

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Самарский государственный технический университет»

*На правах рукописи*

**Князева Жанна Валерьевна**

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ И РАЗРАБОТКА  
КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ ЗАЩИТНЫХ  
МЕТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ КОРПУСОВ ПОГРУЖНЫХ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В НЕФТЯНЫХ  
СКВАЖИНАХ**

2.6.17. Материаловедение

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель –

доктор физико-  
математических наук,  
профессор Амосов А.П.

Самара - 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Анализ причин преждевременного выхода из строя погружного скважинного оборудования и способов повышения его ресурса	10
1.1 Общие сведения об установках электрических центробежных насосов	10
1.2 Особенности условий эксплуатации. Осложняющие факторы	15
1.3 Механизмы и виды коррозионных повреждений погружных электродвигателей	18
1.4 Способы защиты погружного оборудования от коррозии	24
1.5 Применение металлизационных покрытий	27
1.5.1 Технология напыления металлизационных покрытий	27
1.5.2 Виды защитных металлизационных покрытий	30
Выводы по главе	36
2 Объекты и методы исследования	39
2.1 Объекты исследования	39
2.2 Методы исследования	44
Выводы по главе	54
3 Анализ причин отказов погружного скважинного оборудования при различных условиях эксплуатации	56
3.1 Анализ статистических данных отбраковки ПЭД по причине коррозионного повреждения корпуса	56
3.2 Определение основных причин отказов корпусов ПЭД с металлизационным покрытием после эксплуатации	69
Выводы по главе	75
4 Разработка методики и результаты комплексных лабораторных испытаний	77
4.1 Разработка методики проведения лабораторных испытаний	77

металлизационных покрытий	
4.2 Результаты проведения лабораторных испытаний металлизационных покрытий	84
Выводы по главе	130
5 Разработка технических требований к газотермическим металлизационным покрытиям корпусов пэд	132
5.1 Технические требования к газотермическим металлизационным покрытиям корпусов ПЭД	132
Выводы по главе	138
6 Разработка способа комбинированной защиты наружной поверхности корпусов ПЭД	140
6.1 Способ защиты от коррозии и износа ПЭД путем футеровки наружной поверхности	140
Выводы по главе	146
Основные результаты и выводы	147
Список использованных источников	149
Приложение А. Альбом. Виды повреждений металлизационного покрытия погружных электродвигателей при эксплуатации	164
Приложение Б. Технические требования к газотермическим металлизационным покрытиям погружных электродвигателей	170
Приложение В. Акты внедрения результатов диссертационной работы	205

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы:** Большая часть нефтяного сырья в Российской Федерации на настоящий момент добывается из месторождений, срок эксплуатации которых приближается к 20-30 годам и которые находятся на завершающей стадии освоения. Современный этап развития нефтяной промышленности Российской Федерации характеризуется осложненными условиями разработки месторождений, что обусловлено малыми темпами добычи вследствие высокой вязкости нефти, высокой агрессивности и обводненностью сред. Можно сказать, что весь фонд скважин эксплуатируется механизированным способом, преимущественно при помощи установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) [1]. К основным факторам, приводящим к отказу УЭЦН относятся: засорение механическими примесями, выпадение солеотложений и асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО), высокая коррозионная активность среды. Солеотложения оказывают негативное влияние на рабочие колеса УЭЦН, образуя соляной налет и накипь. Выпадение АСПО критично для колонны насосно-компрессорных труб (НКТ) по длине которой может наблюдаться снижение температуры, благоприятное для образования отложений. Для погружного оборудования УЭЦН основными критическими факторами являются засорение механическими примесями и высокая коррозионная активность среды. Воздействие механических примесей приводит к износу, заклиниванию и засорению рабочих органов. Помимо механического разрушения, воздействие механических примесей может приводить к инициированию и интенсификации процесса коррозионного разрушения.

Коррозионному разрушению подвергаются различные узлы УЭЦН: внутренняя поверхность НКТ, наружная поверхность рабочих органов УЭЦН, наружная поверхность погружных электродвигателей (ПЭД), металлическая оболочка кабеля, обсадная колонна. По статистике, примерно 70 % отказов по причине коррозии приходится на корпус ПЭД [2]. Проблема коррозионного разрушения погружного оборудования УЭЦН представляет особый интерес. На

протекание коррозионных процессов влияет комплекс факторов – высокая обводненность, присутствие сероводорода и углекислого газа, наличие механических примесей. Устранение отказов ПЭД в процессе эксплуатации является достаточно сложным и дорогостоящим процессом, включающим работы по подъему оборудования; экономические убытки от простоя скважины; ремонт или замену отказавшего ПЭД [3]. Из всего вышеперечисленного можно сделать однозначный вывод о том, что защита ПЭД от коррозии и износа является крайне актуальной задачей.

Применение металлизационных покрытий является наиболее простым и экономичным способом защиты погружного оборудования от агрессивных факторов в промышленных условиях. При множестве достоинств метода применение металлизационных покрытий не полностью решает проблему защиты электродвигателей от воздействия осложняющих факторов. К числу наиболее существенных недостатков применяемых покрытий относятся: недостаточная стойкость к ударным механическим воздействиям, недостаточная стойкость к абразивному износу, значительная пористость покрытий. Особое внимание необходимо обратить на коррозионную стойкость и трибологические свойства металлизационных покрытий, поскольку большая часть отбраковывается по причине коррозии корпуса, которую зачастую инициирует или интенсифицирует абразивный износ механическими примесями, а также механические повреждения, образование которых является результатом проведения спуско-подъемных операций (СПО). Причиной перечисленных недостатков является низкая проработанность вопроса применения металлизационных покрытий в нефтегазовой отрасли. Для решения проблемы применения защитных металлизационных покрытий ПЭД, существенного повышения их свойств, увеличения экономической эффективности за счет увеличения наработки ПЭД необходимо использовать современные достижения науки в разработке покрытий для защиты металлических поверхностей от коррозии и износа.

**Степень разработанности:** Проблема защиты нефтяного оборудования от коррозии имеет особую значимость как в РФ, так и за рубежом. К началу работы

над диссертацией имелись сведения о методах определения причин разрушения металлических частей оборудования нефтегазовой отрасли, методах исследования и определения причин разрушения полимерных покрытий. Известно большое количество исследований металлизационных покрытий, однако, методические рекомендации по проведению исследований и методики испытаний металлизационных покрытий, применяемых для защиты ПЭД, учитывающих воздействие основных осложняющих факторов в скважинных условиях, отсутствуют.

**Основная цель работы:** Создание комплексной методики оценки свойств защитных металлизационных покрытий и совершенствование данного способа защиты ПЭД на основе результатов определения причин разрушения и лабораторных исследований. Для достижения этой цели в диссертационной работе решались следующие **основные задачи:**

1. Анализ причин разрушения корпусов ПЭД с металлизационным покрытием в различных условиях эксплуатации с определением основных механизмов разрушения.

2. Обобщение, систематизация и выбор параметров эксплуатации, оказывающих наибольшее воздействие на свойства покрытий.

3. Исследование методов и разработка комплексной методики проведения лабораторных испытаний металлизационных покрытий, позволяющей в короткие сроки получить данные о качестве покрытия.

4. Исследование коррозионного поведения металлизационных покрытий, используемых для защиты корпуса ПЭД.

5. Разработка технических требований к защитным металлизационным покрытиям ПЭД с целью повышения их коррозионной стойкости.

6. Разработка нового способа защиты наружной поверхности корпуса ПЭД.

**Научная новизна:**

1. Установлено, что в условиях эксплуатации ПЭД основное влияние на коррозионную стойкость оказывает не химический состав покрытия, а его структура и пористость, поскольку разрушение происходит по механизму

подпленочной коррозии с образованием карбонатов и/или сульфидов железа.

2. Разработана методика ускоренных коррозионных испытаний металлизационных покрытий и показано, что результаты испытаний по предложенной методике коррелируют с наблюдаемыми коррозионными разрушениями, полученными в ходе эксплуатации ПЭД.

3. Разработан новый способ комбинированной защиты корпуса ПЭД путем футеровки его наружной цилиндрической поверхности и дополнительной металлизации нефутерованных поверхностей, в том числе сварных швов. Доказано, что применение стали AISI 316L для футеровки обеспечивает необходимый ресурс во всем диапазоне температур и давлений, возможных при эксплуатации корпуса ПЭД. (Патент на изобретение № 2734201).

4. Установлено, что металлизационные покрытия, нанесенные методом ЭДМ эффективны в условиях коррозионного фонда только при наличии эпоксидной пропитки.

**Теоретическая значимость:** Показано, что в условиях эксплуатации ПЭД основное влияние на коррозионную стойкость оказывает структура и пористость, а не химический состав металлизационного покрытия. Установлено, что ввиду особенностей строения структуры металлизационных покрытий, нанесенных методом ЭДМ, эффективность применения в условиях коррозионного фонда проявляется только при наличии эпоксидной пропитки. Разработан новый способ комбинированной защиты наружной поверхности корпуса ПЭД.

**Практическая значимость** заключается в том, что результаты работы имеют прикладное значение для оценки свойств металлизационных покрытий корпусов ПЭД, создания новых и развития существующих технологий производства антикоррозионных и износостойких покрытий, применяемых при добыче нефти в различных условиях эксплуатации. Кроме того, практическую значимость подтверждает тот факт, что работы выполнялись в рамках договора с ООО «РН-БашНИПИнефть» (ПАО «НК «Роснефть»).

1. Впервые разработан альбом отказов, на основании которого возможна первичная идентификация причин разрушения по визуальным признакам, что

позволит производить дополнительную классификацию отказов оборудования, которая в свою очередь позволит внедрять на предприятии более совершенные методы антикоррозионной защиты.

2. Разработана методика ускоренных лабораторных коррозионных испытаний металлизационных покрытий ПЭД.

3. Разработаны технические требования к качеству металлизационных покрытий, используемых для защиты ПЭД, позволяющие оценить применимость металлизационного покрытия для определенных условий эксплуатации.

Результаты работы были внедрены на предприятиях ООО «ТСК «Урал» г. Екатеринбург, ООО «ТСЗП» г. Москва, ООО «КОМТЭК» г. Екатеринбург.

**Методология и методы исследования.** Методология исследований заключалась в поэтапном изучении физико-химических процессов разрушения металлизационных покрытий; влияния параметров эксплуатации на механизм разрушения металлизационных покрытий. Решение задач осуществлялось теоретически и экспериментально при помощи стандартных и самостоятельно разработанных методик, методов статистической обработки данных.

**Объект исследования:** Корпуса ПЭД с нанесенными на наружную поверхность металлизационными покрытиями, образцы-свидетели (стальные образцы с покрытием, технология нанесения которых идентична технологии нанесения покрытия изделия).

**Предмет исследования:** Физико-химические процессы коррозионного разрушения, механического разрушения металлизационных покрытий; состав и структура покрытий и продуктов коррозии.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Стадийность и механизм коррозионных разрушений металлизационных покрытий корпусов ПЭД.

2. Методика ускоренных коррозионных испытаний металлизационных покрытий корпусов ПЭД в CO<sub>2</sub>- и H<sub>2</sub>S- содержащих средах.

3. Технические требования к качеству металлизационных покрытий для защиты корпусов ПЭД.

4. Разработанный способ комбинированной защиты наружной поверхности корпуса ПЭД.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается использованием современного оборудования и аттестованных методик исследований, значительным количеством экспериментальных данных и применением статических методов обработки результатов, сопоставлением полученных результатов с результатами других авторов.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: 4-ая Международная научно-техническая конференция «Коррозия в нефтяной и газовой промышленности» 4-6 сентября 2019 г. (г. Самара); 10-ая Международная научно-практическая конференция «Перспективное развитие науки, техники и технологий» 30 октября 2020 г. (г. Курск). 15-ая Международная научно-практическая конференция «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации» 18-19 марта 2021 г. (г. Курск); II Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция, посвященная 65-летию ЛГТУ «Современные проблемы материаловедения» 18 февраля 2021 г.

**Личный вклад автора в диссертационную работу** состоит в постановке целей и задач, разработке методологии исследования, интерпретации результатов и формулировке всех основных положений, определяющих научную новизну и практическую значимость работы. Основные эксперименты автор выполнил в творческих коллективах, что отражено в составе авторов опубликованных работ.

**Публикации.** Результаты диссертации опубликованы в 9 работах, из них 1 статья в журнале, входящем в базы данных Scopus и Web of Science, 4 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Получен 1 патент РФ.

# **1 АНАЛИЗ ПРИЧИН ПРЕЖДЕВРЕМЕННОГО ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ПОГРУЖНОГО СКВАЖИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО РЕСУРСА**

## **1.1 Общие сведения об установках электрических центробежных насосов**

Установки ЭЦН (рисунок 1.1) состоят из наземных и погружных узлов [4, 5]. Наземная часть включает автотрансформатор; станцию управления; кабельный барабан и оборудование устья скважины. Погружная часть состоит из колонны насосно-компрессорных труб (НКТ), на которой погружной агрегат спускается в скважину; бронированного трехжильного электрического кабеля, по которому подается питающее напряжение погружному электродвигателю и который крепится к колонне НКТ специальными зажимами. Погружной агрегат состоит из многоступенчатого центробежного насоса, оборудованного приемной сеткой и обратным клапаном. В комплект погружной установки входит сливной клапан, через который сливается жидкость из НКТ при подъеме установки. В нижней части насос сочленен с узлом гидрозащиты (протектором), который, в свою очередь, сочленен с ПЭД. В нижней части электродвигатель имеет компенсатор. Жидкость поступает в насос через сетку, расположенную в его нижней части. Сетка обеспечивает фильтрацию пластовой жидкости. Насос подает жидкость из скважины в НКТ.

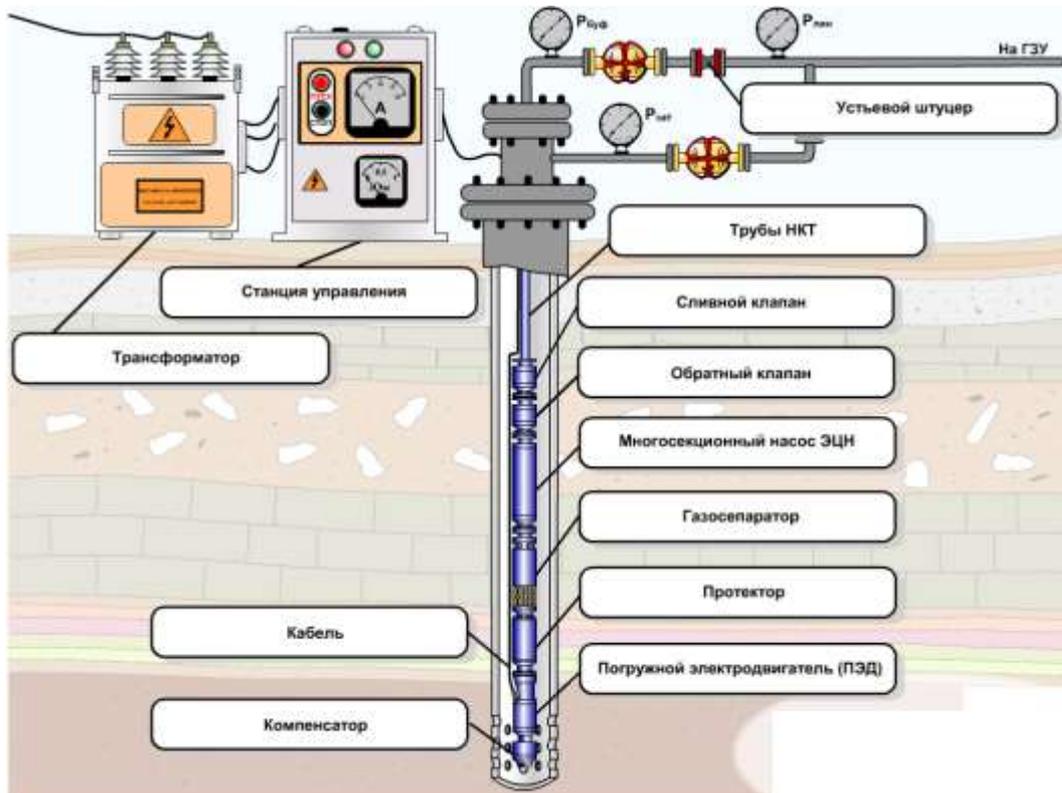


Рисунок 1.1 – Установка электропогружного центробежного насоса

Рассмотрим подробнее конструкцию ПЭД. Электродвигатель состоит из статора, ротора, головки, основания и узла токоввода. Статор выполнен из трубы, в которую запрессован магнитопровод, выполненный из листовой электротехнической стали. Статор магнитомягкий по всей длине. В пазы статора уложена трехфазная протяжная обмотка из специального обмоточного провода. Фазы обмотки соединены в звезду. Внутри статора размещается ротор, представляющий из себя набор пакетов, разделенных между собой промежуточными подшипниками и последовательно надетыми на вал. Вал ротора выполнен пустотелым для обеспечения циркуляции масла. Пакеты ротора изготовлены из листовой электротехнической стали. В пазы пакетов вставлены медные стержни, сваренные по торцам с медными короткозамкнутыми кольцами [5].

Двигатели выбираются исходя из максимального диаметра и требуемой мощности, при котором насосная установка может быть беспрепятственно спущена в скважину.

На рисунке 1.2 представлено распределение основных производителей погружных электродвигателей, используемых в России [6].

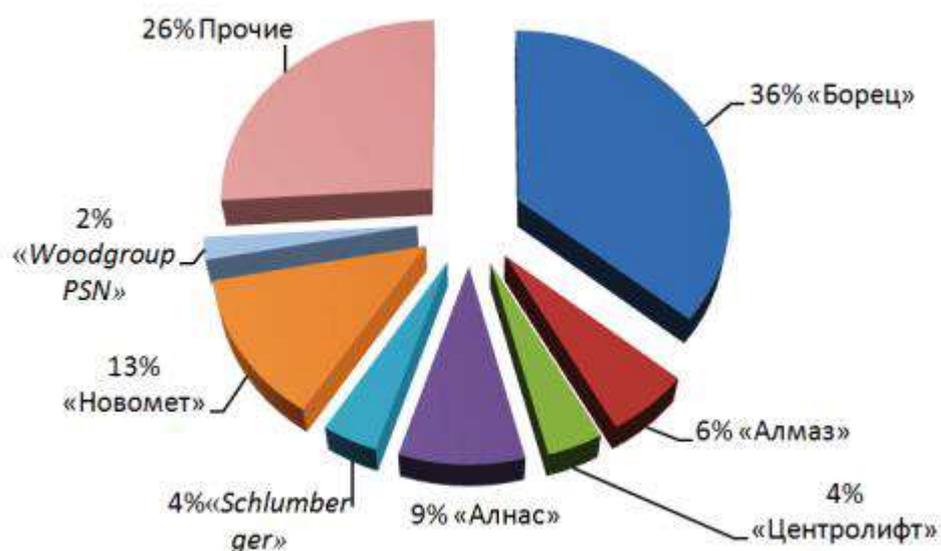


Рисунок 1.2 – Производители ПЭД

ООО «ПК «Борец» производят трехфазные короткозамкнутые маслonaполненные двухполюсные двигатели ручной намотки. Скорости вращения асинхронного биполярного двигателя при полной нагрузке составляют 3000 об/мин и 3600 об/мин при частотах 50 Гц и 60 Гц соответственно. Двигатели характеризуются способностью выдерживать высокие температуры, которые являются одной из причин преждевременного отказа.

Компания «Алмаз» выпускает двигатели асинхронные погружные трехфазные маслonaполненные серии ПЭД-Я и двигатели параметрические погружные трехфазные маслonaполненные серии РППЭД-Я (далее «двигатели»). Основными конкурентными преимуществами электродвигателей являются стабильная работа в широком диапазоне напряжений питания, возможность регулирования скорости вращения ротора путем изменения напряжения питания, увеличение мощности. Двигатели производятся в размерах 100-130 мм с мощностью от 56 кВт до 500 кВт в обычном и жаростойком исполнении.

Компанией «НОВОМЕТ» в настоящее время производится широкая линейка асинхронных электродвигателей различной модификаций. Двигатели выпускаются в одно-, двух- и трехсекционном исполнении размерами 96-185 мм с мощностью от 16 до 650 кВт.

В ООО «Алнас» производятся полнокомплектные установки электроцентробежных насосов для добычи нефти. В арсенале предприятия более 50 модификаций двигателей с габаритами от 96 мм до 180 мм и мощностью от 16 кВт до 750 кВт. Применение специальных электротехнических материалов позволяет эксплуатировать погружные двигатели при температуре пластовой жидкости до 120 °С, в высокотермостойком исполнении – до 150 °С.

Компания «Woodgroup PSN» производит высокоэффективные электродвигатели и многоступенчатые центробежные насосы с высокой стойкостью к абразивному износу. Основным преимуществом электродвигателей является минимальные требования для установки оборудования, особенно в условиях низких температур.

В Schlumberger производят инновационное оборудование повышенной надежности благодаря использованию интегрированных компонентов с меньшим числом механических соединений. Конструктивное исполнение ЭЦН обеспечивает высокую надежность при эксплуатации в условиях повышенного содержания механических примесей и свободного газа в перекачиваемой среде благодаря улучшенной конструкции секций компрессионного типа, увеличенным уплотнительным поясам ступеней ЭЦН и увеличенным проходным сечениям рабочих органов ЭЦН. Конструкция насоса исключает необходимость замены оборудования в связи с изменениями производительности скважины, тем самым снижая операционные затраты и увеличивая время бесперебойной работы.

Компания «Baker Hughes» производит насосы для работы в сложных условиях. К преимуществам производимого оборудования относятся возможность замены отдельных узлов установки без нарушения центровки валов, сокращение ремонтных работ, исключение возможности утечки, низкий уровень шума и

отсутствие вибрации системы, работоспособность в высокотемпературных условиях.

Для корпусов ПЭД используются высокоточные бесшовные трубы. Трубы изготавливают из горячекатаной круглой заготовки, поставляемой по ТУ 14-3-1941-1994 [7], ТУ 14-3Р-134-2014 [8]. Трубы для корпусов ПЭД изготавливаются методом холодной прокатки или механической обработкой резанием. Выпускается более 100 модификаций двигателей различной мощности. Основным требованием производителей к применяемым материалам является стойкость к климатическим факторам. Все многообразие материалов, применяемых для изготовления корпусов ПЭД, ранжируют по коррозионной стойкости на базовое, коррозионностойкое исполнение (в том числе с применением антикоррозионных покрытий). По стойкости к температуре окружающей среды: базовое (температура пластовой жидкости до 120 °С), теплостойкое (температура пластовой жидкости до 150 °С) и особотеплостойкое исполнение (температура пластовой жидкости до 170 °С).

Базовое исполнение предполагает применение следующих марок стали: 20, 35, 35Г [7], 22ГЮ, 09ГСФ, 37Г2А [9]. Трубы для корпусов ПЭД в коррозионностойком исполнении в основном изготавливаются из стали марки 12Х18Н10Т [8].

Применимость ПЭД в том или ином исполнении в зависимости от скважинных условий представлена в таблице 1.1 [10].

Таблица 1.1 - Исполнение ПЭД в зависимости от скважинных условий

<b>Исполнение*</b>	<b>Б</b>	<b>К</b>	<b>Т</b>	<b>ТК</b>	<b>ТТК</b>	<b>ТТ</b>
Водородный показатель попутной воды, рН	5,0-8,5	3,0-9,0	5,0-8,5	3,0-9,0	3,0-9,0	5,0-8,5
Максимальная массовая концентрация твердых частиц, % (г/л)	0,1 (1,0)					
Микротвердость частиц (по шкале Мооса), не более, балл	7					

Продолжение таблицы 1.1

Максимальное содержание попутной воды, %	100					
Газовый фактор пластовой жидкости, не более, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	250	250	350	350	500	500
Гидростатическое давление в зоне работы двигателя, не более, МПа	40 (400)					
Максимальная концентрация сероводорода, % (г/л)	0,001 (0,01)	0,125 (1,25)	0,001 (0,01)	0,125 (1,25)	0,125 (1,25)	0,001 (0,01)
Максимальная концентрация СО <sub>2</sub> , % (г/л)	-	0,115 (1,15)	-	0,115 (1,15)	0,115 (1,15)	-
Максимальная концентрация Cl <sup>-</sup> , % (г/л)	-	2,0 (20)- 7,5 (75)	-	2,0 (20)- 7,5 (75)	2,0 (20)- 7,5 (75)	-
Максимальная концентрация НСО <sub>3</sub> , % (г/л)	-	0,1 (1,0)	-	0,1 (1,0)	0,1 (1,0)	-
Максимальная концентрация Са <sup>2+</sup> , % (г/л)	-	0,2 (2)-0,9 (9)	-	0,2 (2)-0,9 (9)	0,2 (2)-0,9 (9)	-
Максимальная концентрация Na <sup>+</sup> + К <sup>+</sup> , % (г/л)	-	0,4 (40)	-	0,4 (40)	0,4 (40)	-
Максимальная температура пластовой жидкости, не более, °С	120	120	150	150	170	170
Примечания * - Б – базовое исполнение (температура эксплуатации ≤120 °С); К – коррозионностойкое исполнение; Т – теплостойкое исполнение (температура эксплуатации ≤150 °С); ТК – теплостойкое коррозионностойкое исполнение (температура эксплуатации ≤150 °С); ТТК – особотеплостойкое коррозионностойкое исполнение (температура эксплуатации ≤170 °С); ТТ – особотеплостойкое исполнение (температура эксплуатации ≤170 °С).						

