

На правах рукописи

Латипов Ильнур Ульфатович



**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ И
КОНТРОЛЯ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА ДЕФЕКТНЫХ
ЗОН ТРУБОПРОВОДОВ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

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

Санкт-Петербург - 2024

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Болобов Виктор Иванович

Официальные оппоненты:

Атрошенко Светлана Алексеевна

доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук, лаборатория физики разрушения, ведущий научный сотрудник.

Филиппов Дмитрий Александрович

доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», лаборатория «Функциональные материалы», заведующий лабораторией.

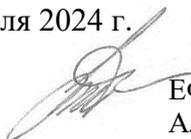
Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

Защита диссертации состоится **23 сентября 2024 г. в 12:00** на заседании диссертационного совета ГУ.9 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а**.

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

Автореферат разослан 23 июля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЕФИМОВ
Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Одной из основных причин, приводящих к отказу подземной части магистральных газопроводов (до 36% в случае ПАО «Газпром»), является потеря их работоспособности в результате стресс-коррозии. Процесс начинается на внешней поверхности нижней образующей трубы на участках с отслоившейся изоляцией, где металл находится в непосредственном контакте с грунтовой водой, и представляет собой растрескивание металла при одновременном воздействии коррозионной среды и растягивающих напряжений, завершающееся разрушением трубопровода в дефектной зоне. Одной из проблем, возникающих при принятии решения о дальнейшем использовании труб демонтированных участков трубопровода, на которых внутритрубной диагностикой выявлены дефектные зоны стресс-коррозионного поражения, является неопределенность в области распространения этих зон по трубопроводу из-за наличия в них участков, где процесс стресс-коррозии еще находится на инкубационной стадии развития, протекает в тонком поверхностном слое металла и не может быть зафиксирован, как внутритрубной диагностикой, так и другими неразрушающими методами контроля. Отсюда возникает сложность в определении границ непораженных коррозией элементов трубопровода, которые могли бы получить дальнейшее практическое применение. Например, при монтаже, ремонте, реконструкции и модернизации газопроводов в составе временных байпасных и продувочных линий.

Решение этой задачи требует применения новых высокочувствительных, эффективных методов контроля материалов газопроводов на подверженность стресс-коррозии на начальной стадии ее развития. Одним из них является

существующий метод магнитной анизотропии (ММА), способный по изменению доменной структуры ферромагнитных материалов фиксировать механические напряжения, возникающие в тонком (менее 1 мм) поверхностном слое металла, и, как следствие, изменения в его структуре на инкубационной стадии развития стресс-коррозии. В этом контексте ММА представляет собой перспективный инструмент для диагностики стресс-коррозионных процессов. Метод ММА основан на анализе изменений магнитных свойств материала, возникающих в результате стресс-коррозионных процессов.

Степень разработанности темы исследования

В работах Абдуллина И.Г., Агинея Р.В., Гуменова К.М., Хижнякова В.И., Сильвестрова С.А., Овчинникова И.И., Конищева К.Б., Kane R.D., D. Hardie, T. Zhang, Y.F. Cheng Djukic M.B. - и других авторов установлены основные признаки стресс-коррозии трубопроводов и причины, способствующие ее возникновению, предложены теории, объясняющие механизм протекания данного процесса, и способы его предотвращения. Несмотря на значительные усилия в области исследования и контроля стресс-коррозионных процессов в магистральных газопроводах, в настоящее время отсутствуют достаточно разработанные экспресс-методы, позволяющие определять границы области стресс-коррозионного поражения на инкубационной стадии ее развития. Успешная реализация этих требований позволит перейти от замены целых участков трубопровода к вырезке и дальнейшему использованию его непораженных элементов, что значительно снизит затраты на ремонт и повысит эффективность эксплуатации газотранспортных систем.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.6.17 Материаловедение по пункту 6 «Разработка и совершенствование методов исследования и

контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств металлических, неметаллических и композиционных материалов и функциональных покрытий».

Объект исследования – процесс развития стресс-коррозии материала газопровода.

Предмет исследования – метод магнитной анизотропии для ранней диагностики области дефектной зоны стресс-коррозионного поражения газопровода.

Цель исследования – разработка экспресс-метода исследования и контроля структуры материала газопровода для установления области распространения стресс-коррозионного поражения на инкубационном этапе развития.

Идея – использование метода магнитной анизотропии для установления области дефектной зоны стресс-коррозионного поражения трубопровода.

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

1. На основе обобщения теоретических и экспериментальных исследований установить факторы, связывающие изменение структуры материала трубопровода при его стресс-коррозии с возникающими напряжениями.

