовки).
- Индуктор для обжима (заготовка расположен внутри индуктора).
- Плоский индуктор предназначен для выполнения операции по обработке плоских деталей.

На рисунке 2.6 представлены основные типы индукторов по технологическим операциям, выполняемым ими.



Рисунок 2.6 – Виды индуктора по форме

1– плоский индуктор; 2 – для обжима; 3 – для раздачи [85]

Долговечность индуктора в значительной степени зависит от характеристик его изоляции, поскольку последняя подвергается воздействию высокой температуры и давления, возникающих в рабочей зоне индуктора. Для предотвращения выхода изоляции из строя необходимо, чтобы она обладала высокой теплопроводностью и термостойкостью. Кроме того, изоляция должна обладать высокой механической прочностью во избежание разрушения в условиях повышенного давления. Опыт показывает, что наилучшей изоляцией для индукторов в настоящее время являются эластичные заливочные материалы или эластичные материалы, заполняющие форму под давлением, такие как полиуретановый каучук, резина и другие [85]

Правильный выбор материала рабочих элементов индуктора и время протекания разрядного тока через него, учитывая предельные конструктивные возможности его компонентов, могут значительно повысить долговечность и производительность индуктора.

2.4 Выводе по главе 2

1. Подробно описаны состав магнитно-импульсной обработки и принцип её работы. Также представлено уравнение баланса энергии в системе разрядной цепи-индуктора с описанием физических величин её составляющих.

2. Проведен теоретический анализ механизма действия магнитно-импульсной обработки на обрабатываемую деталь, в результате которого было выявлено, что на образец оказывается интенсивное комплексное теплосиловое воздействие. С одной стороны, давление магнитного поля, а с другой - наведение вихревых токов, вызывающих нагрев обрабатываемой детали.

3. Также было установлено, что процесс залечивания дефектов сплошности происходит в результате концентрации вихревых токов вблизи вершин дефектов, что вызывает высокий локальный нагрев этих зон до температуры плавления металла. В зоне дефекта возникают термические напряжения, которые приводят к выбросу расплавленного материала внутрь трещин, что приводит к завариванию вершин дефекта и уменьшению их размеров.

4. Представлены результаты численного моделирования, проведенного в рамках предшествующих исследований в области обработки магнитных импульсов. Выяснено, что полученные результаты компьютерного моделирования соответствуют гипотезе о взаимодействии электромагнитного поля с дефектами сплошности металла.

5. Рассмотрен состав индуктора для магнитно-импульсной обработки, приведены практические опыты по определению оптимальной конструкции индуктора и выбору материалов для изготовления его рабочих элементов.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТА МЕТАЛЛА НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ

Нефтегазопроводы постоянно находятся в сложном напряженном состоянии, подвергаясь воздействию множественных переменных и статических нагрузок, таких как колебания давления, гидроудары, вибрационные процессы и температурные воздействия. Это может вызвать высокие напряжения в стенках трубы и привести к усталостным повреждениям, особенно в участках с неоднородным напряженным состоянием. В результате снижается работоспособность трубопроводов и их усталостная долговечность [86].

Улучшение прочностных свойств материала трубопроводов является важным фактором для обеспечения надежности и долговечности нефтегазопроводов в условиях сложных нагрузок и переменных факторов в окружающей среде. Для решения этой проблемы требуется применение технически рациональных и экономически эффективных технологических методов. Метод магнитно-импульсной обработки (МИО) является одним из таких методов, поскольку его применение способствует улучшению физико-механической структуры материалов. Этот метод также способствует "залечиванию" микродефектов и усталостных микротрещин, что позволяет существенно увеличить трещиностойкость, усталостную долговечность и, следовательно, надежность рабочих элементов трубопроводного транспорта [86].

Однако эффективность указанного метода зависит от правильного выбора параметров. Поэтому для более глубокого понимания процессов импульсного воздействия на заготовки со структурными неоднородностями и для определения оптимальных режимов обработки необходимо проведение комплексного исследования [86].

В настоящей главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния магнитно-импульсной обработки на прочностные свойства

магистрального газопровода, изготовленного из низкоуглеродистой, стали марки 17Г1С и содержащего поверхностные трещины типа КРН [86].

3.1 Материалы и методика исследования

3.1.1 Приготовление образцов

В качестве материала для исследования были изготовлены четыре фрагмента из низколегированной углеродистой стали 17Г1С из бывших в эксплуатации магистральных газопроводов, диаметром 720 мм, содержащих поверхностные трещины. Размеры фрагментов составили 301×50 мм, а средняя толщина -16,6 мм.

Специфическое распределение трещин на поверхности фрагментов было исследовано магнитопорошковым и магнитно-вихретоковым контролем [86].

В качестве средств для магнитопорошкового контроля была использована черная магнитопорошковая суспензия Magnavis 7HF. Магнитно-вихретоковый контроль проводился с помощью вихретокового дефектоскопа ВК-1[86].

По результатам магнитопорошкового контроля на наружной поверхности фрагментов была обнаружена сетка продольных трещин, по внешним признакам соответствующая коррозионному растрескиванию под напряжением (КРН). Глубина трещин была определена магнитно-вихретоковым контролем и составляла от 0,3 до 1,5 мм, ширина раскрытия – менее 0,1 мм [86].

На рисунке 3.1 приведено изображение наружной поверхности фрагмента №1(2П) после проведения магнитопорошкового контроля (КРН), где отображена зона скопления коррозионного растрескивания под напряжением. Изображение получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body (максимальное разрешение 5472 x 3648 пикселей) [86].

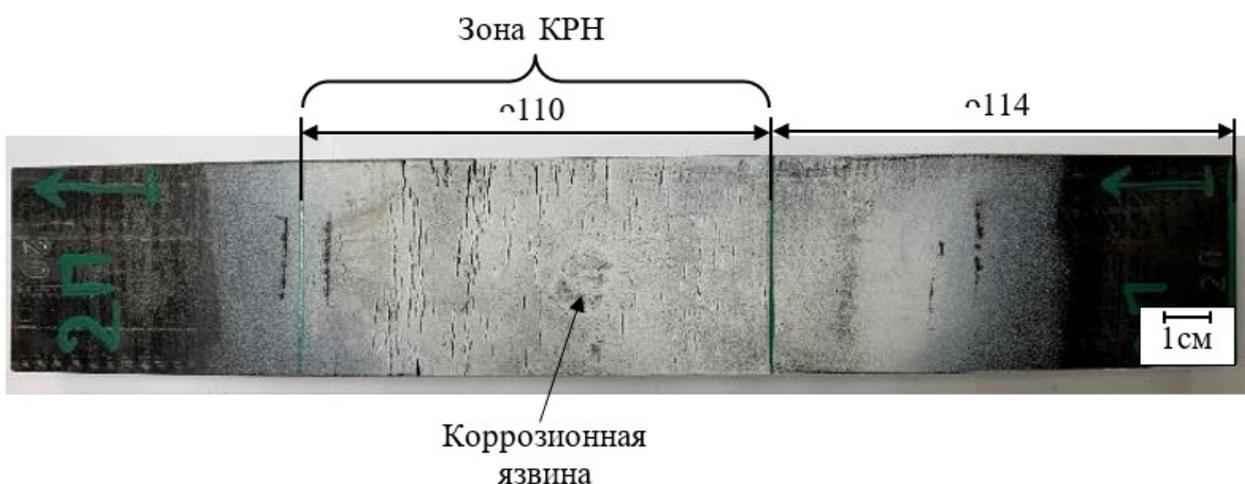


Рисунок 3.1 – Фотография наружной поверхности фрагмента №1(2П) (получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body) после проведения магнитопорошкового контроля [86]

На рисунке 3.2 изображена зона скопления коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) наружной поверхности фрагмента №1(2П). Изображение получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body (максимальное разрешение 5472 x 3648 пикселей) [86].



Рисунок 3.2 – Фотография зоны КРН фрагмента №1(2П) после проведения магнитопорошкового контроля [86]

Боковая поверхность фрагмента №1(2П) была исследована с помощью оптического микроскопа Olympus BX51, диапазон увеличения объективов от 1.25x

до 100х. При стократном увеличении были зафиксированы трещины, распространяющиеся с поверхности на глубину до 0.9 мм с раскрытием менее 0.1 мм (рисунок 3.3) [86].

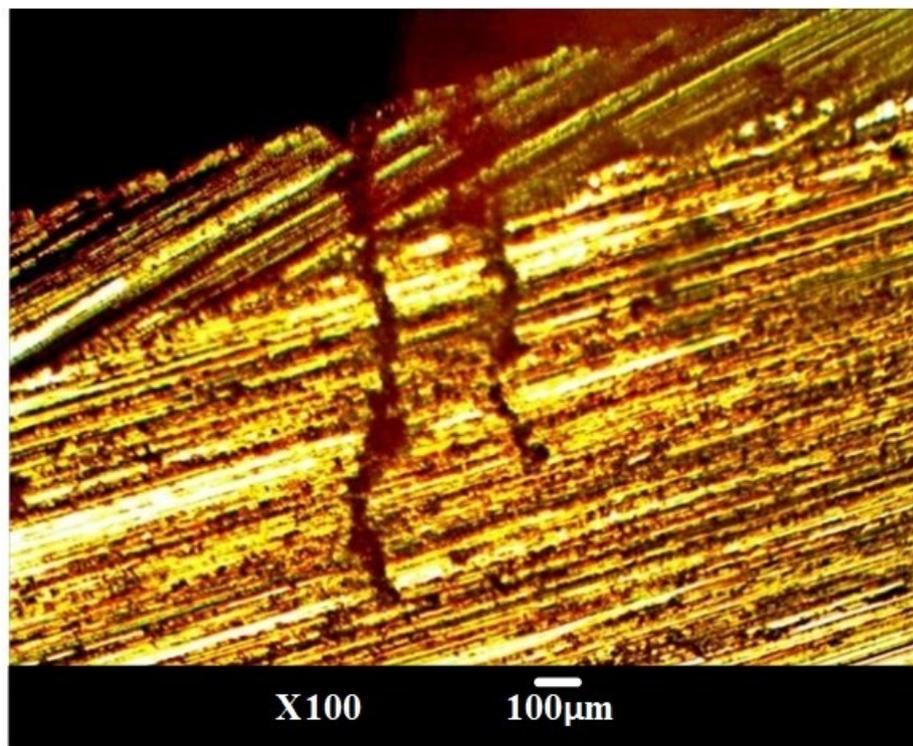


Рисунок 3.3 – Микроскопическое изображение коррозионного растрескивания под напряжением на боковой поверхности фрагмента №1(2П) (увеличение 100х) [86]

Из зоны КРН фрагмента №1(2П) были вырезаны ленточной плитой шесть образцов вдоль трещин КРН размерами 50×15 мм [86].

На рисунке 3.4 представлено изображение боковой поверхности одного из образцов, вырезанных из зоны КРН фрагмента №1(2П), где отмечаются отдельные трещины, которым присвоили номера 1-7. Глубина трещин измерялась лупой при десятикратном увеличении и составила не более 1 мм, а ширина раскрытия – менее 0,1 мм. Трещины распространяются с наружной поверхности образца в глубину металла [86].

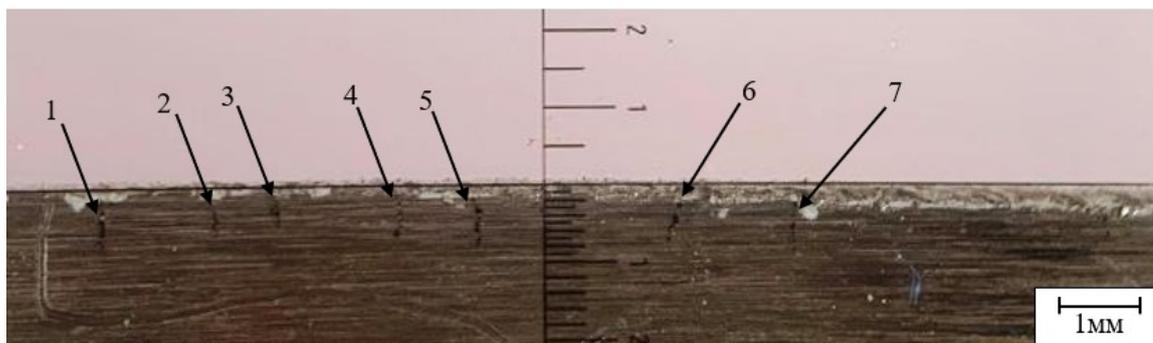


Рисунок 3.4 – Изображение боковой поверхности образца, вырезанного из зоны коррозионного растрескивания под напряжением фрагмента №1(2П), полученное с помощью лупы при десятикратном увеличении [86]

На рисунке 3.5 приведено изображение наружной поверхности фрагмента №2(5П) после проведения магнитопорошкового контроля (КРН), где отображена зона скопления коррозионного растрескивания под напряжением. Изображение получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body (максимальное разрешение 5472 x 3648 пикселей) [86].

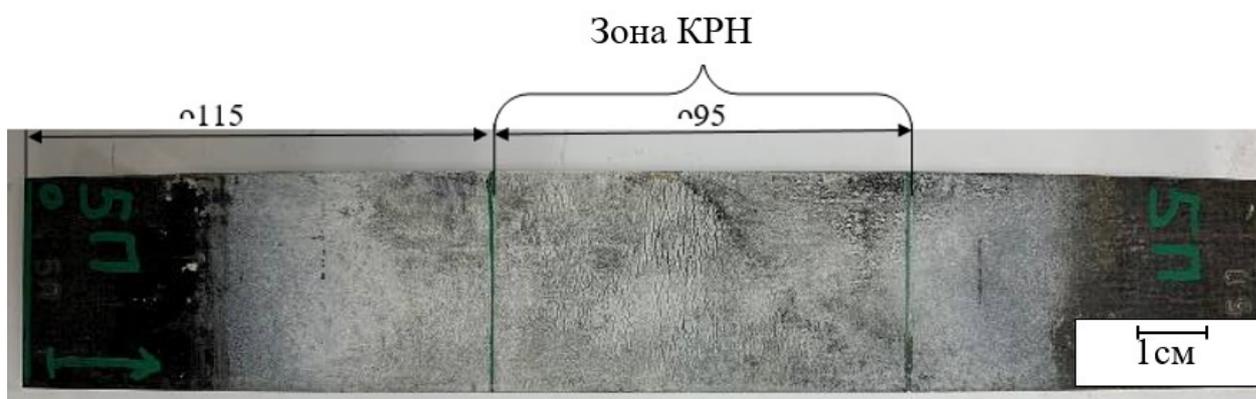


Рисунок 3.5 – Фотография наружной поверхности фрагмента №2(5П) (получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body) после проведения магнитопорошкового контроля [86]

На рисунке 3.6 изображена зона скопления коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) наружной поверхности фрагмента №2(5П). Изображение получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body (максимальное разрешение 5472 x 3648 пикселей) [86].



Рисунок 3.6 – Фотография зоны КРН фрагмента №2(5П) после проведения магнитопорошкового контроля [86]

Также, из зоны КРН фрагмента №2(2П) были вырезаны ленточной плитой шесть образцов вдоль трещин КРН размерами 50×15 мм.

На рисунке 3.7 приведено изображение наружной поверхности фрагмента №3(10П) после проведения магнитопорошкового контроля (КРН), где отображена зона скопления коррозионного растрескивания под напряжением. Изображение получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body (максимальное разрешение 5472 x 3648 пикселей) [86].

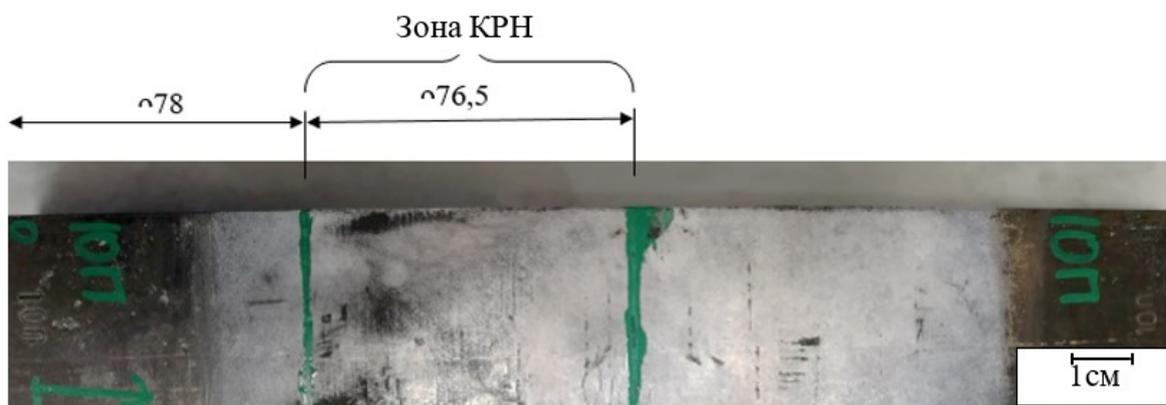


Рисунок 3.7 – Фотография наружной поверхности фрагмента №3(10П) (получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body) после проведения магнитопорошкового контроля [86]

Зона скопления коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) наружной поверхности фрагмента №3(10П) представлена на рисунке 3.8. Изображение получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body (максимальное разрешение 5472 x 3648 пикселей) [86].



Рисунок 3.8 – Фотография зоны КРН фрагмента №3(10П) после проведения магнитопорошкового контроля [86]

Аналогично фрагментам №1 и №2, из зоны КРН фрагмента №3(10П) были вырезаны ленточной плитой шесть образцов вдоль трещин КРН размерами 50×15 мм [86].

На рисунке 3.9 представлено изображение наружной поверхности фрагмента №4(9П) после проведения магнитопорошкового контроля (КРН), где отображена зона скопления дефектов коррозионного растрескивания под напряжением. Изображение получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body (максимальное разрешение 5472 x 3648 пикселей) [86].

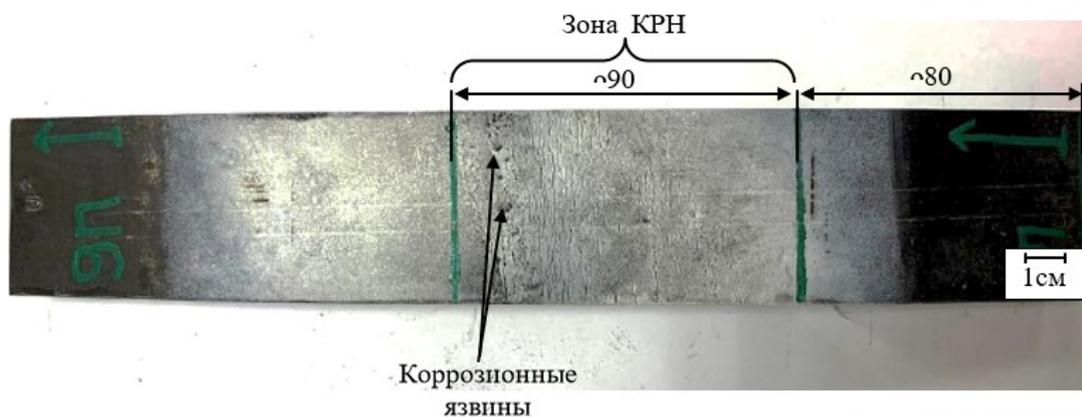


Рисунок 3.9 – Изображение наружной поверхности фрагмента №4(9П) (получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body) после проведения магнитопорошкового контроля [86]

Зона скопления коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) наружной поверхности фрагмента №4(9П) представлена на рисунке 3.10. Изображение получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body (максимальное разрешение 5472 x 3648 пикселей) [86].



Рисунок 3.10 – Фотография зоны КРН фрагмента №4(9П) после проведения магнитопорошкового контроля [86]

Боковая поверхность фрагмента №4(9П) была исследована с помощью оптического микроскопа Olympus VX51, диапазон увеличения объективов от 1.25x до 100x. При стократном увеличении были зафиксированы трещины,

распространяющиеся с поверхности на глубину до 1.1 мм с раскрытием менее 0.1 мм (рисунок 3.11) [86].

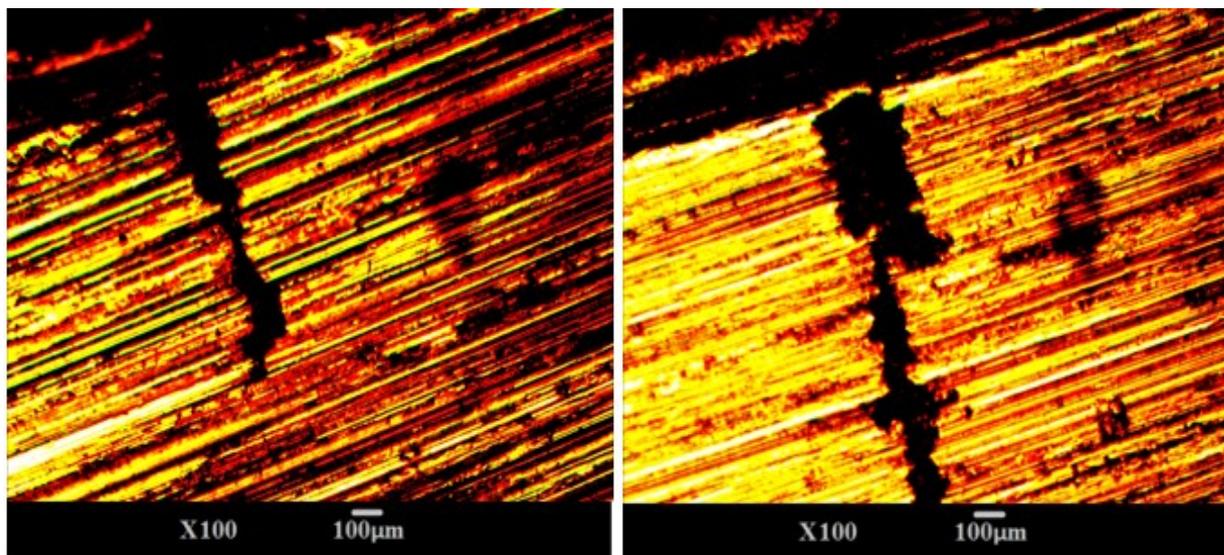


Рисунок 3.11 – Микроскопическое изображение коррозионного растрескивания под напряжением на боковой поверхности фрагмента №4(9П) (увеличение 100х) [86]

Из зоны КРН фрагмента №4(9П) были вырезаны ленточной пилой шесть образцов вдоль трещин размерами 50×10 мм [86].

На рисунке 3.12 представлено изображение боковой поверхности одного из образцов, вырезанных из зоны КРН фрагмента №4(9П), где выявлены отдельные трещины, распространяющиеся с наружной поверхности в глубину металла. Глубина трещин измерялась лупой при десятикратном увеличении и составила не более 1,1 мм, а ширина раскрытия – менее 0,1 мм [86].



Рисунок 3.12 – Изображение боковой поверхности образца, вырезанного из зоны коррозионного растрескивания под напряжением фрагмента №4(9П), полученное с помощью лупы при десятикратном увеличении [86]

Для дальнейшего исследования, вырезанные образцы из зон КРН фрагментов №1(2П), №2(5П), №3(10П) и №4(9П) были разделены на 4 группы. Шесть образцов, вырезанных из зоны КРН фрагмента №1(2П), составили группу образцов №1, образцы из зоны КРН фрагмента №2(5П) - группу №2, образцы из зоны КРН фрагмента №3(10П) - группу №3 и образцы из зоны КРН фрагмента №4(9П) - группу №4 [86].