## 1.2 Особенности условий эксплуатации. Осложняющие факторы

Общеизвестным фактом является, что четвертая стадия разработки месторождений затруднена ввиду влияния различных причин. Традиционно, причины отказов распределены следующим образом [11]:

- Субъективные причины

- Технические причины
- Геологические причины

Субъективные причины обычно обусловлены нарушением инструкций и технологических операций во время подготовки, вывода скважины на режим и ее эксплуатации. В качестве примера к субъективным причинам можно отнести брак подготовки скважины, брак подготовки насосно–компрессорных труб (НКТ) и элементов подвески, брак эксплуатации УЭЦН, брак подбора УЭЦН, механическое повреждение кабельной линии и т.п. К техническим причинам относят недостаточную надежность оборудования (брак, конструктивные недостатки и т.п.).

Геологические причины отказов включают ряд осложняющих факторов, в большей степени влияющих на работу скважины. Анализ работ, посвященных преждевременным отказам оборудования УЭЦН, на месторождениях различных нефтяных компаний в период с 2004 г по 2019 г показывает о негативном воздействии следующих факторов [5, 12, 13-19]:

- высокая коррозионная активность среды;
- высокая обводненность среды;
- высокая температура пластовой жидкости (до 140 °С и выше);
- высокий газовый фактор (более 500 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>);
- засорение механическими примесями;
- солеотложения и выпадение асфальтосмолопарафиновых отложений.

Среди основных факторов, приводящих к отказу УЭЦН, преобладают засорение механическими примесями и солеотложения [13]. Статистика причин отказов УЭЦН показывает, что для высокодебитных скважин высокое содержание механических примесей является одной из главных проблем при добыче [20]. Причинами выноса механических примесей могут быть как разрушение горных пород с последующим выносом песка, так и проппант, закачанный в скважину в процессе гидроразрыва пласта. Наличие механических примесей представляет значительную проблему для дорогостоящего оборудования при его абразивном износе, заклинании и засорении рабочих органов твердыми частицами. Наиболее

распространенный и эффективный способ защиты оборудования от воздействия механических примесей – установка на приеме насоса специальных фильтров, ограничивающих доступ частиц к насосу. Общим недостатком фильтров является довольно быстрое засорение непроточных ячеек и необходимость их частой промывки подъемным оборудованием [21]. Еще одним эффективным методом уменьшения образования песка является закачка отверждаемой смолы в призабойную зону, данные по скважине при применении данного метода показывают увеличение времени наработки насоса с 40 до 73 суток [21].

Влияние отложений солей рассмотрено в работе [22]. Солеотложение, как правило, происходит вследствие пересыщения воды труднорастворимыми солями при изменениях температуры, давления, рН или при выделении газа. Наибольшее воздействие солей наблюдается на рабочих колесах УЭЦН, на поверхности которых при нагреве в процессе эксплуатации образуются соленые налеты и накипь, которые увеличиваясь, уменьшают проходные диаметр отверстий. В качестве защиты от выпадения солей применяются ингибиторы солеотложений, закачка которых осуществляется или через систему поддержания пластового давления, или через затрубное пространство, или с использованием скважинных контейнеров, подвешиваемых под погружной электродвигатель [22].

Возможность выпадения асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) зависит от химического состава нефти, температуры, обводненности продукции, интенсивности газовыделения и забойного давления. Выпадение АСПО значительно снижает проходное сечение НКТ вплоть до остановки добычи, что обусловлено образованием отложений в призабойной зоне пласта, стволе скважины, устьевой арматуре и выкидных линиях [23, 24].

Если при низкой температуре увеличивается вероятность выпадения АСПО [24], то повышенная температура на забоях скважин (может достигать 140 °С и выше) влияет на показатель надежности оборудования. По некоторым данным [14], надежность оборудования при повышении температуры может снижаться в 1,5 раза из-за интенсификации коррозионных процессов (максимальная скорость коррозии углеродистых и низколегированных сталей находится в интервале температур от

50 до 100 °С [15, 21]). Проблема коррозионного разрушения погружного оборудования УЭЦН является особенно актуальной. На протекание коррозионных процессов влияет комплекс факторов, такие как высокая обводненность, наличие сероводорода и углекислого газа в пластовой жидкости, наличие механических примесей. Коррозионные повреждения чаще носят локальный характер [2, 13, 15], результатом которого является разрушение металла в глубину, вплоть до появления сквозных отверстий.

Коррозионному разрушению подвергаются различные узлы УЭЦН: внутренняя поверхность насосно-компрессорных труб (НКТ), наружная поверхность рабочих органов УЭЦН, наружная поверхность ПЭД, металлическая оболочка кабеля, обсадная колонна. По статистике, примерно 70 % отказов по причине коррозии приходится на корпус погружных электродвигателей [2]. На основании данных наработки на отказ ПЭД на предприятиях «Самаранефтегаз» за 2013-2017 гг., наблюдается тенденция постепенного снижения величины наработки на отказ с 601 суток до 503 суток. Представленные данные свидетельствуют о значительном износе электродвигателей и уменьшении их остаточного ресурса, что приводит к более частым капитальным ремонтам оборудования, сокращению межремонтного периода. Устранение отказов погружных электродвигателей в процессе эксплуатации является достаточно сложным и дорогостоящим процессом, включающим работы по подъему оборудования; экономические убытки от простоя скважины; ремонт или замену отказавшего ПЭД [3]. Из всего вышеперечисленного можно сделать однозначный вывод о том, что защита ПЭД от коррозии и износа является крайне актуальной задачей.

### **1.3 Механизмы и виды коррозионных повреждений погружных электродвигателей**

Коррозия, как упоминалось ранее, является основной проблемой нефтяной промышленности, на протекание которой влияет множество внешних факторов. В нефтяной промышленности различают три основных механизма коррозии,

классификация которых происходит по наименованию превалирующих коррозионных агентов [25, 26]:

- CO<sub>2</sub>-коррозия;
- H<sub>2</sub>S-коррозия;
- O<sub>2</sub>-коррозия.

Механизм кислородной коррозии встречается редко, поскольку кислород не содержится в продуктивных пластах. Наличие кислорода в среде имеет техногенное происхождение, например, при применении природных водоемов для заводнения пластов или обессоливания нефти [25, 26].

Углекислотная коррозия обусловлена наличием угольной кислоты (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), образующейся при растворении углекислого газа в воде. При наличии воды в нефтепромысловых средах, в присутствие растворенного углекислого газа происходит электрохимическое взаимодействие металла труб с транспортируемым флюидом. В результате на поверхности металла образуются твердые отложения карбоната железа, которые выполняют функцию барьерных элементов и препятствуют дальнейшему развитию коррозионного процесса. Наряду с карбонатами железа наиболее распространенными продуктами CO<sub>2</sub>-коррозии являются карбонаты железа FeCO<sub>3</sub>, ржавчина (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\*nH<sub>2</sub>O) и коррозит (FeO\*FeCO<sub>3</sub>) [26, 27]. Скорость углекислотной коррозии зависит от множества факторов: концентрации CO<sub>2</sub> в жидкой фазе, pH среды, давления углекислого газа, температура, структура и скорость потока транспортируемой среды, состав нефти (содержание ионов кальция, ионов хлора и растворенного сероводорода) [25, 26]. Несмотря на многофакторность процесса углекислотной коррозии определяющим фактором скорости углекислотной коррозии являются свойства образующихся продуктов коррозии. На углеродистых сталях продукты коррозии состоят из смеси карбонатов железа и карбонатов кальция (при температурах ниже 100 °C). При более высоких температурах защитную пленку образует магнетит (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [25, 26]. Карбонат железа принято относить к осадкам защитного типа [28, 31, 32, 33-36]. При этом по мнению многих авторов осаждение FeCO<sub>3</sub> не обязательно приводит к образованию защитного слоя. По мнению зарубежных авторов защитный слой

карбоната железа может образовываться при температуре выше 60 °С [28, 31, 33-36]. Авторы [34] утверждают, что при повышении температуры  $\text{FeCO}_3$  претерпевает морфологические изменения, уплотняется и приобретает защитные функции. Авторами отечественных публикаций считается, что в углекислотной среде защитный слой  $\text{FeCO}_3$  может образовываться и при температуре 20-50 °С [30, 32, 37-40]. Так, опытным путем авторами [29] после испытаний в хлоридных растворах (1 % NaCl) при  $P_{\text{CO}_2} = 1$  бар и 50 °С на поверхности трубной стали были получены отложения, состоящие из матрицы нерастворившегося цементита стали, заполненной  $\text{FeCO}_3$ . Наблюдаемая полярность мнений может быть объяснена тем, что протекание интенсивной коррозии в работе [31] сопровождается образованием на поверхности металла не  $\text{FeCO}_3$ , а коррозита ( $\text{FeO} \cdot \text{FeCO}_3$ ), который не только не обладает защитными свойствами, но и в определенном интервале pH стимулирует протекание коррозионных процессов [41].

Механизм сероводородной или  $\text{H}_2\text{S}$ -коррозии обусловлен содержанием серы в транспортируемой среде. Основная особенность сероводородных сред – это способность вызывать сульфидное коррозионное растрескивание под напряжением и водородное растрескивание стали [25]. Наличие сероводорода значительно усиливает диффузию атомарного водорода в сталь, который, в свою очередь, вызывает снижение пластических свойств стали, зарождение и быстрое развитие отдельных трещин, что приводит к быстрому разрушению труб, работающих под давлением [26]. Роль сероводорода в локальной коррозии проявляется в каталитическом воздействии на электрохимическую реакцию растворения железа ионов сероводорода и/или образующихся в результате коррозии сульфида железа [26]. Откладываясь на поверхности металла в виде осадка сульфида железа образуют с металлом гальваническую пару, в которой играют роль катода. Разность потенциалов в гальванической паре достигает 0,2-0,4 В, что способствует образованию глубоких язвенных повреждений [41]. Совместное действие сероводорода и углекислоты приводит к более интенсивным коррозионным повреждениям, чем раздельное действие этих компонентов. В коррозионной среде, содержащей сероводород, даже незначительное присутствие кислорода (менее 0,1

мг/л) способствует катодной деполяризации, в результате чего интенсивность коррозионных повреждений возрастает [43, 44]. Известно, что при наличии в среде только сероводорода скорость коррозии достигает 1,0-1,5 мм/год, а в присутствии кислорода скорость коррозии увеличивается до 0-8,0 мм/год [42].

Сероводород может также продуцироваться микроорганизмами, известными как сульфатвосстанавливающие бактерии (СВБ). Попадая с пластовой водой или водой поверхностных водоемов в продуктивные пласты, бактерии восстанавливают свою активность. Бактерии могут существовать как в планктонных, так и в адгезированных формах. Под слоем СВБ протекает реакция продуцирования сероводорода из сульфатов и сульфитов. Далее сероводород взаимодействует с металлом оборудования с образованием сульфида железа, в результате чего развивается локальная коррозия [41, 45]

Основной вид коррозионных повреждений скважинного оборудования – локальная коррозия внутренней поверхности НКТ и коррозия наружной поверхности узлов УЭЦН. В 90 % случаях коррозия подземного оборудования наблюдается при обводненности продукции скважин более 40 % (объемн.) и дебете 40 м<sup>3</sup>/сут. Однако интенсивное протекание углекислотной коррозии может наблюдаться даже при содержании воды в продукции около 1 % (объемн.) [41].

Существует множество классификаций видов коррозии. Для нефтяной промышленности виды коррозии классифицируются следующим образом [2, 11, 46]:

1. По типу агрессивных сред:

- газовая коррозия;
- атмосферная коррозия;
- коррозия в неэлектролитах;
- подземная коррозия;
- биокоррозия;
- коррозия блуждающим током.

2. По условиям протекания коррозионного процесса:

- контактная коррозия;

- щелевая коррозия;
- коррозия при неполном погружении;
- коррозия при полном погружении;
- коррозия при переменном погружении;
- коррозия при трении;
- межкристаллитная коррозия;
- коррозия под напряжением.

### 3. По характеру коррозионного разрушения

- общая коррозия (рисунок 1.4)
- локальная язвенная коррозия (рисунок 1.3).

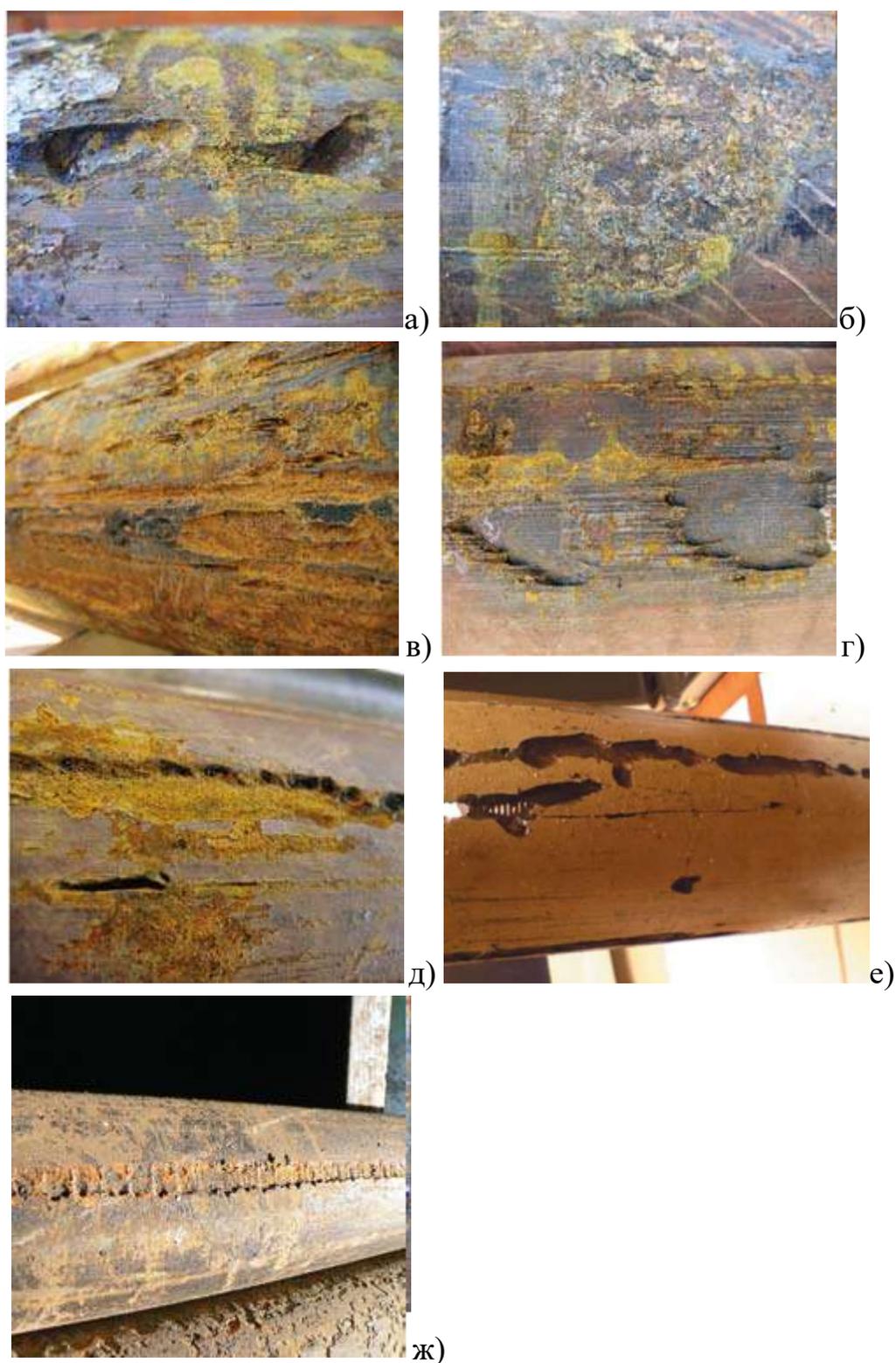
Разрушение металла по механизму общей коррозии предполагает равномерное разрушение поверхности или какой-либо части поверхности. Локальная язвенная коррозия характеризуется высокой скоростью растворения металла на отдельных участках вплоть до образования сквозных отверстий (скорость коррозии на отдельных участках может достигать 1-10 мм/год).

Основными видами локальной коррозии в нефтяной промышленности являются:

- коррозия пятнами (рисунок 1.3 б);
- коррозия в виде плато (рисунок 1.3 г);
- коррозия в виде бороздок (рисунок 1.3 в);
- питтинговая (язвенная) коррозия (рисунок 1.3 а);
- мейза-коррозия (рисунок 1.3 д, е);
- контактная коррозия (рисунок 1.3 ж);
- подпленочная коррозия;
- гальваническая коррозия.

Все многообразие локальных коррозионных повреждений подземного оборудования, по мнению авторов [41], разделяется на два крайних типа Первый тип – язвенная коррозия с хорошо выраженными склонами язв и свищей, второй тип – мейза-коррозия, характеризующаяся значительными областями локальных коррозионных повреждений, которые чередуются с площадями металла, не

затронутыми коррозией. Согласно [41], все остальные типы локальных коррозионных повреждений лежат между этими двумя крайними случаями.



а) питтинговая коррозия; б) коррозия пятнами; в) коррозия бороздками;  
г) коррозия в виде плато; д, е) мейза-коррозия; ж) контактная коррозия

Рисунок 1.3 – Локальная коррозия ПЭД



Рисунок 1.4 – Общая коррозия ПЭД

#### **1.4 Способы защиты погружного оборудования от коррозии**

Для снижения коррозионного воздействия и увеличения ресурса погружных электродвигателей применяются различные способы защиты от коррозии. Основные способы защиты классифицируются на химические, физические и технологические [2, 47].

Химическая защита предполагает применение химических реагентов – ингибиторов коррозии. Подачу ингибиторов коррозии в добывающие скважины осуществляют путем периодического нагнетания раствора в призабойную зону пласта, периодической подачи раствора ингибитора в затрубное пространство скважины или путем постоянной подачи ингибитора на прием насоса [41]. Периодическое нагнетание раствора ингибитора в призабойную зону пласта проводят во время подземного ремонта скважин, перед спуском подземного оборудования. В данном случае ингибитор коррозии закачивают в пласт в виде 10-15 %-го раствора, далее, для того чтобы продуктивный пласт работал как естественный дозатор раствор ингибитора прокачивают вглубь пласта. Для этого после нагнетания раствора ингибитора в призабойную зону пласта дополнительно нагнетают определенный объем воды. Технология подачи раствора ингибитора коррозии в затрубное пространство является более простой и заключается в подаче 10-15 %-го раствора ингибитора в затрубное пространство. Данная технология применяется не только во время подземных ремонтов скважин, но и во время ее эксплуатации. Обработка скважин методом нагнетания растворов ингибитора способствует эффективной защите внутренней поверхности НКТ, но не

обеспечивает защиту наружной поверхности корпусов насосов и двигателей УЭЦН ввиду быстрого выноса ингибитора из пласта и быстрого срыва пленки ингибитора с защищаемой поверхности металла при высоких дебитах скважины [2, 41].

Технологические методы защиты от коррозии направлены на управление и контроль процесса коррозии и включают мероприятия, направленные на водоизоляционные работы, снижение скорости потока, которые являются достаточно эффективными при их грамотном проведении. Однако, данные методы имеют определенные риски в виду их относительно недолгого положительного результата [47].

Наибольшее применение получили физические методы защиты: применение ПЭД в коррозионностойком исполнении (из нержавеющей стали); катодная защита; применение защитных полимерных и металлизационных покрытий [13, 47, 48].

Применение оборудования в коррозионностойком исполнении показывает высокую эффективность и практически полностью исключает отказы по причине коррозии [13, 47]. Несмотря на высокую эффективность, метод менее востребован ввиду высокой стоимости оборудования из нержавеющей стали.

Катодная защита и применение защитных покрытий являются методами электрохимической защиты. Активная электрохимическая защита ранжируется на протекторную и катодную. Катодная защита осуществляется с помощью наземных станций и считается эффективным способом, однако, отмечается достаточно существенный недостаток в отсутствии данных по распределению потенциалов на дне скважины [49, 50]. Процесс протекторной защиты основан на превращении анодной зоны ПЭД в катодную путем установки в хвостовике ПЭД протектора, который изготавливается из сплавов цветных металлов и становится анодом, отвлекая на себя процесс электрохимической коррозии [2].

Наибольшее распространение, как простой и экономичный способ защиты от коррозии наружной поверхности корпусов насосов и двигателей УЭЦН, получила пассивная электрохимическая защита, сущность которой заключается в нанесении антикоррозионного защитного покрытия на поверхность оборудования. Защитное

покрытие эффективно противостоит воздействию всего комплекса осложняющих факторов: агрессивной среды, механического износа, бактерий, отложений солей и АСПО, способствует снижению гидравлических потерь [51].

Для обеспечения коррозионной стойкости используют различные защитные покрытия, в частности – полимерные или металлизационные [17]. При всем многообразии защитных покрытий немногие из них можно применять в условиях работы УЭЦН, предполагающих повышенные давление, температуру, а также высокие скорости потока агрессивной среды, воздействие которых способствует образованию вздутий и отслаиваний покрытия, образованию глубоких царапин при спуске в скважину. В данном случае применение металлизационных покрытий является более предпочтительным [2], поскольку для полимерных существует целый ряд ограничений, таких как термостойкость, стойкость к механическим воздействиям (что особенно важно при наличии в скважине механических примесей), а также высокая степень зависимости долговечности покрытия от качества применяемого покрытия и технологии нанесения [52]. Технология газотермического напыления позволяет получать покрытия с адгезией к основному металлу более 80 МПа, пористостью менее 1 % и твердостью до 62 HRC, что значительно превышает показатели для полимерных покрытий [53]. Кроме того, полимерные покрытия, действуя как теплоизоляция, способствует ухудшению теплоотдачи корпусов двигателей и приводит к их перегреву и выходу из строя [41, 53]. В качестве антикоррозионной защиты корпусов ПЭД хорошо зарекомендовали себя композиционные покрытия на основе эпоксидной смолы, модифицированной кремнийорганическими соединениями. Высокая механическая прочность, термостойкость и коррозионная стойкость композиционного покрытия обеспечивают длительную безаварийную эксплуатацию ПЭД (более 400 суток) [41].

## **1.5 Применение металлизационных покрытий**

### **1.5.1 Технология напыления металлизационных покрытий**

Применение металлизационных покрытий для защиты корпусов ПЭД значительно повышает коррозионную стойкость и износостойкость, что в свою очередь способствует улучшению эксплуатационных свойств изделий, увеличению ресурса работы, повышению надежности изделий, снижению себестоимости их изготовления и обслуживания [54].

Технология газотермического напыления является одной из наиболее распространенных для производства металлизационных покрытий в виду своей низкой стоимости относительно других методов и возможности нанесения покрытия на изделия различной конфигурации, что, несомненно, позволяет расширить область ее применения [54-56]. В общем случае сущность процессов газотермического напыления заключается в образовании направленного потока дисперсных частиц напыляемого материала, обеспечивающего перенос их на поверхность обрабатываемого изделия и формирование слоя покрытия. Единая классификация способов газотермического напыления отсутствует, принципиальное отличие способов газотермического напыления определяется видом источника энергии (рисунок 1.5, [57]).

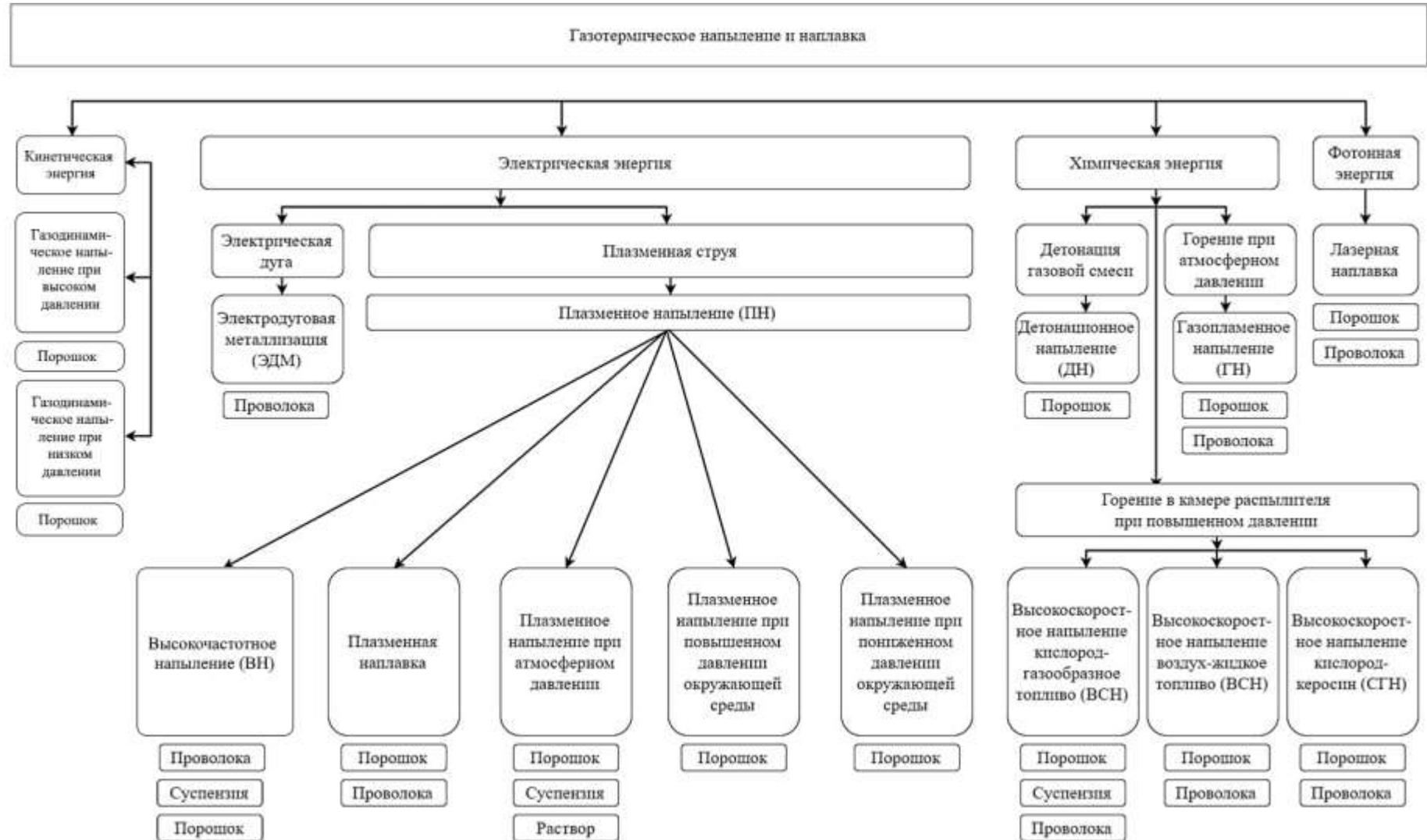


Рисунок 1.5 – Классификация способов газотермического напыления

В промышленности напыление покрытий производится методами газопламенной наплавки, плазменного напыления, детонационного напыления, высокоскоростного газопламенного напыления, электродуговой металлизации и холодного напыления [55, 56, 58, 59]. Выбор используемого метода зависит от области применения, химического состава покрытия и материала подложки, геометрии изделия, требуемых свойств к формируемому покрытию, а также от экономической целесообразности. Наибольшее распространение среди методов термического распыления для защиты ПЭД получили электродуговая металлизация и высокоскоростное напыление [54].