2. Разработать экспериментальную установку и методику испытаний трубных сталей в условиях, имитирующих инкубационную стадию стресс-коррозии трубопроводов, с замером методом МА напряжений, возникающих в поверхностном слое образцов.

3. С использованием разработанной экспериментальной установки исследовать изменения, происходящие в структуре трубных сталей на инкубационной стадии их стресс-коррозионного поражения, с установлением вида зависимости между величиной напряжений, возникающих в результате этих

изменений, и разностью главных механических напряжений (РГМН), регистрируемых ММА.

4. Разработать экспресс-метод контроля изменений в структуре материала трубопровода в результате стресс-коррозионного поражения.

Научная новизна работы:

1. Установлено, что процесс стресс-коррозии материала газопровода, в том числе и на инкубационной стадии развития, сопровождается изменениями в его структуре, вызывающими появление в поверхностном слое трубы остаточных механических напряжений.

2. Показано, что приращение уровня растягивающих напряжений в металлической конструкции и вызванное им изменение сигнала РГМН связаны линейной зависимостью, в которой коэффициент пропорциональности, существенно не различается для различных марок трубных сталей.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Обнаружено, что остаточные напряжения, существующие в поверхностном слое материала трубы газопровода, пораженного стресс-коррозией, имеют в районе образовавшихся трещин величину, близкую к пределу текучести использованной стали.

2. Установлено, что переход от металла трубопровода, пораженного стресс-коррозией к непораженному металлу, определяется, как граница зоны повышенных механических напряжений, устанавливаемая диагностированием места поражения магнито-анизотропным методом.

3. Результаты диссертационной работы внедрены в производственный процесс на предприятии ООО «НТЦ «РусЭкспертПрогресс» (Акт внедрения от 15.05.2024) для выполнения работ по оценке напряженно-деформированного состояния трубопроводов на объектах ООО «Портэнерго» и ООО «НОВАТЭК-УСТЬ-ЛУГА».

Методология и методы исследования.

Научное исследование проведено и использованием комплексного подхода, включающего детальный анализ теоретических сведений о процессе стресс-коррозии, а также с экспериментальным подтверждением эффективности предлагаемых решений по обнаружению изменений в напряженно-деформированном состоянии поверхностного слоя материала трубопровода, как индикатора его стресс-коррозии.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Изменения в структуре трубных сталей на инкубационной стадии развития стресс-коррозии сопровождаются появлением в подповерхностном слое трубы растягивающих напряжений, величина которых прямо пропорциональна изменению разности главных механических напряжений (РГМН), фиксируемых методом магнитной анизотропии в месте дефектной зоны.

2. Метод контроля структуры материала трубопровода, позволяющий по результатам магнито-анизотропных измерений устанавливать область распространения стресс-коррозионного поражения трубы и границы бездефектных зон.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием общепринятых методов анализа и сходимостью результатов экспериментов, полученных различными методами.

Апробация результатов.

Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: Конкурс «Лучшие научные проекты по решению технологических задач АО «Северсталь Менеджмент» среди студентов и молодых ученых «Стальные возможности» - 2021; VIII межд. н-мет. конф. «Актуальные проблемы гуманитарного знания в техническом ВУЗе 2021– год»; I

Всероссийская н. конф. «Транспорт и хранение углеводов – 2022»; II Всероссийская н. конф. «Транспорт и хранение углеводов – 2023»; III Межд. конф. «Коррозия и новые материалы в нефтегазовой промышленности» - 2023;

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач научного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы, посвященной стресс-коррозии; проведении экспериментальных и теоретических исследований, необходимых для подтверждения эффективности предлагаемого решения, разработке метода контроля структуры трубопровода; участие в написании научных статей по теме диссертации.

Публикации

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в издании из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Структура диссертации

Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 107 наименований и 2 приложения. Диссертация изложена на 100 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков, 6 таблиц и 16 формул.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, профессору Болобову В.И., ректору Ухтинского государственного технического университета профессору Агинеи Р.В., директору ООО «Феррологика»

Жукову В.С., научному сотруднику НЦ «Переработки ресурсов» Попову Г.Г. и всем сотрудникам кафедры материаловедения и технологии художественных изделий за помощь в работе над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования.

В первой главе проанализированы причины аварий газопроводов и рассмотрены основные признаки стресс-коррозии. Выявлены факторы, связывающие стресс-коррозионное поражение материала газопровода с процессом его электролитического наводороживания. Проанализированы методы анализа структуры металла пораженных конструкций.

Вторая глава посвящена разработке экспериментальной установки по измерению сигнала РГМН на образцах разных марок трубных сталей в условиях, имитирующих инкубационную стадию развития стресс-коррозии магистральных газопроводов.

