

На правах рукописи

ЗАГОРСКИХ ОЛЬГА АНАТОЛЬЕВНА

**ФОРМИРОВАНИЕ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ТРУБ
ИЗ АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ
ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ**

Научная специальность

2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва-2025

Работа выполнена в АО «ОДК-Пермские моторы» (АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» (входит в Государственную корпорацию «Ростех»)) и федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ).

Научный руководитель: **Лаптев Анатолий Борисович**,
доктор технических наук, доцент, главный
научный сотрудник НИЦ «Курчатовский
институт» - ВИАМ

Официальные оппоненты: **Саврай Роман Анатольевич**,
доктор технических наук, ведущий научный
сотрудник ФГБУН «Института машиноведения
имени Э.С. Горкунова» Уральского отделения
Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН)

Цветкова Галина Викторовна,
кандидат технических наук, доцент, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет» (ПНИПУ)

Защита состоится «___» сентября 2025 г. в ___:___ на заседании диссертационного совета 31.1.002.01, созданного на базе НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17; тел.: (499) 261-86-77, факс: (499) 267-86-09, e-mail: admin@viam.ru; www.viam.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, ученому секретарю диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук _____ М.А. Горбовец

Общая характеристика работы

Введение. В эксплуатации элементов внешней обвязки двигателей наблюдаются случаи усталостных поломок труб (см. рис. 1) из стали 12X18H10T, работающих на двигателе. Поломкам труб предшествует появление на поверхности трубы (под прокладкой хомута колодочного) очагов фреттинг-коррозии (ФК). Нарботка трубопроводов до момента усталостной поломки варьируется от 1200 часов до 55000 часов.

При креплении трубопроводов из стали 12X18H10T на двигателе посредством хомутов в серийном производстве используются подкрепляющие «металлорезиновые» прокладки, состоящие из прессованной спирали (из проволоки марки ЭИ708А-ВИ) и приваренной к ней контактной сваркой втулки (из ленты марки 12X18H10T). Рабочая поверхность серийной втулки (со стороны сопряженного трубопровода) покрывается твердо-смазочным покрытием ЦВСП-3с (на основе кремнийорганического лака с добавлением графита и оксида кадмия). Покрытие ЦВСП-3с является высокотемпературным антифрикционным смазочным покрытием и предназначено для уменьшения износа деталей в узлах, предохранения трущихся деталей от схватывания и заедания. Покрытие ЦВСП-3с изготавливают на основе кремнийорганического лака КО-815 с добавлением графита С-1 и оксида кадмия в соотношении: *75% лак КО-815 + 20% графит С-1 + 5% оксид кадмия*. Покрытие работоспособно на воздухе в интервале температур от - 60°C до +500°C.

На 23-х разрушенных в эксплуатации трубопроводах проверены механические свойства на разрывных образцах на соответствие ГОСТ 19277-2016. Образцы для определения механических свойств вырезаны из прямолинейных участков труб (вне зон поломок). Механические испытания на растяжение показали, что временное сопротивление разрыву (σ_b) труб находится в интервале (625-771) МПа, относительное удлинение (δ) – в интервале (40,7-64,8) %, что соответствует требованиям ГОСТ 19277-2016 (д.б. $\sigma_b \geq 549$ МПа); $\delta_5 \geq 40\%$).

Химический состав материала 12X18H10T всех исследованных труб соответствует ГОСТ 19277-2016 (см. таблицу 1).

В случаях, когда контактные (монтажные) напряжения и вибрация приводят к локальной выработке твердой смазки ЦВСП-3с на поверхности втулки, труба и втулка из одноименных материалов (стали 12X18H10T) вступают в непосредственный металлический контакт. Создаются благоприятные условия для «схватывания» и появления очагов ФК. Таким образом, практика эксплуатации показала, что штатное состояние трубы и

штатная подкрепляющая втулка с покрытием ЦВСП-3с не всегда обеспечивают эффективную работу подкрепляемой трубы в условиях возникновения ФК и требуется поиск доступных и технологических способов повышения устойчивости материала трубы к ФК и фреттинг-усталости (ФУ).

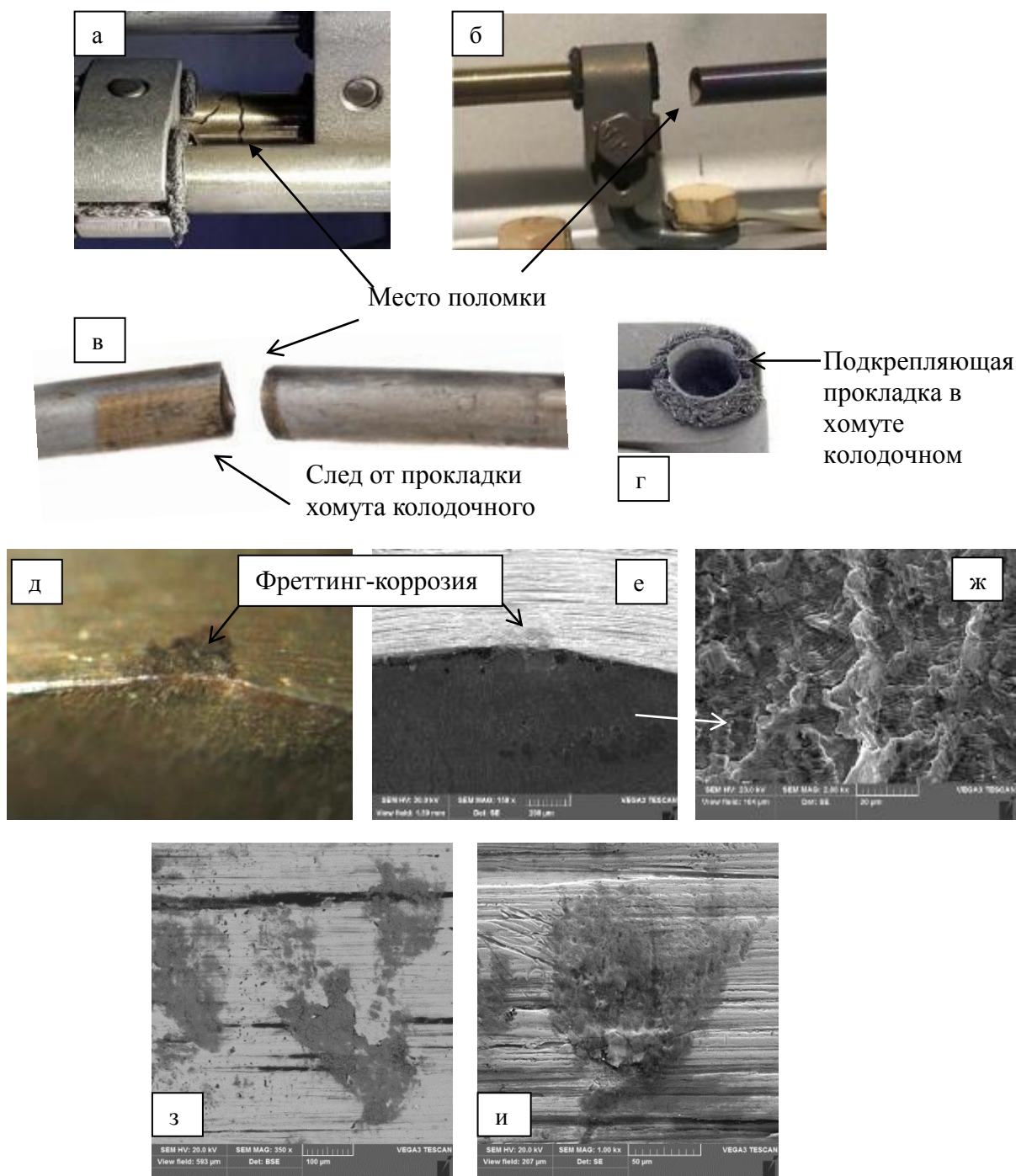


Рисунок 1 – Вид поломки труб в эксплуатации (а-в,д,е), вид участков ФК (д,е,з,и), вид начальной трещины (з) и вид излома (е, ж) по месту усталостной трещины, образовавшейся «под хомутом» (г) при эксплуатации.