Электродуговая металлизация (ЭДМ) представляет собой процесс расплавления двух проволок посредством горения электрической дуги между ними, диспергировании расплава и перенос частиц сжатым воздухом. Электродуговая металлизация является наиболее эффективным методом газотермического напыления, позволяющим получать покрытия с высоким уровнем механических, физических и химических свойств (адгезия, пористость, микротвердость) [54]. К основным недостаткам электродуговой металлизации относятся: возможность перегрева и окисления напыляемого материала; формирование покрытий с большим количеством окислов и высокой пористостью; значительные потери напыляемого материала [59].

При высокоскоростном газопламенном напылении (ВСГПН, HVOF) порошковый материал разогревается и наносится струей с высокой скоростью (7-9 скоростей звука). Для всех покрытий, создаваемых методом высокоскоростного газотермического напыления, характерны высокая адгезия, прочность сцепления и низкая пористость [54, 56].

При выборе того или иного метода нанесения необходимо учитывать основные характеристики получаемого покрытия. В настоящее время к числу перспективных методов нанесения защитных покрытий относятся плазменное и газопламенное нанесение, позволяющие, при правильной оптимизации режимов напыления получать защитные покрытия с достаточно низкой пористостью и высокой адгезионной прочностью [59]. Если применение

плазменного метода менее востребовано ввиду значительных энергозатрат, то второй метод газопламенного распыления характеризуется относительной простотой, надежностью и мобильностью оборудования, а также наименьшими среди всех методов энергозатратами. При этом оптимально подобранные режимы газопламенного распыления позволяют получать защитные покрытия с высокими показателями физико-механических свойств, сопоставимыми с покрытиями, получаемыми методами высокоскоростного и плазменного методов [59].

### 1.5.2 Виды защитных металлизационных покрытий

К наиболее распространенным на рынке РФ материалам покрытий корпусов ПЭД относятся монель, нанесенная на поверхность металла методом электродуговой металлизации, и аустенитные сплавы на основе железа, чаще хром-никелевый сплав с добавлением различных компонентов, нанесение которого может осуществляться методами электродуговой металлизации или высокоскоростного напыления (таблица 1.2) [53].

Таблица 1.2 – Наиболее распространенные на российском рынке защитные металлизационные покрытия и их характеристики

Покрытие	Химический состав	Метод нанесения	Пористость	Пропитка	Микро-твердость, НВ	Адгезия, кг/мм <sup>2</sup>
Монель	Ni70Cu30 +A316	ЭДМ	5-10%	Эпоксидная	110...120 НВ	3-4
Нержавеющая сталь	06X19H10T	ЭДМ	5-10%	Опционально	220...270	3-4
ТСЗП-BC-013 superstainless	200X28H16M5C1	HVOF	<1%	Опционально	500...570	>7
ТСЗП-BC-016	200X14H7C3P3	HVOF	<1%	Опционально	650...800	>7

Монель – это группа сплавов, состоящая из никеля (до 67 масс. %) и меди с небольшим количеством других элементов. Монель обладает высокой коррозионной стойкостью и кислотостойкостью, хорошо противостоит воздействию соленой воды, в нейтральных и щелочных растворах, практически не корродирует [59]. Несмотря на то, что пластичная и

коррозионностойкая медь является не самым твердым материалом, ее присутствие в составе монеты обеспечивает плотность и сплошность покрытия, его коррозионную стойкость, а также обеспечивает смазывающий эффект, что, в свою очередь обуславливает повышенные износостойкость и антифрикционные свойства.

Аустенитные нержавеющие сплавы на основе железа могут использоваться как напыляемый материал в виде проволоки или порошка. Получаемые покрытия характеризуются высокой коррозионной стойкостью и жаростойкостью [59]. Добавление различных легирующих элементов позволяет варьировать свойства получаемого покрытия. Одним из основным легирующих элементов в нержавеющих сплавах является молибден. Считается, что Мо оказывает благотворное влияние на коррозионную стойкость сплава. Во-первых, Мо изменяет полярность пассивной пленки [60]. Во-вторых, положительное влияние Мо проявляется при взаимодействии с хромом. Данный эффект проявляется следующим образом: присутствие молибдена в сплаве на основе Fe-Cr способствует обогащению пассивной пленки хрома ионами молибдена, которые, занимая пустое пространство, делают пассивную пленку хрома более компактной и, следовательно, повышают ее защитные свойства [60, 61]. Другим легирующим элементом аустенитных нержавеющих покрытий является марганец, добавление которого способствует увеличению стойкости к питтинговой коррозии. Положительный эффект Mn связан с образованием сульфидов марганца, которые, как известно, анодно-поляризуются в области пассивности нержавеющих сталей [60]. Еще одним легирующим, аустенитообразующим элементом является Ni, добавление которого способствует увеличению стойкости к растрескиванию, коррозионной стойкости и износостойкости. Ni является элементом с самой высокой коррозионной стойкостью, которая обусловлена образованием защитных оксидов NiO<sub>2</sub>. Добавление Ni способствует снижению плотности анодного тока и изменению потенциала коррозии [62].

Аустенитные нержавеющие покрытия обеспечивают защиту стали в агрессивных средах. В работе [63] рассматривалась система 17 % Cr 12 % Ni, 2,5 % Mo 2-3 % Si, 0,03 % C (остальное – Fe). Порошковый материал наносился методом высокоскоростного газопламенного напыления. Авторами установлено, что покрытие обладает коррозионной стойкостью при воздействии 3 % NaCl в течение 7 дней, а в случае многослойного нанесения (3-4 слоя) покрытие обладает эффективностью против коррозии после 48 дней воздействия 3 % NaCl.

Помимо аустенитных сплавов широкое применение нашли ферритные нержавеющие сплавы [64, 65]. Для ферритных нержавеющих сплавов характерно низкое содержание аустенитообразующих элементов, таких, как Mn, Ni. В работах [64, 65] рассматривалось влияние добавления Nb на коррозионную стойкость ферритных нержавеющих сплавов. Добавление небольшого количества Nb способствует повышению коррозионной стойкости сплава более, чем в два раза [64], в частности при частичном замещении Mo. Частичное замещение объясняется более высокой коррозионной стойкостью сплавов, содержащих оба элемента Mo и Nb, по отношению к сплавам, содержащим только один из этих элементов. Эффект добавления Nb можно проанализировать с точки зрения изменений характеристик пассивной пленки Cr. Когда ионы Nb включаются в пассивный слой Cr, происходит ее физическое изменение. В электрохимическом отношении наличие ионов Nb способствует снижению плотности обменного тока, что в свою очередь обеспечивает снижение скорости коррозии [64, 65].

Большой интерес представляют собой аморфные сплавы на основе железа благодаря сочетанию различных физических, механических и химических свойств, таких, как высокая прочность, твердость, износостойкость и коррозионная стойкость [66, 67]. Аморфные сплавы являются метастабильными материалами, и, как известно, не имеют таких дефектов как, например, границы зерен. К числу наиболее распространённых относятся сплавы на основе Fe-Cr. Более подробно влияние различных

элементов на свойства аморфных покрытий представлены в работах [66, 67]. Металлоиды В, С и Р добавляются в основном для создания аморфной структуры металлических стекол, обладающей улучшенной коррозионной стойкостью по сравнению со сплавом на основе Fe-Cr, когда они частично заменяют Fe. Добавки В, С и Р в сплавах Fe-Cr ускоряют активное растворение до образования пассивной пленки и, соответственно, приводят к увеличению количества полезных частиц, таких как хром, в пассивной пленке, что, следовательно, повышает коррозионную стойкость. Добавление Si помимо улучшения способности к стеклообразованию в сплавах Fe-Cr положительно влияют на состав и однородность пассивной пленки хрома, что способствует увеличению коррозионной стойкости.

Достаточно востребованными являются покрытия на основе алюминия (Al), ввиду высокой коррозионной стойкости в водных средах. Кроме того, в отличие от органических покрытий, алюминиевые обеспечивают защиту не только при целостной системе, но и в случаях, когда стальная подложка подвергается частичному повреждению. Будучи более активным элементом в гальваническом ряду по отношению к стали, покрытия на основе алюминия, разрушаясь, обеспечивают защиту, работая как равномерно распределенный анод [68]. Алюминиевые покрытия наносились методами электродуговой металлизации [68] или холодного напыления [69, 70]. Получаемые данными методами покрытия характеризуются равномерной однородной структурой с низкой пористостью и достаточно высокой износостойкостью по сравнению с металлом подложки.

Пористость покрытия, характерная для рассмотренных методов газотермического напыления, способствует снижению как защитных, так и механических свойств. Возникновение открытой или закрытой поверхностной и объемной пористости в покрытиях, наносимых методом газотермического напыления, может быть обусловлено несколькими факторами: частичное неполное расплавление частиц, недостаточная скорость потока, параметры распыления, свойства исходных материалов. Для исключения негативного

воздействия пористости металлизационных покрытий обычно рекомендуется дополнительная герметизация внутренних дефектов структуры путем нанесения дополнительного слоя пропиточного материала. В качестве пропитки для металлизационных покрытий используются органические и неорганические герметики. Среди органических герметиков часто используются материалы на основе эпоксидных смол, фенолов, силиконов, полиуретанов, полиэфиров и поливинилэфиров. В качестве неорганических герметиков применяются фосфаты алюминия, натрия и этилсиликатов, а также различные растворы золь-гелевого типа. Слой металлизационного покрытия в данном случае дополняется непроницаемостью и химической инертностью полимерного компонента. В качестве дополнительной защиты погружного оборудования, как правило, используются органические герметики, при выборе которого необходимо руководствоваться свойствами применяемого материала. Для эффективного применения дополнительного способа защиты герметизирующие материалы должны иметь достаточную химическую стойкость к окружающей среде, ограничивать диффузию электролита и кислорода через слой герметика, обладать высокой адгезией к покрытию, обладать необходимым уровнем термостойкости и механических свойств. Слой органической пропитки наносится непосредственно на слой металлизационного покрытия без дополнительной подготовки поверхности. Шероховатость поверхности металлизационного покрытия обеспечивает максимальную адгезию лакокрасочных материалов, значительно повышая долговечность композиции [71-73]. При этом необходимо учитывать негативное влияние полимерных материалов на теплоотдачу корпусов двигателей.

Представленные выше методы нанесения и составы металлизационных покрытий на ПЭД являются традиционными. Большой интерес представляет применение более современных методов нанесения и составов металлизационных покрытий на ПЭД. Технология газотермического напыления позволяет наносить различные по составу покрытия – от пластмасс

до тугоплавких соединений [55, 57]. В практике напыления помимо однофазных материалов (чистые металлы и их сплавы, полимеры, керамика, интерметаллиды) применяют гетерогенные – композиционные, а также их смеси [56, 57]. Композиционные материалы занимают особое место и представляют собой сочетание минимум двух разнородных компонентов, которые имеют четкую границу раздела и обладают свойствами, которыми не может обладать ни один из компонентов в отдельности [57, 74]. К числу новых композиционных материалов следует отнести наноструктурные материалы, применение которых позволяет получать значительно лучшие защитные свойства [75]. Большими возможностями для получения композиционных и наноструктурных покрытий обладает простая энергосберегающая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) тугоплавких соединений (карбидов, нитридов, боридов и других) и материалов на их основе в режиме горения [76, 77]. Наноструктурные покрытия могут быть достаточно дорогостоящими, но, например, применение ресурсосберегающей технологии СВС может сделать их вполне рентабельными. Промышленное нанесение наноструктурных покрытия вполне реализуемо, поскольку корпус ПЭД имеет простую цилиндрическую форму. Одним из эффективных путей снижения коэффициента трения при сохранении высокой твердости и износостойкости является разработка нанокomпозиционных покрытий, в которых, наряду с твердой фазой из карбидов и нитридов переходных металлов, содержится «мягкая» фаза, выполняющая роль твердой смазки или способствующая образованию самосмазывающихся фаз в процессе нагрева: серебро, золото, диселенид молибдена, фосфид кальция, углерод и другие [78]. К самым последним достижениям следует отнести разработку современных функциональных и интеллектуальных или, так называемых, smart-покрытий для повышенной защиты от коррозии металлических подложек [79]. Особое внимание уделяется самовосстановлению покрытий на основе полифункциональности за счет инкапсулирования ингибиторов коррозии, противообрастающих средств и добавок, обеспечивающих создание

супергидрофобных поверхностей покрытия, а также за счет химической модификации гибридных матриц покрытий. К числу последних разработок относится класс слоистых металлических коррозионно-стойких материалов, в которых повышенная коррозионная стойкость сопоставима в монолитным материалом [49]. Очевидно, разработка и применение перечисленных современных покрытий может существенно повысить стойкость ПЭД к износу и коррозии и ресурс работы погружного оборудования в нефтяных скважинах.

### **Выводы по главе**

В литературном обзоре представлены общие сведения об установках УЭЦН и особенностях условий эксплуатации. Согласно литературным источникам наиболее уязвимым узлом при воздействии осложняющих факторов является корпус ПЭД. Рассмотрены основные способы защиты ПЭД от воздействия осложняющих факторов. На основании представленных в литературном обзоре данных о механизмах коррозии ПЭД и способах его защиты можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее эффективным и экономически выгодным способом защиты корпуса ПЭД в нефтяной скважине является применение металлизационных покрытий, нанесение которых осуществляется по технологии газотермического напыления.

2. Сущность процессов газотермического напыления заключается в образовании направленного потока дисперсных частиц напыляемого материала, обеспечивающего перенос их на поверхность обрабатываемого изделия и формирование слоя покрытия. Технология газотермического напыления позволяет наносить различные по составу покрытия.

3. При всем многообразии материалов и методов нанесения для данного способа защиты корпуса ПЭД характерна некоторая ограниченность, которая проявляется в использовании узкого числа применяемых материалов и методов. Так, наиболее распространенными на рынке РФ материалами покрытий корпусов ПЭД являются монель, нанесенная на поверхность металла методом электродуговой металлизации, и аустенитные сплавы на

основе железа, нанесение которого может осуществляться методами электродуговой металлизации или высокоскоростного напыления.

4. Для решения проблемы применения защитных покрытий ПЭД, существенного повышения их свойств, ресурса работы и экономической эффективности перспективно использование современных достижений науки в разработке покрытий для защиты металлических поверхностей от коррозии и износа, которое подразумевает:

- расширение числа применяемых методов нанесения покрытий;
- расширение числа применяемых материалов для нанесения покрытия, использование композиционных, наноструктурных, функциональных и интеллектуальных покрытий.

5. Осложненные условия эксплуатации ПЭД требуют, во-первых, тщательного контроля свойств применяемых металлизационных покрытий, во-вторых, корректного моделирования разрушающего воздействия основных осложняющих факторов, что позволит оценить применимость того или иного типа металлизационных покрытий в определенных условиях эксплуатации.

В связи с вышесказанным, целью данной работы является создание комплексной методики оценки свойств защитных металлизационных покрытий и совершенствование данного способа защиты ПЭД на основе результатов определения причин разрушения и лабораторных исследований.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ причин разрушения корпусов ПЭД с металлизационным покрытием в различных условиях эксплуатации с определением основных механизмов разрушения.

2. Обобщение, систематизация и выбор параметров эксплуатации, оказывающих наибольшее воздействие на свойства покрытий.

3. Исследование методов и разработка комплексной методики проведения лабораторных испытаний металлизационных покрытий, позволяющей в короткие сроки получить данные о качестве покрытия.

4. Исследование коррозионного поведения металлизационных покрытий, используемых для защиты корпуса ПЭД.

5. Разработка технических требований к защитным металлизационным покрытиям ПЭД с целью повышения их коррозионной стойкости.

6. Разработка нового способа защиты наружной поверхности корпуса ПЭД.

## 2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Объекты исследования

В настоящей работе исследуются материалы, используемые для защиты наружной поверхности корпусов погружных электродвигателей. Условно объекты исследований ранжируются на несколько групп:

- группа 1 – корпуса ПЭД с наружным защитным металлизационным покрытием различных типов после эксплуатации;

- группа 2 – образцы-свидетели в виде стальных пластин с металлизационным покрытием, технология нанесения которого идентична технологии нанесения покрытия на изделие.

Объекты первой группы эксплуатировались на месторождениях нескольких добывающих предприятий ПАО «НК «Роснефть» (таблица 2.1). Все отобранные корпуса ПЭД эксплуатировались в условиях высокой обводненности скважин. Добываемая продукция по показателю кислотности рН относится к щелочному типу ( $\text{pH} > 7$ ) и характеризуется достаточно высоким содержанием растворенных агрессивных газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ), высокой концентрацией взвешенных частиц (таблица 2.2).

Таблица 2.1 – Характеристика объектов исследования первой группы

№	Производитель ПЭД	Заводской номер	Эксплуатация	Скважина	Наработка, с
1	ООО «Лысьваннефтемаш»	140807936	Самотлорнефтегаз	32257	866
2	ООО ПК «Борец»	120504062	Самотлорнефтегаз	13345	1139
3	ООО «Алмаз»	150738680	Самотлорнефтегаз	12821	603
4	ООО «Алмаз»	150738681	Самотлорнефтегаз	12821	603
5	ООО «Алмаз»	90616508	Самотлорнефтегаз	37121	1018
6	ООО «Алмаз»	150600361	Самотлорнефтегаз	37099	823
7	Schlumberger	1CS5B307266	Самотлорнефтегаз	50762	2172
8	Schlumberger	E1F5L00901N	Самотлорнефтегаз	86013	1093
9	Schlumberger	GCS9B896829	Самотлорнефтегаз	6525	852
10	ООО ПК «Борец»	150201020	Самотлорнефтегаз	13750	210
11	ООО «Лысьваннефтемаш»	140605740	Самотлорнефтегаз	12471	1205
12	ООО ПК «Борец»	91108517	Самотлорнефтегаз	35332	1969

## Продолжение таблицы 2.1

13	ООО «Алмаз»	150738768	Самотлорнефтегаз	12288	338
14	ООО ПК «Борец»	160809717	Самотлорнефтегаз	50595	366
15	ООО ПК «Борец»	90503265	РН- Ставропольнефть	27	1622
16	ООО ПК «Борец»	150909994	РН- Ставропольнефть	68	279
17	АО «Новомет-Пермь»	101104885	Томскнефть	517	426
18	ООО «Новомет-Сервис»	17020600547	Томскнефть	567	693
19	ООО ПК «Борец»	13010082	АО «Самаранефтегаз»	512	1742
20	ОАО «БЭНЗ»	140200151	АО «Самаранефтегаз»	327	581
21	ООО «Новые технологии»	180212241	АО «Самаранефтегаз»	37036	92
22	ООО «Лысьвенский завод нефтяного машиностроения»	130403719	АО «Самаранефтегаз»	25661	362
23	АО «Бейкер Хьюз»	14128234	ООО «Ванкор»	331	356

Таблица 2.2 – Условия эксплуатации объектов исследования первой группы

Скважина	Дебит жидкости, $Q_{ж}$ ( $m^3/c$ )	Обводненность (%)	Дебит нефти $Q_n$ (т/сут)	Газовый фактор ( $m^3/t$ )	рН	Содержание $HCO_3$	Содержание $H_2S$	Минерализация	КВЧ (мг/л)	Содержание в КВЧ мех.примесей, %
						мг/л	мг/л			
32257	950	97	24	72	7,42	305	0,5	18315	137	60
13345	1073	98	27	59	7,4	234	0,4	23237	111	60
12821	622	99	1	-	7,24	-	-	-	157	59
12821	622	99	1	-	7,24	-	-	-	157	59
37121	376	98	6	78	7,50	142	0,8	21341	138	60
37099	946	99	8	72	7,40	213	0,6	25134	128	60
50762	20	88	2	70	7,21	213	0,5	16783	152	60
86013	432	97	11	70	7,73	213	0,1	20484	180	60
6525	96	98	2	78	7,56	-	-	15290	118	30
13750	1142	97	19	72	8,68	213	0,5	16738	188	60
12471	1099	97	28	78	7,92	-	-	11729	98	30
35332	250	98	3	72	7,67	213	0,5	16783	141	60
12288	1229	97	31	72	7,43	142	0,8	13226	136	30
50595	960	98	16	70	7,37	213	0,6	25905	74	60
27	202	97	5	142	-	293	0	-	400	0
68	150	84	19	55	-	433	0	-	439	13
517	124	96	4	68	7,10	-	-	-	76	-
567	231	94	12	64	-	-	-	-	41	-

## Продолжение таблицы 2.2

512	33	89	3	29	-	-	-	-	132	-
327	257	97	7	36	-	-	-	-	189	-
37036	-	-	-	70	-	-	-	-	172	-
25661	163	96	6	70	-	-	-	-	170	60
331	311	39	172	140	-	-	-	-	392	-

Данные о материалах, наносимых на наружную поверхность корпусов ПЭД после эксплуатации, отсутствуют, в виду списания отработавших узлов. Определение фактического типа покрытия и причин его разрушения рассмотрены в Главе 3.

Объекты исследования второй группы, предназначенные для проведения лабораторных исследований, наносились на базе следующих производственных площадок:

- АО «Плакарт»;
- ООО «Технологические системы защитных покрытий»;
- АО «Бейкер Хьюз».

Нанесение защитных покрытий осуществлялось на образцы-свидетели, металлическая подложка выполнена из наиболее применяемой для корпусов ПЭД марки стали – сталь 35. Сведения о марке материалов, методах нанесения и химическом составе исследуемых образцов второй группы представлены в таблицах 2.3, 2.4.

Таблица 2.3 – Характеристика объектов исследования второй группы

№п/п	Наименование материала	Метод нанесения	Производитель	Маркировка
1	ТСЗП-МП015-17	ЭДМ	ООО «ТСЗП»	РН-1
2	ТСЗП-М015-17	ЭДМ	ООО «ТСЗП»	РН-2
3	06X19H9T	ЭДМ	ООО «ТСЗП»	РН-3
4	04X19H11M3	ЭДМ	ООО «ТСЗП»	РН-5
5	Плакарт 01.3-Н	ВСГПН	АО «Плакарт»	РН-6
6	Плакарт 01.6-Н	ВСГПН	АО «Плакарт»	РН-7

## Продолжение таблицы 2.3

7	Плакарт №0.08-Н	ВГПН	АО «Плакарт»	РН-8
8	Монель + металл (08X18H10)	ЭДМ	АО «Плакарт»	РН-9
9	Проволока: сталь 316 + эпоксидная пропитка	ЭДМ	АО «Бейкер Хьюз»	РН-11
10	На основе никеля	ВСГПН	АО «Плакарт»	РН-13

Таблица 2.4 – Химический состав металлизационного покрытия объектов исследования второй группы

№п/п	Наименование материала	Маркировка	Химический состав, %*
1	ТСЗП-МП015-17	РН-1	Cr ~ 6,6-14,5 Ni ~ 4,4-8,4 Mo ~ 2,5 Si ~ 2,0-3,7 Fe – осн.
2	ТСЗП-М015-17	РН-2	Cr ~ 13,0-16,0 Ni ~ 7,3-9,8 Mo ~ 3,5 Si ~ 2,9-3,7 Al ~ 1,0 Fe – осн.
3	06X19H9T	РН-3	Cr ~ 17,7-18,6 Ni ~ 8,5-8,9 Si ~ 0,5-0,7 Ti ~ 0,6 Fe – осн.
4	04X19H11M3	РН-5	Cr ~ 19,0-20,1 Ni ~ 10,1-11,0 Mo ~ 2,2-2,7 Si ~ 0,8-1,1 Nb ~ 0,9-1,2 Fe – осн.
5	Плакарт 01.3-Н	РН-6	Cr ~ 28,9 C ~ 2,00 Si ~ 1,21 Mo ~ 4,85 Ni ~ 16,27 Fe – осн.