3.1.2 Характеристики методов исследования

Все образцы группы №2(5П) были подвергнуты магнитно-импульсному воздействию с энергией, запасенной в конденсаторах магнитно-импульсной установки, равной 1 кДж [86].

Все образцы группы №3(10П) были подвергнуты магнитно-импульсному воздействию при энергии, запасенной в конденсаторах магнитно-импульсной установки, равной 2 кДж [86].

Все образцы группы №4(9П) были подвергнуты магнитно-импульсному воздействию при энергии, запасенной в конденсаторах магнитно-импульсной установки, равной 5 кДж [86].

После проведения МИО, образцы были оставлены на воздухе до тех пор, пока их температура не снизилась до комнатной температуры без применения дополнительных охлаждающих средств [86].

Образцы группы №1(2П) не подвергались магнитно-импульсному воздействию [86].

Магнитно-импульсная обработка образцов производилась на магнитно-импульсной установке МИУ-5кДж-СГАУ с помощью многовиткового цилиндрического индуктора [86].

Магнитно-импульсная установка МИУ-5кДж-СГАУ имеет следующие технические характеристики: максимальная запасаемая энергия в конденсаторах накопителей 5 кДж; напряжение заряда от 1 до 20 кВ; частота разряда 55 кГц; масса 350 кг; габаритные размеры 0,8 x 0,9 x 1,1 м [86].

На рисунке 3.13 изображена магнитно-импульсная установка МИУ-5кДж, к которой подключен цилиндрический индуктор. В индукторе помещен образец [86].



Рисунок 3.13 – Магнитно-импульсная установка МИУ- 5кДж [86]

Осциллограмма разрядного тока, протекающего в контуре индуктора, была зарегистрирована с помощью датчика тока Rogowski coil 5.63 кА/В. Датчик был подключен к цифровому осциллографу LeCroy WaveSurfer 44Xs-A 400 МГц для отображения полученной осциллограммы [86].

Рисунок 3.14 показывает датчик тока Rogowski coil 5.63 кА/В.



Рисунок 3.14 – Датчик тока Rogowski coil 5.63 кА/В [86]

Для более глубокого понимания поведения вихревых токов, наведенных в обрабатываемом образце во время магнитно-импульсной обработки, были выполнены снимки распределения тепловых полей в процессе МИО. Снимки были сделаны с помощью тепловизора FLIR-P640 со следующими характеристиками: диапазон температур от - 40 до +500 °С; быстродействие 1мкс; погрешность 0,5%. Результаты, полученные тепловизором во время магнитно-импульсной обработки, были проанализированы с помощью программы ThermoCAM Resercher Professional 2.8 SR-1, и построены графики изменений температуры [86].

После проведения МИО образцов групп №2(5П), №3(10П) и №4(9П), все обработанные образцы МИО (образцы групп №2(5П), №3(10П) и №4(9П)) и

необработанные образцы (образцы группы №1(2П) были испытаны на ударную вязкость [86].

Следует отметить, что образцы не являются стандартными, поскольку в них не был выполнен разрез, так как цель исследования заключается в определении влияния магнитно-импульсной обработки на прочностные свойства газопроводов, содержащих поверхностные трещины КРН. Таким образом, в данном случае поверхностные трещины КРН служат концентраторам напряжений в связи с тем, что они создают места повышенной концентрации напряжения и могут быть очагом разрушения при ударе или нагрузке [86].

Данный метод был выбран, поскольку он является самым чувствительным к изменению структуры металла и его склонности к разрушению.

Исследования ударной вязкости проводились на маятниковом копре ИО 5003-03 одиночным ударом при комнатной температуре 25 °С, скорость движения маятника в момент удара составляла 5,32 м.с⁻¹ [86].

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

Для исследования были выбраны два образца, один из группы №1(2П) (необработанный МИО), а другой из группы №4(9П) (обработанный МИО с энергией 5 кДж), образцы одновременно помещались в камеру микроскопа [86].

Микроскоп типа РЭМ-NANO SEM3000 имеет следующие технические характеристики: разрешение 1 нм; ускоряющее напряжение от 0 до 30 кВ; диапазон увеличения от 10х до 1 000 000х; максимальный размер образца 260 x 240 мм [86].

3.2 Анализ полученных результатов исследования

Расчет ударной вязкости по итогам всех видов замеров был выполнен по формуле (3.1) [32]:

$$a_k = \frac{A_k}{F} \quad (3.1)$$

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

По полученным результатам испытаний образцов группы №1(2П) (без магнитно-импульсной обработки) на ударную вязкость составлена таблицы 3.1 [86].
Таблица 3.1 – Результаты испытаний на ударную вязкость для образцов группы №1(2П) (без магнитно-импульсной обработки) [86]

№ образца	A_k (Дж)	F , (см ²)	a_k , (Дж/см ²)	Среднее значение, Дж/см ²
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	

При магнитно-импульсной обработке образцов №2(5п) с запасенной энергией в конденсаторах МИУ, достигающей 1 кДж, с помощью датчика тока Rogowski coil 5.63 кА/В было зафиксировано максимальное значение амплитуды разрядного тока, составляющее 41 кА, длительность импульса составила 550 мс. Изменение температурных полей во время МИО было зарегистрировано с помощью тепловизора TVP FLIR-P640. Наблюдалось повышение температуры на краях образца и вблизи вершин трещин. Это явление объясняется резким изменением направления токов, с последующем их скоплением и увеличением плотности. Максимальная температура была зарегистрирована на момент окончания воздействия 550 мсек и составила 58 °С [86].

График распределения тепловых полей во время МИО-1кДж, полученный с помощью программы ThermoCAM Resercher Professional 2.8 SR-1 представлен на рисунке 3.15.

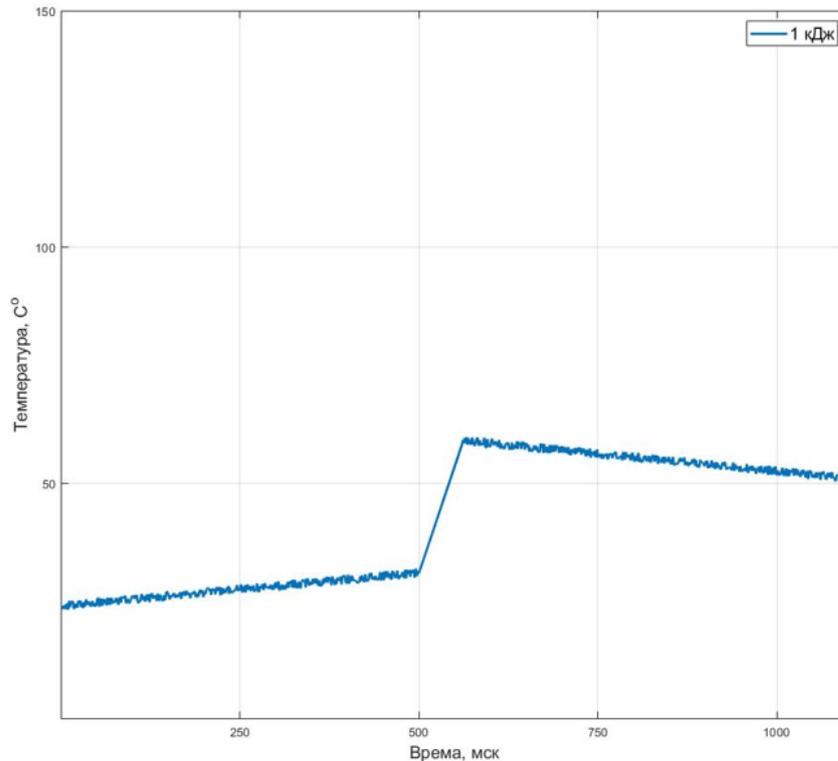


Рисунок 3.15 – Зависимость температуры от времени магнитно-импульсного воздействия при МИО-1кДж для образцов группы №2(5П) [86]

Результаты испытаний образцов группы №2(5П) на ударную вязкость представлены в таблице 3.2 [86].

Таблица 3.2 – Результаты испытаний на ударную вязкость для образцов группы №2(5П) (после магнитно-импульсной обработки МИО-1 кДж) [86]

№ образца	A_k (Дж)	F , (см ²)	a_k , (Дж/см ²)	Среднее значение, Дж/см ²
1	48.6	0.821	59.2	61.2
2	49	0.82	59.7	
3	50.2	0.825	60.8	
4	51.4	0.819	62.7	
5	51.6	0.82	62.9	
6	51	0.824	61.9	

При проведении магнитно-импульсной обработки образцов №3(10П) с энергией МИУ, достигающей 2 кДж, было зафиксировано максимальное значение амплитуды разрядного тока, составившее 55 кА. Длительность импульса составила 600 мс. Максимальная температура была зарегистрирована на момент окончания импульса и составила 84 °С [86].

На рисунке 3.16 показан график изменений температуры во время проведения МИО-2 кДж, полученный с помощью программы ThermoCAM Resercher Professional 2.8 SR-1 [86].

На основе полученных результатов испытаний на ударную вязкость образцов группы №3(10П), подвергнутых магнитно-импульсному воздействию с энергией 2 кДж, была составлена таблица 3.3 [86].

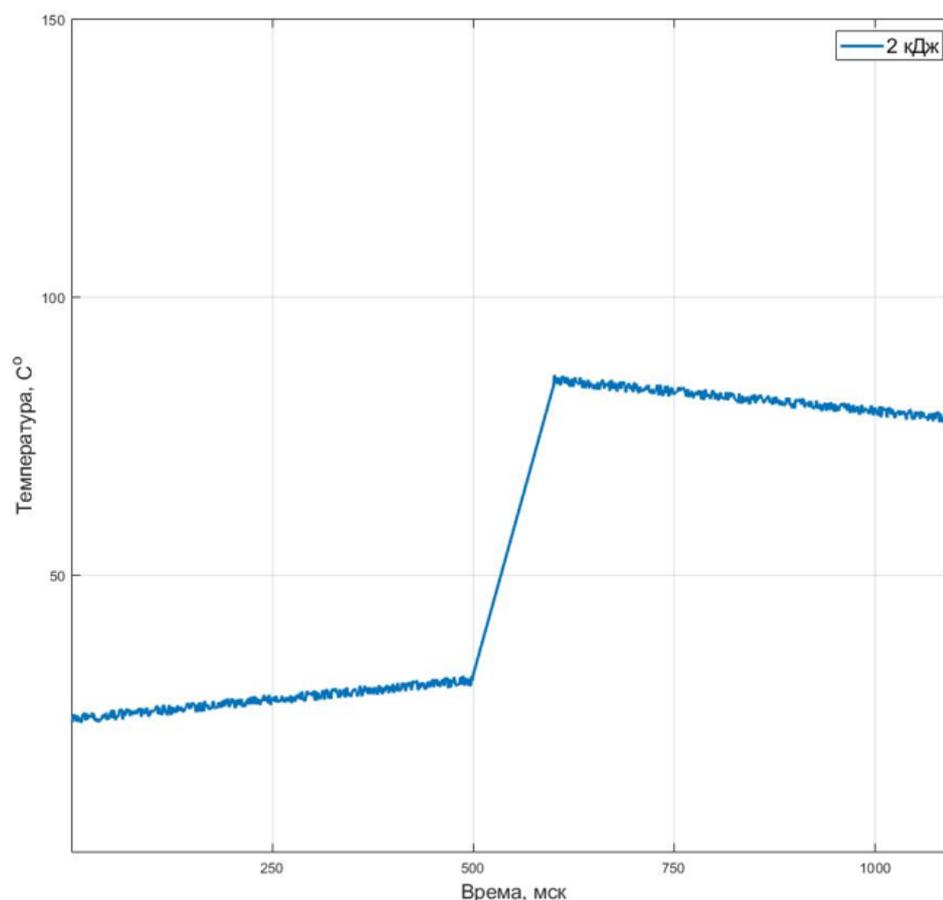


Рисунок 3.16 – График распределения тепловых полей во время МИО-2кДж для образцов группы №3(10П) [86]

Таблица 3.3 – Результаты испытаний на ударную вязкость для образцов группы №3(10П) (после магнитно-импульсной обработки МИО-2 кДж) [86]

№ образца	A_k (Дж)	F , (см ²)	a_k , (Дж/см ²)	Среднее значение, Дж/см ²
1	48.2	0.818	58.9	61.4
2	49	0.80	61.25	
3	50.5	0.825	61.2	
4	51.1	0.82	62.3	
5	51.8	0.823	62.95	
6	51	0.824	61.9	

Сравнение результатов испытаний, представленных в таблицах 3.1 (без МИО), 3.2 (после МИО-1кДж) и 3.3 (после МИО-2кДж), позволяет сделать вывод о том, что магнитно-импульсная обработка с энергией 1 кДж и 2 кДж не оказывала влияния на прочностные свойства металла. Этот вывод может быть объяснен незначительным повышением температуры при МИО, поскольку при МИО с энергией 1 кДж температура возросла на 33 °С, а при МИО с энергией 2 кДж – на 59 °С. Данные изменения температуры являются недостаточными для вызова структурных изменений в металле, которые могли бы существенно повлиять на его прочностные свойства [86].

Более того, пластическая деформация, вызванная этими импульсами, также может оказать влияние на его микроструктуру. Однако, как было указано выше, интенсивность МИО недостаточная для вызова значительных изменений в металлической структуре, что несомненно сказывается на его прочностных свойствах [86].

Таким образом, для достижения более заметного влияния на прочностные характеристики металла, требуется использование более интенсивных энергетических импульсов, которые могли бы вызвать более значительные структурные изменения в материале [86].

Осциллограмма разрядного тока, протекавшего в контуре индуктора во время проведения МИО-5 кДж, изображена на рисунке 3.17. Максимальная амплитуда разрядного тока составила 64 кА, длительность тока -750 мсек [88].

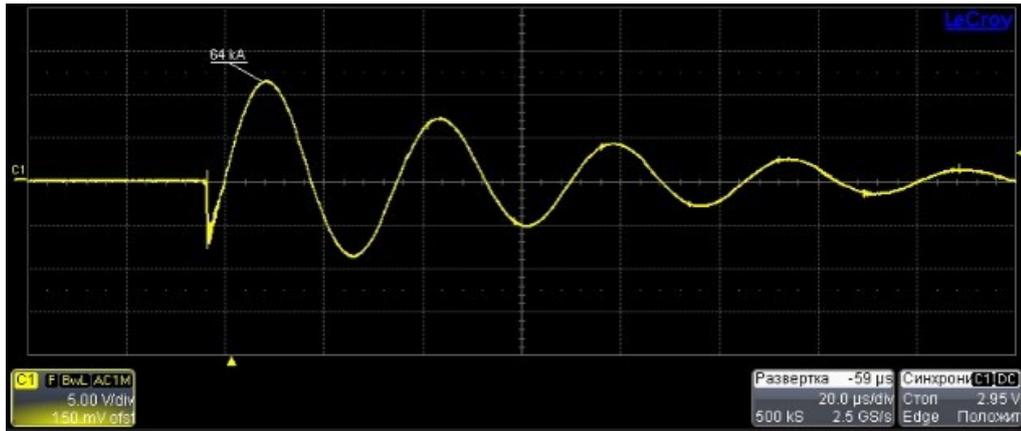


Рисунок 3.17 – Осциллограмма разрядного тока в контуре индуктора при МИО-5 кДж [86]

Снимки распределения тепловых полей при МИО-5кДж, полученные с помощью тепловизора TVP FLIR-P640, показали, что точкой интенсивного теплового воздействия являются вершины трещин и края образца, где зарегистрировано повышение температуры до 290 °С на момент окончания воздействия 710мкс [86].

На рисунке 3.18 представлены снимки распределения температуры при МИО-5кДж в разные моменты времени t [86].

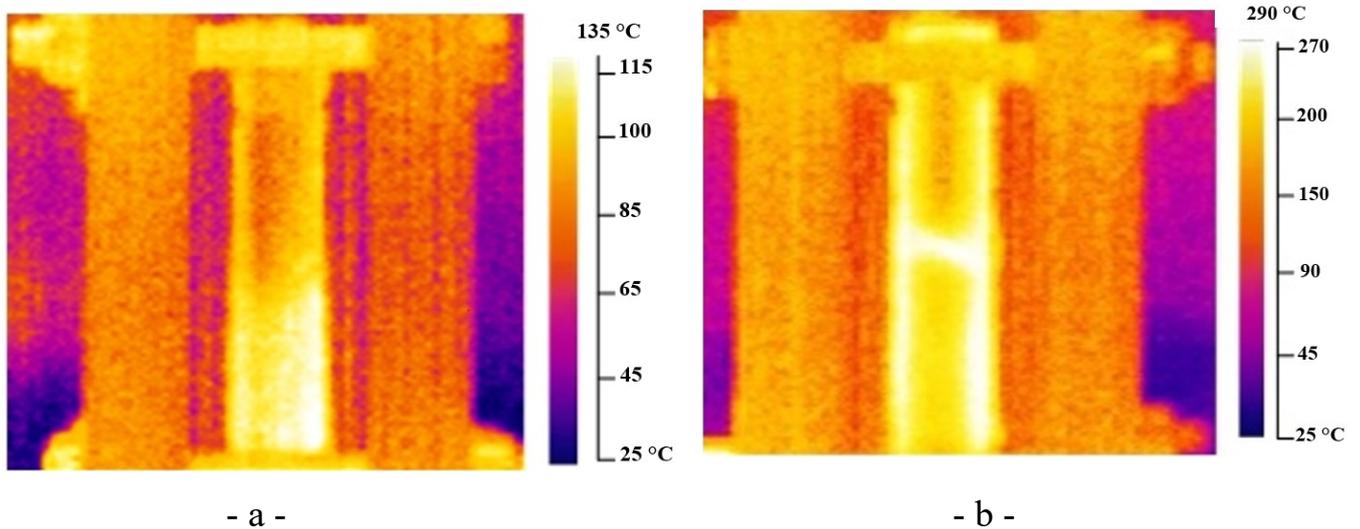


Рисунок 3.18 – Снимки распределения температуры при МИО-5кДж в разные моменты времени

$a - t = 615$ мкс; $b -$ момент окончания магнитно-импульсной воздействия ($t = 710$ мкс) [86]

На рисунке 3.19 показан график изменения температуры во время МИО-5кДж, программы ThermoCAM Resercher Professional 2.8 SR-1.

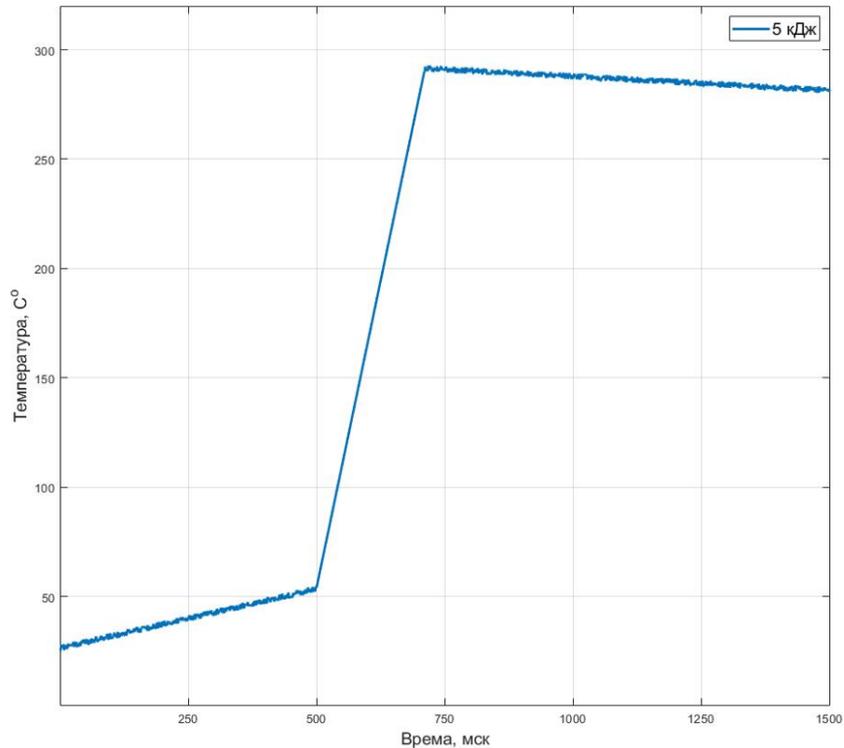


Рисунок 3.19 – Зависимость температуры от времени магнитно-импульсного воздействия при МИО-5кДж для образцов группы №4(9П) [86]

Важно отметить, что используемая модель тепловизора способна регистрировать температурные поля в миллисекундном диапазоне, в то время как процесс обработки происходит на уровне микросекунд. Следовательно, повышение температуры было выше, чем то, что было зарегистрировано тепловизором. Таким образом, результаты измерения температуры не являются количественными (то есть они не отображают точные значения температуры), а представляют собой качественную оценку нагрева образца (представление о характере распределения температурных полей). Это, в сопоставлении с результатами металлографических исследований, дает более глубокое понимание механизма протекания наведенных токов в обрабатываемой детали [86].

Результаты испытаний на ударную вязкость образцов группы №4(9П), подвергнутых магнитно-импульсному воздействию с энергией 5кДж представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты испытаний на ударную вязкость для образцов группы №4(9П) (после магнитно-импульсной обработки МИО-5 кДж) [86]

№ образца	A_k (Дж)	F , (см ²)	a_k , (Дж/см ²)	Среднее значение, Дж/см ²
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	

Результаты испытаний показывают, что ударная вязкость обработанных образцов магнитно-импульсным воздействием с энергией 5 кДж повысилась на 14% по сравнению с необработанными образцами (образцы группы №1(2П), что позволит сделать вывод о том, что образцы после магнитно-импульсной обработки стали более устойчивыми к разрушению [86].

Полученные с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ-NANO SEM3000) снимки поверхности излома образцов изображены на рисунке 3.20 и рисунке 3.21 [86].