Таблица 1 – Химический состав материала 12X18H10T 23-х исследованных труб, имевших усталостные поломки при эксплуатации на двигателях

Химический состав		Содержание элементов, %							
	Fe	C ¹⁾	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	S	P
Фактическое значение	осн	0,05-0,08	0,22-0,66	0,24-1,39	17,04-18,60	9,00-10,53	0,31-0,54	0,005-0,02	0,003-0,018
ГОСТ 19277-2016, ГОСТ 5632-72		Не более					Не более		
	осн	0,12	0,8	2,0	17,0-19,0	9,0-11,0	5(C ¹⁾ -0,02)-0,70	0,020	0,035

Методологической основой работы является изучение и теоретическое описание процессов ФК и ФУ хромоникелевой аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T и формирование упрочненного поверхностного слоя, устойчивого к ФК и ФУ. В основу исследований заложены основные положения теории трения и контактного взаимодействия (в условиях одновременного воздействия гальванической коррозии и вибрации. Значительный вклад в развитие этих теорий в своих работах внесли Уотерхауз Р, Голего И.Л., Крагельский И.В., Шевеля В.В., Гаркунов Д.Н., Трощенко В.Т., Сосновский Л.А., Буше Н.А., Геккер Ф.Р., Асланян И.Р., Погonyшев В.А., Харченков В.С. и др.

Цель работы: Разработка режимов упрочняющей поверхностной обработки изделий (труб) из аустенитной нержавеющей стали для повышения ее стойкости к фреттинг-коррозии и фреттинг-усталости.

Для достижения указанной цели необходимо решение следующих **основных задач:**

1. Исследовать механизм ФК и ФУ труб из нержавеющей аустенитной стали.
2. Разработать и теоретически обосновать метод фреттинг-коррозионной и фреттинг-усталостной прочности труб из нержавеющей стали 12X18H10T путем упрочнения поверхности.
3. Установить зависимость фреттинг-коррозионной и фреттинг-усталостной прочности труб из аустенитной нержавеющей стали от

морфологии (микрогеометрии) и шероховатости поверхности, степени наклепа и остаточных напряжений, фазового состава измененного слоя.

4. Теоретически и практически обосновать технологическую целесообразность применения упрочняющей поверхностной обработки изделий (труб) из аустенитной нержавеющей стали, эксплуатируемых в условиях ФК, реализовать предложенные методы в производстве.

Объектом исследования является труба ($\varnothing 8 \times 1,0$ мм) из хромоникелевой аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T с различным состоянием поверхности, эксплуатирующаяся в условиях вибрации и подверженная ФК и ФУ. Сталь 12X18H10T содержит в составе $\sim 10,4\%$ масс. Ni и относится к типу аустенитных сталей с нестабильным аустенитом. В определенном интервале деформаций в аустенитной матрице этой стали возникает зарождение и накопление ферромагнитного α' - мартенсита деформации.

Предметом исследования являются процессы взаимодействия сопряженных с натягом пар (труба-втулка) выполненных из нержавеющей аустенитной стали, эксплуатируемых в условиях вибрации и ФК.

Научная новизна:

1. Разработаны теоретические основы повышения стойкости к ФК и ФУ труб из нержавеющей аустенитной стали, подверженной циклическим нагрузкам в условно неподвижном соединении.

2. Впервые показано, что создание на поверхности труб из нержавеющей аустенитной стали поверхностного слоя (путем упрочнения поверхности стеклянной дробью) повышает устойчивость материала к ФК и ФУ.

3. Выявлена зависимость для прогнозирования влияния шероховатости поверхности, уровня остаточных напряжений и микротвердости поверхности на изменение времени до разрушения образцов труб из нержавеющей аустенитной стали в условиях вибрации и ФК.

Достоверность результатов работы обеспечена согласованностью экспериментальных результатов, полученных с использованием разнообразных методов исследования структуры, фазового состава и свойств изучаемых материалов, сертифицированного аналитического и испытательного оборудования и подтверждена результатами статистической обработки результатов экспериментов.

Теоретическая значимость. В работе выполнено теоретическое обобщение процессов разрушения стальных труб при фреттинге, показана актуальность этой задачи и возможность повышения стойкости к ФК и ФУ

трубопроводов из нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н10Т созданием поверхностного слоя.

Изучен механизм ФК и ФУ трубы из стали 12Х18Н10Т в условиях эксплуатации.

Практическая значимость работы

1. Практически подтверждена целесообразность применения упрочняющей поверхностной обработки изделий (труб) из аустенитной нержавеющей стали, эксплуатируемых в условиях ФК; по результатам испытаний в АО «ОДК-ПМ» выпущены протоколы испытаний, технические справки, технические акты.

2. Результаты диссертационной работы внедрены в экспериментальную базу АО «ОДК-ПМ» и АО «ОДК-Авиадвигатель». Принято решение о подконтрольной эксплуатации упрочненных стеклянной дробью трубопроводов (по местам крепления втулками), имеющих годные результаты замеров (до и после проведения упрочняющей обработки), на газогенераторе (ГГ).

Положения, выносимые на защиту

1. Способ повышения усталостной прочности труб из аустенитной нержавеющей стали (в том числе в условиях возникновения ФК) путем создания на поверхности труб измененного слоя и улучшения микрогеометрии и шероховатости поверхности в условно неподвижных соединениях.

2. Установление зависимости методов и режимов поверхностной упрочняющей обработки на физико-механические свойства и фазовые превращения при формировании измененного слоя на поверхности труб из нержавеющей аустенитной стали.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на научных конференциях Актуальные проблемы защиты от коррозии нефтегазового оборудования и трубопроводов (КОРРОЗИЯ-2024). Уфа, 2024, Актуальные проблемы защиты от коррозии нефтегазового оборудования и трубопроводов (КОРРОЗИЯ-2023). I Международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию ФГБОУ ВО "УГНТУ" (15 мая 2023 г.). Уфа, 2023, VII Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 125-летию со дня рождения авиаконструктора, ученого-аэродинамика Роберта Людвиговича Бартини «Климат-2022: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы». Москва, 2022, XIV Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов "ТестМат". Москва, 2022. VI Всероссийской научно-технической

конференции «Климат-2021: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы». Москва, 2021. На XVI Международном Китайско-Российского Симпозиуме «Новые материалы и технологии» (г. Хайкоу, пров. Хайнань, КНР).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы изложено в научных работах, в том числе в 4 научных статьях, опубликованных в журналах из перечня ВАК при Минобрнауки России, и 1 – в издании, индексируемом в Scopus, общим объемом 3,5 п.л./2 п.л.

Личный вклад автора

Диссертационная работа является результатом исследовательской работы автора в АО «ОДК-ПМ». Диссертанту принадлежит основная роль в постановке цели и задач исследования, в выборе путей и методов их решения. Все этапы экспериментальной работы проведены при непосредственном участии диссертанта. Диссертантом лично изучены все обрабатываемые и испытываемые образцы, построены графики и установлены зависимости, интерпретированы результаты всех исследований и написаны научные статьи, подготовлена база данных, объединяющая режим упрочнения, уровень остаточных напряжений и поверхностной микротвердости образцов с их фазовым составом и повышением усталостной прочности в условиях ФК и ФУ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, общих выводов, списка литературы из 96 наименований. Работа изложена на 143 страницах, содержит 42 рисунка и 18 таблиц.

Основное содержание работы

Во введении представлено обоснование актуальности работы, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора и апробация работы.

В первой главе на основе литературного обзора научных публикаций изложены теоретические основы повышения стойкости к ФК и ФУ поверхности металлических материалов, подверженных циклическим нагрузкам в условно неподвижных соединениях. Теоретически обоснована целесообразность применения в качестве метода повышения ФК и ФУ прочности труб из нержавеющей стали 12Х18Н10Т упрочнения поверхности. На основе проведенного обзора сформулированы цель и задачи настоящей работы.