6	Плакарт 01.6-Н	РН-7	Cr ~ 14,02 C ~ 2,08 Si ~ 2,92 Mn ~ 0,25 Ni ~ 5,97 B ~ 3,27 S ~ 0,02 Fe – осн.
7	Плакарт №0.08-Н	РН-8	Co ~ 10,0 C ~ 5,44 Cr ~ 3,91 O ~ 0,66 Fe ~ 0,032 W – осн.
8	Монель + металл (08X18H10)	РН-9	Монель: Ni ~ 67,04 Cu ~ 28,4 Fe ~ 2,6 Mn ~ 1,65 Mg ~ 0,1 C ~ 0,19 Металл: Cr ~ 18,10 Ni ~ 10,09 Mn ~ 1,06 Si ~ 0,33 N ~ 0,062 C ~ 0,043 P ~ 0,037 S ~ 0,013 Fe – осн.
9	Проволока: сталь 316 + эпоксидная пропитка	РН-11	Cr ~ 16,30 Ni ~ 10,40 Mn ~ 1,08 Si ~ 0,41 N ~ 0,03 C ~ 0,026 P ~ 0,028 S ~ 0,006 Mo ~ 2,17
10	На основе никеля	РН-13	C ~ 0,75 Cr ~ 14,16 Si ~ 4,37 B ~ 3,10 Fe ~ 3,67 Ni – основа

Перечень материалов, предназначенных для нанесения металлизационного покрытия на образцы-свидетели сформирован на

основании результатов исследований образцов первой группы и обзора применяемых для защиты корпусов ПЭД материалов, в рамках работы, проводимой по договору с ООО «РН-БашНИПИнефть» (ПАО «НК «Роснефть»).

Исследования образцов второй группы предполагают проведение лабораторных испытаний, моделирующих воздействие эксплуатационных факторов. Полученные результаты лабораторных испытаний будут являться основанием для разработки технических требований к свойствам металлизационных покрытий для защиты корпусов ПЭД в процессе эксплуатации.

## **2.2 Методы исследований**

Исследования проводились по разработанному комплексу испытаний для оценки свойств металлизационных покрытий и применимости в определенных условиях эксплуатации. Все используемые в данной работе средства измерения прошли государственную поверку в Федеральных ЦСМ, а испытательное оборудование – аттестацию.

### **2.2.1 Определение толщины покрытия**

Определение толщины металлизационного покрытия проводится неразрушающим или металлографическим методами. В первом случае измерение толщины проводилось с использованием неразрушающих толщиномеров в соответствии с ГОСТ 31993 [80]. В этом случае толщина покрытия изделия контролировалась не менее, чем в трех зонах по периметру изделий. Для получения достоверных результатов производилось не менее 10 измерений. Измерение толщины покрытия на образцах-свидетелях осуществлялось не менее, чем в 10 точках. Расстояние между точками, а также расстояние от торцов образцов до точек измерения должно составлялось не менее 20 мм.

Контроль толщины покрытия металлографическим методом проводился в соответствии с ГОСТ 9.304 [81]. Толщина покрытия измерялась на поперечном шлифе при 200-кратном увеличении с помощью металлографических микроскопов. В данном случае проводилось не менее пяти измерений по наибольшим выступам профиля слоя покрытия по всей длине шлифа.

Результаты определения толщины, полученные неразрушающим методом, являются некорректными ввиду значительной шероховатости поверхности металлизационных покрытий. Поэтому металлографический метод определения толщины слоя покрытия является предпочтительным. За результат принималось среднее арифметическое значение всех измерений. Относительная погрешность измерения этого параметра составляла не более 10 %.

### **2.2.2 Определение объемной пористости и сплошности покрытия**

Определение объемной пористости, сплошности и качества сцепления покрытия проводилось металлографическим методом на поперечном шлифе при 200-кратном увеличении.

Для оценки пористости металлографический шлиф фиксировался на предметном столике оптического микроскопа. Далее путем сравнения с эталонными шкалами (рисунок 2.1) [82] производилось определение фактической сплошности. Далее по всей длине металлографического шлифа определялось наличие нарушений адгезионных связей на границе «металл-покрытие». После чего в поле зрения микроскопа перемещался слой металлизационного покрытия и оценивалась сплошность слоя по наличию или отсутствию трещин.

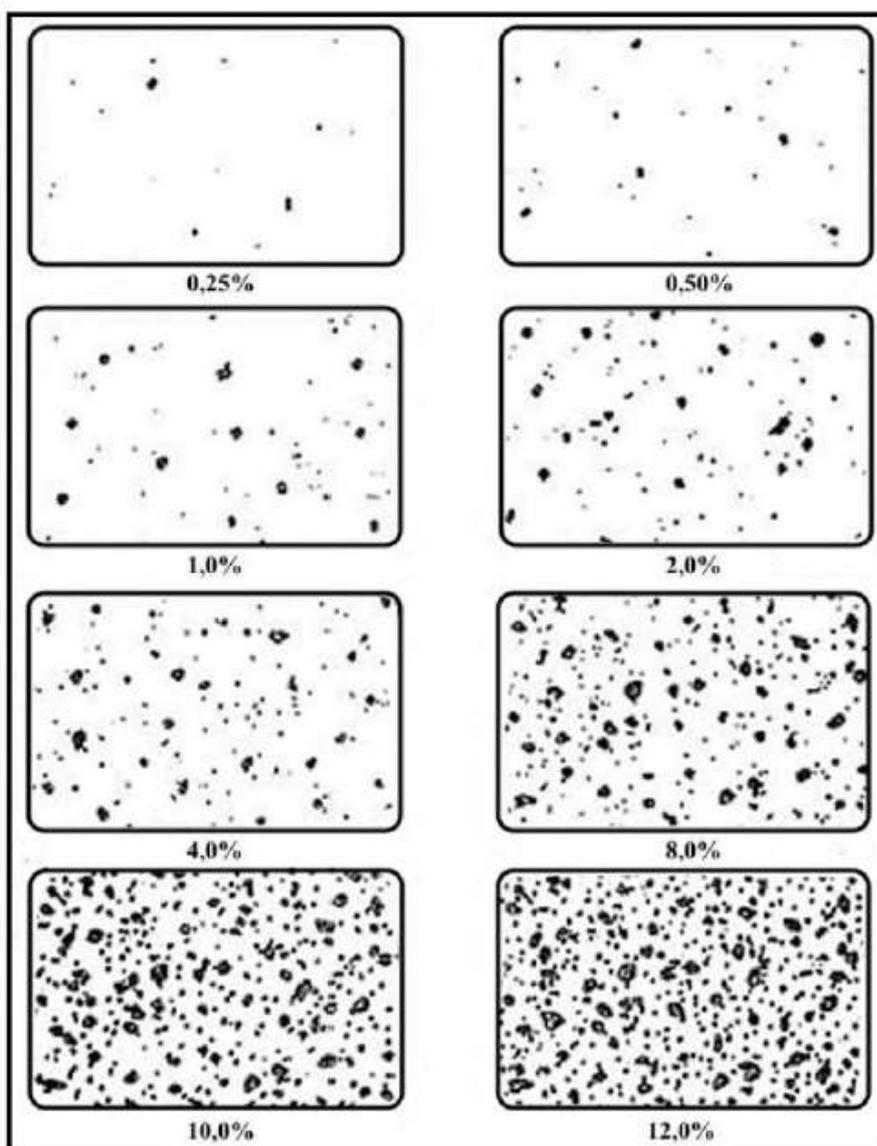


Рисунок 2.1 – Эталоны определения пористости покрытия

### 2.2.3 Определение адгезионной прочности

Адгезия характеризуется силой сцепления покрытия с подложкой. Для определения адгезионной прочности в данной работе использовался метод нормального отрыва по стандарту ГОСТ 32299 [83]. При определении адгезионной прочности на каждый образец-свидетель наклеивалось по два «грибка», далее образцы-свидетели выдерживались при температуре 200 °С до полного отверждения клея. Затем с помощью разрывной машины определялось усилие отрыва «грибков». Прочность при отрыве  $\sigma$ , МПа, рассчитывают по формуле 2.1. Характер разрушения определяют как средний

процент площади с соответствующим типом разрушения испытываемого покрытия.

$$\sigma = F/A, \quad (2.1)$$

где  $\sigma$  – прочность при отрыве;

$F$  – разрывное усилие, Н;

$A$  – площадь заготовки, мм<sup>2</sup>.

#### **2.2.4 Определение микротвердости покрытия**

Показатель микротвердости металлизационного покрытия в первом приближении определяет прочность и износостойкость покрытия. Определение данного параметра производилось на металлографическом шлифе с помощью микровердомера [84]. В процессе испытаний осуществлялось нагружение образца в течение 10-15 с. Величина нагрузки составляла от 9,807 Н (1 кгс) до 98,07 Н (10 кгс). Для достоверности испытаний проводилось не менее 10 измерений.

#### **2.2.5 Определение износостойкости покрытия**

Определение износостойкости покрытия осуществлялось в соответствии с ГОСТ 23.208 [85] на образцах-свидетелях размером 30х30х5 мм. После фиксации испытательных образцов-свидетелей в установке роликом создавалось усилие  $44 \pm 0,25$  Н. Далее задавалось вращение ролика с частотой  $60 \pm 2$  об/мин. Для проведения испытаний в качестве абразивного материала использовался электрокорунд зернистостью 16-П с относительным содержанием влаги не более 0,15 %. Длительность испытаний определялась твердостью покрытия. За результат испытаний принималось среднее арифметическое значение потери массы покрытия.

#### **2.2.5 Определение стойкости покрытия к прорезанию**

Стойкость металлизационного покрытия к прорезанию определялась путем перемещения предварительно нагруженного (50 кг) конусного резца по

поверхности покрытия [86]. Испытания проводились на образцах-свидетелях размерами 150x100 мм. На каждом образце-свидетеле выполнялось не менее трех прорезаний со скоростью перемещения резца  $250 \pm 5$  мм/мин., после чего с использованием глубиномера определялась глубина прорезания покрытия. Результатом испытаний является среднее арифметическое 18 измерений.

### **2.2.6 Определение микроструктуры и элементного состава покрытий методом электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом**

Микроструктурные исследования различных типов покрытий, определение их элементного состава проводились с помощью растрового электронного микроскопа Jeol JSM-6390LA с приставкой энергодисперсионного анализа MPСА JET-2200.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) относится к числу широко распространенных современных микроскопических методик, предназначенных для получения визуальной информации о микростроении объектов и информации о составе слоя покрытия. Методы сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа (ЭДА) основаны на принципе взаимодействия электронного пучка с исследуемым веществом.

Исследование покрытий осуществлялось на металлографических шлифах поперечного либо продольного сечения образцов ПЭД с наружным антикоррозионным покрытием.

Процессу изготовления шлифов необходимо уделять особое внимание, поскольку из-за возможной хрупкости, пористости и наличия структурных составляющих различной твердости существует вероятность того, что истинная структура покрытия может быть искажена. Резка шлифов проводилась абразивными кругами на отрезном станке с использованием охлаждающей жидкости. После чего осуществлялись операции заливки и запрессовки с последующими шлифованием и полировкой. Для создания ровной поверхности образцов операцию шлифования проводили с

использованием мелкозернистого материала, каждый этап шлифования сопровождался уменьшением зернистости применяемого абразива. После каждого этапа шлифования поверхность образцов тщательно очищалась во избежание переноса крупных частиц абразива на мелкозернистый абразивный материал. В процессе финишной полировки полировальный диск смачивали полировальной жидкостью, содержащей мелкодисперсные частицы полировального порошка. При полировке образцы держали в таком положении, чтобы направление движения диска было перпендикулярно направлению рисок от последней шлифовальной операции.

В процессе исследования шлифов отмечались следующие особенности:

- внешний вид, морфология строения;
- наличие пор, раковин, нерасплавленных частиц;
- толщина слоя покрытия;
- наличие дефектов на границе «металл-покрытие»;
- наличие дефектов (трещин) в слое покрытия;
- элементный состав покрытия.

Определение элементного состава проводилось с помощью энергодисперсионного анализатора. Процесс проведения энергодисперсионного анализа состоял из следующих операций:

1. Определялась область исследования.
2. Фокусировали электронный пучок на данной области при требуемом увеличении.
3. Установили детектор рентгеновского излучения на необходимом расстоянии (в соответствии с инструкцией по эксплуатации прибора) от исследуемой области.
4. Задали необходимое напряжение на катоде. Рекомендуется значение в 1,5 раза выше критического потенциала возбуждения наиболее высоких энергий рентгеновских линий. Практически все элементы (легкие и средние, включая лантаноиды) характеризуются линиями с энергией 0–10 кВ, поэтому рекомендуется использовать напряжение в 15 кВ.

5. Произвели сбор спектральных данных генерируемого электронным пучком рентгеновского излучения образцов.

6. Провели расшифровку данных по спектру рентгеновского излучения сопоставлением со спектрами излучения эталонов элементов в базе данных спектров.

7. Произвели вычитание фона, разделение пиков и коррекцию матрицы для рентгеновского спектра излучения образца. Данные процедуры осуществили с помощью программного обеспечения. Для полученного таким образом спектра произвели измерение интенсивности пиков излучения отдельных элементов, исходя из которых, рассчитывают весовые и атомные соотношения концентраций элементов, нормированные на 100%.

### **2.2.7 Определение стойкости к воздействию модельных сред**

Сущность метода заключается в выдержке образцов-свидетелей в кислой или щелочной средах (кислая среда – 10 % р-ра HCl в воде, щелочная среда – 10 % р-р NaOH в воде) при фиксированной температуре испытаний 60 °С и нормальном атмосферном давлении в специальном сосуде. Испытания проводились на образцах-свидетелях размером 100x50x3 мм.

Оценка стойкости покрытия производилась по изменениям внешнего вида покрытия и изменению адгезионной прочности.

### **2.2.8 Определение стойкости к длительному воздействию водных растворов**

В основе данного метода лежит выдержка образцов-свидетелей в модельной среде 5 % р-ра NaCl в воде при температуре 90 °С и нормальном атмосферном давлении. Продолжительность испытаний составляет 1000 часов. Испытания проводились на образцах-свидетелях размером 100x50x3 мм.

Критерием оценки стойкости покрытия является анализ изменения внешнего вида и сохранение физико-механических свойств покрытия.

### **2.2.9 Определение стойкости к циклическому изменению температуры**

Сущность метода испытания на стойкость к циклическому изменению температуры заключается в чередующемся воздействии на покрытие высокой и низкой температур с последующим определением изменений защитных свойств по сравнению с контрольным образцом. Испытания проводились по методике стандарта ГОСТ 27037 [87] на образцах-свидетелях.

Образцы-свидетели помещались в сушильный шкаф и выдерживались при температуре  $(60\pm 2)$  °С в течение 1 ч., затем в течение не более 2 мин. образцы-свидетели переносились в камеру холода и выдерживались при температуре минус  $(40\pm 2)$  °С в течение 1 ч. Далее образцы-свидетели извлекались из камеры холода и выдерживались при температуре  $(20\pm 5)$  °С в течение 15 мин. Цикл повторяли не менее 10 раз.

По завершению испытаний производилась оценка внешнего вида покрытия образцов-свидетелей, в ходе которой фиксировались изменения цвета покрытия, наличие или отсутствие вздутий, или других дефектов (появление открытых пор, шероховатости, следов коррозии). Производилась оценка сплошности покрытия и качества сцепления с металлом подложки металлографическим методом.

### **2.2.10 Определение стойкости к взрывной декомпрессии**

Испытания на стойкость к взрывной декомпрессии проводятся в соответствии с методикой, представленной в ГОСТ 58346-2019 [94], с использованием лабораторного автоклава производства ООО «НПЦ «Самара» (рисунок 2.2).

На дно реактора автоклава устанавливался стеклянный стакан, в который погружались образцы, после чего добавлялся раствор 5 %-го (масс.) NaCl. Стеклянный стакан использовался с целью исключения контакта покрытия со стенками и металлической оснасткой лабораторного автоклава

как непосредственно, так и через электролит. Испытания проводились на образцах-свидетелях размером 100x50x3 мм.

Далее автоклав продувался газообразным азотом не менее 5 минут до полного вытеснения из реактора воздуха, затем автоклав заполнялся углекислым газом  $\text{CO}_2$  до отметки 5 МПа по манометру.

Автоклав нагревался до заданной температуры испытаний 90 °С.

После выхода автоклава на заданный температурный режим, необходимое давление (10 МПа) создавалось с помощью закачивания газа  $\text{N}_2$ .

Продолжительность испытаний составляла 24 часа.

По завершении испытания осуществлялся быстрый сброс давления через вентиль автоклава со скоростью не менее 2 МПа/с.

Допустимые отклонения давления:  $\pm 0,5$  МПа, температуры:  $\pm 3$  °С.

Оценка стойкости покрытия к быстрой декомпрессии производилась по изменениям внешнего вида покрытия образцов и изменению адгезионной прочности методом отрыва. Кроме того, производилась оценка сплошности покрытия и качества сцепления с металлом подложки металлографическим методом.



Рисунок 2.2 – Лабораторный автоклав производства ООО «НПЦ «Самара»

### 2.2.11 Определение стойкости к воздействию CO<sub>2</sub>- и H<sub>2</sub>S-содержащих сред

Испытания на стойкость к воздействию CO<sub>2</sub>- и H<sub>2</sub>S-содержащих сред проводятся в соответствии с методикой, представленной в ГОСТ 58346-2019 [94], с использованием лабораторного автоклава производства ООО «НПЦ «Самара» (рисунок 2.2).

Сущность метода заключается в определении стойкости металлизационных покрытий к воздействию агрессивной среды определенного состава с фиксированными значениями концентраций растворенных газов в жидкости, температуры и давления. Автоклавные испытания проводились в CO<sub>2</sub> и/или H<sub>2</sub>S-содержащих средах при температурах 90 °С и/или 120 °С. Условия проведения испытаний, необходимое количество компонентов газовой фазы представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Условия проведения испытаний

№	T, °С	P, МПа	Минерализация, г/л	P <sub>парциальное</sub> CO <sub>2</sub> , МПа	P <sub>парциальное</sub> H <sub>2</sub> S, МПа	Длительность, час
1	90/120	10	50	4	0,5	240
2	90/120	10	50	-	0,5	240

На дно реактора автоклава устанавливался стеклянный стакан, в который погружались образцы, после чего добавлялся раствор 5 %-го (масс.) NaCl. Стеклянный стакан использовался с целью исключения контакта покрытия со стенками и металлической оснасткой лабораторного автоклава как непосредственно, так и через электролит. Испытания проводились на образцах-свидетелях размером 100x50x3 мм.

Далее автоклав продувался газообразным азотом не менее 5 минут до полного вытеснения из реактора воздуха, затем вентиль подачи газа перекрывался. Автоклав заполнялся H<sub>2</sub>S до отметки 0,5 МПа (или CO<sub>2</sub> до отметки 4,0 МПа) по манометру.

Автоклав нагревался до заданной температуры испытаний. После выхода автоклава на заданный температурный режим, необходимое давление создавалось с помощью подачи газа  $N_2$ .

После достижения всех заданных параметров испытания начинается отсчет времени. Продолжительность испытаний составляет 10 суток.

По завершению испытания осуществлялся медленный сброс давления, не менее 30 минут через вентиль автоклава в нейтрализатор.

Допустимые отклонения давления:  $\pm 0,5$  МПа, температуры:  $\pm 3$  °С.

Оценка стойкости покрытия к воздействию  $CO_2$  и  $H_2S$ -содержащих сред производилась по изменениям внешнего вида покрытия образцов и изменению адгезионной прочности методом отрыва. Кроме того, производилась оценка сплошности покрытия и качества сцепления с металлом подложки металлографическим методом.

### **Выводы по главе**

1. Для достижения поставленных задач осуществлялся отбор образцов нескольких групп. К первой группе образцов относятся корпуса ПЭД с наружным металлизационным покрытием, разрушенным в процессе эксплуатации на месторождениях нескольких дочерних обществ ПАО «НК «Роснефть». Образцы второй группы предназначены для проведения комплексных лабораторных исследований и представляют собой образцы-свидетели с напыленным металлизационным покрытием различных типов. Перечень материалов, предназначенных для нанесения металлизационного покрытия на образцы-свидетели сформирован на основании результатов исследований образцов первой группы и обзора применяемых для защиты корпусов ПЭД материалов, в рамках работы, проводимой по Договору с ООО «РН-БашНИПИнефть» (ПАО «НК «Роснефть»).

2. На основании результатов исследований образцов первой группы целесообразно использовать методику комплексных испытаний металлизационных покрытий. Выбраны методы испытаний, результаты которых позволят оценить физические, механические, физико-механические,

трибологические и коррозионные свойства металлизационных покрытий, и которые могут быть основой новой методики комплексной оценки свойств металлизационных покрытий.

3. Новая методика комплексной оценки свойств металлизационных покрытий может быть представлена тремя базовыми блоками. Первый блок должен быть представлен методами контроля технологических показателей покрытия в исходном состоянии: оценка внешнего вида покрытия, его физических и физико-механических свойств, включающих определение шероховатости, толщины покрытия, пористости, сплошности и качества сцепления с металлом подложки. Второй блок испытаний должен быть представлен методами, определяющими стойкость покрытий к внешним механическим воздействиям. Вторым блоком представлены методами, определяющими качественные и количественные характеристики адгезионной прочности, микротвердости, абразивной стойкости, стойкости к прямому удару и определение стойкости к прорезанию. Третий блок испытаний должен включать методы ускоренных испытаний в модельных средах для оценки коррозионного поведения металлизационных покрытий. В качестве модельных сред в новой методике могут использоваться: кислая среда 10 % раствора HCl; щелочная среда 10 % раствора NaOH, минерализованная среда 5 % раствора NaCl; минерализованная среда 5 % раствора NaCl, насыщенная коррозионно-активными газами CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S; воздушная среда с воздействием переменных температур.

### **3 АНАЛИЗ ПРИЧИН ОТКАЗОВ ПОГРУЖНОГО СКВАЖИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

В данной главе осуществлен анализ данных дефектации и отбраковки корпусов ПЭД в сервисных центрах не менее четырех нефтедобывающих регионов. Полученные данные сопоставлены с наработкой оборудования.

#### **3.1 Анализ статистических данных отбраковки ПЭД по причине коррозионного повреждения корпуса**

Анализ данных дефектации УЭЦН позволяет выявить наиболее уязвимый узел и определить причину отказа. В рамках данного этапа проводился анализ результатов проведения дефектации и отбраковки корпусов на ремонтных базах ПАО «НК «Роснефть» (таблица 2.1).

В ходе работ как с результатами дефектации, так и непосредственно на ремонтных базах было обнаружено, что, несмотря на повсеместное использование защиты корпуса ПЭД от коррозии с помощью различных покрытий, наблюдается отсутствие единого регламента регистрации и контроля за состоянием защитного покрытия, так, например, информация о факте нанесения покрытия, месте проведения работ, типе, составе и физико-механических свойствах (толщина покрытия, сплошность, прочность и др.) не фиксируются в сопроводительной документации. Зачастую покрытие рассматривается не как конструктивный элемент, а как дополнительный фактор, не влияющий на функциональные свойства изделия.

#### **АО «Самотлорнефтегаз»**

Для проведения анализа предоставлены результаты дефектации УЭЦН в АО «Самотлорнефтегаз» за период 01.01.2012-16.03.2018 гг. Всего за указанный период зафиксировано 23914 отказов.

Основные факторы, определяющие условия эксплуатации представлены в таблице 3.1. В таблице приведены минимальное, максимальное и среднее значения для всех скважин.

Таблица 3.1 – Условия эксплуатации

	Р <sub>пл</sub> , атм.	ГФ, м <sup>3</sup> /т	Т <sub>пл</sub> , °С	Забой, м	Q <sub>ж</sub> , м <sup>3</sup> /сут	ОБВ, %	КВЧ, мг/л	рН
Мин.	97	22	36	10	1	1,5	13	6,28
Макс.	277	170	87	4525	1460	99,9	3624	8,2
Среднее	138	74	62	2022	165	81	159	7,3

Продолжение таблицы 3.1

	Минерализация, мг/л							Газы		
	Общая	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> S, мг/л	CO <sub>2</sub> , мг/л	O <sub>2</sub> , мг/л
Мин.	16783	0	3	271	3,4	-	2	-	-	-
Макс.	36653	1904	365	12572	39600	-	3904	-	-	-
Среднее	22163	796	116	5928	9650	-	348	-	-	-

На рисунке 3.1 представлено распределение отказов по отказавшему элементу. Наибольшее количество отказов связано с выходом из строя ЭЦН (37 %), среди них доля отказов по причине коррозии корпуса составляет менее 2,5 % (206 ед.), среднее значение межремонтной наработки составляет 570 суток. На ПЭД приходится 15 % отказов, из них по причине коррозии корпуса более 51 % (1808 ед.) средняя межремонтная наработка составляет 439 суток (при этом частные показатели находятся в интервале от 11 до 1927 суток). В связи с относительно небольшим вкладом ЭНЦ в общее количество отказов по причине коррозии корпусов более детально остановимся на анализе отказов ПЭД. В связи с частичным отсутствием данных по суммарной наработке здесь и далее в процессе анализа в качестве основного показателя будем рассматривать межремонтную наработку, основываясь на том, что при спуске состояние покрытия и металла корпуса имело удовлетворительное состояние.