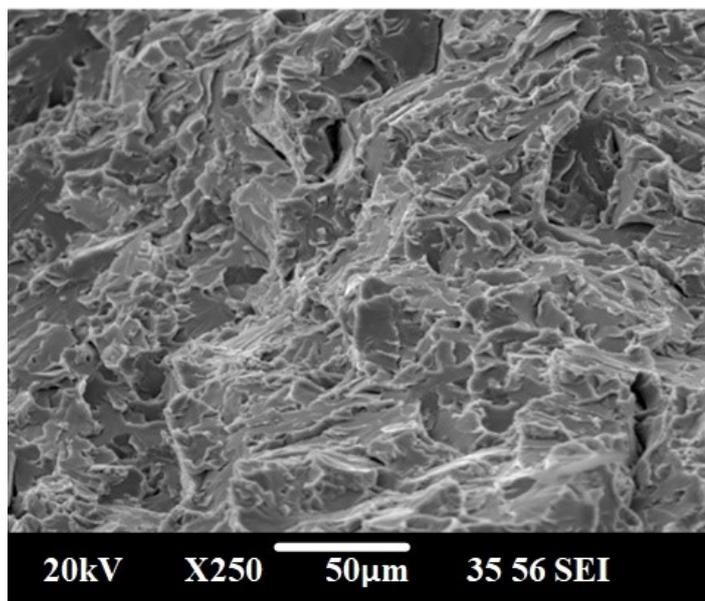


Рисунок 3.20 – Изображение поверхности излома образца из группы №1(2П) (без магнитно-импульсной обработки) [86]

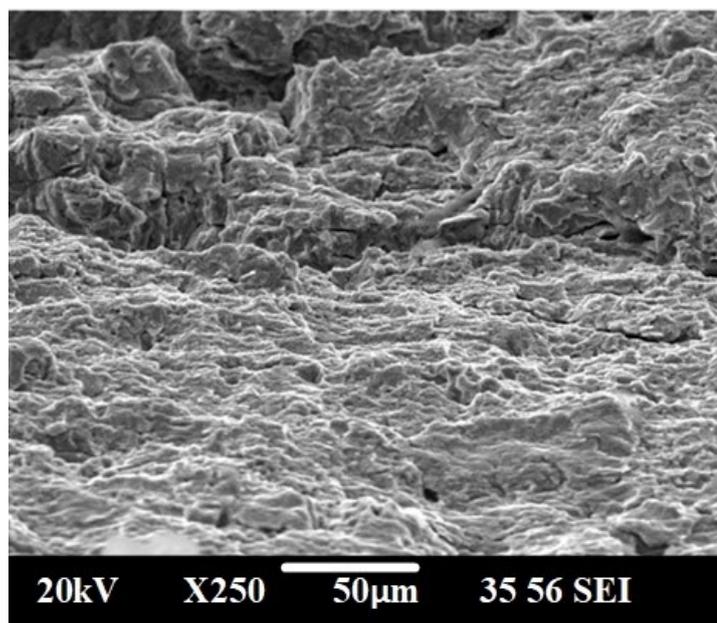


Рисунок 3.21 – Изображение поверхности излома образца из группы №4(9П) (после магнитно-импульсной обработки МИО-5кДж) [86]

На рисунке 3.20 наблюдаются заостренные кромки границ излома, что соответствует признакам хрупкого разрушения. Снимок излома обработанного образца (рисунок 3.21) показывает более сглаженные поверхности излома по сравнению с изломом необработанного образца, о чем свидетельствуют признаки вязкого разрушения (элементы чашечного рельефа) [86].

Таким образом, полученные снимки излома образца 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 способным к поглощению энергии удара перед разрушением [86].

Металлографические снимки микроструктуры металла на поверхности излома, полученные при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ-NANO SEM3000), представлены на рисунке 3.22 и рисунке 3.23.

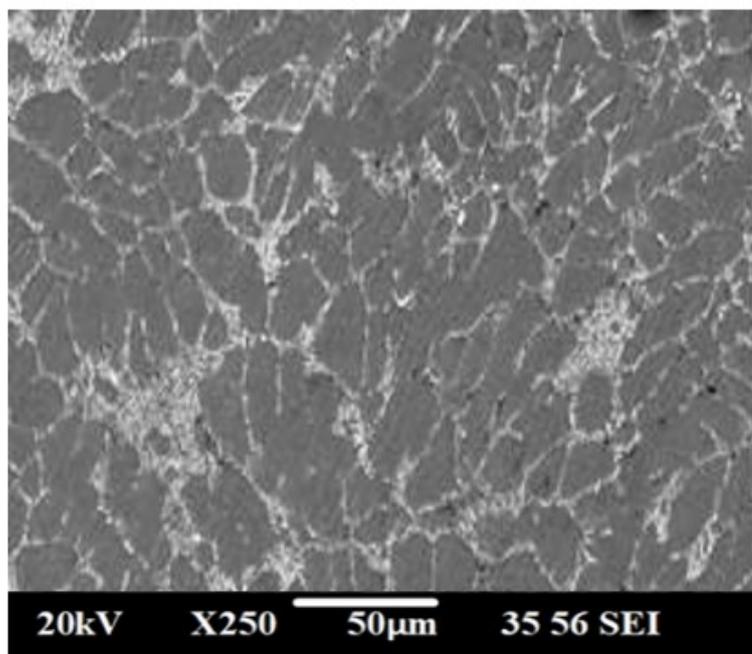


Рисунок 3.22 – Микроструктура поверхности излома образца из группы №1(2П) (без магнитно-импульсной обработки) [118]

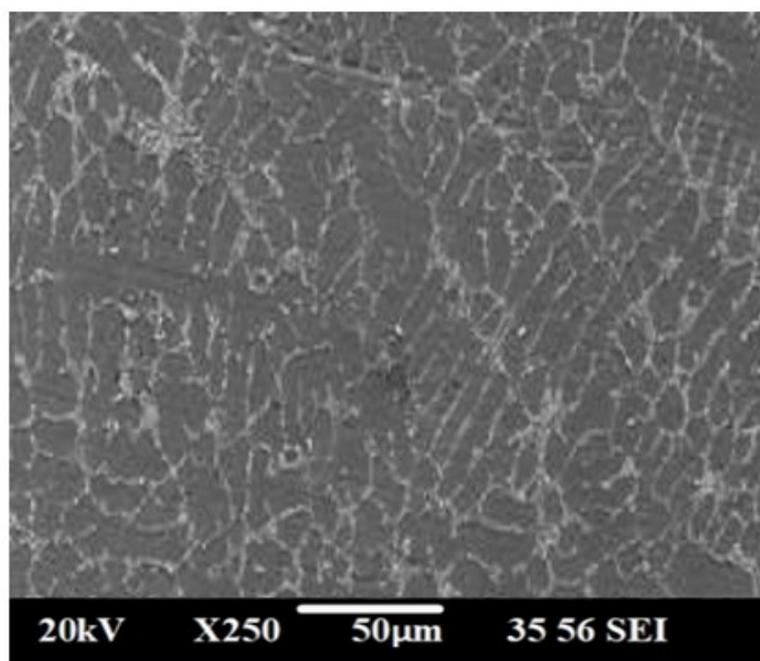


Рисунок 3.23 – Микроструктура поверхности излома образца из группы №4(9П) (после магнитно-импульсной обработки МИО-5кДж) [118]

Сравнивая рисунок 3.22 и рисунок 3.23, можно отметить, что магнитно-импульсная обработка привела к структурным изменениям в виде измельчения микроструктуры отработанного образца (рисунок 3.23) по сравнению с

микроструктурой необработанного образца (рисунок 3.22). Это 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, рисунок 3.23 демонстрирует формирование более однородной и равномерной структуры металла, что делает его более устойчивым к различным видам разрушения, включая ударное разрушение. Полученные результаты исследования соответствуют результатам проведенных исследований в работе [97] о влиянии магнитно-импульсной обработки на механические и прочностные свойства и структуру сплавов.

С другой стороны, можно сказать, что металл обработанных образцов подвергался низкотемпературному отпуску, что могло снизить остаточные напряжения и, соответственно, улучшить его устойчивость к разрушению [86].

3.3 Выводы по главе 3

1. Представлены результаты испытаний на ударную вязкость образцов, вырезанных из бывших в эксплуатации магистрального газопровода, содержащих поверхностные трещины типа КРН. Образцы были разделены на четыре группы. Первая группа была испытана на ударную вязкость без магнитно-импульсной обработки, в то время как остальные группы были испытаны на ударную вязкость после магнитно-импульсной обработки с различными режимами обработки [86].

2. Экспериментально было установлено, что магнитно-импульсная обработка с энергией 1 кДж и 2 кДж не оказывала влияния на прочностные свойства металла. Это можно объяснить незначительным повышением температуры во время МИО, которое оказалось недостаточным для вызова структурных изменений, способных существенно повлиять на прочностные свойства металла образцов [86]. Однако было выявлено, что магнитно-импульсная обработка с энергией 5 кДж привела к повышению прочностных свойств металла трубопровода, содержащего систему трещиноподобных дефектов. В частности, ударная вязкость возросла на 14% [86].

3. Металлографические снимки микроструктуры металла на поверхности излома после магнитно-импульсной обработки с энергией 5 кДж показали, что данная обработка вызвала структурные изменения в виде измельчения зерн с формированием более однородной и равномерной структуры металла [86].

4. Полученные снимки температурных изменений при магнитно-импульсной обработке показывают, что применяемая энергия МИУ не была достаточна для того, чтобы достичь температуры расплавления металла. Таким образом, повышение ударной вязкости произошло не за счет устранения дефектов, а за счет структурных изменений металла, так как было установлено, что характер разрушения после обработки стал более вязким [86].

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДЕФЕКТЫ СПЛОШНОСТИ МЕТАЛЛА НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ

Дефекты сплошности металла, такие как трещины, включения, поры или другие неоднородности, служат концентраторами напряжений при нагрузке. Напряжения сосредотачиваются вокруг этих дефектов, что может привести к их дальнейшему росту вплоть до разрушения. Это особенно опасно в условиях циклических нагрузок, так как повторяющиеся напряжения могут привести к усталостному разрушению материала. Таким образом, для увеличения долговечности рабочих элементов трубопроводного транспорта и повышения их эксплуатационных свойств необходимо уменьшать объем указанных дефектов как исходных, так и развивающихся в процессе эксплуатации [28-30].

Как было отмечено в Главе 2, основными видами воздействия на детали при МИО являются воздействие импульсным давлением и воздействие вихревыми токами. Воздействие на дефекты сплошности материалов упругопластическими волнами, возникающими при МИО, является эффективным при обработке материалов с относительно высокой пластичностью, таких как алюминиевые и титановые сплавы, в то время как для менее пластичных материалов, таких как стали, используемые для изготовления трубопроводах, воздействие давлением может оказаться не столь эффективным.

На основе анализа работ отечественных и зарубежных авторов по вопросу устранения дефектов сплошности магнитно-импульсной обработкой следует отметить, что экспериментальные исследования проводились только на тонких металлических пластинах (толщиной до 1 мм), изготовленных из сплавов с низколегированной трубной стали, титанового сплава и алюминиевого сплава [86]. Данные эксперименты не позволили изучить эффективность магнитно-импульсной обработки в зависимости от глубины залегания дефектов и их локализации относительно поверхности газопровода вследствие значительно большей толщины реальных промышленных трубопроводов.

В данной главе проводились исследования воздействия магнитно-импульсной обработки (МИО) на дефекты сплошности металла магистрального газопровода вихревыми токами. Исследования были проведены на образцах, вырезанных из бывших в эксплуатации магистральных газопроводов, содержащих микротрещины различной формы и геометрических размеров, при различных режимах работы магнитно-импульсной установки (МИУ). Использование образцов, вырезанных из бывших в эксплуатации магистральных газопроводов, позволило провести исследования эффективности магнитно-импульсной обработки для металла трубопровода на стандартных для газопроводов толщинах.

4.1 Методологические основы и методы исследования

4.1.1 Материалы исследования и их характеристики

В качестве материала для исследования, из зоны поперечного стыкового сварного соединения магистрального газопровода $\text{Ø}1220 \times 18,0$ мм, изготовленного из низколегированной стали 17Г1С, был изготовлен дефектный фрагмент. Данный фрагмент содержит макротрещину в зоне сплавления с выходом на поверхность. Очагом зарождения трещины мог быть допустимый дефект сварки (непровара корня шва). Трещина стремительно росла в процессе эксплуатации под действием внутреннего давления в газопроводе. Длина трещины составляет 230 мм (рисунок 4.1). Магистральный газопровод находился в эксплуатации 25 лет.

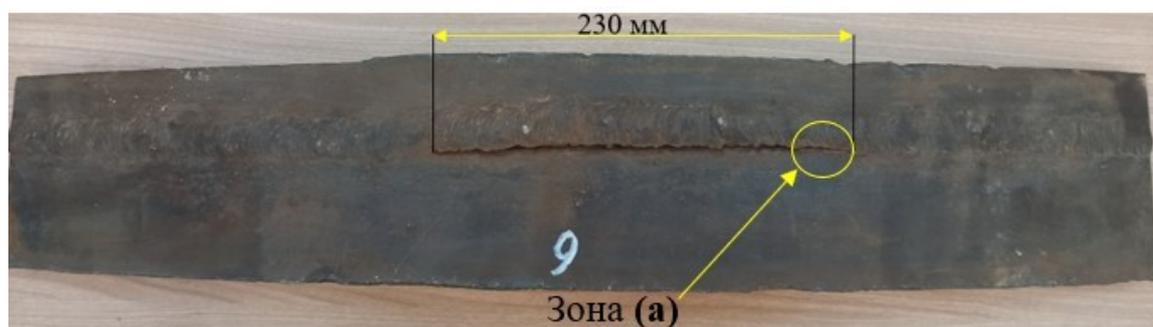


Рисунок 4.1– Фрагмент газопровода «стыковое сварное соединение труб $\text{Ø}1220 \times 18,0$ мм» [118]

Из зоны макротрещины (зона (а), рисунок 4.1) с помощью ленточной пилы были подготовлены два образца для дальнейшего исследования. Размер каждого образца составляет 55×15 мм.

На рисунке 4.2 представлены фотографии полученных образцов с помощью ленточной пилы.

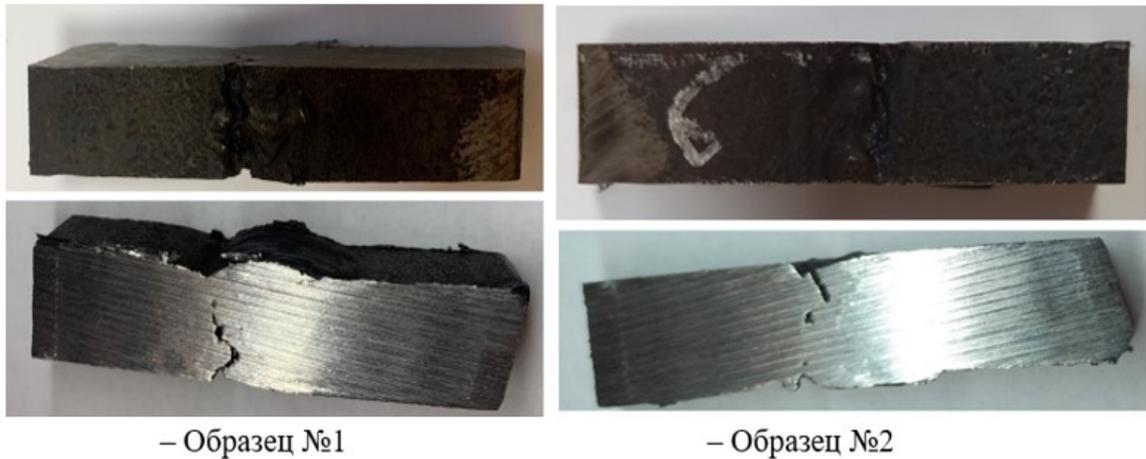


Рисунок 4.2– Вырезанный образец из фрагмента газопровода [118]

Боковая поверхность образцов была отшлифована и отполирована с помощью шлифовальной машины STRUERS. В качестве средств для полировки использовали поликристаллическую суспензию на основе оксида кремния 3 мкм. Рисунок 4.3 показывает боковую поверхность образца №1 после процессов шлифовки и полировки, а также на нем отмечены участки (зоны) для подробных исследований.

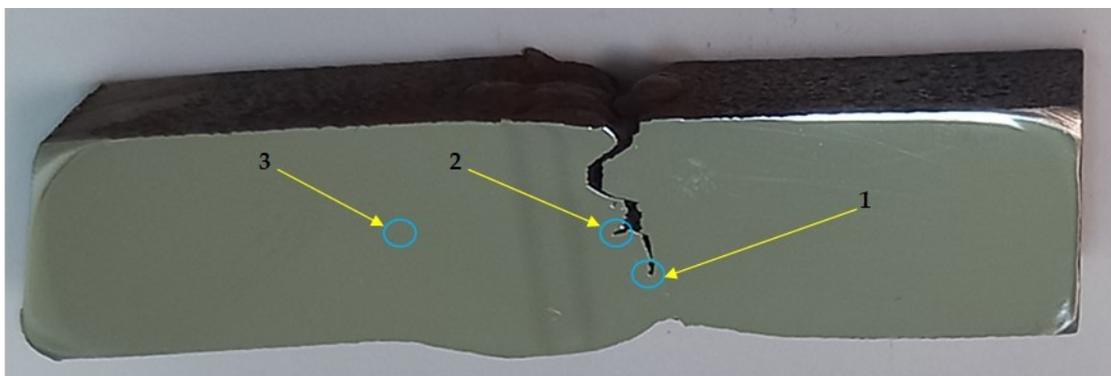


Рисунок 4.3– Боковая поверхность образца №1 после процессов шлифовки и полировки [118]

Образец исследования №1 содержит центральную макротрещину, которая распространяется от внешней поверхности вглубь металла газопровода в зоне термического влияния, образовавшейся в процессе сварки. Глубина трещина составляет 13 мм, а среднее раскрытие – 2.3мм. Трещина разветвляется в двух направлениях, вершинам которых присвоены номера 1 и 2.

Боковая поверхность образца №2 после процессов шлифовки и полировки изображена на рисунке 4.4.

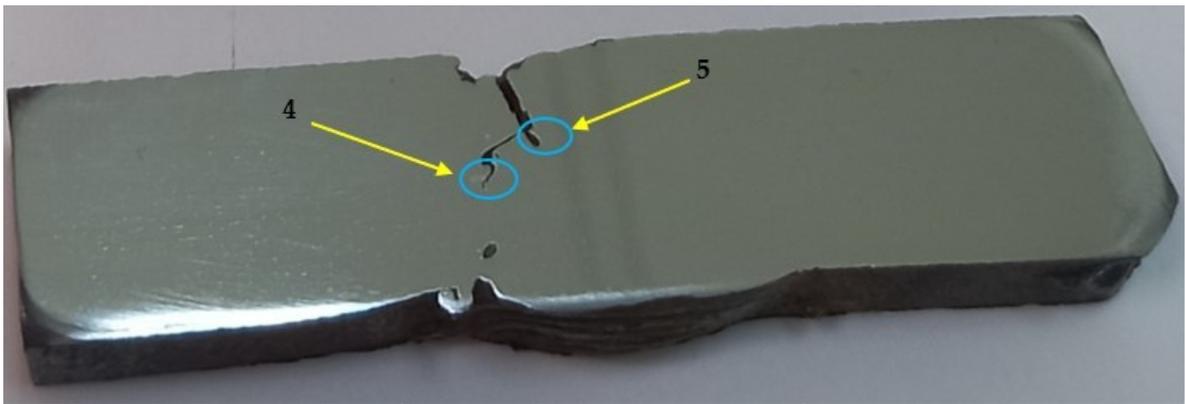


Рисунок 4.4 – Боковая поверхность образца №2 после процессов шлифовки и полировки [118]

Образец исследования №2 содержит центральную макротрещину, которая распространяется от внешней поверхности вглубь металла газопровода в зоне термического влияния, образовавшейся в процессе сварки. Глубина трещина составляет 9.5 мм, а среднее раскрытие – 2.1мм. Трещина разветвляется в двух направлениях, вершинам которых присвоены номера 4 и 5.

4.1.2 Характеристики методов исследования и применяемых приборов

Исходное состояние (до обработки магнитно-импульсным воздействием) микроструктуры макротрещины у вершин №1 и №2 для образца №1, а также у вершины №4 для образца №2 было исследовано с помощью оптического микроскопа Olympus BX51.

После определения исходного состояния макротрещины у вершин №1 и №2 для образца №1, а также у вершины №4 для образца №2, Оба образца были

подвергнуты магнитно-импульсному воздействию с помощью магнитно-импульсной установки МИУ-40 кДж-СУ.

Обработка образцов осуществлялась при двух разных технологических режимов работы МИУ: при первом режиме запасенная энергия в конденсаторах установки составила 10 кДж, при втором режиме - 20 кДж.

После каждого этапа обработки, состояние микроструктуры макротрещины у вершин №1 и №2 для образца №1, а также у вершины №4 для образца №2 было повторно исследованы на оптическом микроскопе Olympus BX51.

Для получения более детального изображения изменений в микроструктуре вершин трещины были проведены металлографические исследования с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ-NANO SEM3000). Исследования были осуществлены после магнитно-импульсной обработки с энергией 20 кДж.

Также была исследована микроструктура металла образца в области около вершин трещин до и после магнитно-импульсной обработки с целью выявления изменений в структуре металла после проведения данной обработки.

Параметры магнитно-импульсной установки МИУ-40кДж-СУ представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры МИУ-40кДж-СУ [118].

Тип МИУ	Запасаемая энергия (кДж)	Напряжение заряда (кВ)	Собственная частота разряда (кГц)	Масса (кг)	Габаритные Размеры (м)
МИУ-40	40	1 - 20	34	1500	1.950 x 1.700 x 1.860

На рисунке 4.5 изображена магнитно-импульсная установка МИУ-40кДж-СУ, к которой подключен цилиндрический индуктор.



Рисунок 4.5 –Магнитно-импульсная установка МИУ-40кДж-СГАУ [118]

Обработка образца производилась с помощью цилиндрического индуктор. Токоведущая спираль индуктора изготовлена из медной проволоки сечением 6×12 мм. В качестве витковой изоляции на медную проволоку были намотаны: один слой ленты из липкой стеклоткани, за которым следовали четыре слоя ленты из лавсановой пленки. Изоляция, образующая корпус индуктора, выполнена из эластичного материала, заполняющего форму под давлением. Число витков индуктора составило 10 витков, а внутренний диаметр -70 мм. При МИО образцы были помещены поочередно внутри индуктора.

Осциллограмма разрядного тока, протекавшего в контуре индуктора была зарегистрирована с помощью датчика тока rogowski coil 5,63 кА/В, датчик тока был

подключен к цифровому осциллографу LeCroy wavesurfer 44Xs-A 400 МГц для отображения полученной осциллограмма.

Рисунок 4.6 показывает цилиндрический индуктор, в котором помещен образец, так же показан датчик тока, подключенный к выводам индуктора.

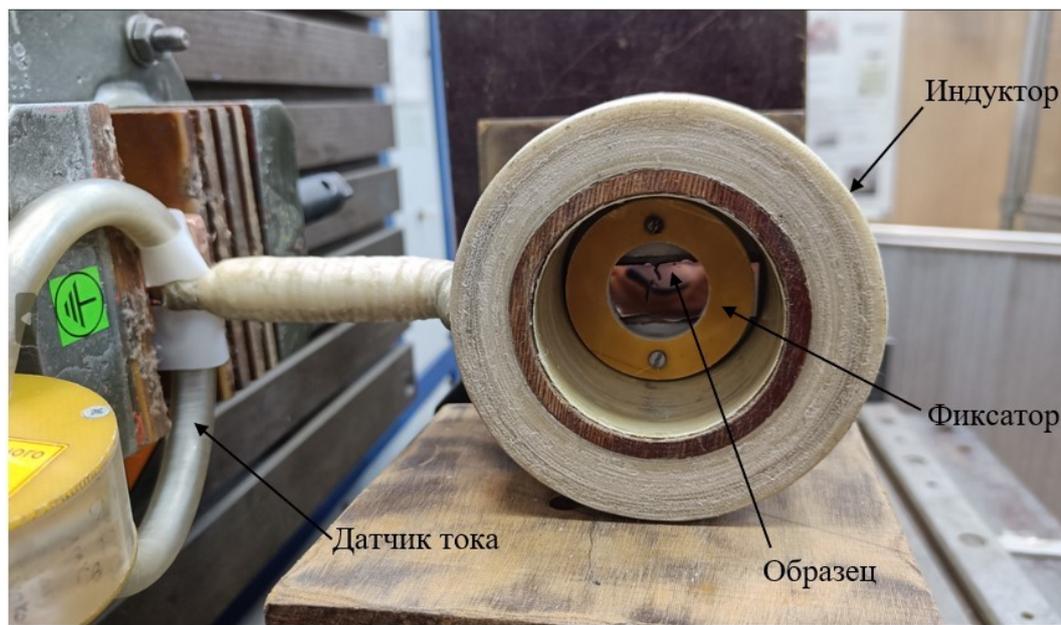


Рисунок 4.6 – Цилиндрический индуктор для магнитно-импульсной обработки [118]

Для качественной и количественной оценки нагрева образца под воздействием вихревых токов, были сделаны снимки распределения тепловых полей в процессе МИО. Снимки были получены с помощью тепловизора FLIR SC7000. Для более детального анализа температурных данных, получаемых с тепловизора, и для построения графиков нагрева выбранных зон и точек на поверхности обрабатываемых образцов применялась программа ThermoCAM Resercher Professional 2.8 SR-1.