Во второй главе приведено описание объектов и методов исследования. Уровень остаточных напряжений на образцах с различным состоянием поверхности определялся двумя методами: рентгеновским на установке XSTRESS 3000 Robot (неразрушающим методом по методике ММ 1.2.128-2010) и методом Давиденкова (механический/разрушающий метод, основан на вырезке из детали образца) на приборе МерКулОН «Тензор-3» зав. №6 по инструкции №05.102.194, (сертификат о калибровке №14/15649, калиброван преобразователь индуктивный 75531 в составе - блок измерительный БИН-2И №429, заводской номер датчика №4227).

Испытания на растяжение образцов выполнены по ГОСТ 10006 на машине для испытания на растяжение РКМ-50.2.05.1 svo – зав. №3/21, сертификат о калибровке №23506/550-2024.

Измерения микротвердости наружной поверхности труб выполнены на микротвердомере LECO LM700 (зав. №FMX0653, свидетельство о поверке №С-ВН/05-06-2024/346128512).

Контроль шероховатости трубных образцов проведен на приборах для измерения параметров шероховатости поверхности М, зав.№ 6240251/6720907/9119-07, свидетельство о поверке № С-ВН/12-04-2022/148050707 (действительно до 11.04.2025) в соответствии с Методикой мод. М фирмы Mahr (Германия).

Параметры шероховатости и профилограммы поверхности получены на лазерном измерительном конфокальном микроскопе OLYMPUS LEXT OLS5100 SAF (регистрационный номер типа СИ 87161-22, заводской № СИ 2М49460, свидетельство № С-ВХЯ/05-10-2023/286452838).

Наружный диаметр образцов труб измерялся микрометром серии 193 «Mitutoyo», заводской номер СИ № 5712981, сертификат о калибровке № 235/8608-2024 от 13.08.2024.

Испытания на сопротивление усталости образцов выполнены по ГОСТ РВ 2840-001-2008 на вибрационном электродинамическом стенде ВЭДС-200А (инв.№ 116981, протокол периодической аттестации № 66/19-2024 от 16.02.2024) и стенде ВЭДС-400А (зав. № 45, инв.№ 117021, протокол периодической аттестации №66/24-2024 от 21.02.2024).

Фрактографический и микрорентгеноспектральный (МРС) анализ изломов и исследование морфологии поверхности образцов труб до и после усталостных испытаний (в том числе в условиях ФК) проведены на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA3 (заводской номер VG11621377RU, свидетельство о поверке № С-С/27-09-2023/285405965 от 27.09.2023).

В исследованиях использованы исходные образцы труб (8х1) мм высоколегированной нержавеющей аустенитной стали марки 12Х18Н10Т по ГОСТ 19277-2016, используемые для изготовления штатных/серийных трубопроводов - шлифованные, обычной точности изготовления, группы А, с нормированием шероховатости (далее по тексту 1-1). Дополнительно использованы образцы труб марки 12Х18Н10Т по ГОСТ 19277-2016 шлифованные, повышенной точности изготовления, группы поверхности Б, с нормированием шероховатости (далее по тексту 1-2). Трубы группы Б не используются для изготовления серийных трубопроводов. В настоящей работе образцы 1-2 использованы в исследовательских целях (как предполагаемая альтернатива штатным трубопроводам).

Перед началом работ исходные трубы 1-1 и 1-2 обеих поставок прошли входной контроль на соответствие ГОСТ 19277-2016. Химический состав контролировался по ГОСТ Р54153-2010, по результатам контроля определено, что материал труб по содержанию основных легирующих элементов отвечает требованиям ГОСТ 19277-2016. Проведены испытания на растяжение образцов по ГОСТ 10006 на отрезках труб полного сечения при нормальной (комнатной) температуре. По результатам испытаний определено, что механические свойства испытанных образцов соответствуют требованиям стандарта на материал ГОСТ 19277-2016. Наблюдаются незначительные отличия в значениях временного сопротивления разрыву и относительного удлинения у шлифованных образцов 1-1 и образцов 1-2. Испытание на сплющивание по ГОСТ 8695 (ISO 3651-1:1998) образцы 1-1 и 1-2 выдержали. У исходных образцов согласно НД на поставку также проверена стойкость против межкристаллитной коррозии (МКК) по ГОСТ 6032 (ISO 3651-1:1998, ISO 3651-2:1998). Все испытанные образцы выдержали испытание на стойкость против МКК.

В третьей главе приведены результаты сравнительных испытаний образцов труб (8х1) мм из нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н10Т после различных режимов гидродробеструйной обработки (ГДО) стеклянной дробью (усл.№ 2-1, 2-2) и после гидроабразивной обработки (ГАО) электрокорундом (усл.№ 3-1..3-3) в сравнении с исходным шлифованным у поставщика состоянием без дополнительной обработки (усл.№ 1-1, 1-2).

В таблице 2 приведены результаты замера шероховатости поверхности и диаметра цилиндрических образцов, обработанных ГДО и ГАО, в сравнении с исходным шлифованным состоянием. По результатам контроля определено, что шероховатость образцов и наружный диаметр до и после дополнительной обработки соответствуют требованиям ГОСТ 19277-2016. Шероховатость образцов 1-1 соответствует ГОСТ 19277-2016 для группы

поверхности А и составляет $Ra = (1,1-1,48)$ мкм (дополнительно определена шероховатость $Rz=12,71$ мкм). Шероховатость поверхности образцов 1-2 составляет $Ra = (0,52-0,65)$ мкм, что соответствует ГОСТ 19277 для группы Б (дополнительно определен параметр $Rz=5,41$ мкм). Шероховатость образцов 2-1 составляет $Ra = (0,92-1,17)$ мкм, $Rz=6,32$ мкм; образцов 2-2: $Ra = (1,17-1,39)$ мкм, $Rz = 10,41$ мкм.

Таблица 2 – Результаты замера наружного диаметра и шероховатости наружной поверхности цилиндрических образцов

Состояние поверхности		Усл.№ образцов	Шероховатость		Наружный диаметр, мм
			Ra (мкм)	Rz (мкм)	
Шлифованное состояние, группа А		1-1	1,10-1,48	12,71	8,03-8,04
Шлифованное состояние, группа Б		1-2	0,52-0,65	5,41	8,04-8,08
Гидродробеструйная обработка (ГДО) стеклянной дробью		2-1	0,92-1,17	6,32	8,04-8,05
		2-2	1,17-1,39	10,41	8,04-8,05
Гидроабразивная обработка (ГАО) электрокорундом		3-1	1,16-1,39	9,75	8,03-8,04
		3-2	0,97-1,14	8,21	
		3-3	0,89-1,29	10,15	
ГОСТ 19277-2016 для $\varnothing_{нар}=8$ мм	Группа пов. А, обычная точность		не более 2,50 мкм	-	$8\pm 0,15$
	Группа пов. Б, повышенная точность		не более 1,25 мкм	-	$8\pm 0,08$

Поверхность шлифованных образцов труб 1-1 типична для штатных трубопроводов обычной точности изготовления, группы А, характеризуется наличием на всей поверхности кольцевой рисочности. Поверхность образцов 1-2 более сглаженная, на фоне тонкой кольцевой рисочности присутствуют отдельные более глубокие риски со следами пластической деформации по краям. Поверхность образцов после ГДО матовая, шероховатая, исходные кольцевые риски отсутствуют. Поверхность образцов, обдудых при давлении 0,2 МПа, отличается наличием отдельных более глубоких ямок, являющихся следами пластической деформации от соударения стеклянной дроби с обрабатываемой поверхностью. Поверхность образцов после ГАО матовая, шероховатая, типична для обдудого состояния. Режимы обдудки образцов 3-1

и 3-3 при первичном опробовании не привели к исчезновению отдельных глубоких кольцевых рисок на исходных трубах, однородная поверхность (без рисок) наблюдалась только на образцах 3-2, обдутых при давлении суспензии 0,2 МПа. Однако при повторной ГАО образцов 3-2 по режиму 2 на их поверхности также были выявлены отдельные более глубокие риски.

Определен уровень остаточных напряжений на упрочненных стеклянной дробью образцах (2-1, 2-2) и образцах, обдутых электрокорундом (3-1..3-3) сравнительно с исходным шлифованным состоянием (1-1 и 1-2) в осевом направлении двумя методами: рентгеновским на установке XSTRESS 3000 Robot (неразрушающим методом) и методом Давиденкова на установке МерКулОН «Тензор-3» (механический/разрушающий метод, основан на вырезке из детали образца).