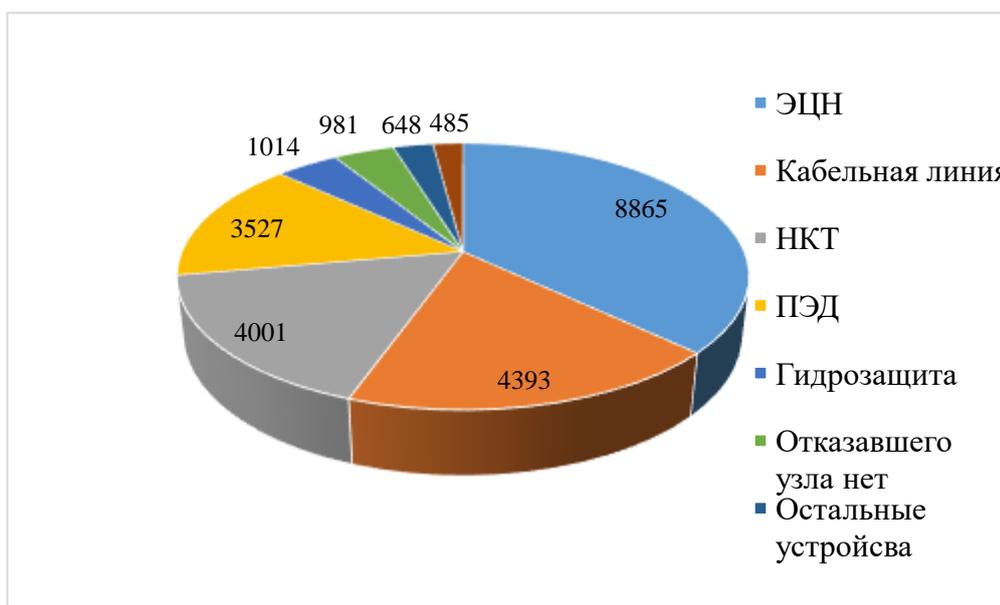


Рисунок 3.1 - Распределение отказов по отказавшему элементу

На рисунке 3.2 и рисунке 3.2 представлено изменение показателей наработки и количество отказов в годовой динамике. Согласно полученным данным, наблюдается стабильное увеличение наработки начиная с 2014 года (367 суток) и на 2017 год среднее значение наработки увеличилось на 52 % и составило 559 суток. В рассмотренном интервале времени наблюдается тенденция к уменьшению количества отказов с 351 в 2015 году до 306 в 2017 году, снижение составило ~ 13 %. Снижение аварийности и увеличение наработки можно, в том числе, связать с увеличением доли корпусов с антикоррозионным покрытием.

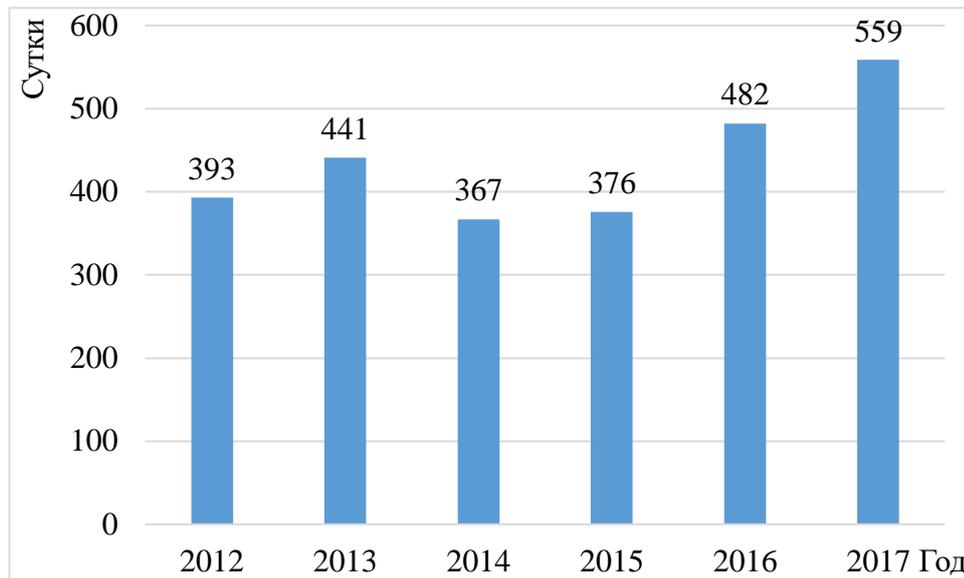


Рисунок 3.2 - Средняя наработка по причине коррозии корпуса

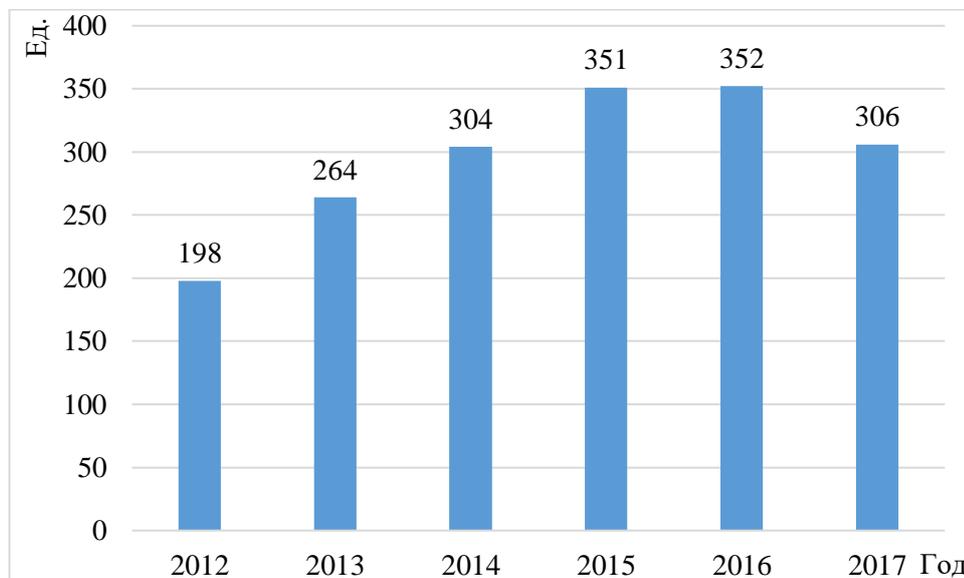


Рисунок 3.3 - Количество отказов по причине коррозии корпуса

Рассматривая распределение количество отказов от длительности наработки (рисунок 3.4) установлено, что максимум отказов приходится на интервал межремонтной наработки 367-720 суток, что составляет 37 % от общего количества отказов по причине коррозии корпуса ПЭД. 35 % отказов приходится на интервал наработки 100-365 суток, 1,2 % на интервал 11-99 суток, 17 % на интервал более 720 суток.

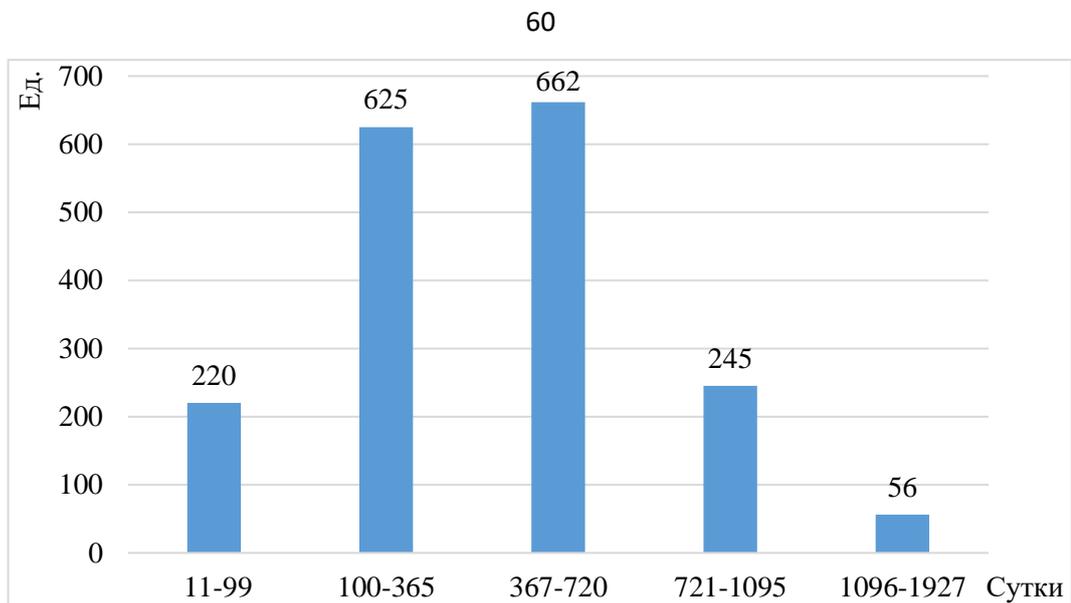


Рисунок 3.4 - Количество отказов по причине коррозии корпуса  
от времени наработки

Установление зависимости наработки от условий эксплуатации и агрессивности среды не привело к получению достоверных зависимостей, одной из причин является большой вклад в общее количество отказов доли механических повреждений покрытия корпуса (более 50 %). Для подтверждения данного вывода представлены зависимости наработки от индекса рН и количества КВЧ (рисунок 3.5, 3.6) определяющими в общем случае показатели коррозионной агрессивности среды (так как рН зависит от содержания растворенных газов, а количество КВЧ определяет абразивный износ). Как видно из представленных диаграмм явная зависимость наработки от рассмотренных параметров отсутствует, что свидетельствует о значительном вкладе в наработку дополнительных факторов, не связанных напрямую с показателями транспортируемой среды.

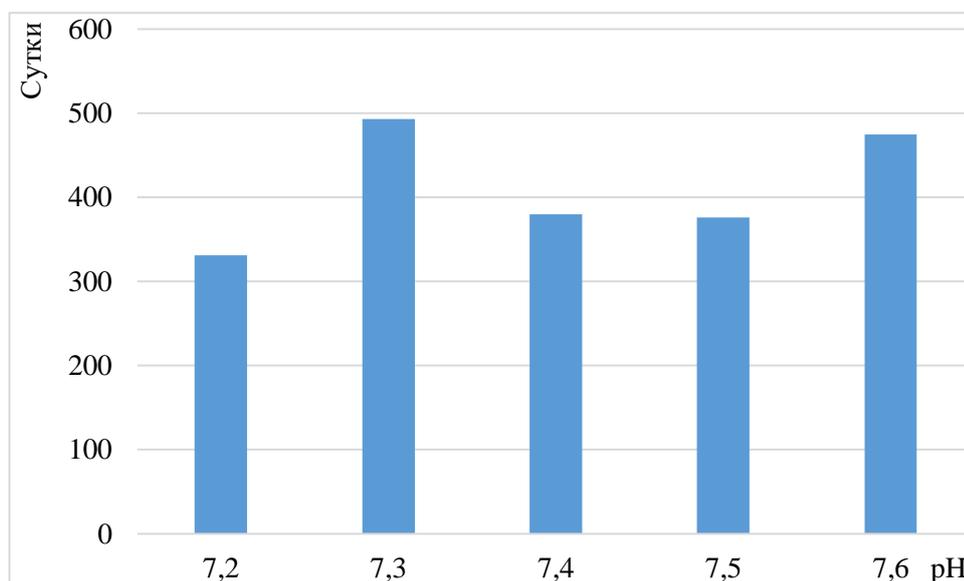


Рисунок 3.5 - Средняя наработка от pH

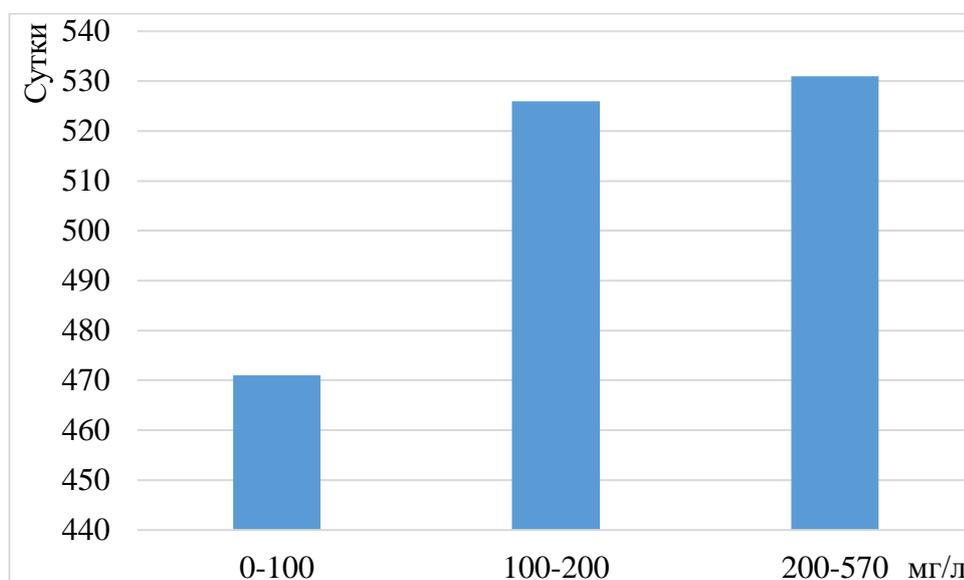


Рисунок 3.6 - Средняя наработка от концентрации КВЧ

На рисунках 3.7-3.11 приведены сводные данные по наработке корпусов ПЭД, отказавших по причине коррозии корпуса, в зависимости от наличия или отсутствия антикоррозионного покрытия. Несмотря на то, что установить тип покрытия и завод-производитель не представляется возможным, можно проследить увеличение наработки для образцов с покрытием как для новых, так и для ремонтных корпусов.

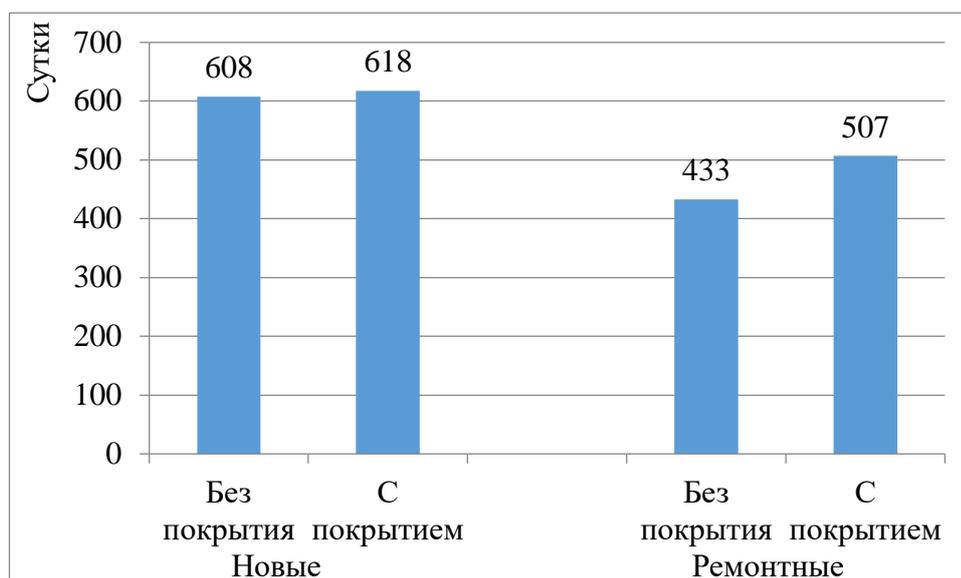


Рисунок 3.7 - Средняя наработка

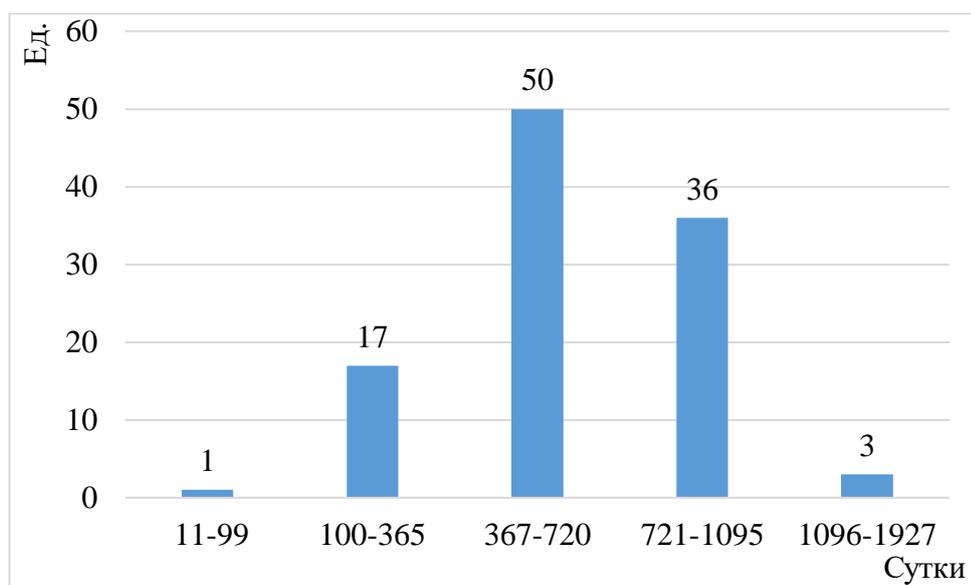


Рисунок 3.8 - Средняя наработка новые без покрытия

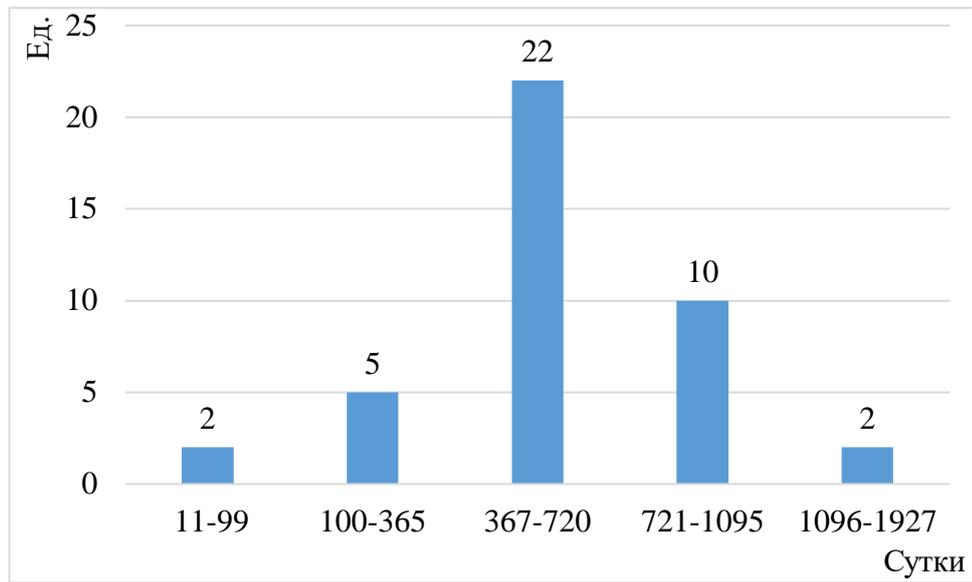


Рисунок 3.9 - Средняя наработка новые с покрытием

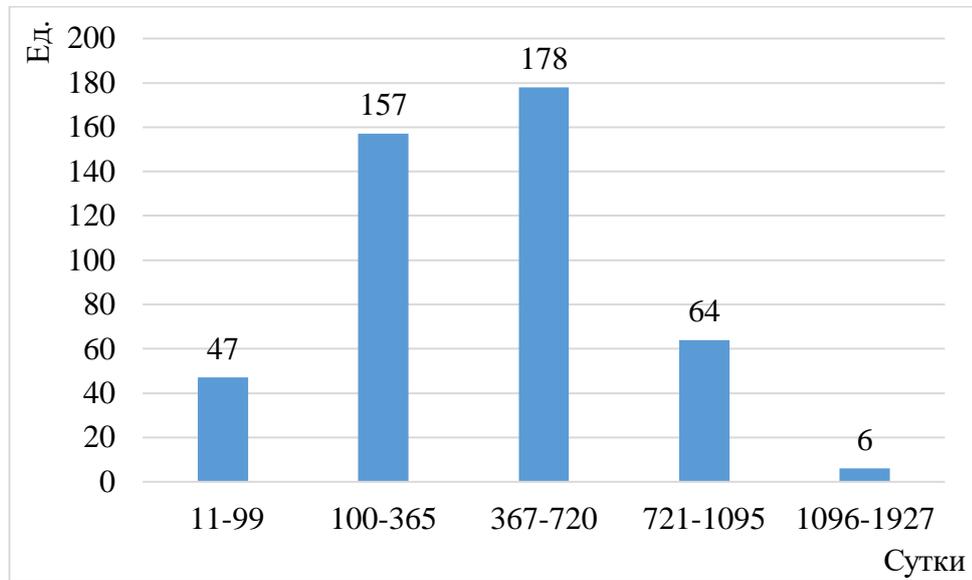


Рисунок 3.10 - Средняя наработка ремонтные с покрытием

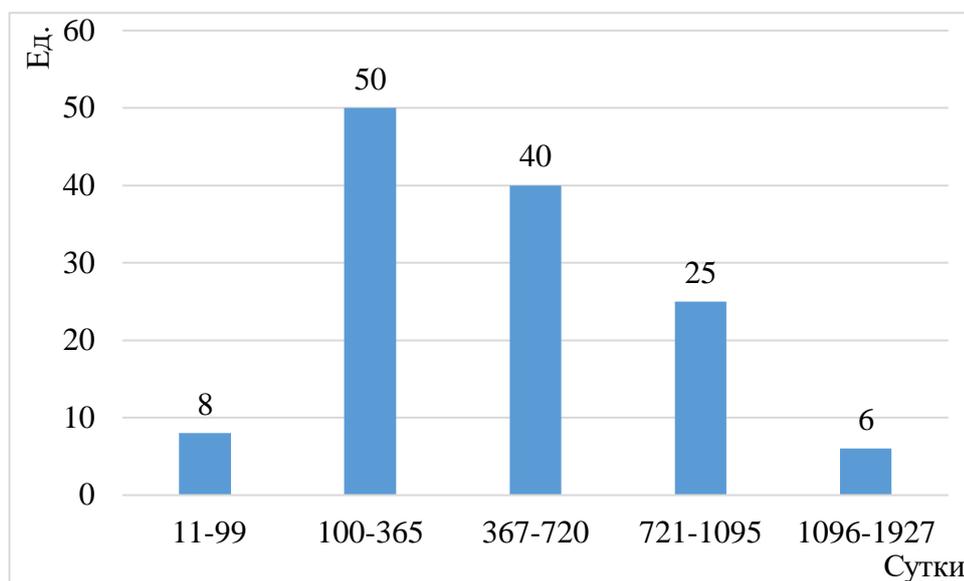


Рисунок 3.11 - Средняя наработка ремонтные с покрытием

### ООО «РН-Юганскнефтегаз»

Для проведения анализа предоставлены результаты дефектации УЭЦН за период 01.01.2016-17.05.2018 гг. За указанный период зафиксировано 28478 отказа. Из них ПЭД, отбракованных по причине коррозии корпуса – 809 ед. со средней межремонтной наработкой 426 суток, ЭЦН отбракованных по причине коррозии корпуса - 1400 со средней межремонтной наработкой 435 суток.

Основные факторы, определяющие условия эксплуатации представлены в таблице 3.2. В таблице приведены минимальное, максимальное и среднее значения для всех скважин.

Таблица 3.2 – Условия эксплуатации

	Р <sub>пл</sub> , атм.	ГФ, м <sup>3</sup> /т	Т <sub>пл</sub> , °С	Забой, м	Q <sub>ж</sub> , м <sup>3</sup> /сут	ОБВ, %	КВЧ, мг/л	рН
Мин.	110	21	60	334	1	1	10	4,0
Макс.	390	140	136	4768	1254	99,9	1840	8,9
Среднее	249	60	87	3246	137	56	161	7,1

	Минерализация, мг/л							Газы, мг/л		
	Общая	Ca <sup>2+</sup> , мг/л	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Мин.	0	0	0	0	4512	-	0	0	0,0006	-
Макс.	525889	81000	3648	20394	25177	-	73212	2,800	0,037	-
Среднее	38273	2475	169	11746	10136	-	3828	0,37	0,0097	-

На рисунках 3.12, 3.13 представлены средняя наработка корпусов ПЭД и ЭЦН в зависимости от наличия или отсутствия антикоррозионного покрытия. Как показывают полученные результаты к значительному увеличению наработки приводит нанесение покрытия в процессе ремонта корпусов ЭЦН, при этом зафиксировано увеличение наработки в 3 раза. Для остальных рассмотренных случаев изменение наработки менее значительны.