4.2 Исследование влияния МИО на дефектное состояние микротрещины

На рисунке 4.7 представлено изображение исходного состояния конца макротрещины №1 (образец №1), полученное микроскопом при 50-кратном увеличении микроскопа на нетравленном шлифе. На рисунке 4.7 наблюдается

микротрещина, распространяющаяся от конца №1 вглубь металла, длина микротрещины составила 711.2 мкм, среднее раскрытие - 65 мкм.

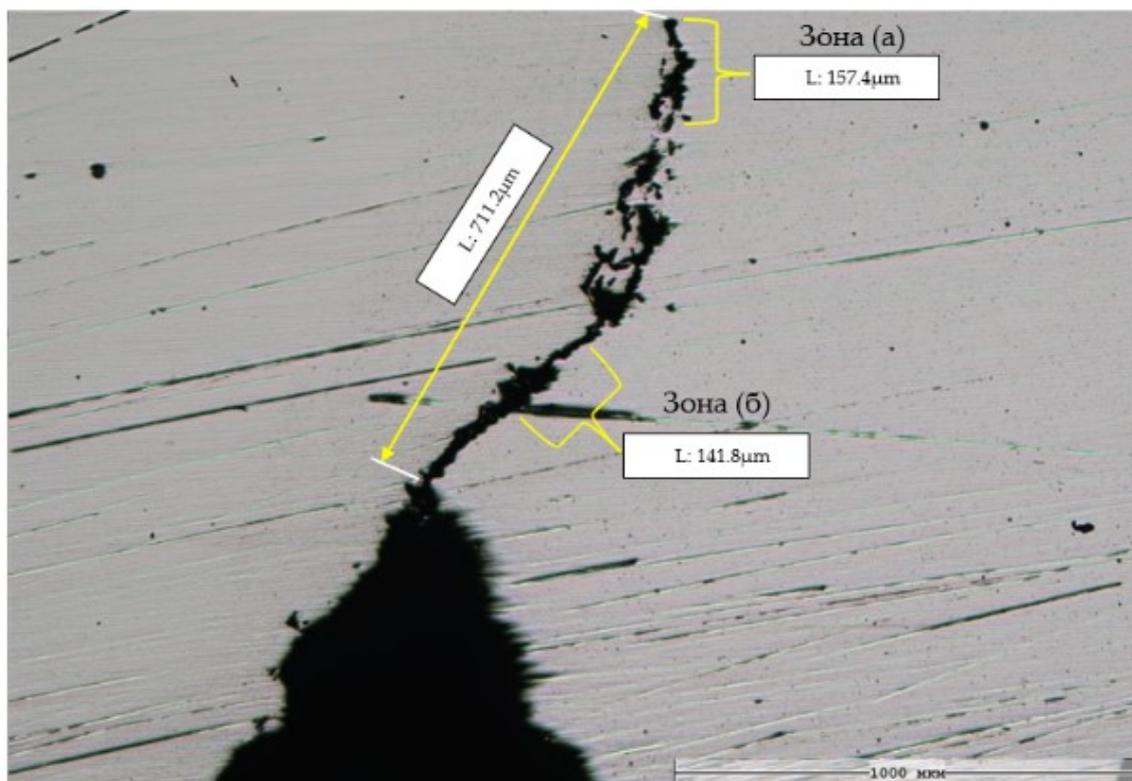


Рисунок 4.7 – Изображение исходного состояния конца трещины №1(образец№1) при 50-кратном увеличении [118]

На рисунке 4.7 отмечены две зоны: зона (а) представляет собой вершину микротрещины, распространяющейся от конца №1, в то время как зона (б) находится дальше от вершины и ближе к области инициации микротрещины.

Рисунке 4.8 показывает исходное состояние вершины микротрещины, распространяющейся от конца №1 (образец №1), изображение было получено с помощью микроскопа при 500-кратном увеличении.

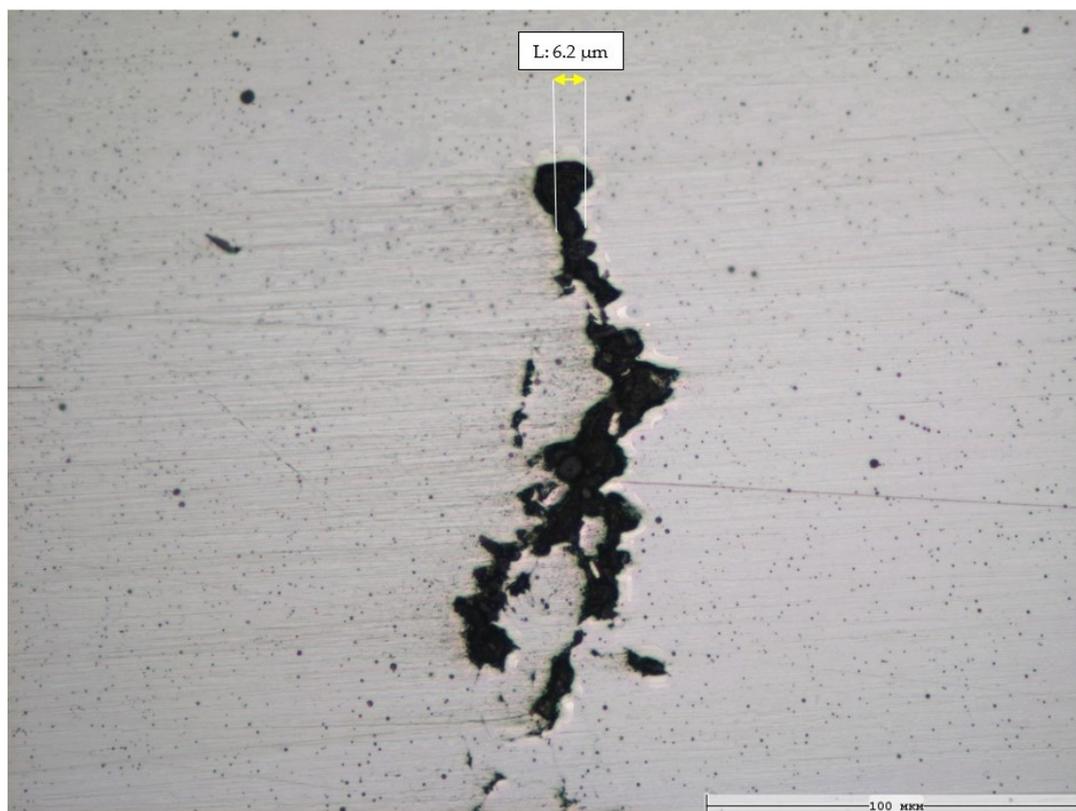


Рисунок 4.8 – Исходное состояние вершины микротрещины (зона (а)) при 500-кратном увеличении [118]

Исходное состояние зоны (б) микротрещины, распространяющейся от конца №1 (образец №1), изображено на рисунке 4.9. Изображение было получено с помощью микроскопа при 100-кратном увеличении.

При проведении магнитно-импульсной обработки образца №1 с энергией 10 кДж была зарегистрирована осциллограмма разрядного тока, протекавшего в контуре индуктора (рисунок 4.10).

Максимальная амплитуда разрядного тока составила 76 кА, длительность тока 700 мсек.

После проведения магнитно-импульсной обработки образца №1 с энергией 10 кДж было исследовано состояние вершин №1, №2 (образец №1) с помощью микроскопом.



Рисунок 4.9 – Исходное состояние зоны (б) микротрещины при 100-кратном увеличении [118]

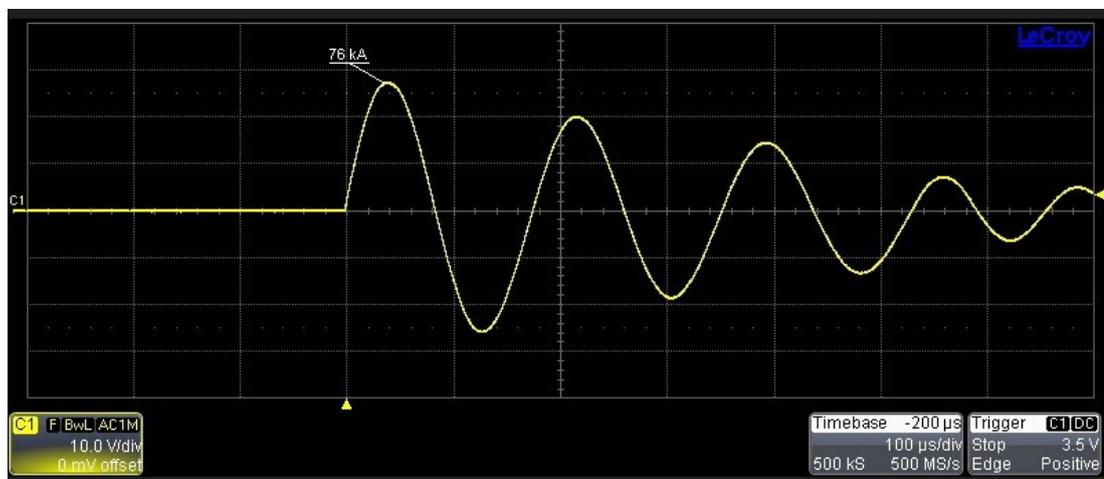


Рисунок 4.10 – Осциллограмма разрядного тока при МИО-10 кДж [118]

На рисунке 4.11 представлено изображение конца макротрещины №1 после магнитно-импульсной обработки мощностью 10кДж, полученное микроскопом при 50-ом увеличении.

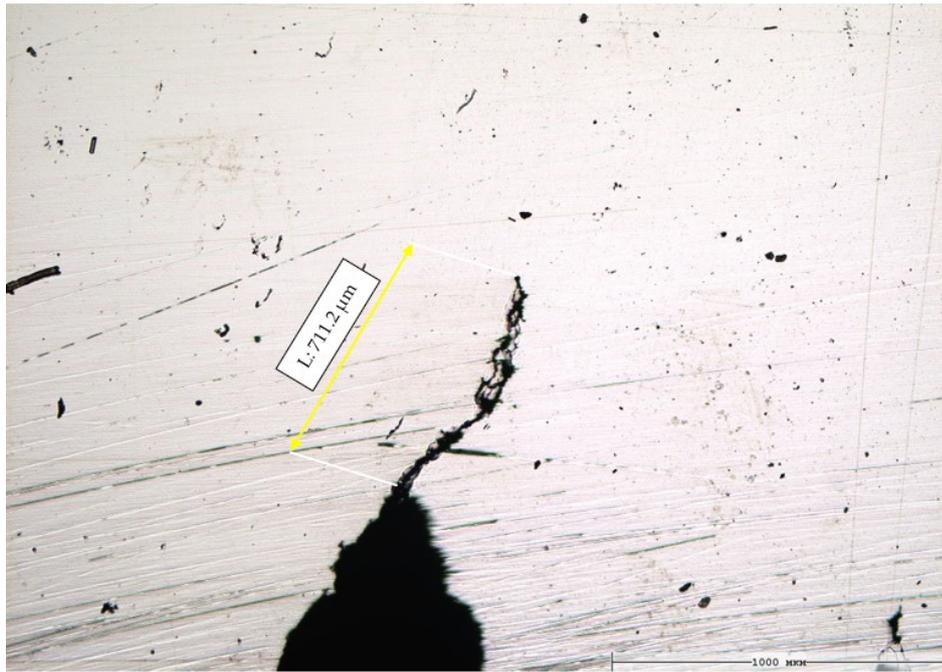


Рисунок 4.11 – Изображение конца макротрещины №1 после МИО-10кДж при 50-кратном увеличении [118]

Состояние вершины микротрещины (зона (а)), распространяющейся от конца №1 после МИО-10 кДж представлено на рисунке 4.12.

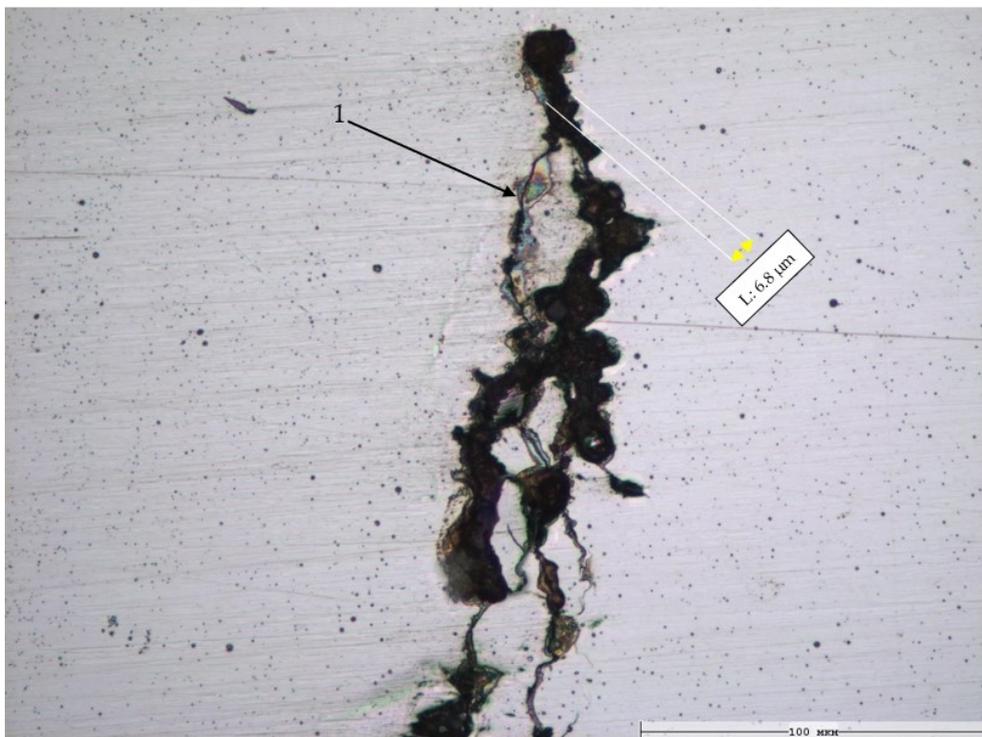


Рисунок 4.12 – Состояние вершины микротрещины у конца №1(зона (а)) после МИО-10кДж, получено при 500-кратном увеличении [118]

Сравнивая рисунок 4.8 и рисунок 4.12 можно отметить, что режим МИО-10кДж вызвал локальный нагрев, приведший к точечному расплавлению краев микротрещины и образованию оксидов. Кроме того, наблюдается отделение микрозон с краев трещины (обозначено номером 1 на рисунке 4.12). 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.

На рисунке 4.13 представлено изображение конца макротрещины №2(образец №1) после магнитно-импульсной обработки с энергией разряда 10кДж, полученное микроскопом при 500-ом увеличении.

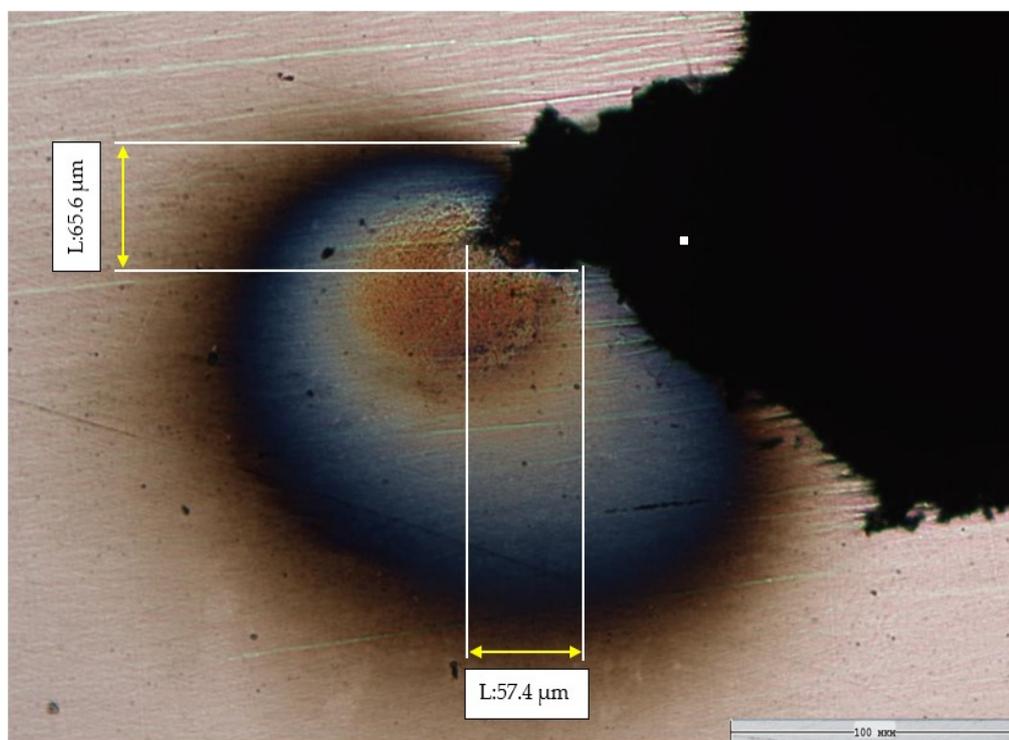


Рисунок 4.13 – Состояние конца макротрещины №2 после МИО-10кДж, получено при 500-кратном увеличении [118]

На рисунке 4.13 также наблюдаются последствия значительного повышения температуры, которые проявились в появлении цвета побежалости, при этом признаки оплавления металла отсутствовали. Полученные результаты можно объяснить более сглаженной формой вершины №2, поскольку она имеет маленькую глубину относительно ее раскрытия, что привело к рассеиванию

индукционных токов, и как следствие, температура металла при обработке при режиме 10 кДж не достигла значения, необходимого для расплавления металла.

Рисунки 4.12 и 4.13 позволяют говорить о том, что плотность вихревых токов, наведенных при МИО-10кДж, не была достаточной для повышения температуры до значения, необходимого для плавления металла образца.

При проведении магнитно-импульсной обработки образца №1 с энергией 20 кДж была с помощью датчика тока зарегистрирована осциллограмма разрядного тока, протекавшего в контуре индуктора (рисунок 4.14). Максимальная амплитуда разрядного тока составила 88 кА, длительность импульса 800 мсек.

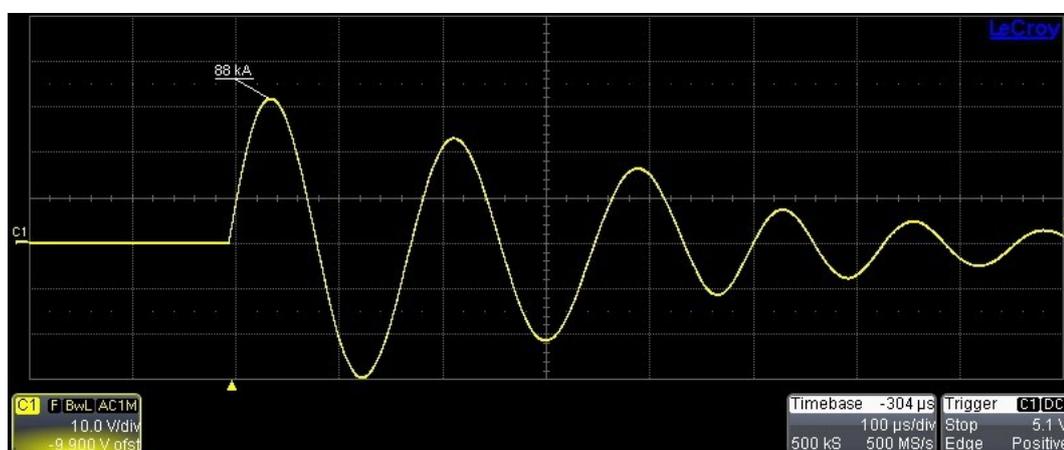


Рисунок 4.14 – Осциллограмма разрядного тока при МИО-20 кДж [118]

Микроструктура вершин макротрещины №1 и №2 образца №1 после второго режима обработки была повторно исследована посредством оптического микроскопа. На рисунке 4.15 представлено изображение вершины макротрещины №1 после магнитно-импульсной обработки 20кДж, полученное при 100-ом увеличении.

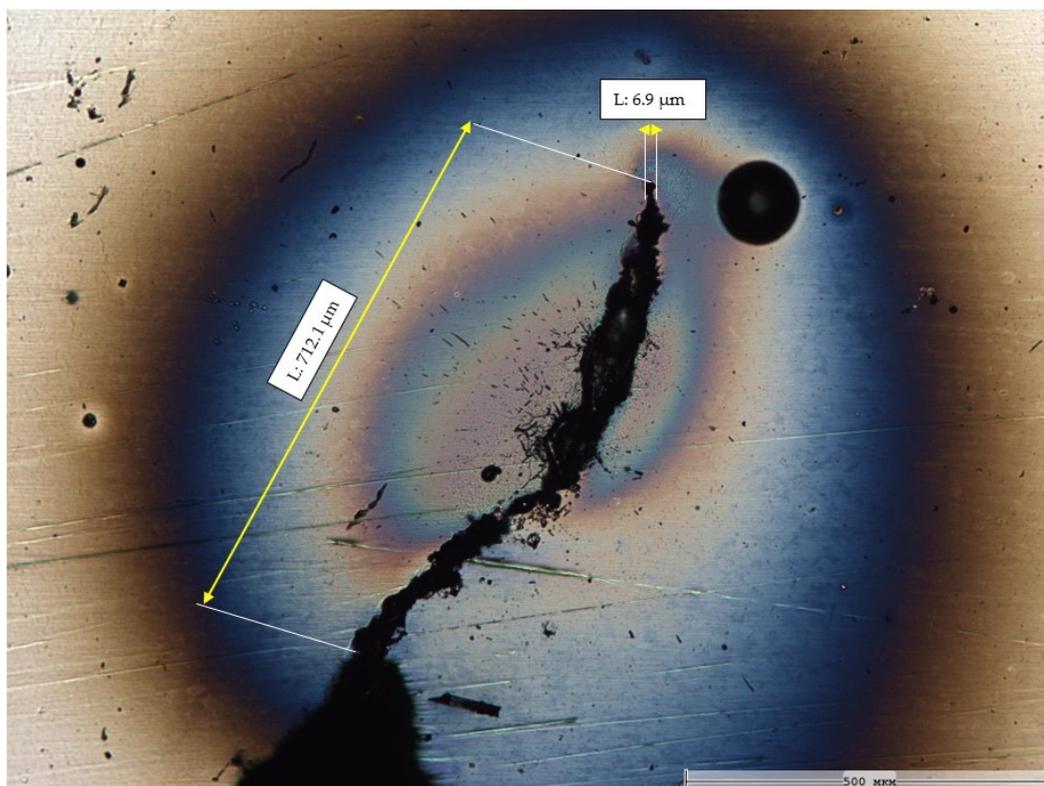


Рисунок 4.15 – Изображение конца трещины №1(образец №1) после МИО-20 кДж при 100-кратном увеличении [118]

На рисунке 4.15 представлены последствия локального нагрева в области вершины микротрещины №1, демонстрирующие возникновение зоны термического влияния. По краям вершины №1 появились цвета побежалости стали. Температура у вершины микротрещины №1 достигла значений температуры плавления стали, что подтверждается расплавлением «островных» микроучастков, отделившихся от краев вершины после первого режима МИО-10кДж (обозначено номером 1 на рисунке 4.12), а также закристаллизовавшимися микробрызгами от расплавленного металла на поверхности микрошлифа. В результате расплавления этих микроучастков в области микротрещины №1 произошло перераспределение металла – край трещины заполнился металлом с образованием оксидных пленок, но вблизи вершины №1 сформировалась сферическая пора, что является менее опасным дефектом по сравнению с острым концом трещины.