Оценка уровня остаточных напряжений на установке XSTRESS 3000 Robot производилась на цилиндрических образцах на площади, определяемой диаметром коллиматора (2 мм) в поверхностном слое толщиной 10-15 мкм; замеры проводили в 4х диаметральных точках в осевом направлении.

Режимы измерений:

Напряжение - 30 кВ

Сила тока - 4мА

Углы наклона $\pm 40^\circ$

Излучение Cr-k_α

Modifit χ -метод

Время экспозиции – 10 сек.

Коллиматор – 2мм.

Угол $2\theta_{(211)} = 156.4^\circ$

Осцилляция - 5°

При замере уровня остаточных напряжений на установке XSTRESS 3000 Robot (неразрушающим методом) определено, что в поверхностном слое (толщиной 10-15 мкм) исследованных образцов в проконтролированных точках в осевом направлении залегают сжимающие остаточные напряжения, см. рис. 2 и 3.

Минимальные сжимающие остаточные напряжения наблюдаются у исходных шлифованных образцов 1-1 группы А. Средние значения остаточных напряжений образцов 3-1 и 3-3, обдутых электрокорундом по режимам 1 и 3, соответственно, остались на уровне исходного шлифованного состояния образцов 1-1. Некоторое повышение остаточных напряжений (более чем на 50 % относительно исходного шлифованного состояния 1-1) наблюдается только на образцах 3-2, обдутых электрокорундом по режиму 2 при большем давлении воздуха.

Средние значения сжимающих напряжений шлифованных образцов 1-2 (группы Б) составили порядка (-363,6) МПа, что более чем в 2 раза

превышает остаточные напряжения шлифованных образцов 1-1 (серийное состояние - группа А).

Существенное повышение средних значений остаточных напряжений наблюдается на упрочненных стеклянкой дробью образцах 2-1 и 2-2 - по сравнению с образцами исходными 1-1 шлифованными (группы А и Б) и образцами, обдутыми электрокорундом. Так у образцов 2-2 в контрольных точках сформированы средние сжимающие остаточные напряжения (-510,25) МПа (при максимальном значении (-525,9) МПа), что примерно на 30 МПа превышает уровень средних сжимающих остаточных напряжений, залегающих в поверхностном слое образцов 2-1, максимальная величина которых составила (-493) МПа. Разницу в приросте напряжений у образцов 2-1 и 2-2 можно обосновать разными режимами обработки поверхности (различиями в давлении воздуха при ГДО).

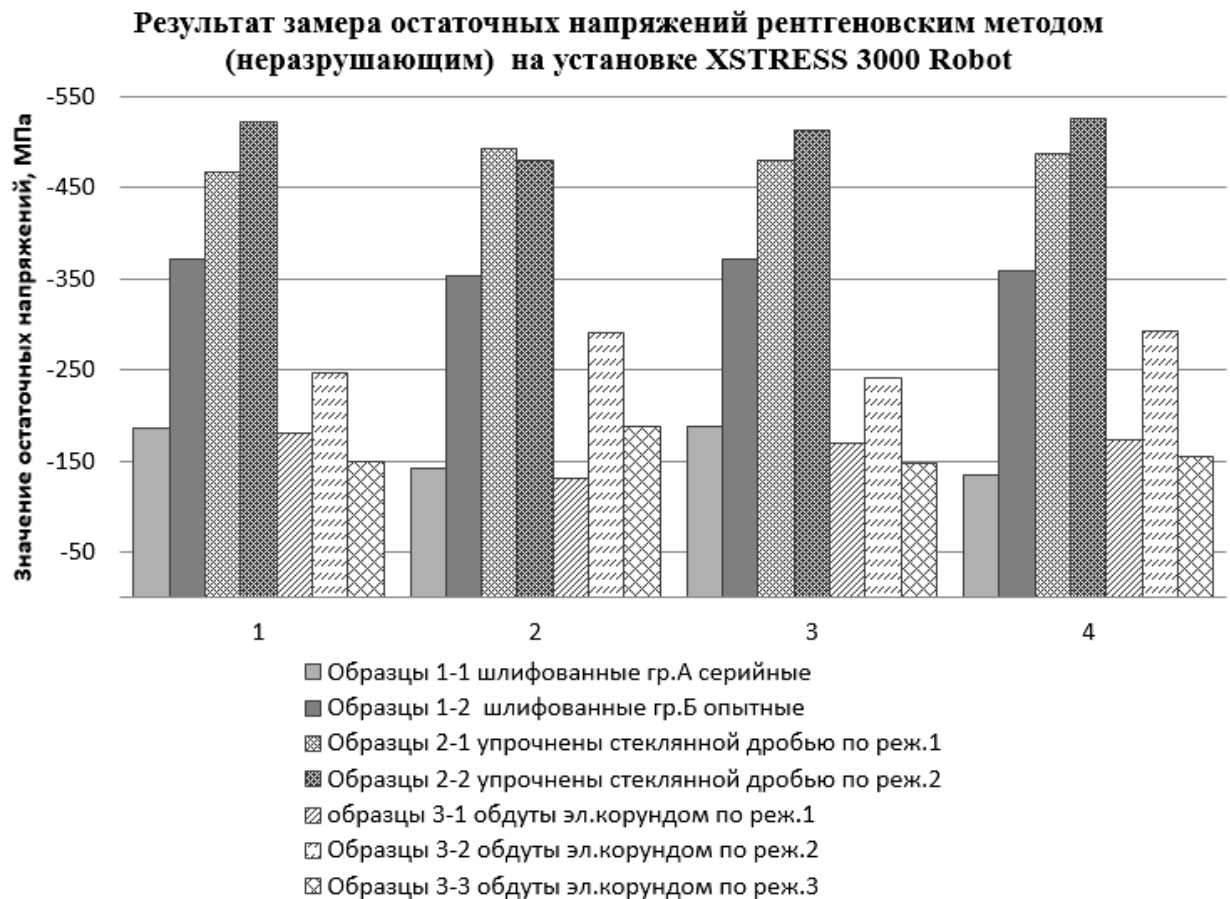


Рисунок 2 - *Результаты замеров остаточных напряжений на установке XSTRESS 3000 Robot (неразрушающим методом).*



Рисунок 3 - Средние значения остаточных напряжений

Образцы для контроля остаточных напряжений методом Давиденкова вырезаны электроэрозионным методом в 2-х диаметрально противоположных направлениях труб. Определение остаточных напряжений выполнялось в осевом направлении на приборе МерКулОН «Тензор-3». Результаты контроля остаточных напряжений методом Давиденкова приведены в таблице 3.

Эпюры распределения остаточных напряжений, показывают:

У шлифованных серийных образцов 1-1 (группа А) максимальные сжимающие напряжения находятся вблизи поверхности (на расстоянии до ~5-10 мкм), величина которых не превышает (-25 кгс/мм^2). У шлифованных образцов 1-2 (группы Б) остаточные напряжения неравномерные по длине и окружности трубы: на отдельных участках трубы сжимающие напряжения до $-(20-50 \text{ кгс/мм}^2)$ наблюдаются вблизи поверхности, на других участках максимальные сжимающие напряжения до (-10 кгс/мм^2) залегают на глубине до 20 мкм, у поверхности переходящие в растягивающие до 5 кгс/мм^2 .

Максимальные сжимающие остаточные напряжения у образцов 2-1 и 2-2, прошедших ГДО, залегают на глубине ~ $(20-40 \text{ мкм})$ от поверхности, величина которых не превышает (-30 кгс/мм^2). Такое распределение остаточных напряжений (с максимумом не у поверхности) может быть связано с релаксационными явлениями на поверхности трубы.