В третьей главе установлена зависимость между величиной сигнала РГМН и напряжением в подповерхностном слое конструкции из трубной стали, возникшим из-за изменений в структуре металла.

В четвертой главе предлагается метод контроля структуры металла трубопроводов на подверженность стресс-коррозии с его апробацией на натурном фрагменте трубы.

Первое защищаемое положение:

Изменения в структуре трубных сталей на инкубационной стадии развития стресс-коррозии сопровождаются появлением в подповерхностном слое трубы растягивающих напряжений, величина которых прямо пропорциональна изменению разности главных механических напряжений (РГМН), фиксируемых методом

магнитной анизотропии в месте дефектной зоны.

При разработке методики эксперимента, имитирующей протекание инкубационной стадии процесса стресс-коррозии трубопроводов исходили из наиболее аргументированной в настоящее время точки зрения, что основной причиной стресс-коррозии является наводороживание напряженной стенки трубы, происходящее из-за появления на ее поверхности атомарного водорода, как продукта электролиза грунтовой воды.

Объектом исследований являлись образцы трубных феррито-перлитных сталей марок 08пс, 20, 17ГС, 18Г2, 10ХСНД в виде вырезанных из проката пластин 150x50x3 мм, защищенных, за исключением рабочей зоны 30x30 мм, диэлектрическим покрытием. Образцы изгибались в струбцине до появления в поверхностном слое их рабочей зоны растягивающих напряжений $\sigma_p \sim 0,7\sigma_T$, близких к имеющим место в стенках магистральных газопроводов. Образец 1 (рисунок 1) в струбцине 3 помещался в электролит – 5 % водный раствор H_2SO_4 + 1,5 г/л $CS(NH_2)_2$ и подключался к источнику постоянного тока (DC Power Supply YX-305D). Осуществлялось наводороживание рабочей зоны образца при заданных плотности катодного тока J и времени t , после чего образец, с использованием сканера (рисунок 2), подвергался магнито-анизотропным измерениям при глубине проникновения сигнала $\sim 0,5$ мм: устанавливалось распределение изолиний РГМН по поверхности образца с определением текущего значения РГМН_г в центральной точке его рабочей зоны и сравнением с начальной величиной РГМН₀, установленной до наводороживания. С использованием микроскопа *Leica DM* и микротвердомера ПМТ-3М исследовались структура и твердость *HV* подповерхностного слоя наводороженных образцов.

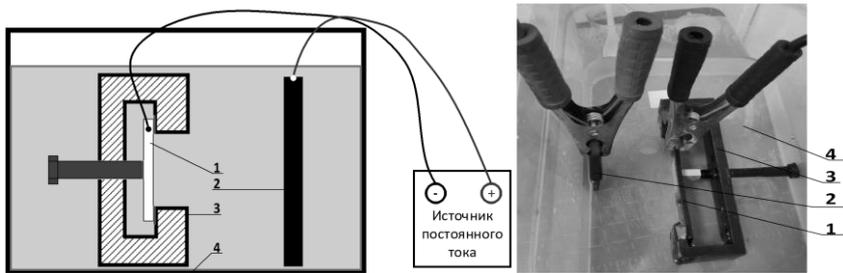


Рисунок 1 – Схема и вид установки для наводороживания образцов: 1 – исследуемый образец (катод); 2 – графитовая пластина (анод); 3 – струбцина

Для установления зависимости между изменением сигнала РГМН и напряжением в конструкции, вызвавшим это изменение, пластины сталей подвергались одноосному растяжению (Рисунок 3, *a*) и трехточечному изгибу (*б*) с замером сигнала сканера ММА в средней точке пластин при различных значениях возникающих растягивающих напряжений σ_p .

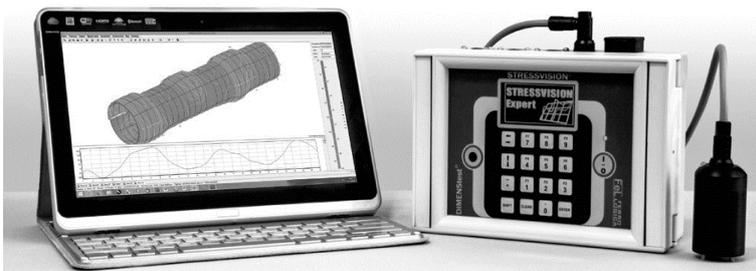
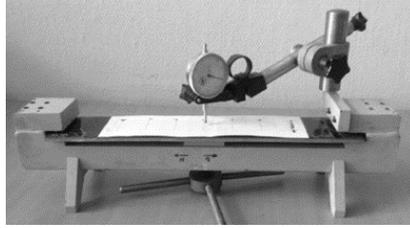