Для более детального изображения изменений в микроструктуре вершин трещины №1 были проведены металлографические исследования с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ-NANO SEM3000).

Рисунок 4.16 показывает состояние вершины микротрещины, распространяющейся от конца макротрещины №1 (образец №1) после МИО-20кДж, полученное с помощью растрового электронного микроскопа при 250-ом увеличении.

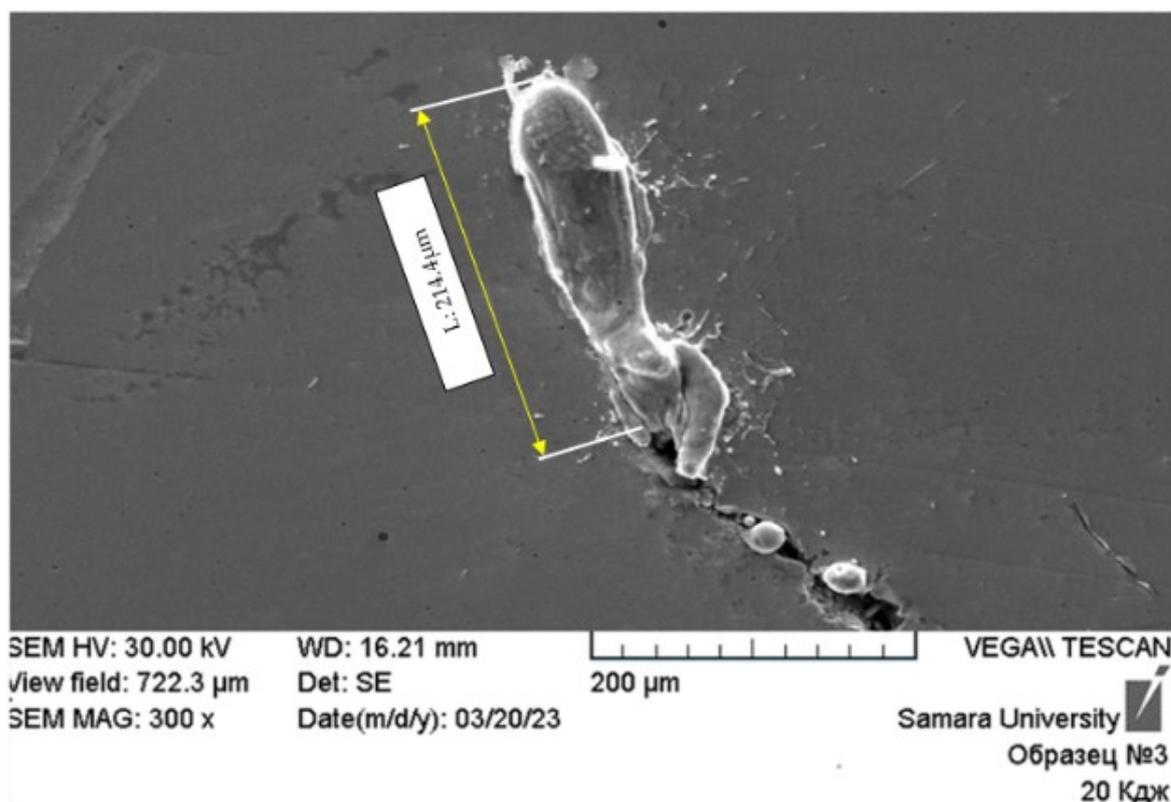


Рисунок 4.16 – Состояние вершины микротрещины у конца №1(зона (а)) после МИО-20кДж, получено электронным микроскопом при 250-кратном увеличении [118]

На рисунке 4.16 наблюдается заполнение вершины микротрещины №1 расплавленным металлом после проведения магнитно-импульсной обработки с энергией 20 кДж. Длина зоны, которая была заполнена 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 (б) микротрещины, распространяющейся от конца №1 (образец №1), изображено на рисунке 4.17. Изображение было получено с помощью микроскопа при 500-кратном увеличении.

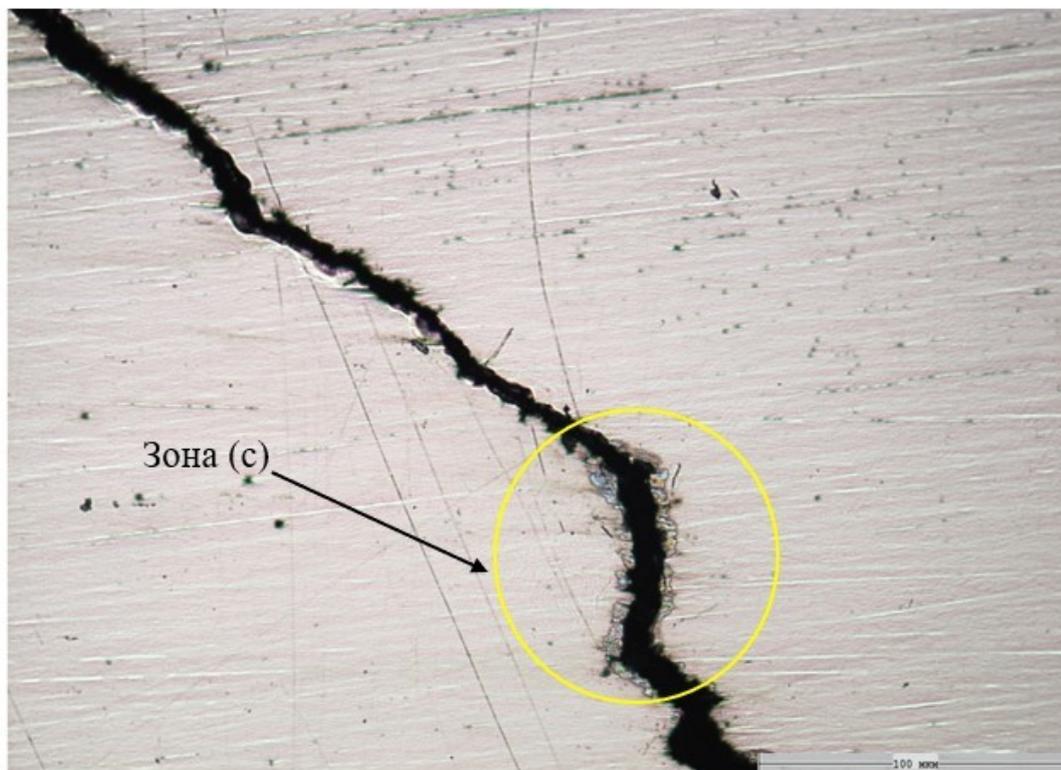


Рисунок 4.17 – Состояние вершины микротрещины у конца №1(зона (б)) после МИО-20кДж, получено при 500-кратном увеличении [118]

На рисунке 4.17 также наблюдаются последствия локального нагрева, выраженные в образовании оксидов (зона (с)).

Рисунки 4.16 и 4.17 показывают, что расплавление металла произошло в области вершины микротрещины (зона, а, рисунок 4.7 и рисунок 4.16), в то время как на более удаленных от вершины участках (зона б, рисунок 4.7 и зона с, рисунок 4.17) 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.

Рисунок 4.18 демонстрирует состояние вершины №2 (образец №1) после магнитно-импульсной обработки с энергией 20кДж, полученное микроскопом при 500-кратном увеличении.

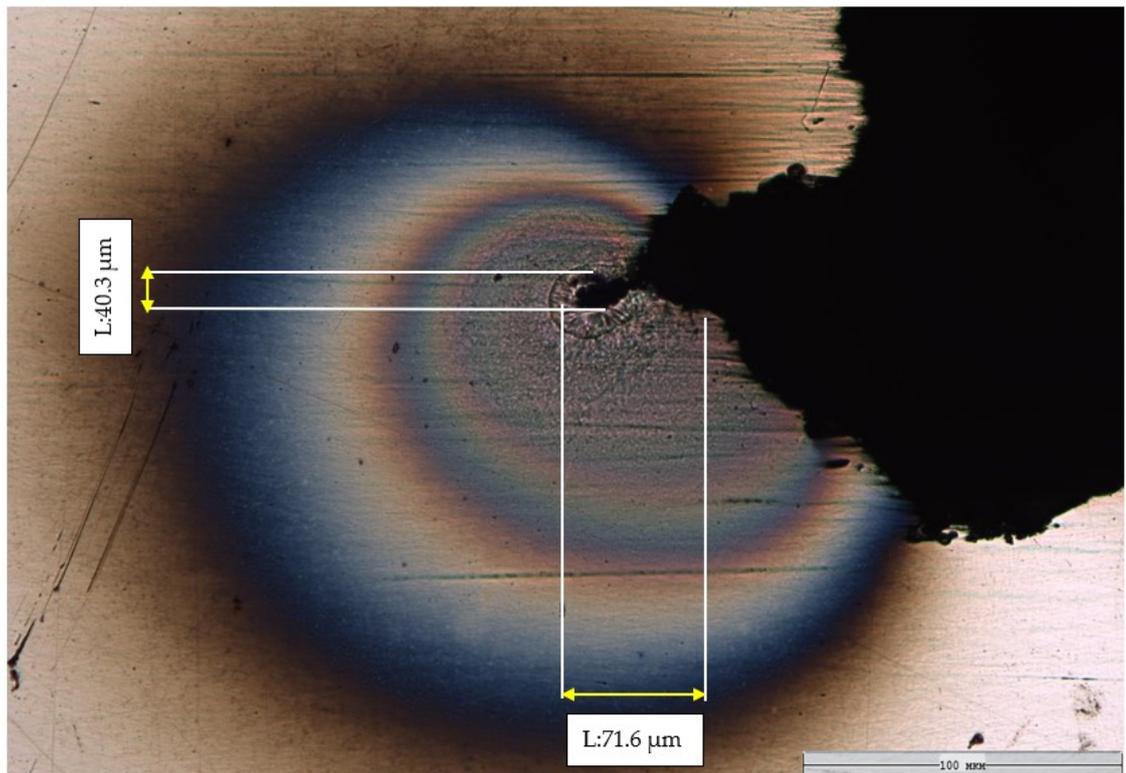


Рисунок 4.18 – Состояние конца макротрещины №2 после МИО-20 кДж, получено микроскопом при 500-кратном увеличении [118]

На рисунке 4.18 также наблюдается переплавление микроучастка в области вершины №2 с образованием кратера, что объясняется тем, что плотность индукционных токов достигла значений, необходимых для повышения температуры до точки плавления металла. В результате было отмечено увеличение длины микротрещины, при этом произошло затупление вершины, так как шероховатый рельеф поверхность края трещины стал более сглаженным.

Известно, что форма трещины существенно влияет на коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} в ее вершинах. Более вытянутые трещины вызывают более высокую концентрацию напряжений в вершинах по сравнению с трещинами, имеющими более закругленную форму. Это объясняется тем, что в области острых вершин происходят значительные изменения геометрии металла, что приводит к большим градиентам напряжений в этой области. Следовательно, напряжение увеличивается, поскольку оно является функцией его градиента. В то время как трещины с более закругленными вершинами вызывают более равномерному распределению напряжений вдоль трещины, соответственно коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} снижается.

Таким образом, на основе представленных результатов на рисунке 4.18 можно сделать вывод, что МИО-20кДж привела к снижению коэффициента интенсивного напряжения K_{Ic} в области вершины трещины, что в свою очередь снижает риск дальнейшего роста трещины при нагрузке, поскольку вершины трещины затупилась и стала более гладкой.

На основе полученных результатов обработки образца №1 можно отметить, что эффективность применяемой технологии в значительной степени зависит от геометрии и размеров трещины. Так как у острой вершины №1 размером в несколько микрометров произошло расплавление краев трещины с последующим их заполнением расплавленным металлом, в то время как у широкой вершины №2 размером в десятки микрометров произошло рассеивание индукционных токов с последующим снижением температуры, что требовало большего количества энергии для достижения точки плавления металла.

Другим фактором, который мог бы влиять на эффективность МИО служит регулярность вершины трещины, так как сложная конфигурация создает неблагоприятные условия для протекания вихревых токов, что приводит к их рассеиванию с последующим снижением их плотности. Следовательно, снижение температуры возле вершины №2 также могло быть обусловлено сложной формой вершины трещины.

На рисунке 4.19 представлено изображение исходного состояния конца макротрещины №4 (образец №2), полученное микроскопом при 50-кратном увеличении на нетравленном шлифе. На рисунке 4.19 наблюдается микротрещина, распространяющаяся от конца №4 вглубь металла.

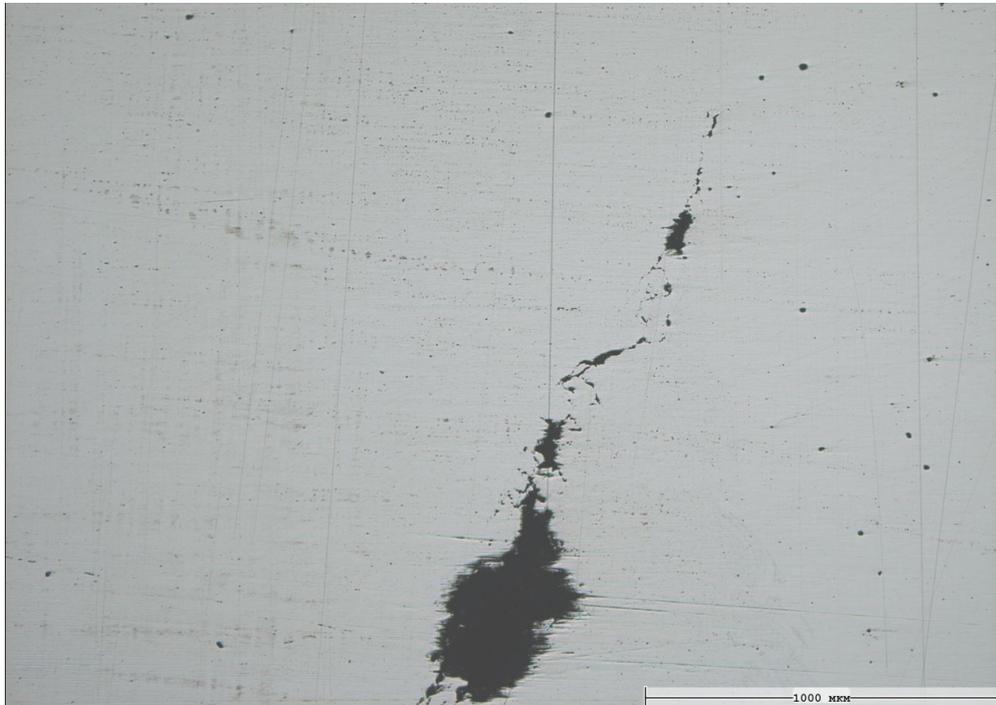


Рисунок 4.19 – Изображение исходного состояния конца трещины №4(образец№2) при 50-кратном увеличении [118]

После проведения магнитно-импульсной обработки образца №2 с энергией 10 кДж состояние вершины №4 было повторно исследовано с помощью микроскопом при 100-кратном увеличении (рисунок 4.20)

Аналогично полученным результатам при МИО-10кДж вершины макротрещины №1 (образец №1), рисунок 4.20 демонстрирует последствия локального нагрева в области вершины микротрещины, сопровождавшегося образованием оксидов. Также наблюдается отделение микрозон с краев трещины под действием высокого импульсного давления, образовавшегося в рабочей зоне индуктора вследствие отталкивания магнитных полей индуктора и вихревых токов.

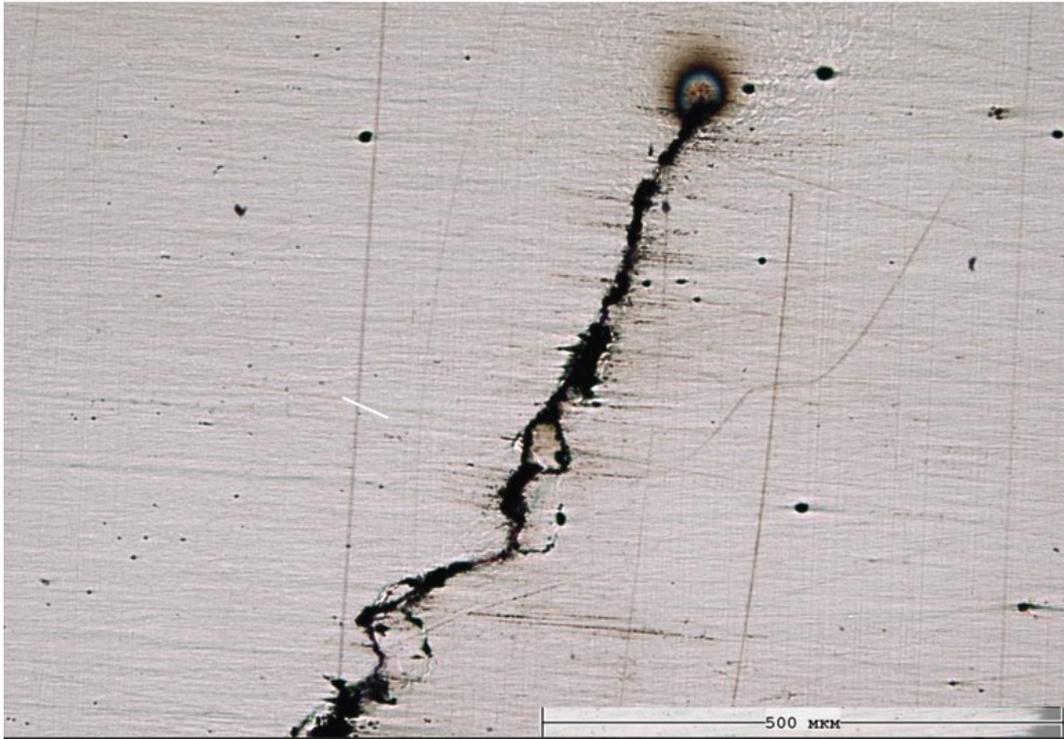


Рисунок 4.20 – Изображение состояния конца трещины №4(образец №2) после МИО-10кДж, получено микроскопом при 100-кратном увеличении [118]

Признаков расплавления металла не было обнаружено, что обусловлено недостаточной плотностью вихревых токов, наведенных в металле образца при энергии 10 кДж для достижения значения, необходимого для повышения температуры до точки плавления металла.

Состояние вершины №4 после проведения магнитно-импульсной обработки образца №2 с энергией 20 кДж было повторно исследовано с помощью микроскопом при 100-кратном увеличении (рисунок 4.21).

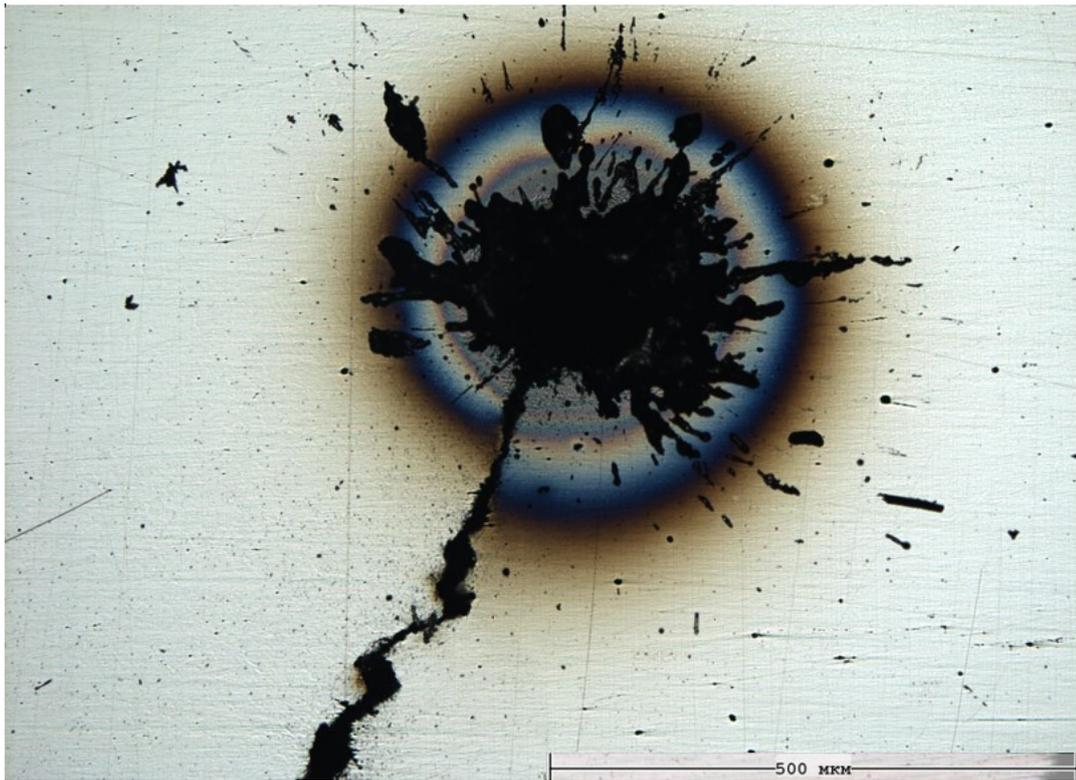


Рисунок 4.21 – Изображение состояния конца трещины №4(образец №2) после МИО-20кДж, получено микроскопом при 100-кратном увеличении [118]

На рисунке 4.21 представлены последствия локального нагрева в области вершины микротрещины №4, демонстрирующие возникновение зоны термического влияния. По краям вершины №4 появились цвета побежалости стали. Температура у вершины микротрещины №4 достигла значений температуры плавления стали, что подтверждается закристаллизовавшимися микробрызгами от расплавленного металла на поверхности микрошлифа.

Для более детального изображения изменений в микроструктуре вершин трещины №4 были проведены металлографические исследования с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ-NANO SEM3000).

Рисунок 4.22 показывает состояние вершины микротрещины, распространяющейся от конца макротрещины №4 (образец №2) после МИО-20кДж, полученное с помощью растрового электронного микроскопа при 100-ом увеличении.