Эпюры распределения остаточных напряжений у образцов, прошедших ГАО показывают, что наведенные ручной обдувкой напряжения при различном давлении воздуха неравномерные на разных участках поверхности. У образцов 3-1, обдутых при давлении воздуха 0,1 Мпа, максимальные сжимающие напряжения до (-8 кгс/мм^2) наблюдаются вблизи

поверхности, на других участках поверхности максимальные напряжения залегают на глубине до 30 мкм и не превышают величины (-6 кгс/мм^2). У образцов, обдутых по режиму 2 при давлении воздуха 0,2 МПа, сжимающие напряжения, залегающие на глубине до 30 мкм, не превышают величины (-13 кгс/мм^2), на другой части поверхности максимальные сжимающие напряжения залегают на глубине до 5 мкм от поверхности и достигают значений не более (-18 кгс/мм^2). У образцов 3-3, прошедших ГАО по режиму 3, максимальные сжимающие напряжения также наблюдаются вблизи поверхности и не превышают значений (-18 кгс/мм^2).

Таблица 3 - Результаты контроля остаточных напряжений на образцах труб с различной обработкой поверхности по методу Давиденкова (разрушающий метод)

Расстояние от края, мкм	Остаточные напряжения, кгс/мм ² (– сжимающие, + растягивающие)										
	Шлифованные группы А (1-1)				Шлифованные группы Б (1-2)				ГДО по режиму 1 (2-1)		
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
5	-	-22,3	-21,3	-2,7	-4,3	-20,2	-48,6	3,1	-7,9	-15,2	-11,4
10	-10,9	-12,3	-19,1	-1,2	-7,7	-4,7	-13,7	1,0	-13,0	-9,7	-15,4
20	-5,7	-4,8	-7,4	0,4	-1,9	2,4	1,2	-8,8	-17,0	-8,4	-30
30	-2,6	-2,1	-3,6	0,7	0,8	2,5	3,1	-4,4	-6,1	-19,4	-23,7
40	-2,1	-1,7	-0,7	0,7	2,1	2,1	2,9	-2,2	-9,4	-27,4	-23,1
50	-0,7	-2,3	0,7	0,1	1,7	2,1	3,0	0,1	-10,7	-23,8	-19,1
60	0,7	-0,4	0,2	0,4	1,7	2,3	2,8	1,1	-9,1	-17,6	-14,9
70	1,3	1,0	0,7	0,1	1,7	1,9	4,2	2,0	-8,8	-14,0	-11,6
80	1,5	1,9	1,0	1,0	2,0	1,9	3,8	1,8	-5,6	-8,7	-8,0
90	0,9	1,6	0,9	0,4	1,4	3,3	2,9	2,0	-6,8	-7,6	-5,8
100	-0,2	2,2	1,1	0,4	1,4	2,8	2,8	1,8	-4,0	-2,8	-1,8
120	-1,1	1,9	1,2	0,1	1,4	1,3	2,5	1,8	-1,8	-1,2	0,6
140	-4,3	2,1	1,2	1,4	1,0	1,7	2,4	1,6	-1,2	3,5	3,7
160	-0,8	2,1	1,6	2,0	1,2	1,4	2,1	1,8	2,7	12,5	4,5
180	-	2,4	1,9	1,8	1,4	1,8	2,3	1,4	4,2	11,3	4,8
$\sigma_{\text{макс}}$ (сжим), кгс/мм ²	-10,9	-22,3	-21,3	-2,7	-7,7	-20,2	-48,6	-8,8	-17	-27,4	-30
$\sigma_{\text{макс}}$ (раст), кгс/мм ²	1,5	2,4	1,9	2	2,1	3,3	4,2	3,1	4,2	12,5	4,8
$\Delta \sigma=0$, мкм	54	63	45	18	27	17	19	11/49	147	124	117

Продолжение таблицы 3 - *Результаты контроля остаточных напряжений на образцах труб с различной обработкой поверхности по методу Давиденкова (разрушающий метод)*

Расстояние от края, мкм	Остаточные напряжения, кгс/мм ² (– сжимающие, + растягивающие)									
	ГДО по режиму 2 (2-2)			ГАО по режиму 1 (3-1)		ГАО по режиму 2 (3-2)			ГАО по режиму 3 (3-3)	
	1	2	3	1	2	1	2	3	1	2
5	-4,6	-10,7	-2,7	-4,2	-7,8	-3,6	-7,5	-18,1	-18,5	-7,7
10	-4,6	-24	-2,2	-2,1	-5,6	-5,1	-7,2	-12,3	-6,3	-11,5
20	-8,0	-26	-1,7	-1,2	-3,2	-2,2	-10,6	-6,0	-3,6	-8,6
30	-4,6	-28,2	-2,1	-6,2	-1,6	-12,8	-7,3	-2,6	-0,7	-7,7
40	-3,1	-25	-2,0	-2,7	-3,7	-5,3	-6,2	-0,9	-0,3	-5,9
50	-1,9	-20,4	-1,4	-1,7	0,4	-3,6	-3,7	-1,5	0,1	-4,2
60	-2,8	-18,9	-2,7	-1,0	1,0	0,8	-2,1	1,7	0,7	-2,0
70	-2,7	-15,8	-1,1	-0,1	1,5	1,4	-1,1	0,2	2,5	0
80	-1,3	-13,1	-1,1	0,4	1,6	1,4	0,2	4,2	2,0	2,2
90	-0,4	-11,0	-8,5	1,4	1,1	2,1	0,6	3,9	3,2	1,6
100	-0,6	-9,8	0,7	2,1	1,4	2,6	1,8	0,9	1,2	2,6
120	1,6	-8,1	1,2	1,2	2,2	10,5	1,8	2,8	1,9	2,3
140	2,4	-1,4	0,5	1,5	1,6	3,1	2,2	1,9	1,2	3,6
160	2,8	1,4	0,2	1,6	1,4	1,4	2,8	1,7	1,7	3,5
180	3,7	5,4	2,6	1,0	2,8	2,2	2,4	-	2,1	3,8
$\sigma_{\text{макс. (сжим)}}, \text{кгс/мм}^2$	-8	-28,2	-8,5	-6,2	-7,8	-12,8	-10,6	-18,1	-18,5	-11,5
$\sigma_{\text{макс (раст)}}, \text{кгс/мм}^2$	3,7	5,4	2,6	2,1	2,8	3,1	2,8	2,0	3,2	3,8
$\Delta \sigma=0, \text{мкм}$	107	150	98	73	49	58	79	56	47	70

Измерения микротвердости образцов труб выполнены на микротвердомере LECO LM700 непосредственно с поверхности и в сечении образцов при нагрузке 10 и 25 гр. Дорожки отпечатков микротвердости строились перпендикулярно к образующей поверхности по направлению к середине сечения трубы на специально подготовленных наклонных «косых срезах» шлифов (угол, образованный наружной замеряемой поверхностью образцов с плоскостью шлифов, составил $\sim 97^\circ$). Первые отпечатки микротвердости наносились на расстоянии (10-25 мкм) от наружной поверхности труб. За величины микротвердости взяты средние значения не менее чем по пяти замеренным дорожкам микротвердости для каждой группы образцов. Сравнительные результаты значений микротвердости в поверхностном наружном слое образцов труб приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Сравнительные результаты замера микротвердости образцов

Фактические результаты	Шлиф. группа А (1-1)	Шлиф. группа Б (1-2)	ГДО по режиму 1 (2-1)	ГДО по режиму 2 (2-2)	ГАО по режиму 1 (3-1)	ГАО по режиму 2 (3-2)	ГАО по режиму 3 (3-3)
HV _{0,010} , кгс/мм ² (на расстоянии 0,01 мм от поверхности)	308	312	420	435	313	310	305
HV _{0,025} , кгс/мм ² (на расстоянии 0,02 мм от поверхности)	236	288	346	381	233	240	237
Глубина измененного слоя, мкм	40	60	80	60	40	50	40
Степень наклепа, %	13	37,8	65,5	82,3	11,5	14,8	9,5

В четвертой главе приведены результаты циклических испытаний соединений из стали 12Х18Н10Т. Для определения влияния дополнительной обработки поверхности труб (наличия измененного слоя и шероховатости) на фреттинго-стойкость и усталостную прочность трубопроводов в сравнении с исходным (шлифованным) состоянием, выполнены сравнительные вибро/усталостные испытания образцов труб с разными вариантами финишной обработки поверхности.