Рисунок 2 – Сканер механических напряжений STRESSVISION для проведения магнитно-анизотропных измерений



(a)



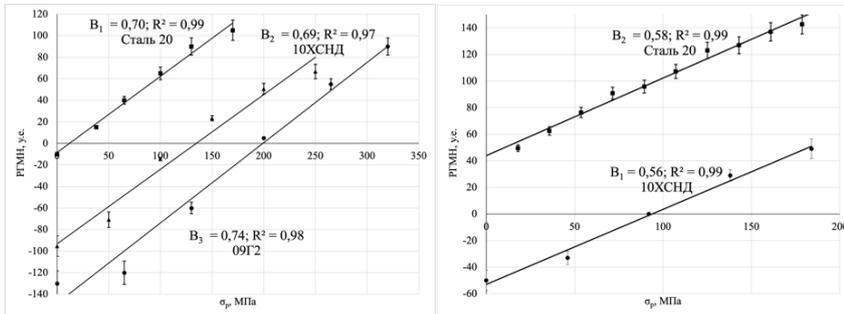
(б)

Рисунок 3 – Замер сигнала сканера STRESSVISION при растяжении пластины на испытательной машине Zwick Roell (a) и вид пластины, подвергнутой трехточечному изгибу, перед замером РГМН (б)

Установлено (рисунок 4), что вне зависимости от марки стали и способа приложения растягивающему напряжению σ_p , приращение РГМН при растяжении пластин прямо пропорционально σ_p

$$\Delta \text{РГМН} = B \sigma_p, \quad (1)$$

при значениях коэффициента B , близких для всех исследованных трубных сталей ($B_{\text{ср}} = 0,65$ у.е./МПа).



(a)

(б)

Рисунок 4 – Зависимость сигнала РГМН от величины растягивающего напряжения при испытании пластин трубных сталей на одноосное растяжение (a) и трехточечный изгиб (б)

Как видно из графиков рисунка 4 и соответствующих картограмм на рисунке 5, основной массе исходных пластин,

металл поверхностных слоев которых, как можно заключить, находится под действием остаточных напряжений сжатия, соответствуют отрицательные значения РГМН, которые уменьшаются по абсолютной величине, т.е. увеличиваются, по мере возрастания растягивающих напряжений, возникающих в результате растяжения и изгиба пластин, с переходом сигнала РГМН в область положительных значений, что связано с формированием доменной структуры под действием напряжения обратного знака.

Оказалось (рисунок 6, таблица 1), что воздействие водорода на пластины всех анализируемых сталей оказывает такой же эффект, как и их изгиб или растяжение, т.е. приводит к увеличению РГМН. Отсюда заключали, что наводороживание сопровождается появлением в поверхностном слое сталей, именно, *растягивающих* напряжений, величина которых с увеличением интенсивности наводороживания (увеличением плотности тока J) возрастает. Таблица 1 – Влияние наводороживания трубных сталей на величину сигнала РГМН

Марка стали	№ образца	J , мА/см ²	РГМН ₀	РГМН _i	ΔРГМН	ΔРГМН _{ср}
08пс	1	25	-56	-47	9	8
	2		-46	-40	6	
17ГС	3	25	-24	-7	17	17
20	4	50	-275	-246	29	26
	5		-291	-270	21	
	6		-98	-67	31	
	7		-127	-100	27	
	8	-132	-103	29		
	9	136	-118	-84	34	34
	10		-131	-85	46	
11	-131		-113	18		

Как показали металлографические исследования, причиной возникновения указанных напряжений явились изменения в структуре поверхностного слоя сталей, вызванные обезуглероживанием входящего в их состав цементита при наводороживании ($4H + Fe_3C \rightarrow CH_4 + 3Fe$), а также молизацией продифундировавших в металл атомов водорода, а именно:

- появление в строчной феррито-перлитной структуре сталей несплошностей, в виде более широких и светлых участков перлитной составляющей (рисунок 7, *а, б*);

- наличие внутри несплошностей пор (рисунок 7, *в*), как можно заключить, заполненных сжатыми газами (метаном и водородом), давление которых на стенки пор вызвало пластическую деформацию металла поверхностного слоя образцов и появление в нем остаточных растягивающих напряжений;

- наличие у несплошностей загнутых вверх краев (рисунок 7, *а, б*), указывающих на направление развития будущих трещин перед их выходом на поверхность, где их наличие является признаком стресс-коррозии.