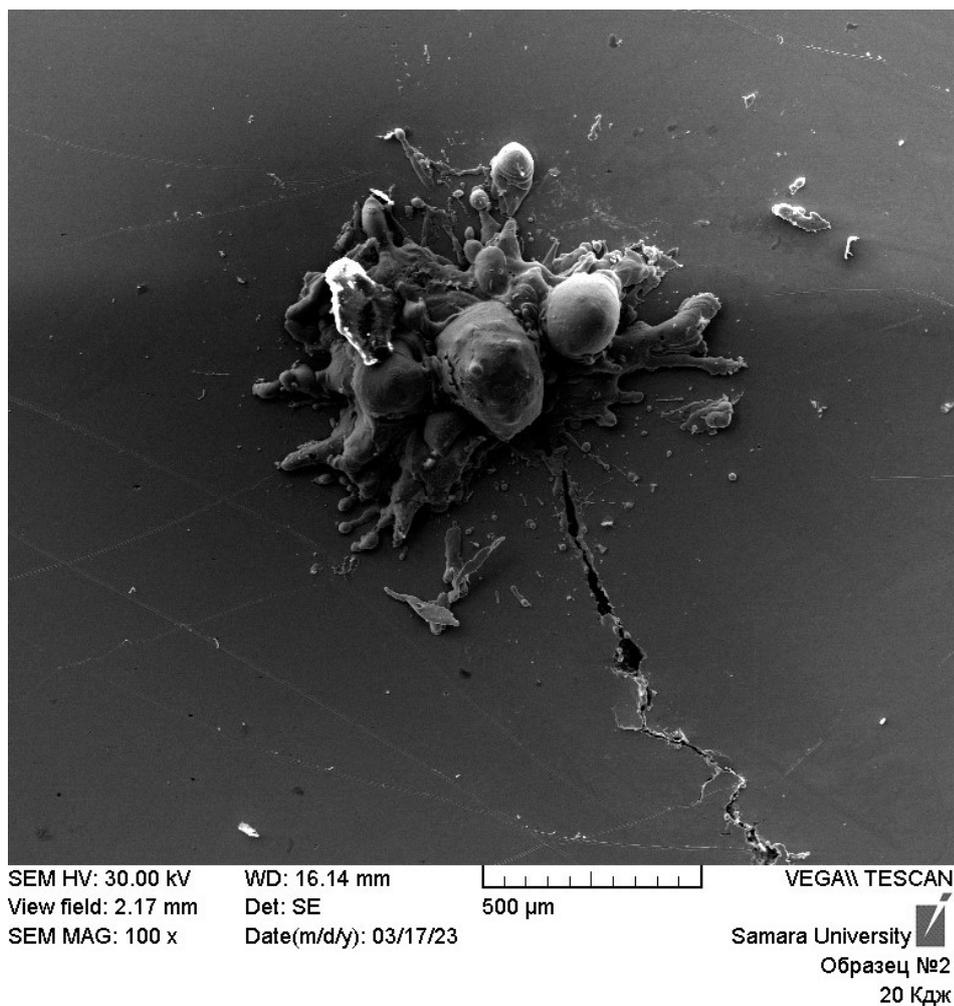


Рисунок 4.22 – Состояние вершины микротрещины у конца №4 (образец №2) после МИО-20кДж, получено электронным микроскопом при 100-кратном увеличении [118]

На рисунке 4.22 наблюдается заполнение вершины микротрещины №4 расплавленным металлом после проведения магнитно-импульсной обработки с энергией 20 кДж.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что магнитно-импульсная обработка (МИО) является более эффективным методом для залечивания трещин с узкой и вытянутой, а также более регулярной формой вершин, таких как вершины №1 (образца №1) и №4 (образец №2). В этих случаях создаются более благоприятные условия для протекания токов и их концентрации.

Для лучшего понимания характеристик протекания вихревых токов в обрабатываемом образце во время проведения МИО были сделаны снимки распределения температурных полей. Снимки были получены с помощью

тепловизора FLIR SC7000. Анализ температурных данных, полученных с тепловизора, производился с помощью программы ThermoCAM Resercher Professional 2.8 SR-1. Для построения графиков изменений температуры были выбраны три зоны, обозначенные линиями 1,2 и 3.

На рисунке 4.23 представлен снимок распределения температуры на поверхности образца №1 до проведения магнитно-импульсной обработки, а также соответствующие графики изменений температуры в выбранных точках 1, 2 и 3.

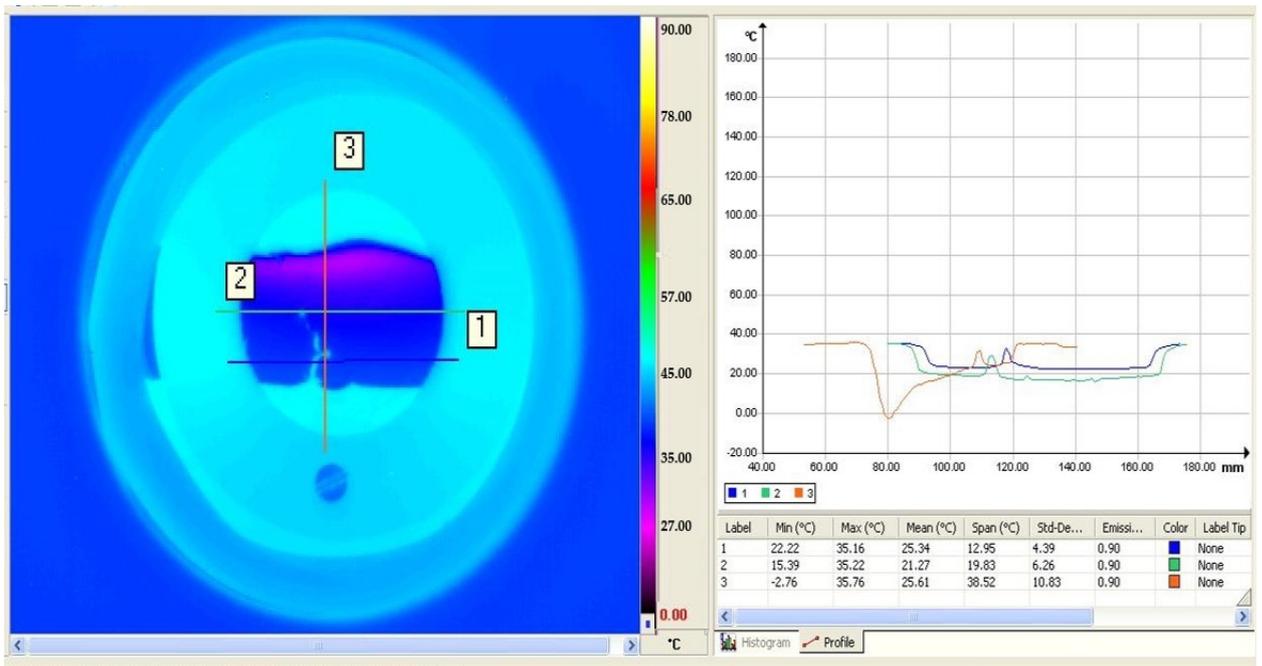


Рисунок 4.23 – График распределения температуры на поверхности образца №1 до МИО [118]

На рисунке 4.24 изображено температурное состояние образца №1 во время магнитно-импульсной обработки с энергией 20 кДж в момент времени 312 мкс. На данном изображении наблюдается резкий скачок температуры до 90°C в зоне трещины и у краев образца.

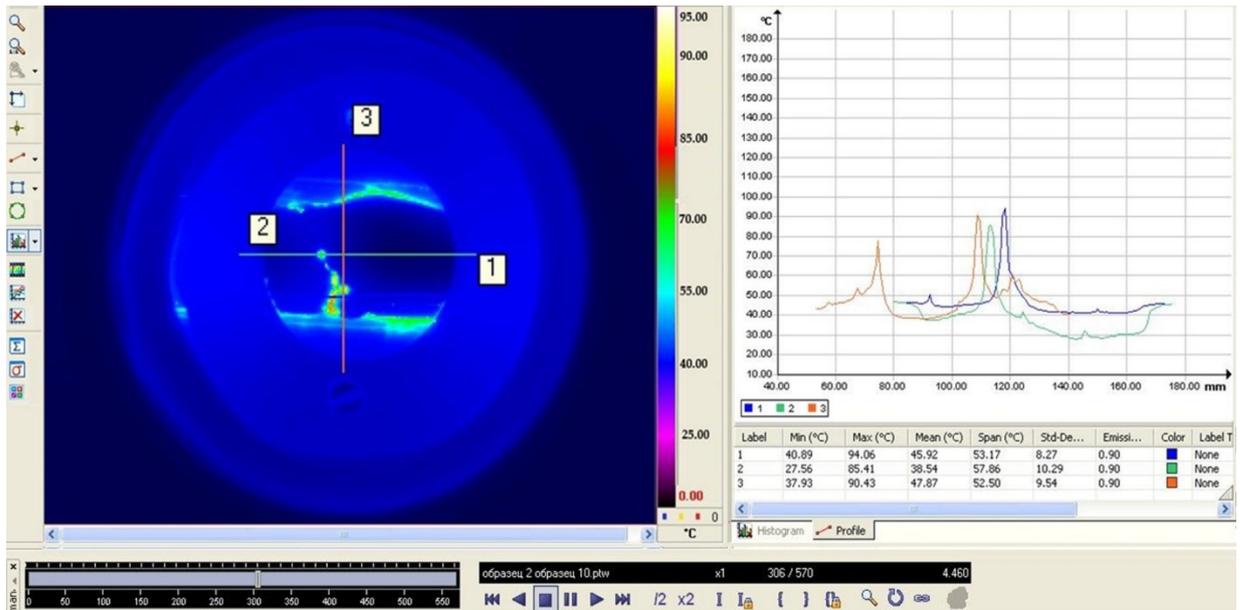


Рисунок 4.24 – График распределения температуры на поверхности образца №1 при МИО-20кДж в момент времени 312мск [118]

Рисунок 4.25 показывает распределение тепловых полей на поверхности образца №1 во время магнитно-импульсной обработки с энергией 20 кДж в момент времени 423мск. На данном рисунке наблюдается резкий скачок температуры до 710°C в зоне трещины и у краев образца.

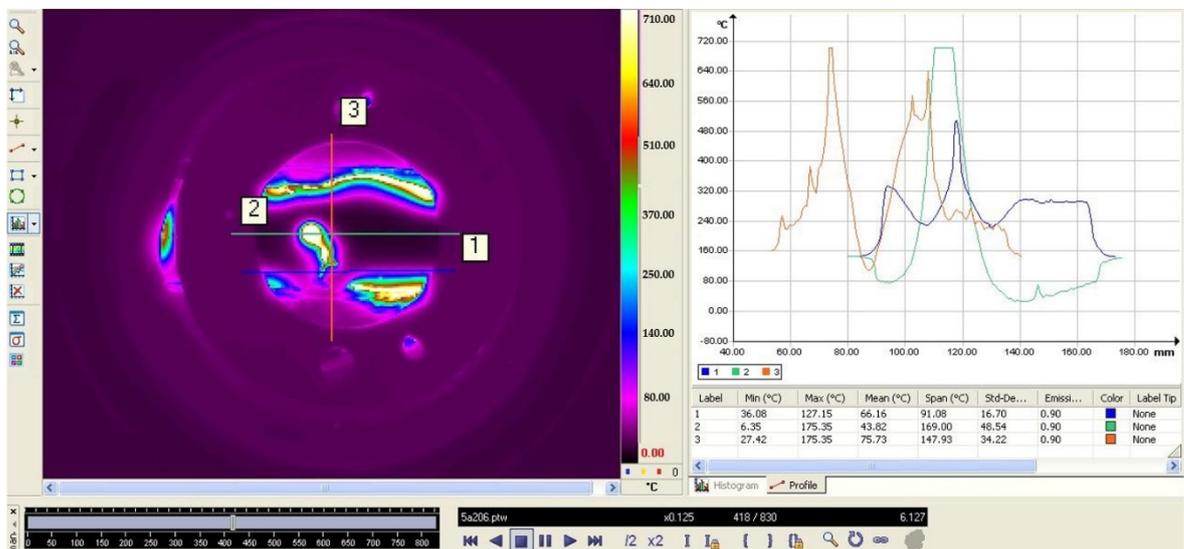


Рисунок 4.25 – График распределения температуры на поверхности образца №1 при МИО-20кДж в момент времени 423мск [118]

Распределение тепловых полей на поверхности образца №1 во время магнитно-импульсной обработки с энергией 20 кДж в момент времени 527мск изображено на рисунке 4.26. На данном рисунке наблюдается спад температуры и

выход образца на температурный номинальный режим (комнатная температура). Основной остаточный нагрев находится в области дефекта и на краях образца.

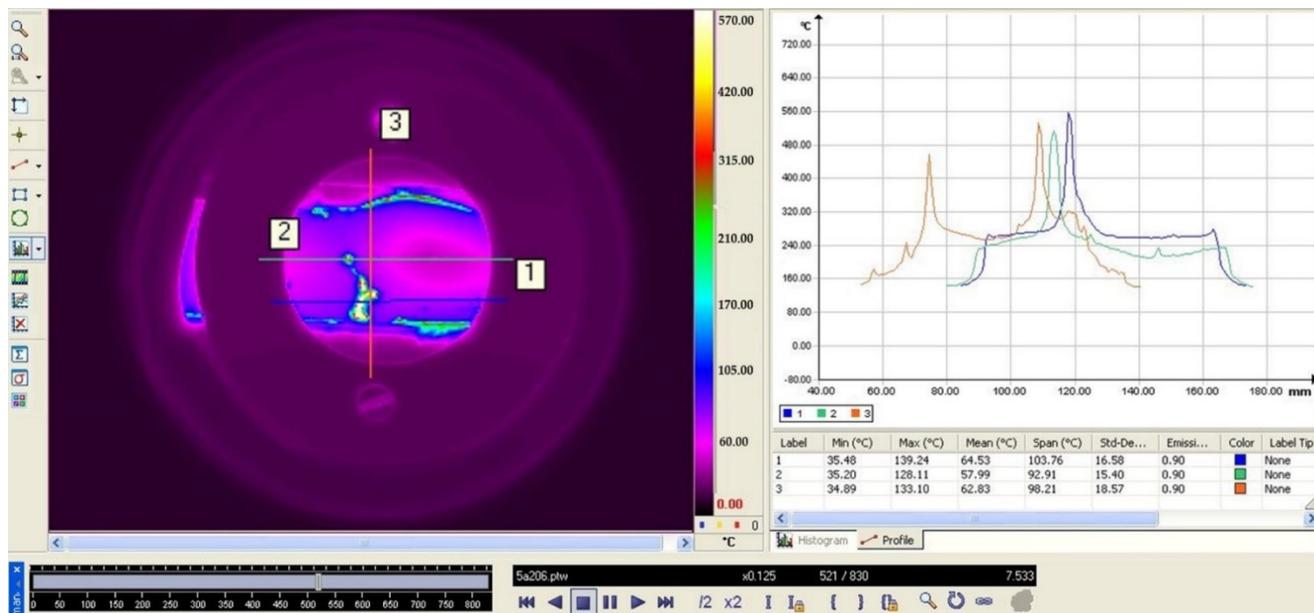


Рисунок 4.26 – График распределения температуры на поверхности образца №1 при МИО-20кДж в момент времени 527мкс [118]

Полученные снимки и графики распределений тепловых полей на поверхности образца №1 во время проведения МИО-20кДж показывают, что точкой интенсивного воздействия при МИО является вершин трещин где отмечалось значительное повышение температуры. Данное наблюдение объясняется концентрацией вихревых токов и повышением их плотности в этих зонах. Нагрев краев образца можно объяснить резким изменением направления токов, что привело к их концентрации, следовательно, повышению плотности.

Важно отметить, что используемая модель тепловизора способна регистрировать температурные поля в миллисекундном диапазоне, в то время как процесс обработки происходит на уровне микросекунд. Следовательно, повышение температуры было выше, чем то, что было зарегистрировано тепловизором. Это подтверждается результатами, представленными на рисунках № 4.15, № 4.16 где отмечалось повышение температуры у вершины трещины до точки плавления металла, т.е., выше температуры, зарегистрированная тепловизором в 710°C.

Снимки распределения тепловых полей на поверхности образца №1 во время проведения МИО-20кДж показывают, что значительному нагреву подвергались окрестности трещины, в то время как области, расположенных дальше от вершины, не подвергались сильному нагреву. Большие градиенты температуры между этими зонами привели к быстрому охлаждению области вершины, что отражено на рисунке 4.26 в виде значительного быстрого спада температуры.

Известно, что сильный нагрев с последующим быстрым охлаждением приводит к структурным изменениям металла. С целью изучения влияния МИО на структуру металла были проведены металлографические исследования микроструктуры металла до и после МИО-20 кДж у вершины №2 (1) образца №1.

4.3 Исследование влияния МИО на микроструктуры металла

С целью выявления влияния магнитно-импульсной обработки на структуру металла были проведены металлографические исследования микроструктуры металла с помощью оптического микроскопа Olympus BX51 при 500-кратном увеличении.

Исследования микроструктуры были осуществлены в двух зонах: зоне 2 (вершина №2 образца №1) и зоне 3 (основной металл образца №1).

На рисунке 4.27 изображена исходная микроструктура основного металла (зона №3) до магнитно-импульсной обработки.

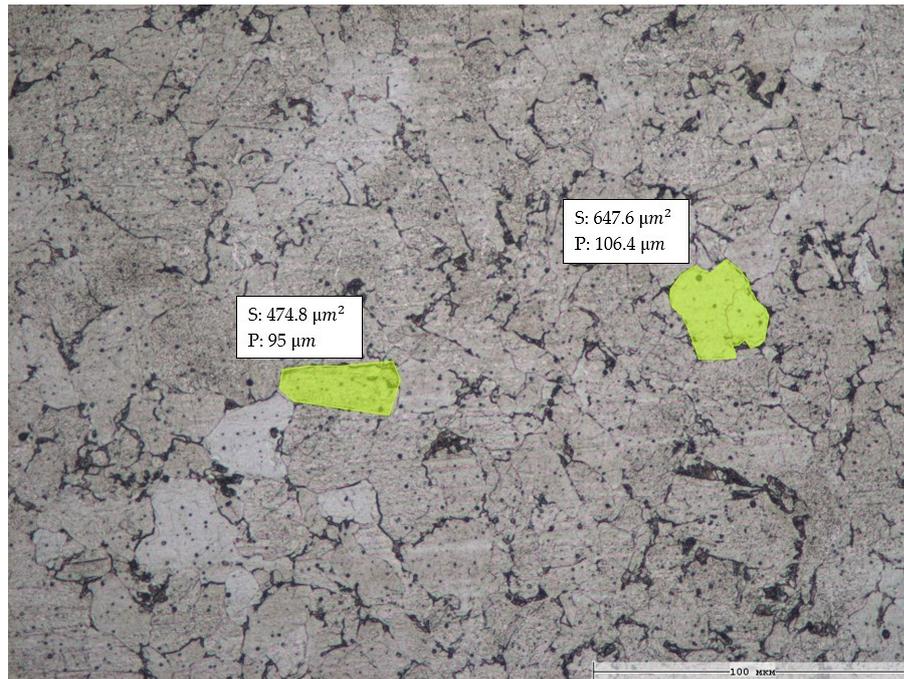


Рисунок 4.27 – Микроструктура основного металла образца №1 (зона №3) до МИО [118]

Рисунок 4.27 демонстрирует крупнозернистую ферритно-перлитную структуру низкоуглеродной стали 17Г1С.

Рисунок 4.28 показывает микроструктуру основного металла образца №1 (зона 3) после МИО-20кДж.

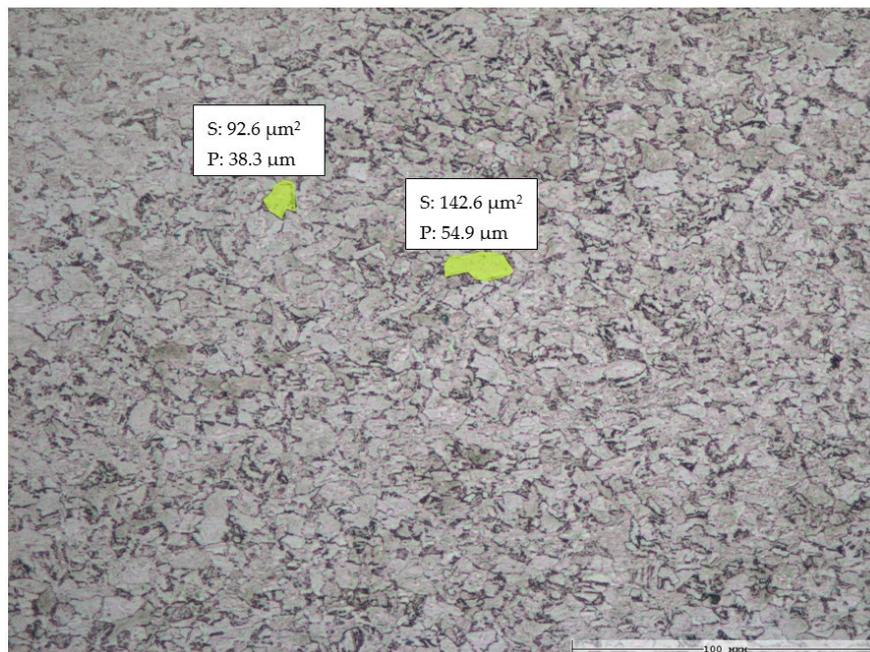


Рисунок 4.28 – Микроструктура основного металла образца №1 (зона №3) после МИО-20кДж [118]

Сравнивая рисунки 4.27 и 4.28 можно отметить, что структура металла после МИО осталась прежней ферритно-перлитной, при этом произошли структурные изменения в виде измельчения микроструктуры металла. Более того, наблюдается формирование более однородной и равномерной структуры металла после МИО, что может оказать существенные влияния на прочностные свойства металла и делает его более устойчивым к различным видам разрушения. Изменения микроструктуры после МИО могут быть обусловлены комплексным воздействием механических и тепловых процессов, сопровождающих МИО. Так как, во время МИО материал подвергается интенсивным механическим воздействиям, а также тепловому воздействию, что может привести к изменениям в микроструктуре металла.

Это можно объяснить тем, что во время МИО металл подвергался комбинации механических и тепловых воздействий, приводящих к изменению микроструктуры металла.

Микроструктура металла образца №1 в области вершины трещины №2 (зона термического влияния) после МИО-20 кДж представлена на рисунке 4.29.

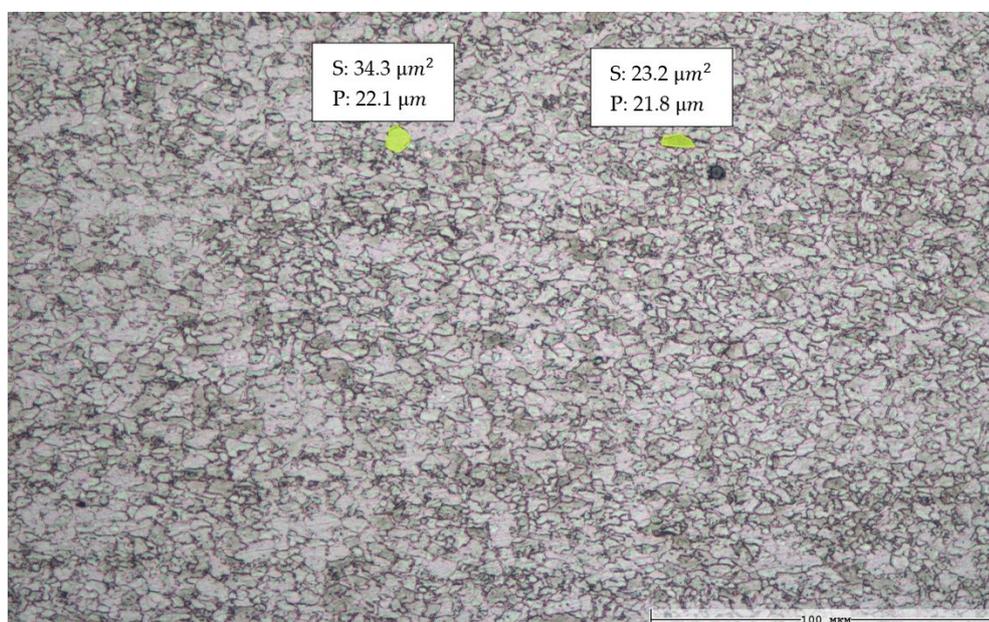


Рисунок 4.29 – Микроструктура зоны термического влияния возле вершины №2 после МИО-20кДж [118]

Сравнивая рисунки 4.27 и 4.29 можно заметить, что структура металла осталась прежней ферритно-перлитной, при этом произошло перекристаллизация зерен. Данное наблюдение можно обосновывать тем, что температура в зоне вершины трещин превысила температуру аустенитного состояния (A_{c3}), после чего последовало быстрое охлаждение, что вызвало превращение структуры в более мелкозернистой структуре.