Усталостным испытаниям подвергались образцы штатного/серийного исполнения 1-1 (шлифованные, группы исполнения А), образцы труб исполнения 1-2 (шлифованные, группы исполнения Б, альтернатива штатным трубам), а также образцы, упрочненные ГДО стеклянной дробью по режиму 1, представляющие наибольший интерес в данной работе (исходя из результатов ранее проведенных исследований по определению микрогеометрии и шероховатости поверхности, уровня остаточных напряжений, микротвердости и степени наклепа).

На первом этапе испытывались образцы труб длиной 0,25 м по ГОСТ РВ 2840-001-2008 с консольным зажатием в замке с одного конца в условиях, исключающих ФК. На втором этапе также испытывались образцы длиной 0,25 м (аналогично этапу 1), но в условиях возникновения ФК.

Испытания образцов труб выполнены, на вибрационном электродинамическом стенде ВЭДС-200А при изгибных колебаниях по симметричному циклу напряжений базе 20 млн. циклов. Условия испытания: нормальная (комнатная) температура, среда – лабораторный воздух.

Образцы труб препарировались тензорезисторами с базой 5 мм для контроля уровня вибронапряжений. Перед испытаниями была проведена тарировка балки при помощи камертонно тарировочного устройства. Уровень переменных напряжений задавался и контролировался по двум тензорезисторам и амплитуде перемещения незакрепленного конца образца. Схема испытаний показана на рис. 4.

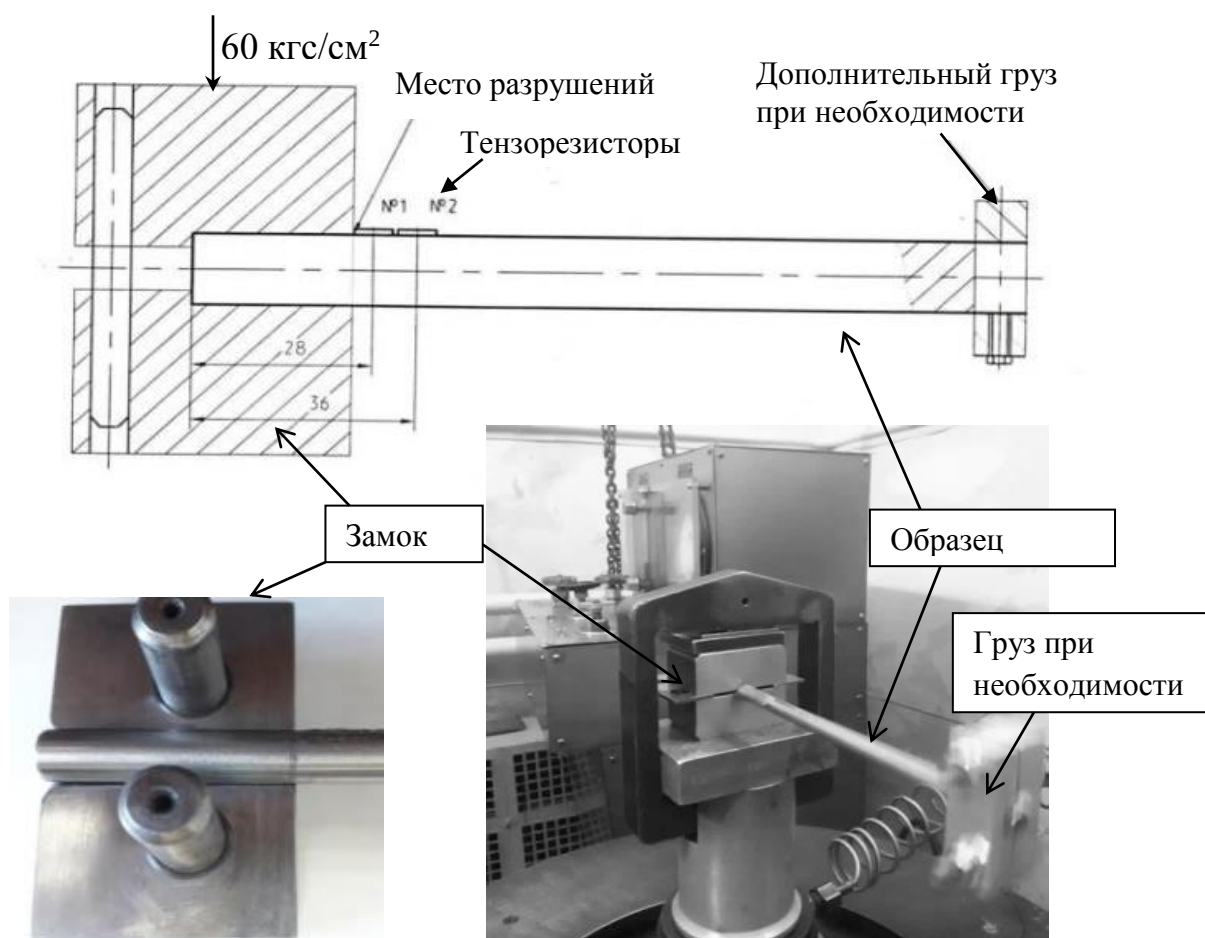


Рисунок 4 – Схема испытания и крепления образца трубы и наклейки тензорезисторов на образец. База тензорезисторов 5 мм.

На этапе 3 выполнены виброиспытания образцов труб с двусторонним зажатием штатными прокладками, наиболее приближенные к эксплуатационным. Образцы труб с подкреплением серийными прокладками (с штатным покрытием) устанавливались на вибродинамический стенд типа

ВЭДС-400. Для испытаний использовались хомуты с парными колодками. Момент затяжки винта в хомуте составлял 1,0 кгс·м. Усталостные испытания образцов выполнены при комнатной температуре при изгибных колебаниях по симметричному циклу напряжений с частотой основного тона на базе испытаний 20 млн. циклов. Напряжение по тензорезистору задавалось 118 МПа (12 кгс/мм²). После испытаний на поверхности образцов труб в местах подкрепления прокладками выявлены единичные локальные «несмываемые» участки серо-коричневого цвета размером до (0,5-1 мм), типичные для очагов ФК без усталостного развития, см. рисунок 5.

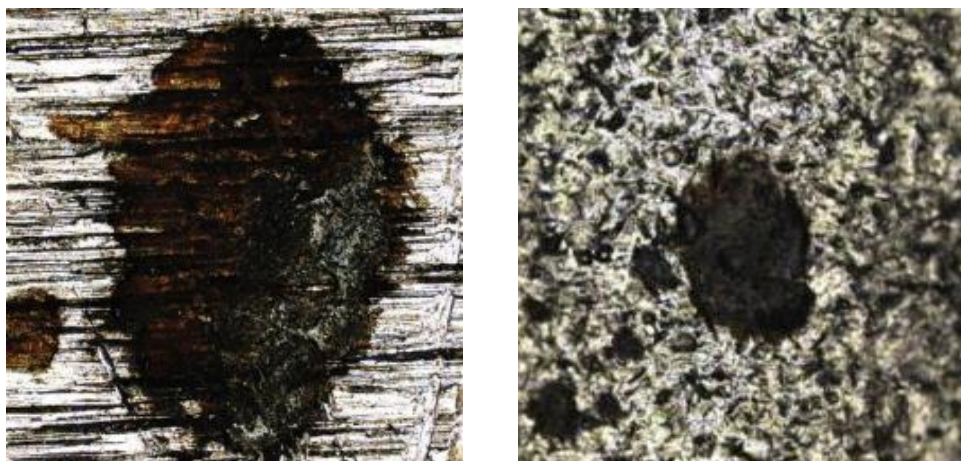


Рисунок 5 – Вид локальных несмываемых участков с элементами ФК на наружной поверхности образцов труб после виброиспытаний (слева образец шлифованный гр.А, справа – после ГДО стеклянной дробью)

В пятой главе приведены данные фрактографического анализа образцов труб после испытаний на ФК и ФУ. Исследованы морфология, элементный и структурно-фазовый состав измененного слоя.