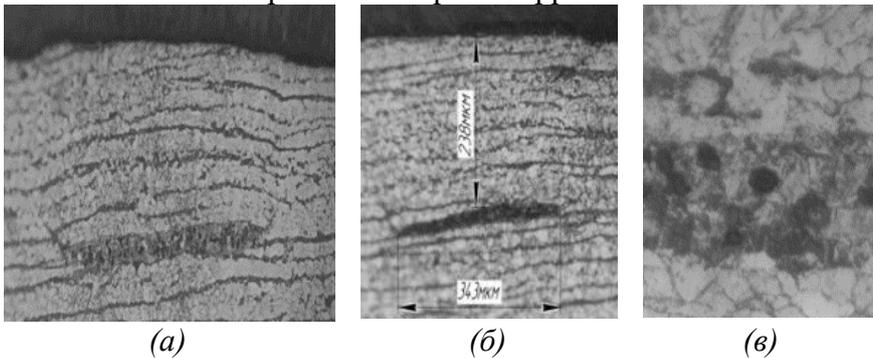


Рисунок 7 – Вид несплошностей на поперечном шлифе стали 17ГС при увеличении X250 (*а, б*) и X1000 (*в*)

Получение зависимости (1) позволило рассчитать напряжения первого рода, возникающие в подповерхностном слое конструкций из трубных сталей в результате наводороживания и инкубационной стадии процесса стресс-коррозии, которые для $\Delta PGMH = 34$ у.е из таблицы 1 равны 50МПа и близки к установленным другими методами: до ~40МПа (Zhang, T.), 60МПа (Гликман Л.А.).

Таким образом, первое положение, выносимое на защиту, **считается доказанным.**

Второе защищаемое положение:

Метод контроля структуры материала трубопровода, позволяющий по результатам магнито-анизотропных измерений устанавливать область распространения стресс-коррозионного поражения трубы и границы бездефектных зон.

Предлагаемая схема контроля:

- Анализ демонтированной части трубопровода с фиксацией участков, где по результатам внутритрубной диагностики были выявлены признаки стресс-коррозии.
- Очистка трубопровода на отмеченных участках от изоляции.
- Снятие картограммы распределения изолиний PGMH по поверхности участка с использованием прибора «*Stressvision*».
- Анализ полученной картограммы с определением контуров области с повышенными значениями PGMH, принимаемых за границы области стресс-коррозионного поражения трубы.
- Отступление от границ области поражения по оси трубы на величину технологического запаса, считая, что отсюда начинается непораженный элемент трубы и здесь проходит линия его вырезки.

Апробация метода проводилась на фрагменте горячекатанной трубы 63x5 мм из стали 35Г2Ф с дефектами после эксплуатации в виде трещин на внешней поверхности трубы (рисунок 8), свойственных стресс-коррозионному поражению трубопроводов.

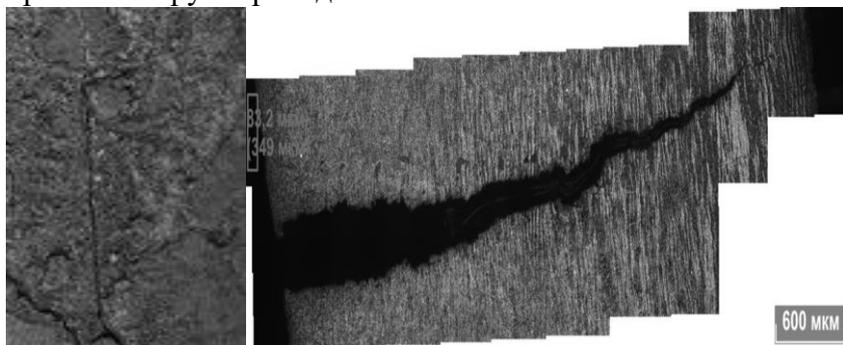


Рисунок 8 – Вид трещины на поверхности и в поперечном сечении стенки фрагмента

В соответствии с результатами измерений установлено, что распределение изолиний РГМН по внешней поверхности фрагмента трубы носит неравномерный характер – в местах трещин (зона I рисунка 9) максимальные значения РГМН (до -520 у.е.) примерно на 360 у.е. отличаются от их величины в окружающих областях (~ -160 у.е.) и соответствуют (1) остаточным напряжениям (540 МПа), весьма близким к величине σ_T материала фрагмента (для стали 35Г2Ф 550 МПа).