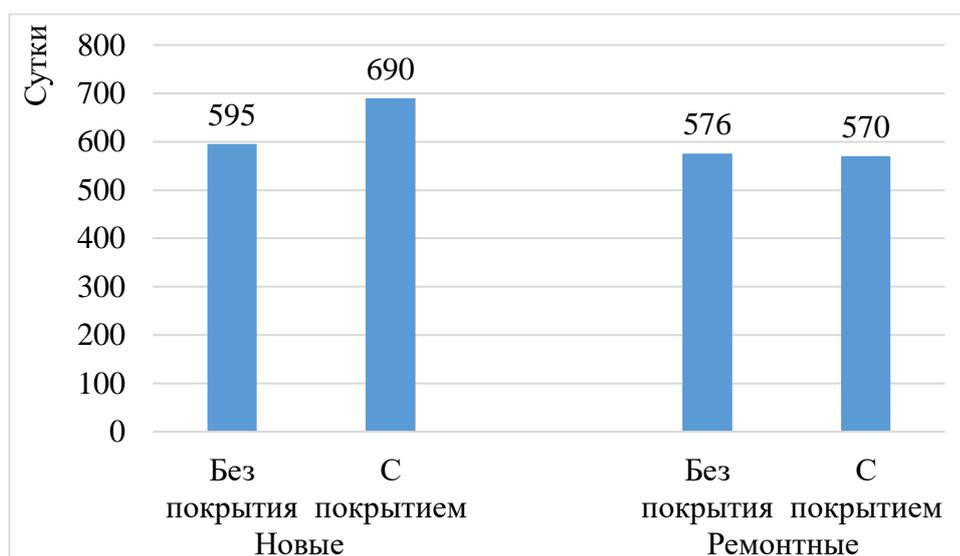


Рисунок 3.12 - Средняя наработка корпусов ПЭД

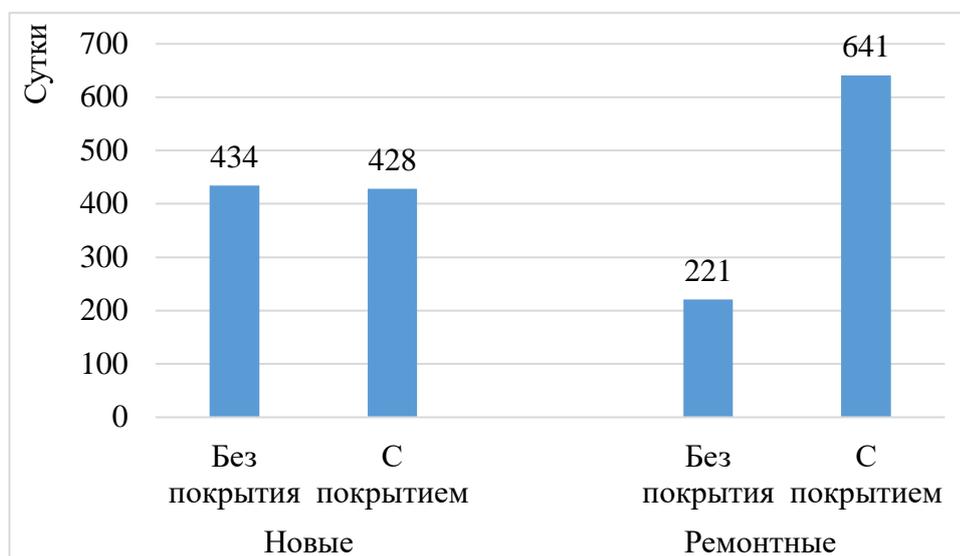


Рисунок 3.13 - Средняя наработка корпусов ЭЦН

### АО «Самаранефтегаз»

Для проведения анализа предоставлены результаты дефектации УЭЦН в АО «Самаранефтегаз» за период 03.01.2013-08.07.2018 гг. За указанный период зафиксировано 8063 отказа. Из них ПЭД, отбракованных по причине коррозии корпуса – 518 ед. со средней межремонтной наработкой 489 суток, ЭЦН, отбракованных по причине коррозии корпуса - 226 со средней межремонтной наработкой 605 суток.

Основные факторы, определяющие условия эксплуатации представлены в таблице 3.3. В таблице приведены минимальное, максимальное и среднее значения для всех скважин.

Таблица 3.3 – Условия эксплуатации

	Р <sub>пл</sub> , атм	ГФ, м <sup>3</sup> /т	Т <sub>пл</sub> , °С	Забой, м	Q <sub>ж</sub> , м <sup>3</sup> /сут	ОБВ, %	КВЧ, мг/л	рН
Мин.	32	0	21	212	0,68	40	5,1	4,5
Макс.	350	389	87	3458	975	99,9	1707,3	8
Среднее	164	55	48	2105	117	70	149,3	6,21

Продолжение таблицы 3.3

	Минерализация, мг/л							Газы, мг/л		
	Общая	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Мин.	227	176	0	0,76	157	0,2	30	-	-	-
Макс.	333849	43610	16781	265277	362392	4831	1200	-	-	-
Среднее	239158	11742	2624	77929	147790	662	202	-	-	-

На рисунках 3.14, 3.15 представлены средняя наработка корпусов ПЭД и ЭЦН в зависимости от наличия или отсутствия антикоррозионного покрытия. Как показывают полученные результаты применение защитного покрытия преимущественно приводит к росту наработки, а в случае ремонтных корпусов ПЭД наблюдается небольшое снижение наработки, что возможно связано с недостаточным набором статистических данных. Следует отметить, что достоверная информация о наработке новых корпусов ЭЦН с покрытием отсутствует.

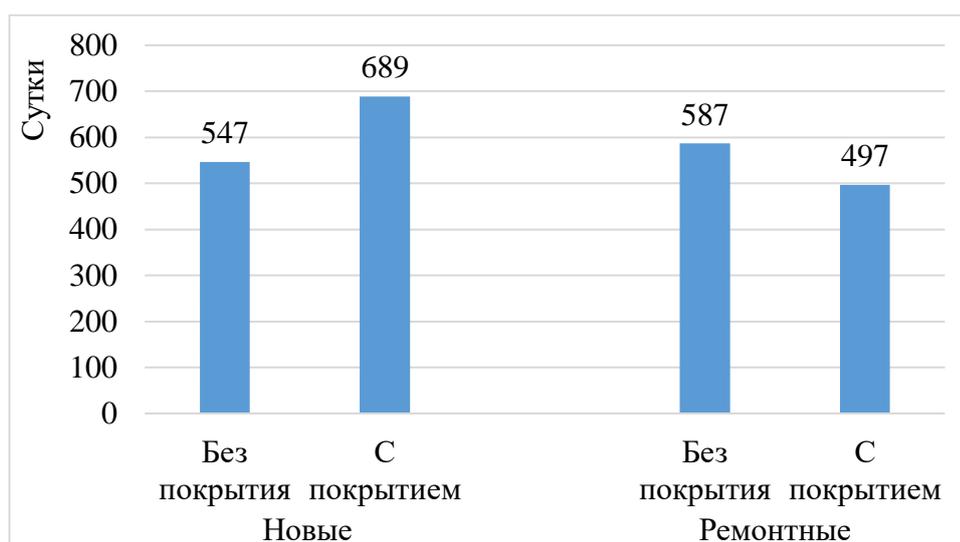


Рисунок 3.14 - Средняя наработка корпусов ПЭД

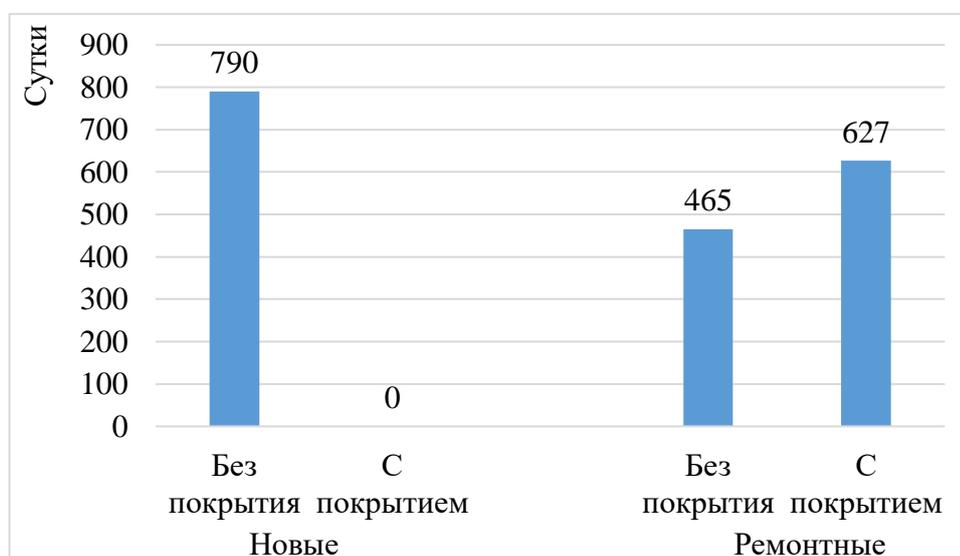


Рисунок 3.15 - Средняя наработка корпусов ЭЦН

**ООО «РН-Ванкор»**

За период с 05.2009 по 05.2018 зафиксировано 2298 отказа, из них по причине выхода из стоя ПЭД и ЭЦН – 585 отказа.

По причине коррозии.

ЭЦН:

- 21 по причине механического повреждения покрытия с наработкой от 244 до 1042, среднее значение 508 суток;

- 6 по причине коррозии корпуса с наработкой 351-734, среднее 523 суток.

ПЭД:

- 6 по причине механического повреждения покрытия с наработкой 244-991, среднее 447 суток;

- 9 по причине коррозии корпуса с наработкой 351-656, среднее 470 суток.

Ввиду малого количества отбракованных узлов статистическая обработка предоставленных данных не представляется возможной.

**ООО «РН-Ставропольнефтегаз»**

За период с 01.2015 по 08.2018 зафиксировано 909 отказа, из них при наличии коррозии корпуса ПЭД и ЭЦН – 21.

ЭЦН:

- 13 по причине коррозии корпуса. Сведения о наличии/отсутствии и причине повреждения покрытия отсутствуют.

ПЭД:

- 8 по причине коррозии корпуса. Сведения о наличии/отсутствии и причине повреждения покрытия отсутствуют.

Для проведения анализа так же были предоставлены результаты дефектации УЭЦН ОАО «Удмуртнефть», АО «Томскнефть». Информация о статистике отказов по причине коррозии корпуса ПЭД и ЭЦН приведена в таблице 3.4. Однако, ввиду малого количества отбракованных узлов

статистическая обработка предоставленных данных не представляется возможной.

Таблица 3.4 – Статистика отказов

Дочернее общество	Всего	ПЭД*	ЭЦН*
«Удмуртнефть»	1865	248	45
«Томскнефть»	14849	10	3
* - отбраковано по причине коррозия корпуса			

### 3.2 Определение основных причин отказов корпусов ПЭД с металлизационным покрытием после эксплуатации

В ходе диссертационной работы было исследовано 23 корпуса ПЭД. Ввиду большого объема полученной информации в диссертации графические материалы представлены только типовыми случаями.

Для определения основных причин разрушения корпусов ПЭД с защитным покрытием проводился комплексный анализ результатов лабораторных исследований аварийных корпусов, отобранных на ремонтных базах ПАО «НК «Роснефть» (таблица 2.1) и эксплуатационных особенностей.

Лабораторные исследования отобранных образцов включало в себя оценку внешнего вида, локализацию дефектов, микроструктурные исследования поврежденных участков с оценкой типа покрытия, количества слоев, толщину каждого слоя, элементный анализ покрытия и продуктов коррозии.

Анализ результатов исследований образцов ПЭД позволил выявить основные причины образования повреждений покрытия и металла корпуса. На 10 образцах наблюдаются механические повреждения покрытия, приводящие к нарушению сплошности и, как следствие, к коррозионному разрушению металла корпуса и развитию подпленочной коррозии. Разрушение 8 образцов сопровождается проникновением компонентов транспортируемой среды через покрытие, что обусловлено диффузией компонентов транспортируемой среды через покрытие без нарушения его сплошности. В 2 из 8 случаев наработка корпусов составила 1622 и 2172 суток. Непосредственно низкие

барьерные свойства материала покрытия стали причиной разрушения 5 образцов. При этом 3 из 6 образцов имели идентичное покрытие «монель+ЛКП», однако, следует отметить, что на всех образцах с данным типом покрытия наблюдается низкая толщина (менее 50 мкм) и несплошность слоя монели, а единичный слой ЛКП не обеспечивает защиты металла от коррозии. Помимо озвученных причин разрушения покрытия были выявлены 3 случая вызванные особенностями технологии нанесения:

1. Нарушение сплошности покрытия ремонтного корпуса ПЭД в виду наличия областей, в которых поверхность металла оказывалась параллельна линии распыления покрытия.

2. Недостаточная толщина слоя металлизационного покрытия, что привело к локальному снижению барьерных свойств покрытия и проникновению коррозионных компонентов среды к металлу ПЭД.

Из 23 образцов на 5 не выявлено нарушения сплошности покрытия и критических коррозионных повреждения металла корпуса.

Рассмотрим подробнее каждый вид разрушения [88].

1. Механические повреждения покрытия (рисунок 3.16) являются наиболее частой причиной отказа электродвигателей. Механические повреждения проявляются в виде нарушения сплошности покрытия типа глубоких рисок, направленных строго вдоль корпуса.

Результаты микроструктурных исследований свидетельствуют о протекании коррозионных процессов и ускоренном коррозионном разрушении металла корпуса ПЭД на участках нарушения сплошности защитного покрытия. На участках без каких-либо повреждений металлизационного покрытия протекание коррозионных процессов не наблюдается.

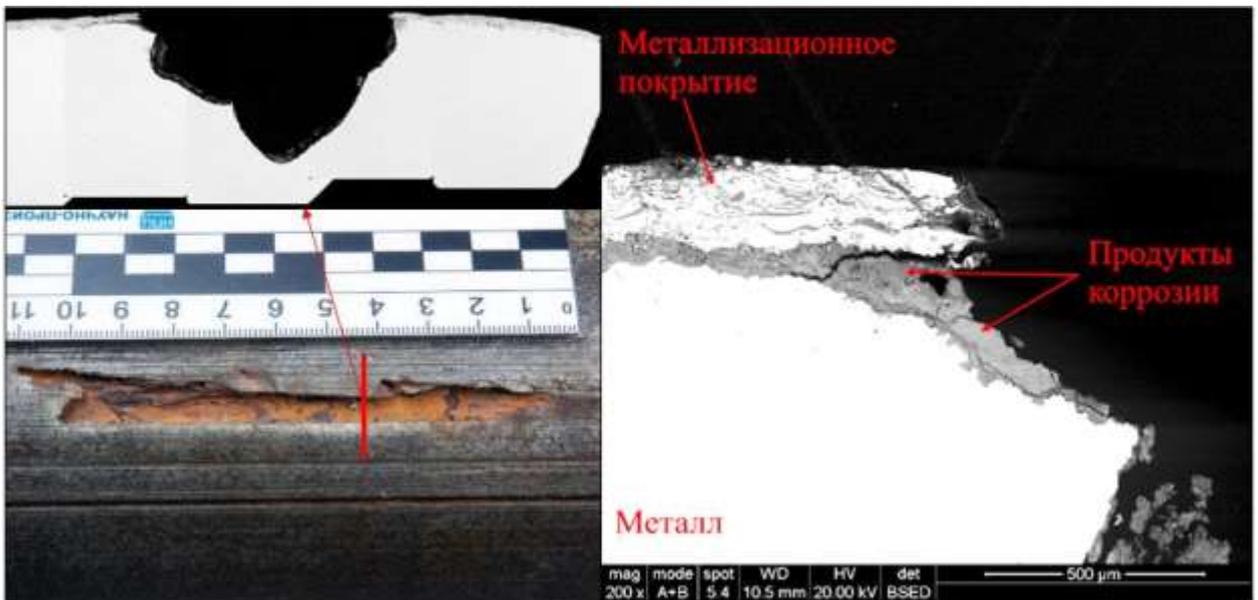


Рисунок 3.16 – Механические повреждения корпуса ПЭД. Образец №1

2. Абразивный износ покрытия. Образование данного вида повреждений сопровождается изменением цвета и «стиранием» участков покрытия с образованием локальных очагов коррозионных повреждений. Повреждения, как правило, локализованы вблизи концов корпуса в виде полос шириной до 10 см (рисунок 3.17). В структуре покрытия корпуса ПЭД на участках локального снижения толщины защитного покрытия наблюдается развитие коррозионных процессов с образованием продуктов коррозии.

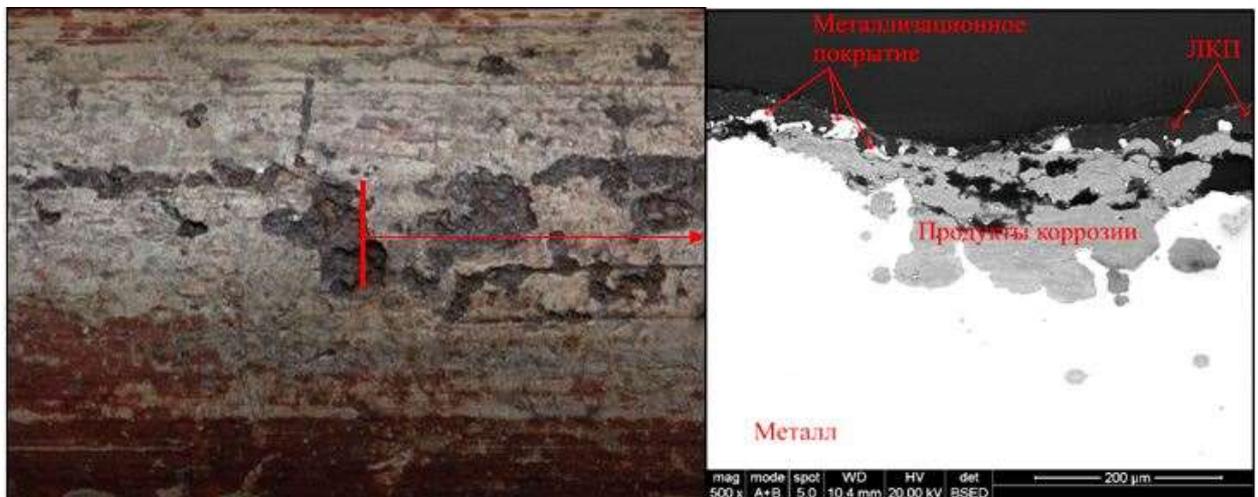


Рисунок 3.17 – Повреждения (абразивный износ) корпуса ПЭД. Образец №3

3. Низкие барьерные свойства покрытия. Визуально характер поврежденности проявляется в виде вздутий и отслоений покрытия, расположенных либо равномерно по поверхности корпуса, либо локально на участках площадью в несколько см<sup>2</sup> (рисунок 3.18). Для всех выявленных случаев отказа характерна низкая толщина слоя металлизации – до 150 мкм. На исследованных образцах ПЭД с комбинированным способом защиты (металлизация + лакокрасочное покрытие) выявлено, что металлизационное покрытие нанесено на поверхность металла, не образуя единый сплошной слой, что также является нарушением технологии нанесения (рисунок 3.19). Отсутствие сплошности слоя металлизационного покрытия характерно для всех исследованных образцов с комбинированным способом защиты. В данном случае проникновение компонентов среды не ограничивается дополнительным барьерным слоем, дальнейшее разрушение происходит по механизму подплёночной коррозии.

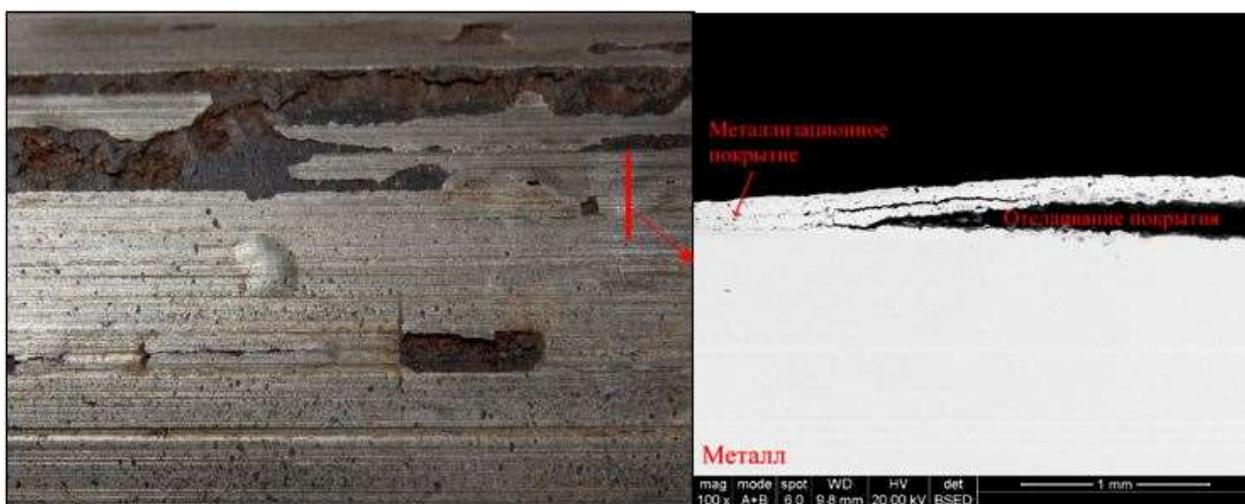


Рисунок 3.18 – Повреждения в виде вздутий и отслаиваний металлизационного покрытия корпуса ПЭД образца №6

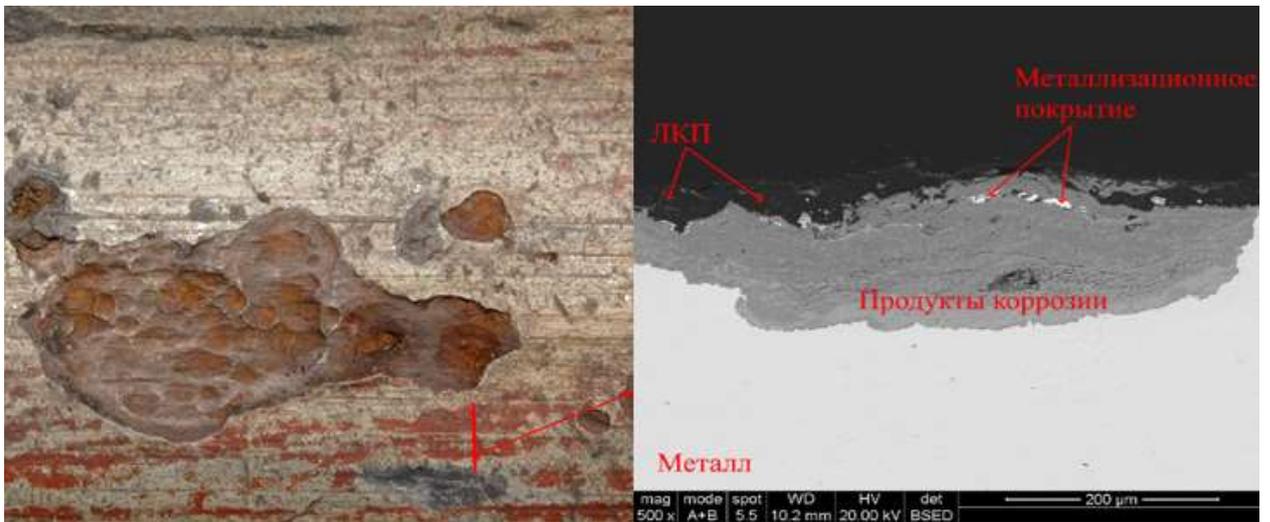


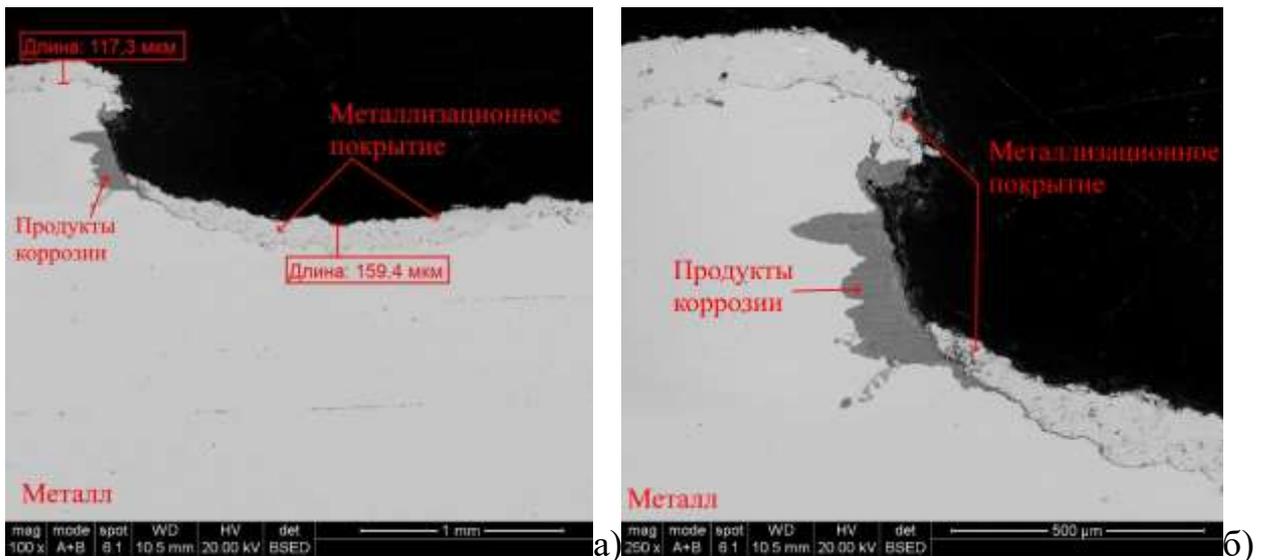
Рисунок 3.19 – Повреждения в виде вздутий и отслаиваний комбинированного защитного покрытия корпуса ПЭД образца №4 «ЛКП+металлизация»

4. Несовершенства технологии нанесения могут проявляться в виде локального снижения толщины покрытия или его отсутствия на труднодоступных для напыления участках.

Данный вид разрушения характерен для ремонтных корпусов ПЭД (рисунок 3.20), поверхность которых уже подвергалась коррозионному разрушению, вследствие чего поверхность корпуса обладает значительной неравномерностью (язвенные повреждения, кратеры). Нанесение покрытия на такую поверхность способствует образованию разнотолщинности покрытия (рисунок 3.21), поскольку при нанесении оно полностью повторяет топографию поверхности корпуса ПЭД. К труднодоступным для напыления участкам относятся стенки полостей или углублений, которые при напылении находятся в одной плоскости с линией распыления покрытия (рисунок 3.21).