При фрактографическом анализе определено, что очаговые зоны развития усталостных трещин на шлифованных образцах, разрушенных при усталостных испытаниях при напряжениях 20 и 22 кгс/мм² (образцы группы А) и 26 кгс/мм² (образцы группы Б), совпадали с отдельными кольцевыми рисками на поверхности труб, образовавшимися на операциях круглой шлифовки при изготовлении труб у поставщиков (см. рис. 6а,б). Глубина отдельных кольцевых рисков на поверхности шлифованных труб (группы Б) по изломам составляет 10 мкм, на трубах серийных (группы А) глубина рисков составляет до 20 мкм.

Очагами зарождения усталостных трещин при испытании образцов различного исполнения (шлифованных и упрочненных) являлись участки ФК (см. рис. 6 в,г). Минимальные участки ФК наблюдаются на поверхности

упрочненных труб, выстоявших при этом максимальное время до разрушения в одинаково заданных условиях при усталостных испытаниях. По местам ФК при металлографическом исследовании на нетравленых шлифах обнаружен измененный дискретный слой глубиной до 10 мкм. При микрорентгеноспектральном анализе в локальных участках ФК на поверхности испытанных образцов труб на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA3 в продуктах ФК всех образцов труб выявлено повышенное содержание кислорода (до 34%), железо и легирующие элементы, входящие в марку 12X18H10T, при этом количество хрома и никеля в продуктах ФК значительно ниже (более чем в 2 раза), чем в основном материале трубы.

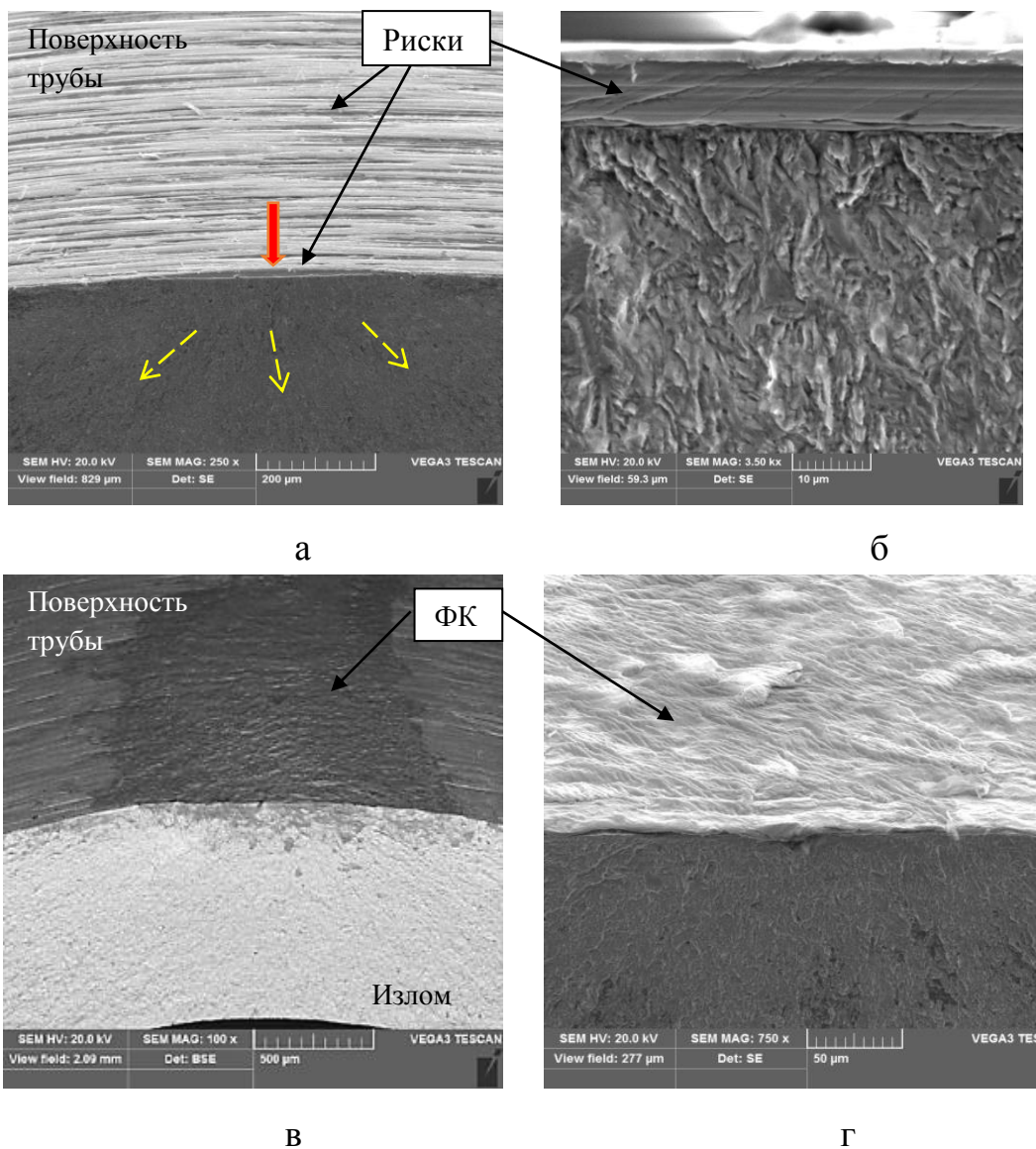


Рисунок 6 - Вид изломов в начальных зонах усталостных трещин, развивающихся от рисков (а,б) и участка ФК (в,г) на поверхности образцов труб. Изображение получено на электронном микроскопе TESCAN VEGA3.

Проведено фрактографическое и металлографическое исследование сформированного при ГДО измененного слоя на поверхности упрочненных образцов труб.

Объемная доля аустенита в поверхностном слое образцов труб рассчитана по интегральным интенсивностям дифракционных линий и показано, что в условиях возникновения поверхностной деформации при ГДО образцов стеклянной дробью при заданном режиме, в поверхностном слое произошел фазовый переход ГЦК-ОЦК с образованием мартенсита деформации (α'), процентное содержание которого в измененном слое составило $\sim 27\%$.

На основании результатов, полученных в работе, методом наименьших квадратов построена математическая модель процесса упрочнения стали. В данной модели:

Число циклов = $- 39,4226 + 0,0047 \cdot (\text{микротвердость}) + 3,6475 \cdot (\text{глубина изм. слоя}) - 0,4633 \cdot (\text{ср. сжим. ост. напр.}) - 19,3456 \cdot (\text{макс. шероховатость})$.

Коэффициент детерминированности модели (R^2) составляет 0,9968, что свидетельствует о хорошей сходимости модели.

Показатель микротвердости поверхности и величины средних сжимающих напряжений на поверхности трубы коррелируют с друг другом, так же как и с глубиной упрочненного слоя, но сжимающие напряжения можно убрать термообработкой, а шероховатость – шлифовкой и полировкой поверхности. Все эти изменения можно учесть с использованием модели.

Расчетными методами получено, что при значениях микротвердости $HV_{0,025} = 256 \text{ кгс/мм}^2$ (на расстоянии 0,02 мм от края образца), глубине измененного слоя больше 44 мкм, максимальных сжимающих остаточных напряжениях XSTRESS больше 208,5 МПа и шероховатости, R_a менее 1,18 мкм достигается максимальная устойчивость к ФК.

В шестой главе выполнена практическая оценка технологической целесообразности применения упрочняющей поверхностной обработки труб ГДО стеклянной дробью.

Для оценки технологической целесообразности применения упрочняющей поверхностной обработки изделий (труб) из аустенитной нержавеющей стали, эксплуатируемых в условиях ФК, трубы из стали 12X18H10T, упрочненные стеклянной дробью, подвергнуты развальцовке на угол $\sim 45^\circ$ и гибке на угол 90° (согласно серийному техпроцессу). Испытания показали, что ГДО по заданному режиму может быть рекомендовано только для прямолинейных участков труб (например, по местам крепления поддерживающими прокладками) или для участков труб, подвергаемых деформации, только после проведения формоизменяющих операций.

Дополнительный провоцирующий нагрев упрочненных стеклянной дробью образцов труб при режиме: нагрев в окислительной печи до 300⁰С, выдержка 30 минут, охлаждение с печью до комнатной температуры выполнен для оценки стабильности уровня остаточных напряжений, сформированных при ГДО, и в качестве мероприятия, направленного на повышение технологичности труб при гибке и развальцовке, предусмотренных серийным ТП.