В тоже время существуют области поверхности трубы вне трещин (зона II рисунка 9), отличающиеся повышенными значениями сигнала (Δ РГМН до 80 у.е.) и соответствующие, как можно заключить, инкубационной стадии стресс-коррозионного поражения трубы. Как показал микроскопический анализ шлифов (рисунок 10), структура материала поверхностного слоя трубы в таких областях действительно отличается от структуры металла,

окружающего эти области, увеличением доли светлой составляющей – феррита (рисунок 11), что соответствует превращению цементита в феррит в процессе обезуглероживания феррито-перлитной стали при стресс-коррозии.

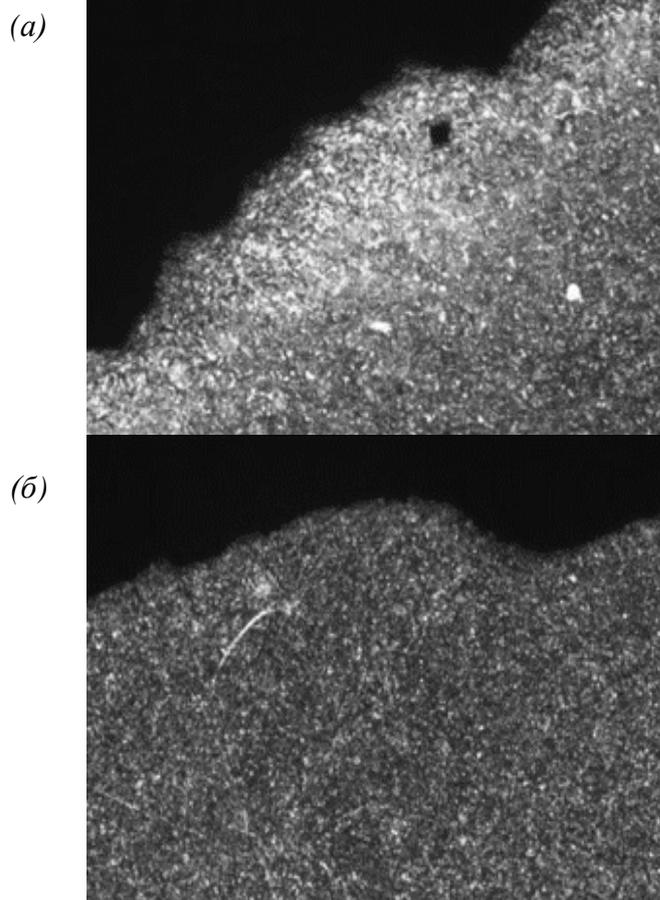


Рисунок 11 – Микроструктура материала поверхностного слоя фрагмента в области с повышенным сигналом РГМН (а) и рядом находящейся области (б)

Весь материал, находящийся за границами области с повышенным РГМН, можно считать непораженным стресс-коррозией.

Таким образом, второе положение, выносимое на защиту, **считается доказанным.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной задачи разработки инновационного метода контроля материала трубопроводов на подверженность стресс-коррозии, что имеет существенное значение для обеспечения работоспособности оборудования нефтегазовой промышленности страны:

1. Результаты анализа и обобщения теоретических и экспериментальных исследований указывают на прямую зависимость между развитием стресс-коррозионного поражения газопровода и формированием зоны повышенных механических напряжений в поверхностном слое материала.

2. Разработана экспериментальная установка и методика проведения магнито-анизотропных измерений на образцах трубных сталей, находящихся под воздействием механических напряжений и подвергающихся электролитическому насыщению водородом. Экспериментальные условия моделируют инкубационную стадию развития стресс-коррозионных процессов в магистральных газопроводах.

3. Проведенные лабораторные исследования с помощью разработанной установки демонстрируют существенную корреляцию между изменениями в структуре трубных сталей, вызванными наводороживанием и приводящими к стресс-коррозии, и изменениями сигнала магнито-анизотропных измерений. Установлено, что величина изменения сигнала прямо пропорциональна напряжениям, возникающим в поверхностном слое материала в результате стресс-коррозии.

4. Предложен экспресс-метод контроля материала газопровода на наличие стресс-коррозионного поражения на

инкубационной стадии его развития, который подтвержден патентом и прошел апробацию на предприятии ООО «НТЦ «РусЭкспертПрогресс», что подтверждается актом внедрения.

Дальнейшее развитие темы диссертационного исследования может быть связано с внедрением метода магнитно-анизотропных измерений в диагностирование объектов нефтегазовых производств и водородопроводов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК:

1. Болобов, В.И. Анализ существующих методик наводороживания и испытаний стальных образцов на воздействие водорода / В.И. Болобов, **И.У. Латипов**, Г.Г. Попов, А.О. Шерстнева // Газовая промышленность. - 2022. - №.8 - С. 36-43.