Рисунок 3.20 – Повреждения корпуса ПЭД. Образец №5



а) Увеличение x100; б) Увеличение x250

Рисунок 3.21 – Микроструктура защитного покрытия ПЭД. Образец №5

Коррозионные разрушения корпусов ПЭД имеют идентичную для всех типов покрытий стадийность. На первом этапе происходит образование продуктов коррозии по границам сплавления частиц металлизационного покрытия (для ЭДМ – оксидов), а также проникновение коррозионно-активных компонентов среды к металлической подложке через сквозную пористость (Рисунок 3.22). Далее по механизму подпленочной коррозии начинается образование карбонатов и/или сульфидов железа, рост которых приводит сначала к вздутиям, а потом разрушению покрытия с оголением

металла и образованием гальванопары. Само покрытие при этом коррозионному разрушению практически не подвергается.

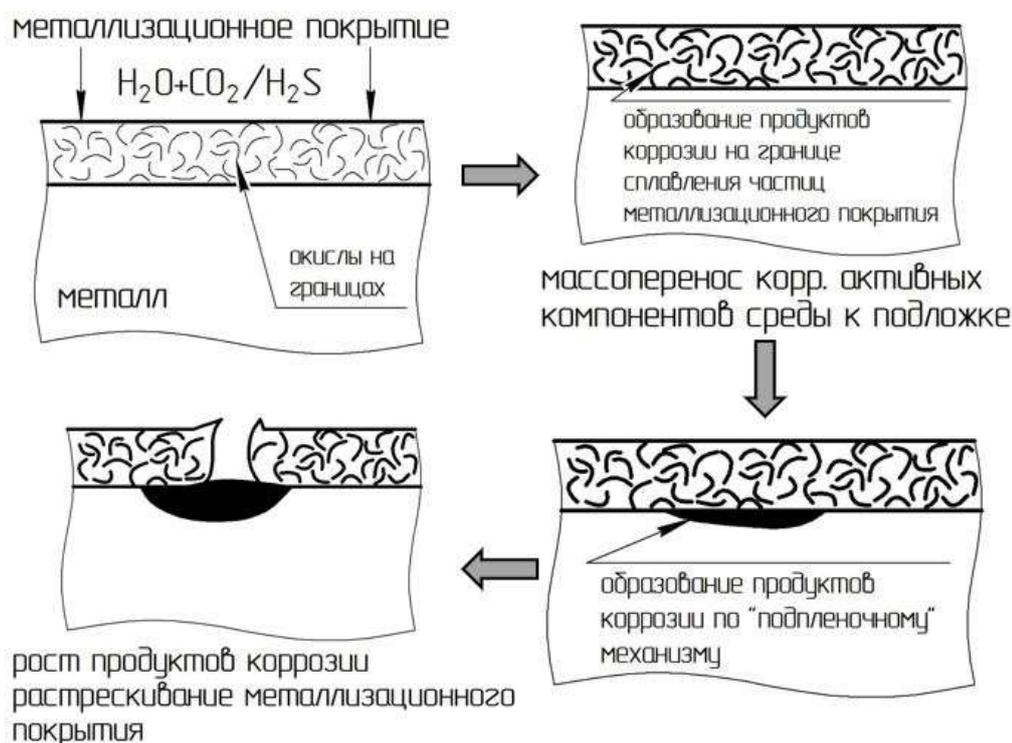


Рисунок 3.22 – Стадийность процесса разрушения корпусов ПЭД по коррозионному механизму

По результатам проведенных исследований разработан альбом повреждений корпусов ПЭД в промышленных условиях (Приложение А). Альбом содержит характерные виды повреждений защитных покрытий с указанием причин образования и кинетики механизма разрушения металлизационного покрытия.

### Выводы по главе

1. По результатам анализа статистических данных коррозия корпуса ПЭД является самой распространенной причиной отказа, что в свою очередь согласуется с данными литературных источников, представленными в первой главе.

2. Исследование аварийных ПЭД позволило установить, что разрушение металла корпуса ПЭД протекает по механизму подпленочной коррозии. Инициирование и интенсификация процессов коррозионного разрушения обусловлены наличием механических повреждений покрытия, абразивным износом покрытия, низкими барьерными свойствами покрытия, а также связаны с несовершенствами технологии нанесения покрытия, способствующих либо нарушению сплошности слоя покрытия, либо снижению его толщины.

3. Установлено, что коррозионные разрушения корпусов ПЭД имеют идентичную для всех типов покрытий стадийность, где на первом этапе происходит образование продуктов коррозии по границам сплавления частиц металлизационного покрытия (для ЭДМ - оксидов), далее проникновение коррозионно-активных компонентов среды к металлу корпуса через сквозную пористость и последующее разрушение по механизму подпленочной коррозии с образованием карбонатов и/или сульфидов железа.

4. На основании проведенных исследований разработан альбом повреждений корпусов УЭЦН в промысловых условиях (Приложение Б). Альбом содержит характерные виды повреждений защитных покрытий с указанием типа покрытия, наработки и условий эксплуатации отдельно по каждым объектам.

## **4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

В данной главе представлен анализ существующих стандартизированных методов испытаний различных систем антикоррозионных покрытий. Разработана комплексная методика проведения лабораторных испытаний антикоррозионных металлизационных покрытий ПЭД, имитирующих различные эксплуатационные факторы, в том числе влияние агрессивных сред на основе водных растворов, содержащих  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  при повышенных температурах и давлении, абразивный износ и механические воздействия.

### **4.1 Разработка методики проведения лабораторных испытаний металлизационных покрытий**

Анализ причин разрушения металлизационных покрытий корпусов ПЭД в процессе эксплуатации выявил три основных фактора, влияющих на долговечность и работоспособность покрытия.

Наиболее критическими и распространёнными являются механизмы, основанные на механическом повреждении покрытия. Отказ оборудования при данном типе разрушения покрытия обусловлен оголением металла корпуса и его ускоренным коррозионным разрушением. При этом наработка на отказ будет зависеть только от фактического момента возникновения повреждения, как для новых, так для ремонтных корпусов. Как правило, механические повреждения представляют собой продольное нарушение сплошности покрытия в виде глубокой риски, царапины или задиров, длиной от нескольких сантиметров до нескольких метров, направленное строго вдоль корпуса. Образование повреждений происходит при механическом контакте корпуса с обсадной колонной, либо сопутствующим оборудованием во время проведения СПО.

Следующий механизм разрушения является следствием воздействия агрессивных компонентов транспортируемой среды и обусловлен их проникновением через слой покрытия к металлу корпуса с последующим образованием и ростом продуктов коррозии под покрытием, что приводит к увеличению внутренних напряжений, нарушению адгезионных связей и последующему отслаиванию покрытия.

Часть отказов корпусов ПЭД не связана напрямую с условиями эксплуатации, а является следствием производственного брака изделий. При нарушении технологии нанесения, отсутствии контроля качества выполненных работ и приёмосдаточных испытаний неизбежно возникают дефекты, способные привести к разрушению покрытия или снизить его барьерные свойства.

На основании проведенного анализа были классифицированные основные причины разрушения покрытий, объединенные в три базовых блока (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Классификация причин разрушения покрытий

Методика проведения лабораторных исследований разрабатывалась в соответствии с классификацией причин повреждений покрытий и содержит в себе три базовых блока испытаний (рисунок 4.2) [89, 90].

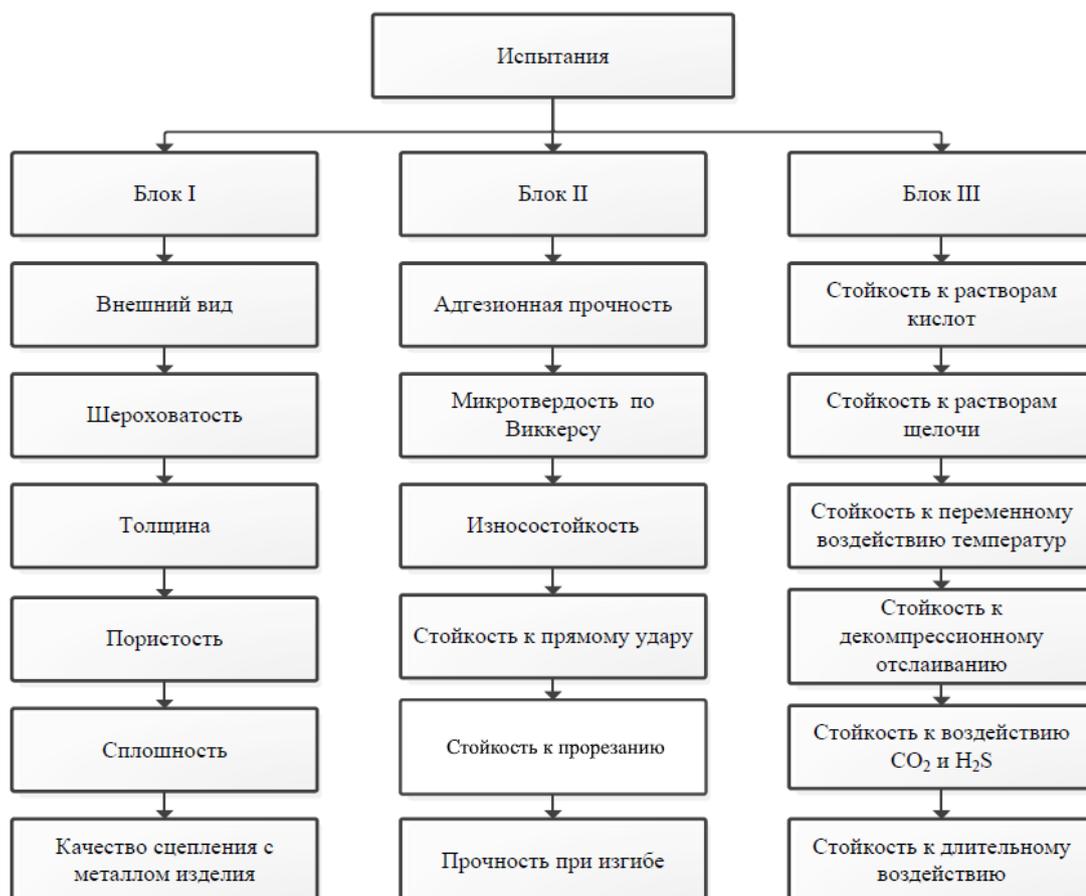


Рисунок 4.2 – Структура методов испытаний

Комплекс испытаний металлизационных покрытий представлен методами контроля основных физических, механических, физико-механических и трибологических свойств металлизационных покрытий в исходном состоянии и их изменение после моделирования эксплуатационных воздействий.

В первом блоке представлены методики по контролю технологических показателей покрытия в исходном состоянии: оценка внешнего вида покрытия, его физических свойств и структурного состояния, включающих определение шероховатости, толщины покрытия, пористости, сплошности и качества сцепления с металлом подложки.

Второй блок испытаний представлен методами, определяющими стойкость покрытий к внешним механическим воздействиям. Блок состоит из методов, определяющих качественные и количественные характеристики

адгезионной прочности, микротвердости, абразивной стойкости, стойкости к прямому удару и прорезанию.

Третий блок испытаний включает методы ускоренных испытаний в модельных средах для оценки защитных свойств металлизационных покрытий, таких как воздействие кислот и щелочей, длительное воздействие водных растворов, воздействие переменных температур, перепадов давления и агрессивных сред с высоким содержанием  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ .

При выборе конкретных методик испытаний были проанализированы отечественные и зарубежные стандарты на испытания покрытий различного типа. Изучены технические условия производителей изделий с покрытием, а также литературные данные по исследованию металлизационных покрытий. На основании проведенной работы были выбраны конкретные методики проведения испытаний. В таблице 4.1 приведена сводная таблица с описанием методов испытания и нормативных документов.

Таблица 4.1 – Методы испытания покрытий

№	Параметр	НД на метод	Примечание
Блок I			
1	Внешний вид	ГОСТ 9.407	Защитные свойства
2	Шероховатость	ГОСТ 2789	При наличии нескольких слоев измерение производится на внешнем слое
3	Толщина	ГОСТ 31993	С указанием суммарной толщины и толщины каждого слоя
4	Пористость	-	Металлографический
5	Сплошность	-	Металлографический
6	Качество сцепления с металлом подложки	-	Металлографический
Блок II			
7	Адгезионная прочность	ГОСТ 32299	Методом нормального отрыва
8	Микротвердость	ГОСТ 2999	По Виккерсу
9	Износостойкость	ГОСТ 23.208	Трение о не жестко закрепленные абразивные частицы
10	Стойкость к прямому удару	ГОСТ Р 51164	-
11	Стойкость покрытия к прорезанию	ОТТ-25.220.01-КТН-054-15	Воздействие конусного резца под нагрузкой
12	Стойкость покрытия при изгибе	ГОСТ Р 58346	-

Блок III			
13	Стойкость к растворам кислот	ГОСТ 9.403	10 % раствор HCl в воде
14	Стойкость к растворам щелочи	ГОСТ 9.403	10 % раствор NaOH в воде
15	Стойкость к длительному воздействию	ГОСТ 9.403	5 % раствор NaCl в воде
16	Стойкость к переменному воздействию температур	ГОСТ 27037	От минус (40 ± 3) до плюс (60 ± 3)
17	Стойкость к декомпрессионному отслаиванию	ГОСТ Р 58346	Среда: 5 % р-р NaCl в воде и газовая фаза 5 МПа CO <sub>2</sub> + 5 МПа N <sub>2</sub> , при температуре 90 °С
18	Стойкость к воздействию CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S	ГОСТ Р 58346	Среда: 5 % р-р NaCl в воде и газовая фаза: а) 4 МПа CO <sub>2</sub> + 6,0 МПа N <sub>2</sub> ; б) 0,5 МПа H <sub>2</sub> S + 9,5 МПа N <sub>2</sub> . Испытания проводятся при температурах 90 °С и/или 120 °С

Практическая реализация разработанной комплексной методики лабораторных испытаний осуществлялась на образцах-свидетелях в виде стальных пластин с нанесенным методами ЭДМ и ВСГПН металлизационным покрытием (10 различных типов), поскольку, было установлено, что влияние геометрического фактора на коррозионные процессы в лабораторных условиях отсутствует. Практическое применение комплексной методики лабораторных испытаний свидетельствует о возможности корректного моделирования разрушающего воздействия основных осложняющих факторов.

После воздействия модельных сред оценивается динамика изменения физико-механических и антикоррозионных свойств, производится определение адгезионной прочности методом нормального отрыва, качество сцепления с металлом и глубина коррозионных повреждений покрытия металлографическим методом.

подавляющее большинство методов испытаний являются универсальными и могут применяться для оценки как полимерных, так и металлизационных покрытий. Тем не менее, в каждом блоке испытаний присутствуют методы, применение которых в силу химических, физических,

механических и структурных особенностей целесообразно только для оценки свойств металлизационных покрытий. В первую очередь это касается металлографических методов оценки толщины, пористости и других структурных особенностей покрытия. Так, для полимерных покрытий достаточно достоверным является неразрушающий метод контроля толщины. В то время как для металлизационных покрытий более достоверным является металлографический метод. Это обусловлено тем, что значительная шероховатость поверхности металлизационных покрытий не позволяет получать корректные данные, поскольку параметр шероховатости, как известно, в значительной степени влияет на магнитное поле, создаваемое приборами неразрушающего контроля.

Методы определения микротвердости [84] и износостойкости [85] могут быть применимы только к металлизационным покрытиям. В первом случае применение метода определения микротвердости [84] для полимерных покрытий затруднено поскольку зачастую разрушение покрытия наступает раньше, чем появляется значительная пластическая деформация. Для полимерных покрытий предусмотрены иные методы контроля твердости, например: по методу Бухгольца [91], по методу Шора [92], твердость по карандашу [93]. Условия проведения испытаний для оценки износостойкости покрытия [85] путем трения о не жестко закрепленные абразивные частицы определяются микротвердостью покрытия, что в данном случае также применимо только для металлизационных покрытий.

В основу предложенной методики автоклавных коррозионных испытаний была положена методика испытаний внутренних антикоррозионных покрытий насосно-компрессорных труб, которая на сегодняшний день активно применяется при испытаниях и легла в основу ГОСТ 58346-2019 [94]. По результатам исследований автоклавные тесты, применяемые для испытания внутренних антикоррозионных покрытий насосно-компрессорных труб, конгруэнтны по отношению к металлизационным покрытиям, применяемым в скважинных условиях, и

корректно моделируют разрушения, наблюдаемые в процессе эксплуатации [95, 96]. Принципиальное различие методик заключается в параметрах проведения испытаний, а также в методах оценки результатов испытаний. В отличие от методики, разработанной для оценки барьерных свойств внутренних полимерных покрытий [97], испытания металлизационных покрытий рекомендуется проводить при более высоких значениях давления и температуры, что в первую очередь обусловлено различной кинетикой проникновения среды через слой покрытия. Проникновение среды через слой полимерного покрытия может происходить по механизму либо фазовой, либо диффузионной проницаемости. В первом случае происходит установление потока газа через сквозные капилляры, во втором протекают процессы сорбции газа полимерной основой покрытия и диффузии молекул газа через толщу материала. Для полимерных покрытий граничные условия температурного режима автоклавных испытаний определяются в первую очередь температурой стеклования покрытия. Согласно [98], разрушающее воздействие на полимерные покрытия достигается при проведении испытаний при температуре ниже температуры стеклования примерно на 10 °С, что в первую очередь обусловлено фазовым состоянием полимерного покрытия, гибкостью полимерной цепи и характером межмолекулярных взаимодействий.

Проникновение компонентов среды через слой металлизационного покрытия имеет как не диффузионный, так и диффузионный характер. Способность покрытия противостоять воздействию среды в первую очередь определяются физическими свойствами покрытия (толщина, плотность, пористость и др.). Повышение температуры и давления испытаний связано с влиянием данных параметров на скорость коррозии, а именно ее увеличение. Очевидно, скорость коррозии значительно возрастает с повышением давления и температуры. Однако, необходимо отметить, что это утверждение применимо для монолитного металла. Известно, что на скорость коррозии в значительной степени влияют так называемые внутренние факторы,

характеризующие качество используемых изделий – это химический состав, микроструктура, состояние поверхности металла. Металлизационное покрытие в данном случае является более уязвимым к коррозии. Это обусловлено в первую очередь такими особенностями, как значительная неоднородность структуры, распределения легирующих элементов, наличие оксидных прослоек, расположенных по границам сплавления частиц.

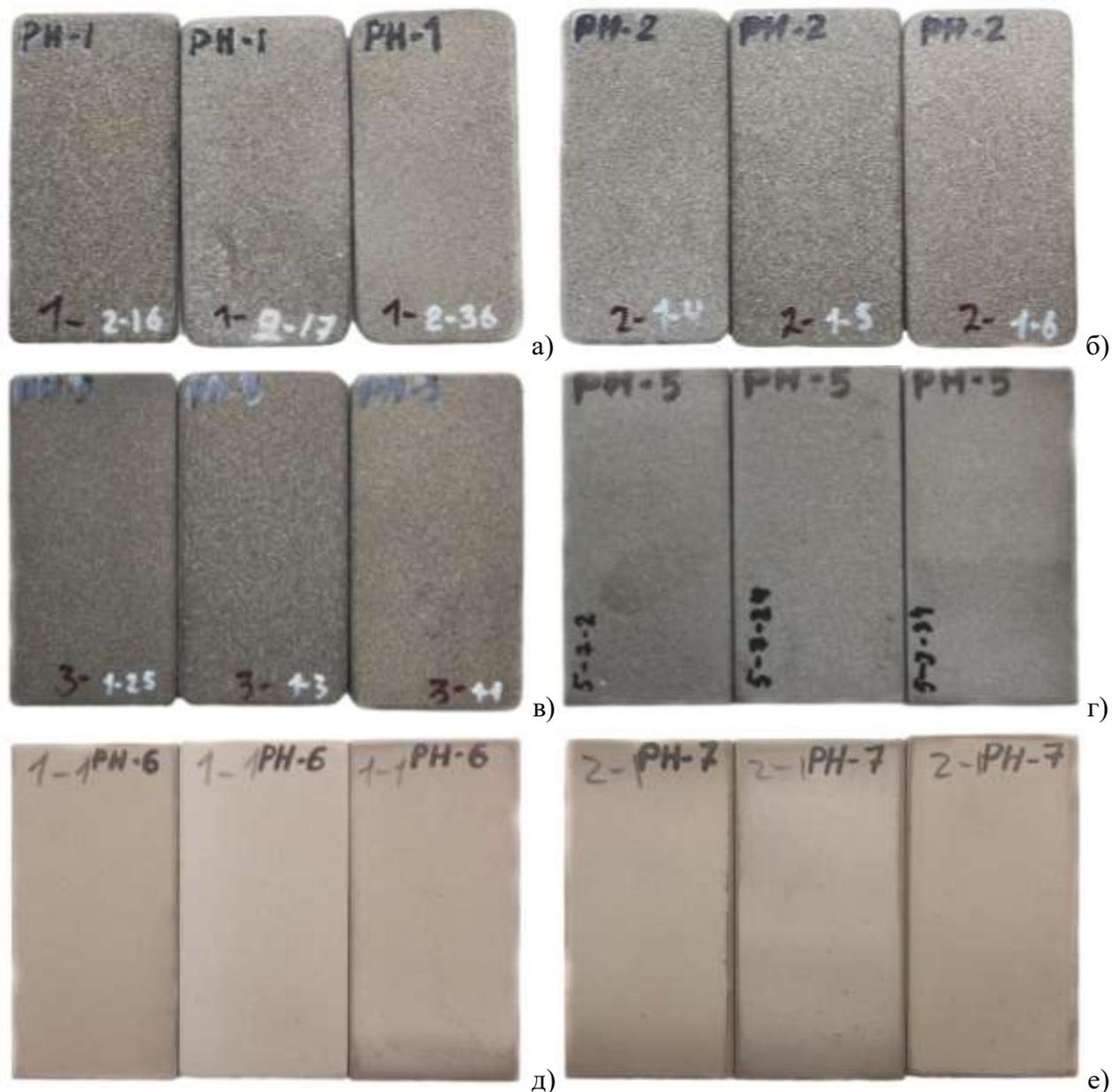
Еще одной отличительной особенностью автоклавных испытаний металлизационных покрытий является использование стеклянного стакана, исключающего контакт металлизационных покрытий со стенками и металлической оснасткой лабораторного автоклава как непосредственно, так и через электролит.

#### **4.2 Результаты проведения лабораторных испытаний металлизационных покрытий, используемых для защиты ПЭД**

В ходе диссертационной работы было исследовано более 500 образцов-свидетелей с нанесенным металлизационным покрытием. Ввиду большого объема полученной информации в диссертации графические материалы представлены только типовыми случаями.

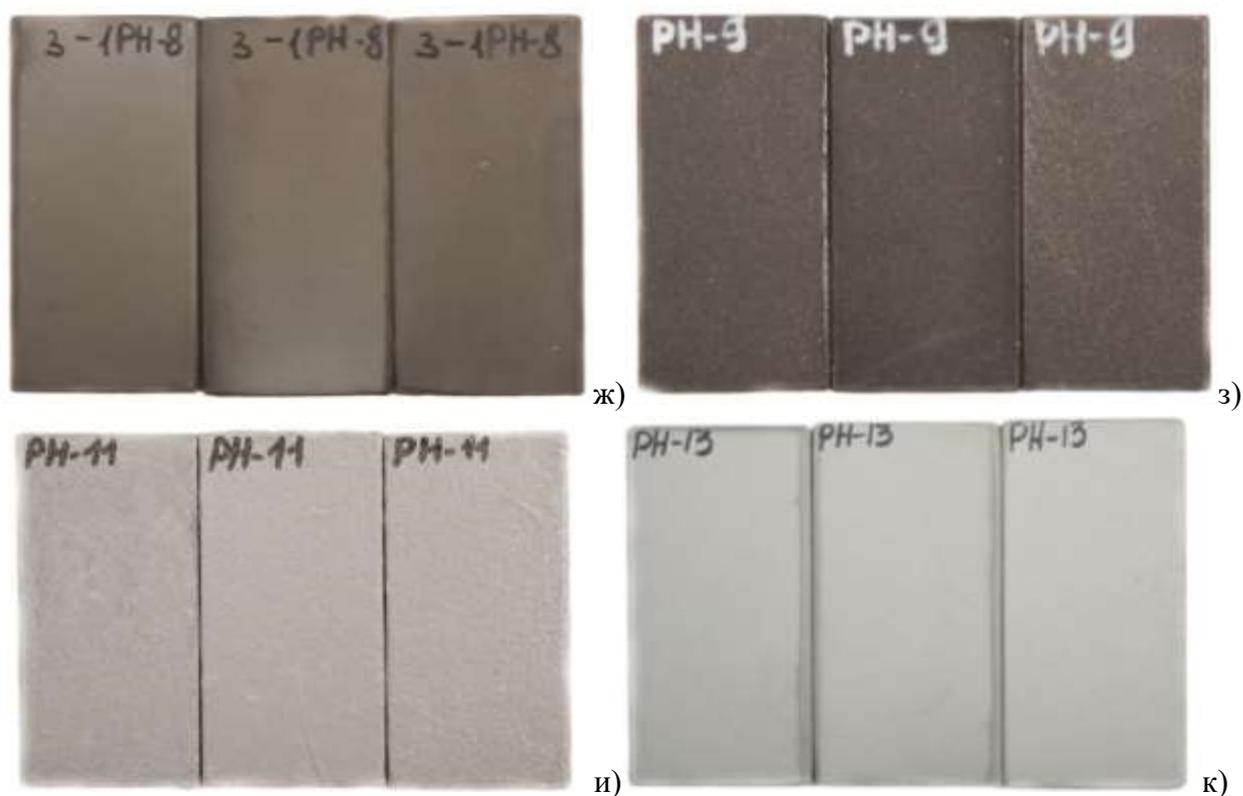
Все образцы-свидетели с нанесенным металлизационным покрытием обладают равномерной поверхностью, без наплывов, частиц нерасплавленного материала, нарушений сплошности (трещины, отслоения). По органолептическим свойствам сформированное металлизационное покрытие образцов-свидетелей имеет различную степень шероховатости, максимальной шероховатостью поверхности обладает покрытие, нанесенное методом ЭДМ. Металлизационное покрытие всех образцов-свидетелей (за исключением образца РН-11 с дополнительным слоем эпоксидной пропитки) имеет характерный для него серый металлический цвет (с различным оттенком). Покрытие РН-11 представляет собой систему, состоящую из основного слоя металлизационного покрытия с дополнительно нанесенным слоем эпоксидной пропитки. Система антикоррозионной защиты образцов

РН-11 обладает сплошной однородной поверхностью, неравномерность слоя эпоксидной пропитки обусловлена выраженной шероховатостью поверхности слоя металлизационного покрытия. Внешний вид металлизационного покрытия различных производителей представлен на рисунке 4.3.