Исследования показали, что провоцирующий нагрев до 300⁰С приводит к некоторой релаксации сжимающих напряжений, но при этом их уровень остается на достаточно высоком.

Основные выводы

1. Приведен обзор механизмов повреждения условно неподвижных соединений в условиях фреттинг-коррозии и фреттинг-усталости. В лабораторных условиях при виброиспытаниях образцов труб серийных (шлифованных групп А и Б) и опытных (упрочненных ГДО стеклянной дробью по режиму 1) на базе 20 млн. циклов были воспроизведены: повреждаемость и выработка штатного твердосмазочного покрытия ЦВСП-3с и появление начальных очагов ФК на поверхностях труб в местах усиления контакта (аналогично эксплуатационным).

2. Теоретически обоснован метод повышения предела выносливости (в том числе в условиях возникновения ФК) шлифованных труб из аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т группы А по ГОСТ 19277-2016 путем выполнения дополнительной финишной упрочняющей обработки и создания на поверхности упрочненного слоя (методом холодной пластической деформации – обдувкой стеклянной дробью).

3. Установлена зависимость фреттинг-коррозионной и фреттинг-усталостной прочности шлифованных труб (Ø8х1 мм) из стали 12Х18Н10Т от режима упрочняющей обработки. Показано, что наиболее эффективна финишная обработка ГДО стеклянной дробью по режиму 1: с вращением образцов на установке КС-150А/5D по программе ЧПУ, с расстоянием до обрабатываемой поверхности 35 мм и углом обработки 90° в течении 30 сек, рабочая жидкость - стеклянная дробь фракцией (0,3-0,4) мм, 30 % в суспензии при давлении воздуха 0,1 МПа. В условиях возникновения поверхностной деформации при ГДО образцов труб стеклянной дробью при заданном режиме, в поверхностном слое упрочненных образцов произошел фазовый переход ГЦК-ОЦК с образованием мартенсита деформации (α'), процентное содержание которого в измененном слое составило ~27%.

4. Определено, что поверхностное упрочнение труб из стали 12X18H10T стеклянной дробью по выбранным режимам не оказывает влияние на временное сопротивление разрыву и относительное удлинение образцов, подвергаемых испытанию на растяжение. Механические свойства образцов при испытаниях на растяжение соответствуют требованиям ГОСТ 19277-2016 и находятся на одном уровне со свойствами шлифованных труб. Наружный диаметр упрочненных труб и шероховатость поверхности после обработки стеклянной дробью по выбранным режимам находятся в пределах ТТ ГОСТ 19277-2016 для труб ($\varnothing 8 \times 1$ мм) групп поверхности А и Б.

5. ГДО позволила улучшить микрогеометрию и шероховатость наружной поверхности труб из стали 12X18H10T, устранить грубые кольцевые риски глубиной до 20 мкм, являющиеся очагами усталостного разрушения, и сформировать на поверхности измененный слой (глубиной 80 мкм) с микротвердостью $HV_{0.025}$ до 346 кгс/мм² (на глубине 0,02 мм) и средним уровнем остаточных сжимающих напряжений, определенных на установке XSTRESS 3000 Robot, порядка (-482) МПа. Степень наклепа поверхности в исследованных сечениях составила 65,5 %. Сформированный ГДО слой обладает также повышенным пределом выносливости и повышает стойкость к фреттинг-коррозии (относительно исходного материала).

6. Теоретически и практически обоснована технологическая целесообразность применения упрочняющей обработки, проведена оценка технологичности труб, подвергнутых ГДО, и определено, что данный вид обработки может быть рекомендован для прямолинейных участков труб (по местам крепления поддерживающими прокладками) или для участков труб, подвергаемых гибке и развальцовке, только после проведения формоизменяющих операций, т.к. упрочненный в результате наклепа поверхностный слой не обладает достаточной пластичностью при существующих степенях деформации.

7. Эффект упрочнения обработанных ГДО образцов труб сохраняется на достаточно высоком уровне до температуры нагрева 300⁰С, при этом наблюдается незначительное повышение пластичности упрочненного слоя за счет снижения (~ на 20 %) средней величины сжимающих остаточных напряжений.

Список основных трудов по теме диссертации, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. Лаптев А.Б., Закирова Л.И., Загорских О.А., Павлов М.Р. Методы исследования процессов коррозионно-механического разрушения и наводороживания металлов (обзор) часть 1. Исследование коррозионно-механического разрушения сталей // Труды ВИАМ. 2022. № 4(110). С. 118-130. – DOI 10.18577/2307-6046-2022-0-4-118-130.

2. Лаптев А. Б., Закирова Л. И., Загорских О. А. и др. Методы исследования процессов коррозионно-механического разрушения и наводороживания металлов (обзор). Часть 3. Коррозионное растрескивание алюминиевых сплавов // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 12. – DOI 10.18577/2307-6046-2022-0-6-138-149.

3. Загорских О.А., Лаптев А.Б. Предотвращение фреттинг-коррозии легированной стали аустенитного класса формированием упрочненного слоя на поверхности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2024. Т. 26, № 4. С. 5-18. – DOI 10.15593/2224-9877/2024.4.01.

Публикации, индексируемые базами Web of science и Scopus:

1. Composition and morphology of hot-salt corrosion in heat-resistant nickel alloys Movenko D.A., Laptev A.B., Zagorskykh O.A. //Inorganic Materials: Applied Research. 2022. Т. 13. № 6. С. 1652-1657. DOI: 10.1134/s207511332206017x.

Иные публикации по теме диссертации:

1. Лаптев А.Б., Закирова Л.И., Загорских О.А. и др. Методы исследования процессов коррозионно-механического разрушения и наводороживания металлов (обзор). Часть 2. Образование пассивных пленок и сероводородное растрескивание сталей // Труды ВИАМ. 2022. № 5(111). С. 138-146. – DOI 10.18577/2307-6046-2022-0-5-138-146.

2. Мовенко, Д.А., Лаптев А.Б., Загорских О.А. Исследование состава и морфологии продуктов горячей солевой коррозии жаропрочных никелевых сплавов // Вопросы материаловедения. 2021. № 1(105). С. 107-115. DOI 10.22349/1994-6716-2021-105-1-107-115.

3. Загорских, О.А., Лаптев А.Б. Повышение трещиностойкости жаропрочных никелевых сплавов при статическом нагружении в коррозионных средах // Климат-2021: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы: Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции,

Москва, 20–21 мая 2021 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2021. С. 138-147.

4. Laptev A.B., Akhiyarov R.J., Zagorskych O.A. et al.] Distribution of chloride ions along the flight path of aircraft (Overview) / // Journal of Physics: Conference Series : III International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-III-2022), Krasnoyarsk, 03–05 марта 2022 года. Vol. 2373. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2022. P. 22008. – DOI 10.1088/1742-6596/2373/2/022008.

5. Загорских О.А., Лаптев А.Б. Особенности фреттинг-коррозии нержавеющей аустенитных сталей (обзор) // Актуальные проблемы защиты от коррозии нефтегазового оборудования и трубопроводов (КОРРОЗИЯ-2023): Сборник материалов I Международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию ФГБОУ ВО «УГНТУ» (15 мая 2023 г.), Уфа, 15 мая 2023 года. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2023. С. 40-42.

6. Загорских О.А., Лаптев А.Б. Распределение коррозионно-агрессивных частиц атмосферы в аэрозолях атмосферы РФ// Климат-2022: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы: Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 125-летию со дня рождения авиаконструктора, ученого-аэродинамика Роберта Людвиговича Бартини, Москва, 27 мая 2022 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 2022. – С. 24-43.

7. Лаптев А.Б., Голубев И.А., Федоров А.С., Загорских О.А. Разработка цифрового двойника материала, подверженного коррозии // Актуальные проблемы защиты от коррозии нефтегазового оборудования и трубопроводов (КОРРОЗИЯ-2024), Уфа, 15 марта 2024 года. – Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2024. С. 16-19.