2. Болобов, В.И. О роли водорода в коррозионном и сульфидном растрескивании трубопроводов / В.И. Болобов, **И.У. Латипов**, В.С. Жуков, С.В. Касьяненко, В.Е. Никулин, И.Е. Сумин// Газовая промышленность. 2023. №.6 С. 90-99.

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

3. Bolobov, V.I. Estimation of the Influence of Compressed Hydrogen on the Mechanical Properties of Pipeline Steels / V.I. Bolobov, **I.U. Latipov**, G.G. Popov , G.V. Buslaev Y.V. Martynenko // Energies. 2021. Vol. 14(6085) - PP. 1-27.

4. Bolobov, V.I. Using the Magnetic Anisotropy Method to Determine Hydrogenated Sections of a Steel Pipeline / V.I. Bolobov, **I.U. Latipov**, V.S. Zhukov G.G. Popov // Energies - 2023. - Vol. 16(5585) - PP. 1–15.

Патенты:

5. Патент РФ № 2778304, 21.06.2023 Болобов В.И., **Латипов И.У.**, Жуков В.С., Попов Г.Г. Способ определения подверженности участков подземных стальных трубопроводов

стресс-коррозии // Заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский горный университет. – № 2022134257,; заявл. 26.12.2022; опубл. 21.06.2023, Бюл. № 18.

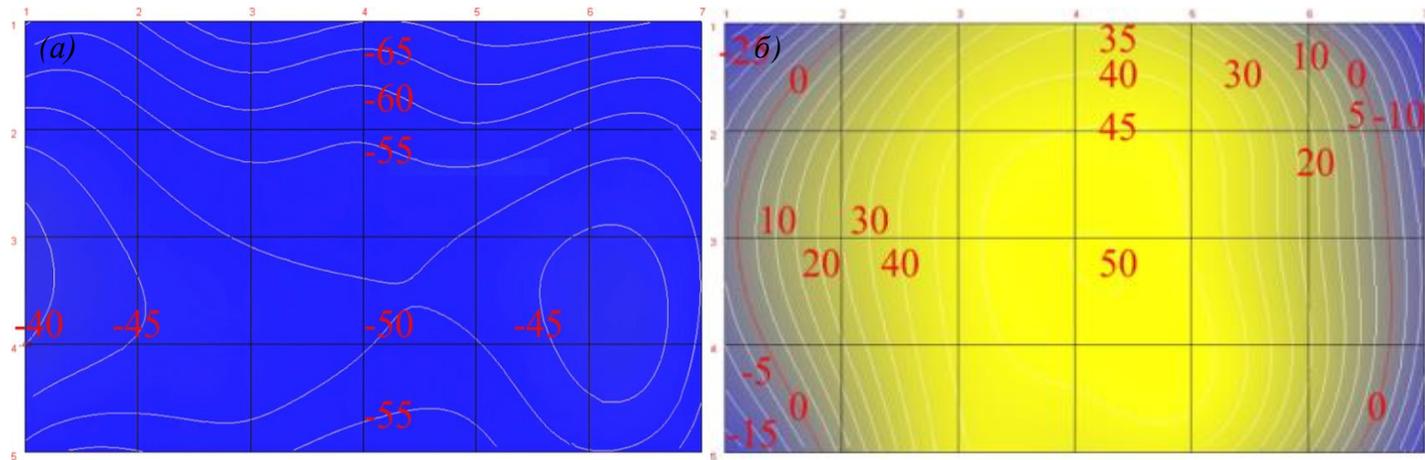


Рисунок 5 – Картограмма распределения изолиний РГМН по центральной части пластины стали 10ХСНД в исходном состоянии (а) и при стреле прогиба $h = 4$ мм (б)