Полученные результаты дают возможность говорить о том, что МИО привела к упрочнению металла за счет формирования более однородной мелкозернистой структуры.

4.4 Выводы по главе 4

1. Представлены результаты экспериментальных исследования влияния магнитно-импульсного воздействия на дефектное состояние толстостенных образцов, вырезанных из бывших в эксплуатации магистрального газопровода $\varnothing 1220 \times 18,0$ мм из низколегированной, стали 17Г1С, содержащих микротрещины различных форм и размером. Исследования были проведены с помощью магнитно-импульсной установки МИО-40кДж-СУ при разных технологических режимах работы.

2. Полученные результаты экспериментов подтверждают результаты предшествующих соответствующих теоретических исследований о том, что точкой интенсивного воздействия при МИО является вершина трещины, так как было отмечено значительный нагрев в области вершин трещин, проявившийся в формировании зоны термического влияния с последующим образованием цвета побежалости.

3. Экспериментально было установлено, что при режиме работы МИО-10 кДж не произошло плавления металла образца, что свидетельствует о том, что плотность вихревых токов, наведенных в обрабатываемом образце при энергии установки 10 кДж, не была достаточной для повышения температуры до значения плавления металла. При этом, наблюдалась высокий нагрев вершин трещин с образованием зоны термического влияния. Однако, при режиме работы МИУ с

энергией 20 кДж было отмечено плавление области вершин трещин с образованием кратера.

4. Исследования показали, что ключевым фактором, влияющим на эффективность магнитно-импульсной обработки, являются форма трещины и её геометрические размеры. Было выявлено, что острые и узкие вершины вызывают более высокую концентрацию вихревых токов и, следовательно, повышение температуры. В то время как широкие и гладкие вершин вызывают рассеяние токов с последующим снижением температуры. Более того, было отмечено, что регулярность формы трещины и её конфигурация существенно влияет на характер протекания токов. Нерегулярная форма со сложной конфигурацией создает неблагоприятные условия для протекания трещины, приводя к рассеиванию линии токов с последующем снижением их плотности.

5. Магнитно-импульсная обработка оказалась более эффективной для восстановления узких острых вершин (вершина №1 образца №2 и вершина №4 образца №2), где наблюдалось плавление этих вершин с последующим заполнением расплавленным материалом. В то время как широкая гладкая вершина (вершина №2 образца №1) росла и стала больше. С другой стороны, произошло затупление вершины №2 и она стала более гладкой что вызывает более равномерное распределение напряжений вдоль трещины, соответственно, снижает коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} при нагрузке.

6. Было зафиксировано расплавление вершин трещины, расположенных на глубине более 10 мм относительно поверхности образца, что открывает перспективы расширения области применения данной технологии за пределы поверхностных и приповерхностных трещины.

7. Полученные результаты демонстрируют, что расплавление металла с последующим заполнением произошло у вершин трещины, в то время как на более удаленных от вершины участках знаки плавления отсутствовали (рисунок 4.16 и рисунок 4.17). На основе данного наблюдения, можно делать вывод о том, что данная технология может быть эффективной для восстановления дефектов на

ранней стадии их развития, перед тем как они достигнут критического размера, после которого единственным решением является замена дефектного участка. В связи с этим и перед тем как применять данную технологию, требуется регулярный мониторинг трещин с использованием неразрушающих методов, таких как ультразвуковая дефектоскопия или визуальный осмотр, может помочь отслеживать рост трещин и определять момент, когда они становятся неустойчивыми.

8. Металлографические исследования микроструктуры металла до и после МИО продемонстрировали, что данная обработка вызвала структурные изменения в виде измельчения зерен с формированием более однородной и равномерной структуры металла, что в свою очередь привело к упрочнению металла.

ГЛАВА 5 ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Технологические особенности магнитно-импульсной обработки (МИО)

Магнитно-импульсная технология является одним из видов импульсных методов обработки материалов, отличающихся высокой развиваемой мощностью и коротким временем силового воздействия на обрабатываемую заготовку. В связи с импульсным характером процесса, требуемая металлоемкость оборудования для её осуществления значительно мала по сравнению с оборудованием, используемым для проведения статических методов обработки.

Отличительной чертой магнитно-импульсной обработки является применение для нагружения деформируемой заготовки давления импульсного магнитного поля, сопровождаемого протеканием по заготовке вихревых токов. Это обуславливает специфические технологические особенности данной технологии, отличающие её от других импульсных методов.

Магнитно-импульсная обработка обладает следующими технологическими преимуществами:

1. Высокая точность дозирования энергии, проводимой к индуктору. Заряд конденсаторов магнитно-импульсной установки осуществляется с помощью зарядного устройства с точностью до 1%. Это обеспечивает возможность тщательного контроля над количеством энергии, передаваемой индуктору, что в свою очередь способствует повышению точности и качества обработки.

2. Магнитно-импульсная обработка не требует механического контакта между индуктором и заготовкой, что позволяет провести обработку через изоляционные покрытия. Отсутствие необходимости механического контакта упрощает процесс обработки, увеличивает долговечности инструментов и повышает качества обработки.

3. Высокая проникаемость магнитного поля позволяет провести обработку даже в случае наличия защитного покрытия без необходимости

отчистки обрабатываемого участка, что сокращает трудоемкость и затраты времени.

4. Локальность нагружения и возможность управления распределением интенсивности нагрузки по обрабатываемому участку, так как магнитное поле значительно затухает за пределами индуктора, что позволяет обрабатывать дефектные зоны обрабатываемой детали без нагружения остальных её частей. Это существенно повышает эффективность и точность процесса, поскольку позволяет сосредоточить воздействие на дефектные участки, минимизируя воздействие на зоны, которые не требуют обработки.

5. Высокая производительность процесса, которая может достигать 3600 операций в час и более в зависимости от характеристик МИУ. Время технологического цикла в значительной мере определяется временем, необходимым для установки индуктора и его снятия.

6. Возможность легкой механизации и автоматизации технологического процесса является еще одним важным преимуществом магнитно-импульсной обработки. Работа установки и технологической оснастки легко синхронизируется благодаря относительно простой конструкции и высокой степени гибкости системы. Это позволяет эффективно интегрировать магнитно-импульсные установки в производственные линии и автоматизированные системы, улучшая общую производительность и точность процесса. Благодаря этой особенности, предприятия могут легко внедрять новые технологии и оптимизировать свои производственные процессы, что способствует повышению конкурентоспособности и эффективности в современной промышленности.

7. Универсальность оборудования - это ключевое преимущество в условиях единичного и мелкосерийного производства. Одна установка способна успешно осуществлять широкий спектр технологических процессов, включая обработку различных материалов и выполнение разнообразных операций. Это позволяет экономить ресурсы и снижать затраты, так как не требуется приобретение и настройка различных специализированных устройств под каждую отдельную операцию.

8. Высокая культура производства и простота обслуживания оборудования - это важные характеристики современных магнитно-импульсных установок. Они работают бесшумно, что способствует комфортным условиям труда операторов и снижает уровень шума в производственном помещении. Кроме того, инструменты, такие как индукторы и узлы установки, не имеют подвижных частей и не требуют смазки, что упрощает обслуживание и снижает вероятность возникновения поломок. Это позволяет поддерживать высокую производительность и надежность работы оборудования на протяжении всего срока его эксплуатации.

9. Экологическая чистота процесса. При работе установок и выполнении технологических операций не выделяются вредные вещества, что способствует сохранению здоровья работников и охране окружающей среды. Фон электромагнитных излучений в рабочем помещении имеет импульсный характер и не превышает допустимых значений, что гарантирует безопасность работы персонала и соответствие экологическим стандартам. Таким образом, магнитно-импульсные технологии являются экологически безопасными и способствуют созданию здоровой и безопасной производственной среды.

10. Обработка тонкостенных заготовок с использованием магнитно-импульсных технологий приводит к улучшению характеристик обрабатываемого материала. При этом повышается допустимая степень деформации и вносятся меньше искажений в структуру и свойства материала по сравнению с другими импульсными методами обработки. Это возможно благодаря более точному и контролируемому воздействию на материал во время процесса обработки, что минимизирует негативные эффекты на его структуру. Таким образом, магнитно-импульсные технологии способствуют повышению качества обработки и сохранению целостности и характеристик тонких материалов.

11. Возможность выполнения технологических операций на удалении от магнитно-импульсной установки при помощи гибкого токопровода, который соединяет индуктор с установкой, представляет собой значительное преимущество данной технологии. Этот подход позволяет выполнять операции на

крупногабаритных заготовках и в труднодоступных местах, даже если они находятся на значительном расстоянии от установки. Гибкость в расположении инструмента обеспечивает удобство в процессе обработки, особенно при обработке крупных и сложных изделий, а также в случае, когда доступ к обрабатываемой поверхности ограничен.

12. Мобильность оборудования обеспечивается благодаря относительно легкому весу оборудования. Установки могут быть изготовлены в передвижном или переносном исполнении и имеют возможность питаться практически от любого источника электрического тока. Это значительно расширяет возможности применения данной технологии за пределы лабораторных условий, позволяя применять её в полевых условиях.

13. Данная технология оказалась эффективной не только для заваривания поверхностных и приповерхностных дефектов, но также для дефектов, расположенных на различных глубинах внутри металла. Это достигается благодаря характеру протекания вихревых токов, которые обеспечивают интенсивное воздействие на значительную глубину в зависимости от параметров обработки, что значительно улучшает эффективность обработки.

14. Низкая себестоимость обработки. Расходным материалом является индуктор, который может выйти из строя из-за высокого давления и температуры, образующихся в процессе обработки. Для продления срока службы индуктора рекомендуется использовать изоляцию, изготовленную из материала с высокой механической и электрической прочностью.

С другой стороны, магнитно-импульсная обработка имеет ряд недостатков, обусловленных взаимодействием импульсного поля индуктора с вихревыми токами, наведенными в обрабатываемой детали:

1. Эффективность процесса существенно зависит от электропроводности обрабатываемого материала, что значительно снижает его эффективность при обработке металлов с низкой электропроводимостью.

2. Увеличение длины кабеля, соединяющего индуктор с установкой, приводит к увеличению джоулевых потерь в разрядной цепи, что в свою очередь снижает коэффициент полезного воздействия индуктора, особенно при обработке труднодоступных местах.

3. Ресурс индуктора ограничен при выполнении операций, требующих высоких значений давления импульсного магнитного поля. Этот ресурс определяется не только прочностью и стойкостью изоляции, но и характерным разрушением скин-слоя индуктора под воздействием циклических термических и механических напряжений, связанных с протеканием импульсного тока.

4. При высоких энергиях, накопленных в конденсаторах установки, механические и тепловые процессы, возникающие в области дефекта, могут превысить пределы разрушения металла, что в конечном итоге может привести к общему разрушению образца. Для предотвращения подобного исхода, критическая важность имеет выбор правильного режима работы, который должен быть адаптирован к прочностным свойствам обрабатываемой детали. Это может включать в себя тщательную настройку параметров процесса обработки и контроль за передачей энергии, чтобы минимизировать риск возникновения разрушительных эффектов.

5.2 Технологические рекомендации по обработке деталей магнитно-импульсным воздействием

Основные работы по внедрению технологических процессов магнитно-импульсной обработки (МИО) дефектных участков газопроводов были проведены в деятельности ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург». Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать рекомендации по проведению магнитно-импульсной обработки:

1. Ключевым инструментом магнитно-импульсной установки является индуктор, функция которого заключается в преобразовании электрической энергии, протекающей в нём, в электромагнитное поле, действующее в зоне индуктора-обрабатываемой детали. Соответственно, эффективность магнитно-

импульсной обработки напрямую зависит от способности индуктора преобразовывать электрическую энергию в электромагнитное поле, действующее на поверхности обрабатываемой детали. Таким образом, для повышения эффективности обработки рекомендуется изготавливать проводники индуктора из материалов, обладающих высокой электропроводностью, что в свою очередь снизит джоулевые потери и, следовательно, повысит коэффициент полезного действия (КПД).

2. Индуктор подвергается интенсивному комплексному теплосиловому воздействию. С одной стороны, джоулевые потери, возникающие при протекании высокого амплитудного разрядного тока в контуре индуктора, вызывают сильный нагрев токопровода индуктора и его изоляции. С другой стороны, индуктор подвергается высоким давлениям, вызванным отталкиванием магнитных полей индуктора и вихревых токов. Механические и тепловые воздействия на индуктор снижают его производительность и могут привести к преждевременному выходу из строя. В целях повышения долговечности индуктора рекомендуется изготавливать изоляцию индуктора из материалов с хорошей механической и электрической прочностью. Кроме того, материал должен обладать достаточной термостойкостью и высокой теплопроводностью, чтобы эффективно рассеивать накопленное тепло и предотвращать перегрев индуктора.

3. Эффективность магнитно-импульсной обработки обратно пропорционально величине зазора между индуктором и обрабатываемой деталью. В связи с этим, рекомендуется максимально минимизировать зазор, что способствует повышению коэффициента полезного воздействия обработки.

4. Увеличение длины кабеля, соединяющего индуктор с установки, повлечет за собой увеличение потери электрической энергии, протекающей в контуре индуктора и, как следствие, снижение эффективности обработки. Для оптимизации процесса рекомендуется располагать установку таким образом, чтобы минимизировать длину кабеля и обеспечить наиболее эффективное использование энергии.

5. При проведении магнитно-импульсной обработки (МИО) высокое давление, возникающее в рабочей зоне индуктора, может вызвать выброса индуктора в случае ненадежной его фиксации, что представляет серьёзную угрозу для безопасности работников. Поэтому при проведении процедуры МИО крайне важно обеспечить надежное закрепление индуктора, чтобы исключить возможность его перемещения или случайного выброса. При этом фиксация должно обеспечить удобство при установке и снятия индуктора. Более того, рекомендуется использовать закрепительные элементы, изготовленные из материалов с низкой электропроводностью. Это помогает избежать сильного нагрева этих элементов, вызванного индуцированными в них вихревыми токами. Такой нагрев может привести к снижению надежности закрепления и даже к выходу из строя этих элементов, что в конечном итоге может повлечь за собой потерю закрепления индуктора и повысить риск несчастных случаев.

6. Направление вихревых токов при магнитно-импульсной обработке значительно влияет на эффективность процесса, поскольку токи, протекающие параллельно оси трещины, оказывают минимальное воздействие из-за низкой концентрации линии токов. В то время как в случае, когда токи протекают перпендикулярно оси трещины, концентрация токов значительно повышается из-за резкой измены их направления. Следовательно, плотность токов у вершин трещин будет высокой. Таким образом, рекомендуется проводить обработку как вдоль, так и поперек дефекта, изменяя расположение индуктора, чтобы каждый участок заготовки подвергалась воздействию магнитного поля.

7. Опыт внедрения в ремонтных работах на проектах компании ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» показал, что данная технология более эффективна для восстановления дефектов, имеющих острую узкую форму. В то время как для дефектов с большим раскрытием относительно их длины МИО оказалась малоэффективной, где наблюдалось затупление вершин без их закрытия. Исходя из этого, рекомендуется применять данную технологию для восстановления вытянутых трещин (их раскрытие значительно меньше их глубины) со средним раскрытием не более 50 мкм.

8. Опыт внедрения МИО также установили, что для трещины с длиной 713 мкм расплавление металла с последующим закрытием трещины произошло в области вершин трещины на протяжении 217 мкм, в то время как на более удаленных от вершины участках признаки плавления отсутствовали. Таким образом, перед тем как применять данную технологию, требуется регулярный мониторинг трещин с использованием неразрушающих методов, таких как ультразвуковая дефектоскопия или визуальный осмотр, что позволяет отслеживать рост трещин и определять момент, когда применение данной технологии становится наиболее эффективным для их восстановления.

5.3 Выводы по главе 5

1. Магнитно-импульсная обработка во многом отвечает требованиям ремонтных работ благодаря ряду преимуществ, которые отличают её от прочих методов ремонта.

2. Составлены рекомендации по практическому использованию и опытно-промышленному внедрению результатов исследований.

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 исследований возможности применения данной технологии в сложных полевых условиях. Такие испытания дадут более точную оценку целесообразности применения данной технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аленицын, А. Г. Краткий физико-математический справочник / А.Г. Аленицын, Е.И. Бутиков, А.С. Кондратьев. – М.: Наука, 1990. – 368 с.
2. Барвинок, В. А. Выбор материалов для изготовления индукторных систем / В. А. Барвинок, Ю.Е. Паламарчук, А. Н. Кирилин, В. П. Самохвалов, В.М. Вершигоров // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. - 2008. - Т. 1. -№14. - С. 97–102.
3. Баренблатт Г.И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении / Г.И. Баренблатт // Прикл. механ. и техн. физ. - 1961. - № 4. - С. 3–56
4. Беклемишев, Н.Н. Влияние локально-неоднородного электромагнитного поля на пластичность и прочность проводящих материалов / Н.Н. Беклемишев, Н.И. Корягин, Г.С. Шапиро // Известия Академии наук СССР. Металлы. -1984. - № 4. - С. 184–187.
5. Белевитин, В.А. Измерение ударной вязкости металлов и сплавов: методические рекомендации / В.А. Белевитин. – Челябинск, Издательство Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета, 2022. – 36 с.
6. Белый, И.В. Деформирование металлов электромагнитным полем с предварительным нагревом заготовок / И.В. Белый, Л.Д. Горкин, Л.Т. Хименко // КШП. - 1984. - №7. - С. 6–8.
7. Белый, И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко. – Харьков, 1977. – 168 с.
8. Белый, И.В. Энергетическое оборудование для магнитно-импульсной обработки металлов / И.В. Белый, Л.Д. Горкин, Л.Т. Хименко // Кузнечноштамповочное производство. - 1984. -№ 7. - С. 22–23.
9. Блантер, М.Е. Металловедение и термическая обработка / М.Е.Блантер. – М.: Машгиз, 1963. – 416 с.
10. Бобин, К.Н. Решение практических проблем применения магнитно-импульсной обработки для повышения долговечности тонколистовых деталей

летательных аппаратов / К.Н. Бобин, Н.А. Рынгач, Н.В. Курлаев // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. - 2014. - Т.1. -№54. - С. 165–171.

11. Бойцов, Г.В. О взаимосвязи стадии зарождения и кинетики развития усталостного разрушения / Б.В. Бойцов // Механика разрушения, надежность и техническая диагностика тонкостенных конструкций: межвуз. сб. Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. ПЕ Алексева. - 1996.- С. 9–16.

12. Бойцов, Г.В. Прогнозирование долговечности напряженных конструкций. Комплексное исследование шасси самолета/ Г.В. Бойцов. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.

13. Бровер, А.В. Комплекс механизмов упрочнения металлических материалов при импульсной лазерной обработке / А.В. бровер // Перспективные материалы. - 2008. - № 1. - С. 63–69.

14. Броек, Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.

15. Большаков, А.М. Исследование характеристик сопротивления разрушению и старения материалов металлоконструкций Севера после длительной эксплуатации / А.М. Большаков// Безопасность и мониторинг техногенных и природных систем: материалы и доклады VI Всероссийской конференции. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т ВСГУТУ.- 2018. - С. 28–35.

16. Варламов, Д.П. Мониторинг дефектности и прогноз состояния магистральных газопроводов России / Д.П. Варламов, В.А. Канайкин, А.Ф. Матвиенко, О.И. Стеклов. – Екатеринбург: Уральский центр академического обслуживания, 2012. – 250 с.

17. Вансович, К.А. Оценка влияния усталостных дефектов коррозионного происхождения на прочность магистральных трубопроводов с позиции механики разрушения / К.А. Вансович, Д.С. Бесеция, А.А. Нахлесткин// Журнал Neftegaz.RU. - 2019. - № 12. - С. 38–42.

18. Владимиров, В.И. Микромеханизмы распространения трещин / В.И. Владимиров, А.Н. Орлов // Усталость и вязкость разрушения металлов. – М.: Наука.- 1974. -С. 141–147.

19. Глущенко, В. А. Единый подход к численному исследованию технологических процессов МИОМ / В.А. Глущенко // Вопросы теории и практики магнитно-импульсной обработки: Тезисы докладов Всесоюзного совещания секции МИОМ. – Самара.- 1991. - С. 7–8.

20. Глущенко, В. А. Магнитно-импульсная обработка металлов / В.А. Глущенко // Кузнечно-штамповочное производство. - 1984. - № 7. - С. 2–3.

21. Глущенко, В. А. Особенности магнитно-импульсной штамповки тонкостенных трубчатых деталей сложной формы / В.А. Глущенко, С.А. Стукалов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1985. - № 12. - С. 2–4.

22. Глущенко, В.А. Патент № 187435 U1 Российская Федерация, МПК В21D 26/14. Многопостовая магнитно-импульсная установка : № 2018120967 : заявл. 06.06.2018 : опубл. 06.03.2019 / В. А. Глущенко, Р. Ю. Юсупов ; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева".

23. Глущенко, В.А. Технология магнитноимпульсной обработки материалов: монография / В.А. Глущенко, В.Ф. Карпухин. – Самара: Изд. дом «Федоров», 2014. – 208 с.

24. Голенков, В.А. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением / В.А. Голенков, А.М. Дмитриев, В.Д. Кухарь, С.Ю. Радченко, С.С. Яковлев. – М.: Машиностроение, 2004. – 404 с.

25. Головин, Ю.И. Концентрация электрического и теплового полей в вершине острых дефектов в металле / Ю.И. Головин, В.А. Киперман // Физика и химия обработки материалов. - 1980. - № 4. - С. 26–30.

26. Головин, Ю.И. Механизм разрушения металлов с трещиной под действием электромагн. Поля / Ю.И. Головин, В.А. Киперман // Физика и химия обработки материалов. - 1983. - № 6. - С. 64–69.

27. Гуревич, С. Е. О скорости распространения трещины и пороговых значениях коэффициента интенсивности напряжений в процессе усталостного разрушения / С.Е. Гуревич, Л.Д. Едидович // Усталость и вязкость разрушения металлов. – М.: Наука.- 1974. - С. 36–79.

28. Гуревич, С.Е. Некоторые аспекты усталостной разрушения механики разрушения / С.Е. Гуревич // Циклическая вязкость металлов и сплавов: сб. науч. тр. – М.: Наука.- 1982. - С. 19–38.

29. Дашук, П. Н. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / П.Н. Дашук, С.П. Зайенц, В.С. Комельков и др. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.

30. Жуков, С.В. Магнитно-импульсная установка средней энергоемкости с высокой собственной частотой разрядного контура / С.В. Жуков, В.А. Глушечков , Р.Ю. Юсупов // Труды XIX Международного форума по проблемам науки, техники и образования. - 2016. - С. 85–86.

31. Золоторевский, В.С. Механические свойства металлов / В.С. Золоторевский. – 3-е изд. М. МИСиС, 1998.

32. Иванова, В.С. Разрушение металлов / В.С. Иванова – М.: Metallurgy, 1979. – 167 с.

33. Карпухин, В.Ф. Инженерная методика расчета процессов магнитно-импульсной обработки / В.Ф. Карпухин // Материалы Второй Международной научно-технической конференции «Металлдеформ 2004», Секция 3. – Самара, 2004. – С. 13.

34. Качан, М. С. Взаимодействие ударных волн с контактной границей соударяющихся тел / М.С. Качан, Ю.В. Киселев, Ю.А. Тришин // Физика горения и взрыва. - 1975. - Т. 11. - № 5. - С. 767–772.

35. Кершенбаум, В.Я. Гидроиспытание труб с дефектами типа «расслоение металла» / В.Я. Кершенбаум, К.М. Гумеров, Н.Р. Ямуров, В.П. Кирнос // II Надежность и сертификация оборудования для нефти и газа. - 2000. -№ 4. - С. 37–39.

36. Кнопфель, Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель. – М.: Мир, 1972. – 392 с.

37. Колесников, С.М. Методика расчета несущей способности соединений, изготовленных электромагнитным обжимом трубы на оправку с канавками / С.М. Колесников, С.Ф. Головащенко // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. - 1990. - № 5. - С. 16–20.

38. Колотовский, А.Н. Работоспособность трубопроводов высокого давления при наличии внутренних расслоений металла / А.Н. Колотовский, А.Я. Яковлев, И.Н. Бирилло, Ю.А. Теплинский. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2009. – 224 с.

39. Красовский, А.Я. Вязкое разрушение цилиндрических тел с аксиальными трещинами, нагруженных внутренним давлением / И.В. Орыняк, В.М. Тороп // Проблемы прочности. - 1990. - № 2. - С. 16–20.

40. Крысанов, Л. Г. Влияние сжимающих напряжений на развитие усталостных трещин в рельсах / Л.Г. Крысанов, В.П. Тырин, А.П. Шабанов // Повышение надежности верхнего строения пути в современных условиях эксплуатации: Сб. науч. тр. – М.: Интекст.- 2000. - С. 55–59.

41. Кукуджанов, К.В. Моделирование воздействия высокоэнергетического электромагнитного поля на микротрещины в поликристаллическом металле / К.В. Кукуджанов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. - 2015. - № 4. - С. 138–158. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.09.

42. Кукуджанов, К.В. О воздействии высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля на микротрещины в упругопластическом проводящем материале / К.В. Кукуджанов, А. Л. Левитин // Проблемы прочности и пластичности. - 2015. - № 77. - С. 217–226.

43. Кукуджанов, К. В. О залечивании повреждений металла высокоэнергетическим импульсным электромагнитным полем / К. В. Кукуджанов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика.- 2017.-№2. - С. 99 – 124. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.2.06

44. Кукуджанов, К.В. Процессы деформирования упругопластического материала с дефектами при электродинамическом нагружении / К.В. Кукуджанов,

А. Л. Левитин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. -2015. - № 1. - С. 106–120. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.1.07.

45. Кукуджанов, К.В. Процессы трансформации и взаимодействия микротрещин в металле под воздействием высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля / К.В. Кукуджанов, А. Л. Левитин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. - 2016. - № 2. - С. 89–110. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.07.

46. Курлаев, Н.В. Влияние импульсной обработки на дефекты сплошности и долговечность материалов / Н.В. Курлаев, А.И. Гулидов, Л.Д. Мержиевский, Н.А. Рынгач // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2005. – № 18. – С. 97–110.

47. Курлаев, Н. В. Механика импульсного воздействия и ее приложение к обработке давлением деталей из алюминиевых сплавов: дис. ... док. тех. наук: 01.02.04/ Курлаев Николай Васильевич. -Новосибирск., -2006. - 339 с.

48. Курлаев, Н.В. Моделирование воздействия ИМП на несплошности в структуре материалов деталей / Н.В. Курлаев, А.И. Гулидов, В.Б. Юдаев, Н.А. Рынгач // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2003. - Т. 2. - С. 80–86.

49. Курлаев, Н.В. Смыкание несплошностей в структуре материалов деталей при магнитно-импульсной обработке / Н.В. Курлаев, А.И. Гулидов, Н.А. Рынгач, В.В. Красовский // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. - 2002. - Т. 1. -№ 12. - С. 131–140.

50. Лариков, Л.Н. Залечивание дефектов в металлах/ Л.Н. Лариков. - Киев: "Наукова думка",1980.

51. Лахтин, Ю.М. Основы металловедения / Ю.М. Лахтин. М.: Металлургия, 1988. 320 с.

52. Лачин, В.Н. Электрогидроимпульсная обработка материалов в машиностроении / В.Н. Лачин, К.Н. Богоявленский, В.А. Вагин и др. - Минск: Наука и техника.- 1987.-231с.

53. Макклиток, Ф. Деформация и разрушение материалов / Ф. Макклиток., А. Аргон. – М.: Мир, 1970. – 443 с.
54. Матвиенко, Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 328 с.
55. Махутов, Н.А. Условия неустойчивого роста трещины нормального отрыва при статическом нагружении за пределами упругости / Н.А. Махутов // Проблемы прочности. - 1999. - №68. - С. 45–58.
56. Миркин, Л.И. Физические основы обработки материалов лучами лазеров/ Л.И. Миркин. – М.: Изд-во МГУ, 1975. – 304 с.
57. Миронов, А.А. Модель разрушения оболочек с поверхностными трещинами / В.М. Волков // Проблемы прочности.- 2006. -№68. - С. 45–51.
58. Морозов, Е.М. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения / Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский. – М.: Ленанд, 2008. – 456 с.
59. Морозов, Е.М. Концепция предела трещиностойкости / Е.М. Морозов // Заводская лаборатория. - 1997. -№ 2. - С. 42–46.
60. Мураками, Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2-х томах / Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. - Т.1. - 448 с. - Т.2. - 566 с.
61. Нейман, Л. Р. Теория электромагнитного поля /Л.Р. Нейман, П.Л. Калантаров. – М.–Л.: Энергия, 1959. – 232 с.
62. Новиков, И.И. Кристаллография и дефекты кристаллической решетки / К.М. Розин. – М.: Металлургия, 1990. – 336 с.
63. Орешенков, А. И. Высокоскоростные методы листовой штамповки / А.И. Орешенков, В.А. Вагин, В.С. Мамутов. – Л.: ЛПИ, 1984. – 80 с.
64. Остсемин, А.А. Определение коэффициентов интенсивности напряжений для образца методом конечных элементов / А.А. Остсемин, А.Д. Платонов, П.Я. Кравец // Заводская лаборатория. - 1998. - № 2. - С. 46–49.
65. Панасюк, В.В. Механика разрушения и прочность материалов: справ. пособие в 4 томах / В.В. Панасюк. – Киев: Наукова Думка, 1988. – 620 с.

66. Райченко, А. И., Теоретическая модель хрупкого разрушения проводника в скин-слое индуктора МИОМ под воздействием импульсного тока / А.И. Райченко, В.Т. Черемис // Магнитно-импульсная обработка материалов на современном этапе. – Самара, 1999. – С. 80–84.

67. Рыкалин, Н.Н. Лазерная обработка материалов / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, А.Н. Кокора. М.: Машиностроение, 1975. 296 с.

68. Садовский, В.Д. Лазерный нагрев и структура стали: Атлас микроструктур / В.Д. Садовский. Свердловск: УрО АН СССР, 1989. 102 с.

69. Сильные и сверхсильные магнитные поля и их применение / Ф. Подред. Херлаха. – М.: Мир, 1988. – 456 с.25.

70. Степанов, В. Г. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов / В.Г. Степанов, Н.А. Шавров. – Л.: Машиностроение, 1975. – 280 с.

71. Степанов, В. Г. Импульсная металлообработка в судовом машиностроении / В.Г. Степанов, Н.А. Шавров. – Л.: Судостроение, 1968. – 254 с.

72. Талалаев, А.К. Индукторы и установки для магнитно-импульсной обработки металлов / А.К. Талалаев. – НТЦ Информтехника, 1992. – 143 с.

73. Тихомиров, В. М. Развитие усталостных трещин смешанного типа в образцах из стали / В.М. Тихомиров, П.Г. Суровин // ПМТФ. 2004. - Т. 45.- № 1. - С. 135–142.

74. Толстов, А.Э. Совершенствование методов оценки технического состояния участков магистральных трубопроводов, содержащих расслоения металла / А.Э. Толстов. – Москва: Изд-во ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2019. – 173 с.

75. Трощенко, В.Т. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения / В.Т. Трощенко. – Киев: Логос, 2000. – 571 с.

76. Фокин, М.Ф. Особенности оценки опасности труб магистральных трубопроводов с «расслоениями», обнаруживаемых при внутритрубной диагностике / М.Ф. Фокин, Е.А. Никитина // Проблемы машиностроения и автоматизации.- 2008.- №2.- С. 81-84

77. Фокин, М.Ф. Оценка прочности труб магистральных трубопроводов с дефектами стенки, ориентированными по окружности трубы, по критерию возникновения течи перед разрушением / М.Ф. Фокин // Прикладная механика и технологии машиностроения: сб. науч. тр. - Нижний Новгород: Изд-во Интелсервис, 2005. - С. 69–76.

78. Форрест, П. Усталость металлов / П. Форрест. – М.:Машиностроение, 1968. 352 с.

79. Фрактография - средство диагностики разрушенных деталей. М.А. Балтер, А.П. Любченко, С.И. Аксенова и др. М.: Машиностроение, 1987. 160 с.

80. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций / Г. В. Клевцов [и др.]. – М. : МИСиС, 2007 – 264 с. – ISBN 978-5-87623-176-5.

81. Хардин, В. Б. Особенности деформации металла при магнитно-импульсной штамповке / В.Б. Хардин, А.Д. Комаров, Д.Н. Лысенко и др. // Кузнечно-штамповочное производство. - 1970. - № 4. - С. 29–30.

82. Хардин, В. Б. О возможности взаимодействия дислокаций с электронным потоком в процессе действия сильных импульсных токов / В.Б. Хардин // Теория и технология обработки металлов давлением: Межвузовский сборник. – Куйбышев, 1975.- Вып. 71. - С. 86–90.

83. Хименко, Л.Т. Создание конструкций и разработка методов расчета индукторов для МИО / Л.Т. Хименко // КШП. - 1994. - №7. - С.20–22.

84. Хмелевский, В.А. Параметрический ряд МИУ / В.А. Хмелевский, И.И.Пинчук и др. // КШП. -1985-№12.-с. 7–9.

85. Черемской, П.П. Поры в твердом теле / П.П. Черемской, В.В. Слезов, В.И. Бетехтин. - М.:Энергоатомиздат, 1990. - 375с.

86. 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

87. 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

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

89. Юсупов, Р.Ю. Патент № 79261 U1 Российская Федерация, МПК В21D 26/14. установка для магнитно-импульсной обработки материалов : № 2008109605/22 : заявл. 11.03.2008 : опубл. 27.12.2008 / Р. Ю. Юсупов, В. А. Глущенко, А. П. Попов ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева, Общество с ограниченной ответственностью "Научно-техническая фирма "Заряд".

90. Юсупов, Р.Ю. Универсальные и специальные магнитно-импульсные установки нового поколения /Р.Ю. Юсупов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. - 2012. - Т. 5. - №36. - С. 125–130

91. Abdullah, S. Fatigue Crack Growth Simulation of Aluminium Alloy under Cyclic Sequence Effects / S. Abdullah, S. M. Beden, A. K. Ariffin // Aluminium Alloys, Theory and Applications. – Rijeka, Croatia.- 2011. – P. 237-258.

92. Abroyan, I.A. Physical Foundations of Electronic and Ionic Technology/ I.A. Abroyan, A.N. Andronov, A.I Titov // Higher School Publishing House, Moscow, Russia.-1984. – 320 p.

93. Adeleke, A.A. Microstructural assessment of AISI 1021 steel under rapid cyclic heat treatment process / A.A. Adeleke, P.P. Ikubanni, T.A. Orhadahwe, J.O. Aweda, J.K. Odusote, O.O. Agboola // Results in Engineering.-2019- №4(2019). – 100044. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100044>

94. ASTM E 647 – 00 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. – Developed by Subcommittee: E08.06. Book of standards, 2002. – Vol. 03.01. – 43 p.
95. Beden, S.M. Review of Fatigue Crack Propagation Models for Metallic / S.M. Beden, S. Abdullah // Ariffin Components European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X. - 2009. -Vol. 28. - № 3. – P. 364–397.
96. Bobin, K.N. Problem-solving of application of the magnetic-pulsed processing for increasing of the durability sheet details of aircrafts/ K.N. Bobin, N.A. Ryngach, N.V. Kurlaev //Scientific Bulletin of NSTU.-2014/-№1(54). – P. 165- 171.
97. Chernikov, D. Changing of mechanical and technological properties of cast metal as a result of pulse-magnetic processing of melts / D. Chernikov, V. Glushchenkov // Key Engineering Materials. -2017. - Vol. 746 KEM. – P. 255-261.
98. Chmilenko, F.V. Improvement of quality of aluminum ingots at electromagnetic processing / F.V. Chmilenko, I.I. Rastvorova //Journal of Physics: Conference Series.- 2018.- №1118(1). – P. 012030. DOI:10.1088/1742-6596/1118/1/012030
99. Couper, M.J. Effect of crack closure and mean stress on the threshold stress intensity factor for fatigue of an aluminum casting alloy/ M. J. Couper, J. R. Griffiths // Fatigue and fracture of engineering materials and structures. - 1990.- - V.I 3 - №6. – P.615-624
- 100.Dzhemilev, E. Developing technology and device for the main pipelines repair with cutting out their defective sections / E. Dzhemilev, I. Shammazov, D. Sidorkin, B. Mastobaev, A. Gumerov // Oil Industry. - 2022. - V. 10. – P. 78-82. DOI 10.24887/0028-2448-2022-10-78-82
- 101.Fetisov, V. Tariff approach to regulation of the European gas transportation system: Case of Nord Stream / V. Fetisov, P. Tsvetkov, J. Müller // Energy Reports. - 2021. - V.7. - № 6. – P. 413-425. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.023>.
- 102.Golubev, I.A. Practice of using the magnetic treatment devices to intensify the processes of primary oil treating/ I.A. Golubev, A.V. Golubev, A.B. Laptev // Journal of Mining Institute. -2020.- 245. – P. 554-560. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.7

103. Irwin, G.R. Analysis of stresses and strain near the end of a crack traversing a plate / G.R. Irwin // *Jorn. Appl.* - 1957. - Vol. 24. – P. 361–369.

104. Khorshev, A. Simulation of induction heating of a ferromagnetic plate with a covering inductor / A. Khorshev, A. Bondar, O. Streltsova, F. Chmileno, I. Rastvorova // *Journal of Physics: Conference Series.* - 2021. - V. 2032. - №1. – P. 012025. DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012025

105. Kovshov, S.V. Methodology for assessing the risks of emergencies on the east siberia - pacific ocean oil and gas main pipeline / S.V. Kovshov, T.A. Alimhanova, V.M. Kitsis // *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development.* - 2020. - V.10. - №1. – P. 13-20. DOI: 10.24247/ijmperdfeb2020

106. Koteleva, N. Development of an Algorithm for Determining Defects in Cast-in-Place Piles Based on the Data Analysis of Low Strain Integrity Testing / N. Koteleva, E. Loseva // *Applied Sciences.* - 2022. - V.12. - № 20. – P. 10636. <https://doi.org/10.3390/app122010636>

107. Kudari, S.K. 3D finite element analysis on crack-tip plastic zone / S.K. Kudari, K.G. Kodancha // *International Journal of Engineering, Science and Technology.* - 2010. - Vol. 2. - №. 6. – P. 47-58

108. Kukudzhanov, K.V. Modeling the Healing of Microcracks in Metal Stimulated by a Pulsed High-Energy Electromagnetic Field. Part I / K.V. Kukudzhanov, A.L. Levitin // *Nanomechanics Science and Technology: An International Journal.* - 2015. - V.6. - №3. –P.233-250. DOI:10.1615/NanomechanicsSciTechnolIntJ.v6.i3.60

109. Kukudzhanov, K.V. Study of the influence of electric current dynamical action on mechanical properties of materials with ordered structure of defects/ K.V. Kukudzhanov, A.V Kolomiets-Romanenko // *Mechanics of Solids.* – 2010.- №45(3). – P. 465-475. DOI:10.3103/S0025654410030167

110. Lu, J.Z. Strain rate correspondence of fracture surface features and tensile properties in AISI304 stainless steel under different LSP impact time/ J.Z. Lu, J.S. Zhong, K.Y. Luo // *Surf. Coat. Technol.*-2013.- 221. – P. 88 - 93. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.01.031.

111. Maksarov, V.V. Influence of the microstructure on the damping properties of stress-strain tool systems in the processing of welded structures from dissimilar steels / V.V. Maksarov, A.E. Efimov, A.I. Keksin // Materials science forum. - 2021. - V. 1022. – P. 7-16. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1022.7

112. Murray, J.W. Repair of EDM induced surface cracks by pulsed electron beam irradiation / J.W. Murray, A.T. Clare // J. Mater. Process. Technol. 2012. - №212(12). – pp. 2642-2651. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.07.018.

113. Novgorodov, D. V. A study of gas pipeline emergency failure / D. V. Novgorodov, V. G. Rybalko, A. S. Shleenkov, and A. Yu. Surkov // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. - 2018. - Iss. 6. – P. 237-248. – DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.237-248.

114. Nosov, V.V. Nanotechnologies of Strength Control of Materials / V.V. Nosov, E. Grigoriev, S. Peretyatko, A.P. Artyushchenko // Materials Science Forum. - 2021. - V.1040. – P.101-108. – DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.101

115. Perveitalov, O.G. Calculation of Durability and Fatigue Life Parameters of Structural Alloys Using a Multilevel Model of Acoustic Emission Pulse Flow/ O.G. Perveitalov, V.V. Nosov, A.I. Borovkov, K.M. Khanukhov, N.V. Chetvertukhin // Metals . - 2023. - V.13(1). - №4. DOI: 10.3390/met13010004

116. Psyka, V. Electromagnetic forming / V. Psyka, D. Rischa, B.L. Kinsey, A.E. Tekkayaa, M. Kleintera // Journal of Materials Processing Technology. - 2011. - Vol. 211. – P. 787-829.

117. Rajak, A.K. Numerical Simulation and Experimental Study on Electromagnetic Crimping of Aluminium Terminal to Copper Wire Strands / A.K. Rajak, S.D. Kore // Electric Power Systems Research, 2017.

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

119. 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, **M. Aljadly**, S.O. Mikhin, A.E. Kopchikov/ In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2022. - №988 (2) – 022064. DOI 10.1088/1757-899X/862/3/032081

120. Shammazov, I.A. Study of the Effect of Cutting Frozen Soils on the Supports of Above-Ground Trunk Pipelines / I.A. Shammazov, A.M. Batyrov, D.I. Sidorkin, T. VanNguyen, // Appl. Sci.- 2023.- №13. – P. 3139. <https://doi.org/10.3390/app13053139>.

121. Song, H. Effect of high density electropulsing treatment on formability of TC4 titanium alloy sheet / H. Song, Z. Wang, Ti. Gao // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. - 2007. -Vol. 17. – P. 87-92. – DOI:10.1016/S1003-6326(07)60053-3

122. Tuba, I.S. A method of elastic-plastic plane stress and strain analysis / I.S. Tuba //J. Strain analysis. - 1966. - №1. – P. 115-122.

123. Yamilev, M.Z. The use of compact inspection devices for monitoring the technical condition of pipelines in protective cases / M.Z. Yamilev, V.V. Pshenin, D.S. Matveev, D.S. Podlesniy, T.I. Bezimyannikov // Neftyanoe Khozyaystvo-Oil Industry. - 2022. - V. 2. – P. 106-110. doi:10.24887/0028-2448-2022-2-106-110

124. Yuan, C.L. Self-healing mechanism of inner crack in plastic deformation under high temperature / C.L. Yuan, Y.X. Zhong // J. Plast. Eng.- 2006.- №13. –P. 53-57.

125. Yu, J. Numerical Calculation and Experimental Research on Crack Arrest by Detour Effect and Joule Heating of High Pulsed Current in Remanufacturing / J. Yu, H. Zhang, D. Deng, S. Hao, A. Iqbal // Chinese journal of mechanical engineering. - 2014. - Vol. 27. - No. 4. – P. 745-753. DOI: 10.3901/CJME.2014.0414.075

ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения результатов диссертационной работы



Общество с ограниченной ответственностью «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»
(ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»)

АКТ

«15» 03 20 24 г.

№ 65/2960 - 6

УТВЕРЖДАЮ



Главный инженер – первый заместитель
генерального директора

В.Н. Сивоконь

«03» 20 24 г.

**о внедрении результатов кандидатской диссертации
Алжадли Мохаммеда
на тему: «Восстановление нефтегазопроводов с трещиноподобными
дефектами магнитно-импульсной обработкой»
по научной специальности 2.8.5. «Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ»**

Комиссия в составе:

Председатель: Замараев Денис Михайлович - начальник УЭИГ, ГРС и ЗК;

Члены комиссии:

1. Белинский Василий Фёдорович - главный технолог
2. Первых Николай Сергеевич – начальник СОВОФ.

Составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Восстановление нефтегазопроводов с трещиноподобными дефектами магнитно-импульсной обработкой», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в деятельности ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» в области восстановления дефектных участков газопроводов с целью повышения остаточного ресурса.

В частности, разработанная автором технология ремонта дефектов магнитно-импульсной обработки и конструкция индуктора, рассмотрены и опробованы в условиях Участка по ремонту восстановлению газопроводов и

другого оборудования ООО «Газпром трансгаз Санкт - Петербург». Для опробования технологии ремонта использовался реальный образец с дефектом типа «Трещина», вырезанный из магистрального газопровода «Торжок-Долина». Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения данной технологии для ремонта подобных дефектов. Кроме того, разработанная технология перспективна для ремонта дефектов труб с дефектом типа «Коррозионное растрескивание под напряжением».

Использование магнитно-импульсной обработки при ремонте и восстановлении труб, бывших в эксплуатации, позволит повысить эксплуатационные свойства дефектных участков трубопроводов, обеспечить продление срока их службы. Внедрение технологии ремонта дефектов КРН методом магнитно-импульсной обработки, позволит осуществлять ремонт до 15% дефектов труб Ду 1020 – Ду 1420 мм.

Председатель комиссии

Начальник УЭИГ, ГРС и ЗК

Д.М. Замараев

Члены комиссии:

Главный технолог

В.Ф. Белинский

Начальник СОВОФ

Н.С. Первых

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патенты на объекты интеллектуальной собственности



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2805733

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ДЕФЕКТОВ
СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА НА ВНУТРЕННИХ
СТЕНКАХ ТРУБОПРОВОДА МАГНИТНО-
ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ**

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

Авторы: *Щипачев Андрей Михайлович (RU), Алжадли
Мохаммед (RU), Соломенникова Арина Ивановна (RU)*

Заявка № 2023103918

Приоритет изобретения **21 февраля 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **23 октября 2023 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **21 февраля 2043 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