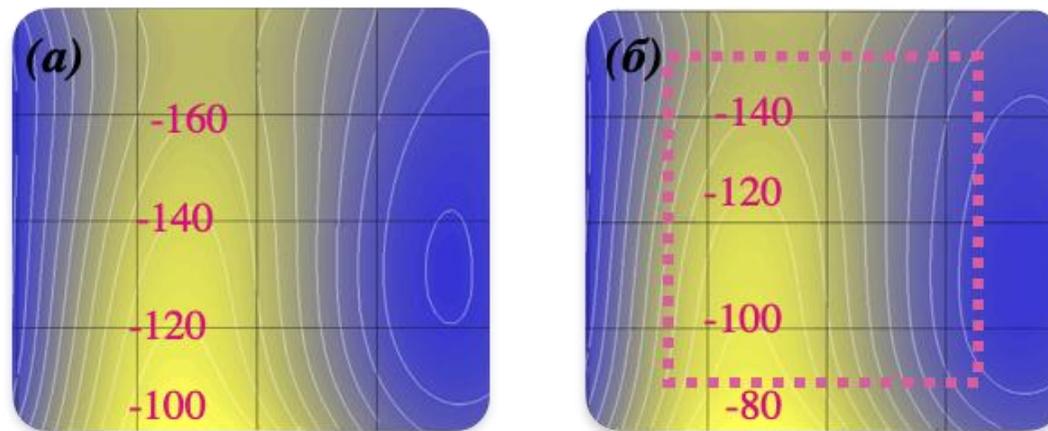


Рисунок 6 – Картограмма изолиний РГМН исходного (а) и наводороженного (б) образца стали 20 ($J = 50$ мА/см², $t = 15$ мин, пунктир – область наводороживания)

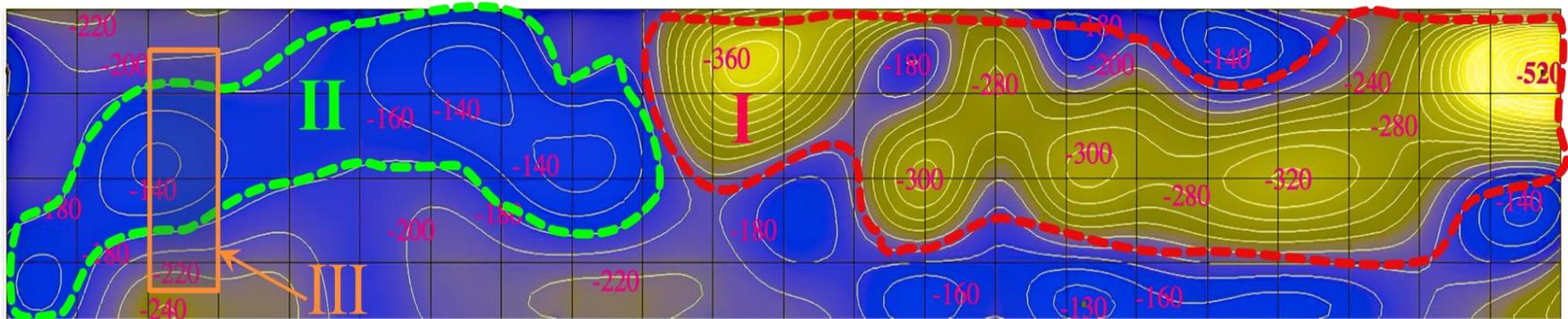


Рисунок 9 – Картограмма распределения изолиний РГМН по внешней поверхности фрагмента: I – зона окружающая трещину, II – зоны повышенных значений РГМН, III – участок, вырезанный для проведения металлографического анализа

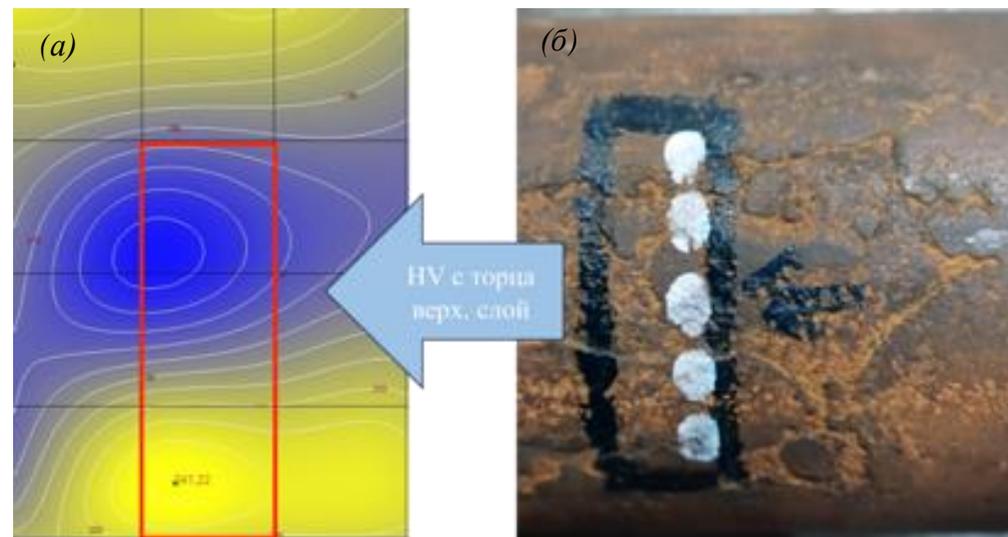


Рисунок 10 – Участок картограммы, соответствующий шлифу (а), и положение шлифа на теле трубы (б)