а) РН-1; б) РН-2; в) РН-3; г) РН-5; д) РН-6; е) РН-7

Рисунок 4.3 – Внешний вид образцов-свидетелей различных производителей



ж) РН-8; з) РН-9; и) РН-11; к) РН-13

Рисунок 4.3 – Внешний вид образцов-свидетелей различных производителей

Нанесенное различными методами газотермического напыления металлизационное покрытие исследуемых образцов-свидетелей обладает значительным разбросом по толщине слоя и шероховатости покрытия (рисунок 4.4; таблица 4.2).

Толщина слоя металлизационного покрытия является важным параметром, влияющим как на механические, так и на коррозионные свойства металлизационных покрытий. В первом случае большую роль играют остаточные напряжения в покрытии, уровень которых растет с увеличением толщины покрытия [57]. Уровень остаточных напряжений может превышать уровень прочности сцепления элементов покрытия, способствуя его растрескиванию. Несмотря на негативное влияние остаточных напряжений, увеличение толщины в свою очередь оказывает влияние на структуру покрытия, а именно способствует уплотнению нижележащих слоев [99], что положительно сказывается на коррозионном поведении металлизационных

покрытий [100]. Низкая толщина покрытия в свою очередь способствует снижению барьерных свойств покрытия [88].

Среди исследуемых типов металлизационных покрытий минимальными значениями толщины обладают образцы-свидетели с покрытием, нанесенным методом ВСГПН (РН-6, РН-7, РН-8, РН-13), а также образцы с ЭДМ покрытием «монель-металл» (РН-9). Среднее значение толщины металлизационного покрытия перечисленных образцов-свидетелей не превышает 300 мкм (таблица 4.2). Максимальными значениями толщины слоя покрытия обладают образцы-свидетели с покрытием, нанесенным методом ЭДМ (РН-1, РН-11).

По результатам испытаний минимальные значения шероховатости характерны для металлизационного покрытия, нанесенного методом ВСГПН (таблица 4.2). Предпочтительным для металлизационного покрытия, используемого для защиты корпуса ПЭД, является низкая шероховатость поверхности покрытия. Это обусловлено, во-первых, минимизацией участков локального утонения покрытия, которое, как известно [88, 97], в значительной степени влияет на уровень барьерных свойств покрытия. Во-вторых, минимизацией площади взаимодействия при возникновении пар трения при проведении СПО.

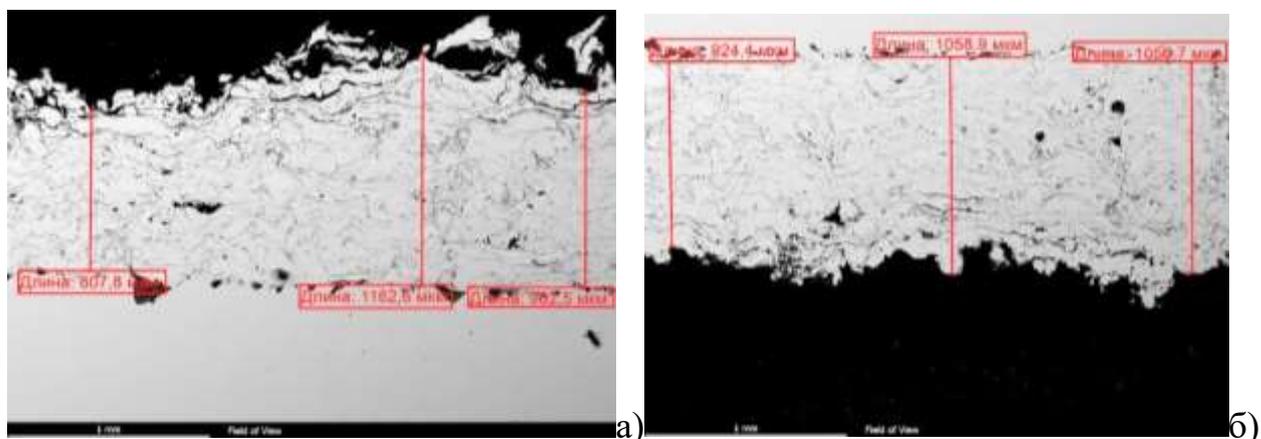


Рисунок 4.4 – Схема определения толщины слоя металлизационного покрытия. Образец РН-1 (а, б)

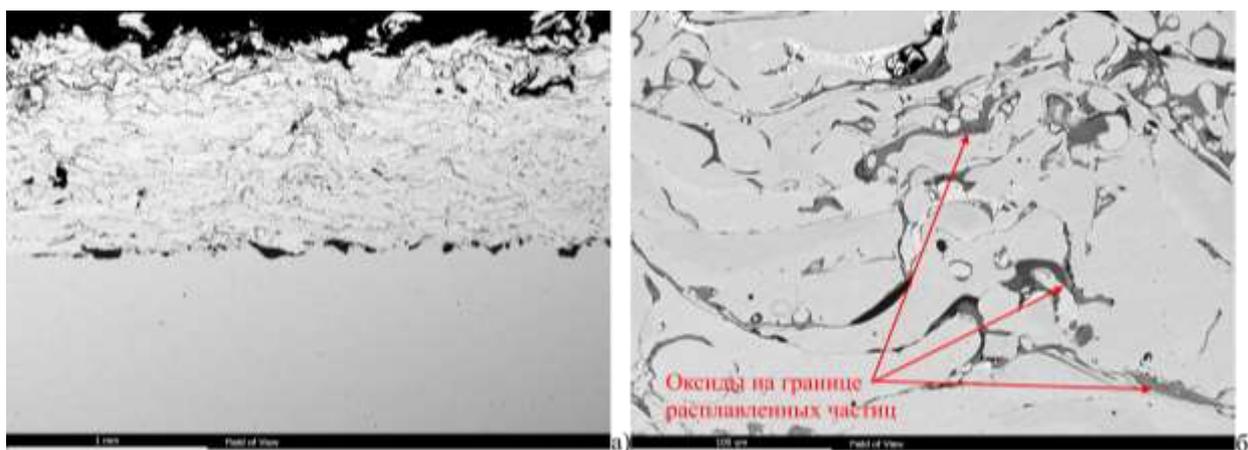
Таблица 4.2 – Результаты определения толщины и шероховатости  
металлизационного покрытия

Маркировка	Толщина, мкм (металлографический метод), мкм	Шероховатость покрытия $R_a$ , мкм
РН-1	925-1163 (1018)	29,75
РН-2	252-535 (387)	28,87
РН-3	315-771 (511)	30,40
РН-5	290-707 (502)	22,73
РН-6	163-312 (255)	9,35
РН-7	98,5-211 (172)	7,39
РН-8	103-256 (183)	5,05
РН-9	107-362 (259)	12,79
РН-11	705-1028 (879)	24,42
РН-13	96,9-165,0 (141,4)	8,37

Шероховатость поверхности является важным параметром, который влияет на трибологическое поведение поверхностей, например, сцепление неровностей или деформация могут увеличить трение. Считается, что шероховатость поверхности определяет скорость износа покрытия – гладкая поверхность испытывает меньшее трение и меньший износ, чем шероховатая [101, 102]. Это объясняется тем, что шероховатая поверхность склонна к разрушению путем выкрашивания поверхности трения [103]. Однако, по результатам лабораторных исследований такой закономерности не обнаружено.

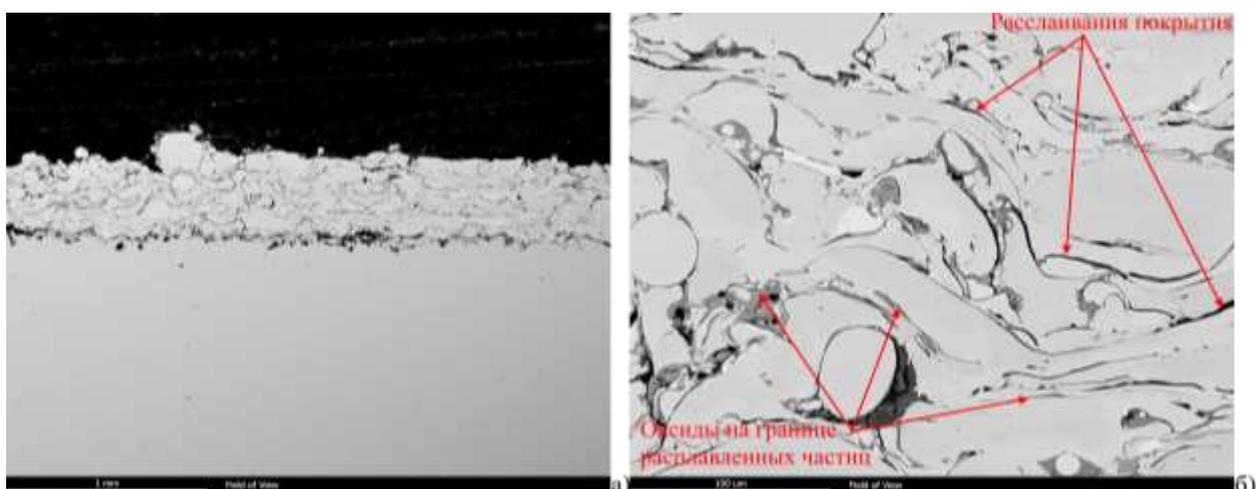
Металлизационное покрытие исследуемых образцов характеризуется различной морфологией строения. Микроструктура металлизационного покрытия образцов-свидетелей, нанесенного методом ЭДМ (РН-1, РН-2, РН-3, РН-5, РН-9 и РН-11), имеет классическое пластинчатое строение, в которой ламели в основном разделены слоем оксидной пленки разной толщины и химической природы. Значительная неоднородность структуры электродуговых металлизационных покрытий обусловлена высокой степенью окисления напыляемых частиц, которые в структуре представлены в виде темных прослоек (рисунок 4.5-4.10). Окисление частиц на дистанции напыления негативно влияет на когезионные и адгезионные свойства, снижая

прочность сцепления, что подтверждает наличие дефектов в виде расслаиваний покрытия в области локализации оксидных прослоек. Максимальная степень расслаивания характера для покрытия образцов РН-9 (монель-металл). Кроме того, окисление частиц негативно сказывается на коррозионной стойкости ввиду высокой пористости образованного на дистанции напыления оксида [104-106]. В структуре покрытия образцов-свидетелей РН-1, РН-2, РН-3, РН-9 присутствуют частицы нерасплавленного материала, что говорит о том, что тепло, выделяемое электрической дугой, недостаточно, чтобы расплавить проволоку. Для подавляющего большинства образцов-свидетелей характерно низкое качество подготовки поверхности – на поверхности металла выявлены включения абразивного материала, что, несомненно, отрицательно влияет на адгезионные свойства покрытия с металлом подложки. Элементный состав выявленных включений представлен Al, Si, Mg, Ca.



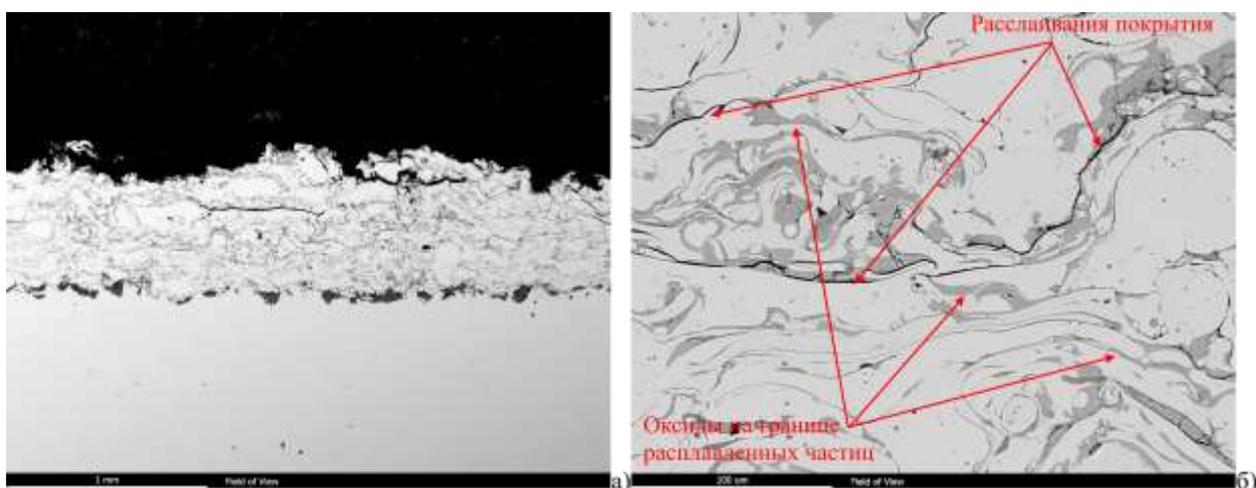
а) Увеличение x100; б) Увеличение x1000

Рисунок 4.5 – Микроструктура металлизационного покрытия РН-1



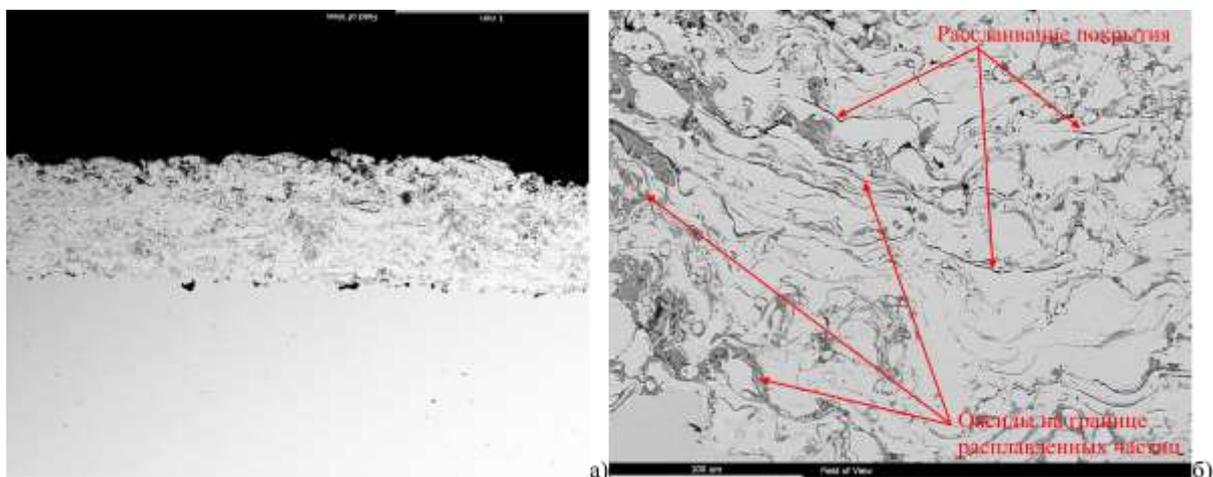
а) Увеличение x100; б) Увеличение x1000

Рисунок 4.6 – Микроструктура металлизационного покрытия РН-2



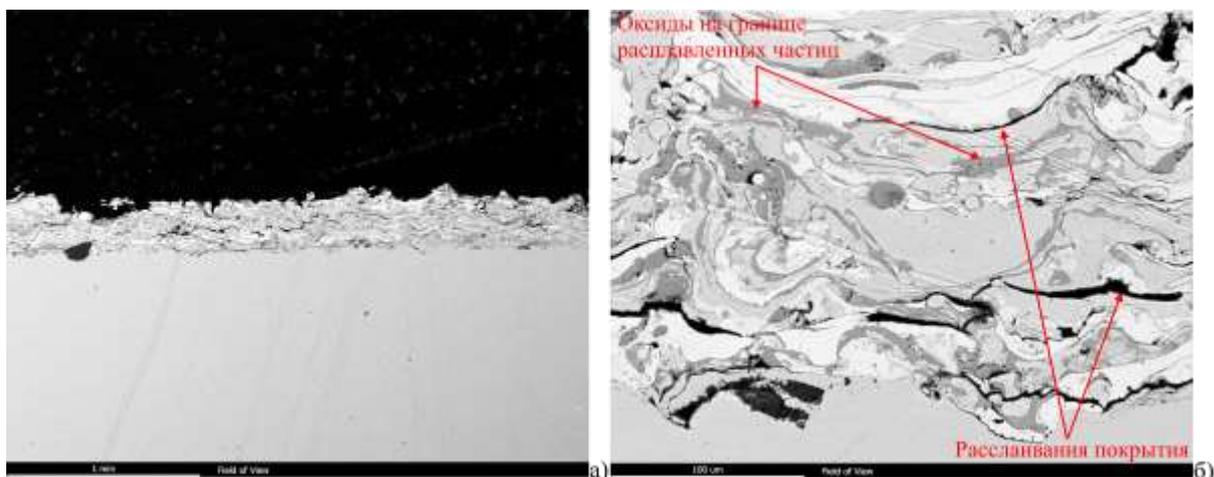
а) Увеличение x100; б) Увеличение x1000

Рисунок 4.7 – Микроструктура металлизационного покрытия РН-3



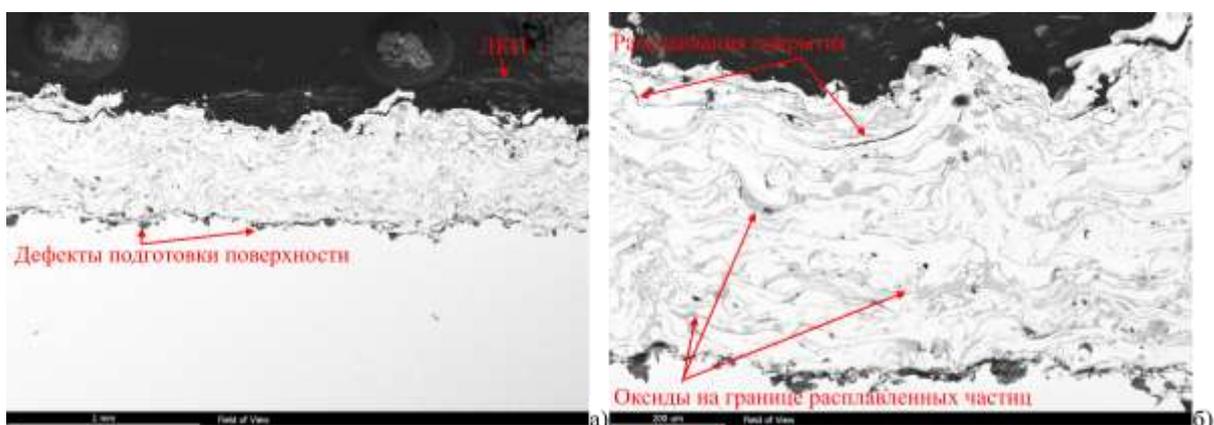
а) Увеличение x100; б) Увеличение x1000

Рисунок 4.8 – Микроструктура металлизационного покрытия РН-5



а) Увеличение x100; б) Увеличение x1000

Рисунок 4.9 – Микроструктура металлизационного покрытия РН-9



а) Увеличение x100; б) Увеличение x500

Рисунок 4.10 – Микроструктура металлизационного покрытия РН-11

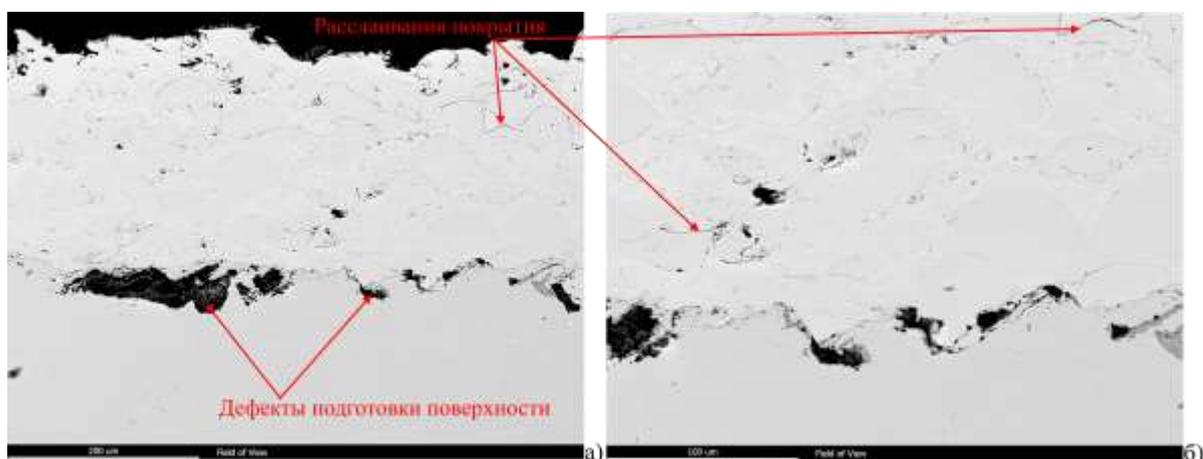
Металлизационные покрытия, нанесенные методом ВСГПН, обладают более благоприятным строением структуры. Для них характерно более плотное строение, а также минимальная степень окисления частиц или ее отсутствие (рисунок 4.11-4.14). Несмотря на отсутствие или минимальное окисление частиц напыляемого материала в структуре покрытий, нанесенным методом ВСГПН (РН-6, РН-7, РН-13) присутствуют расслаивания покрытия, наличие которых в данном случае обусловлено высоким уровнем остаточных напряжений. Остаточные напряжения в покрытиях связаны с условиями формирования слоя, их возникновение происходит между различными фазами

вследствие разницы в коэффициентах термического расширения или из-за образования новых фаз, имеющих линейные объемы [107].

Все металлизационные покрытия, нанесенные методом ВСГПН, имеют различное строение структуры. Для образцов-свидетелей РН-6 и РН-13 характерна низкая степень расплавления напыляемых частиц (рисунок 4.11-4.14). Металлизационное покрытие образцов РН-7 состоит из полностью деформированных частиц (рисунок 4.12). Структура покрытия РН-8 имеет более сложное строение (рисунок 4.13). Здесь в однородной матрице легкоплавких компонентов равномерно расположены сферические частицы более тугоплавкого компонента – карбида вольфрама.

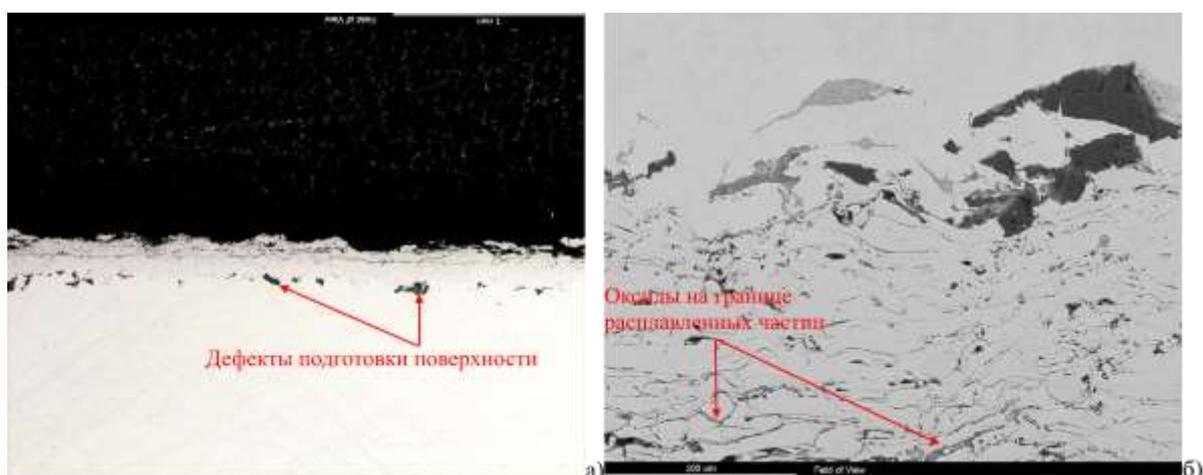
Металлизационное покрытие на основе карбида вольфрама – РН-8 по размеру частиц можно отнести к средне- и высокодисперсным системам.

Менее благоприятной структурой среди металлизационных покрытий, нанесенных методом ВСГПН, обладает покрытие на основе никеля (РН-13) – в структуре покрытия выявлены многочисленные расслоения, локализованные по границе сплавления частиц (рисунок 4.14). Такое структурное состояние при достаточно низкой толщине слоя покрытия заведомо исключает удовлетворительные результаты определения трибологических и антикоррозионных свойств.



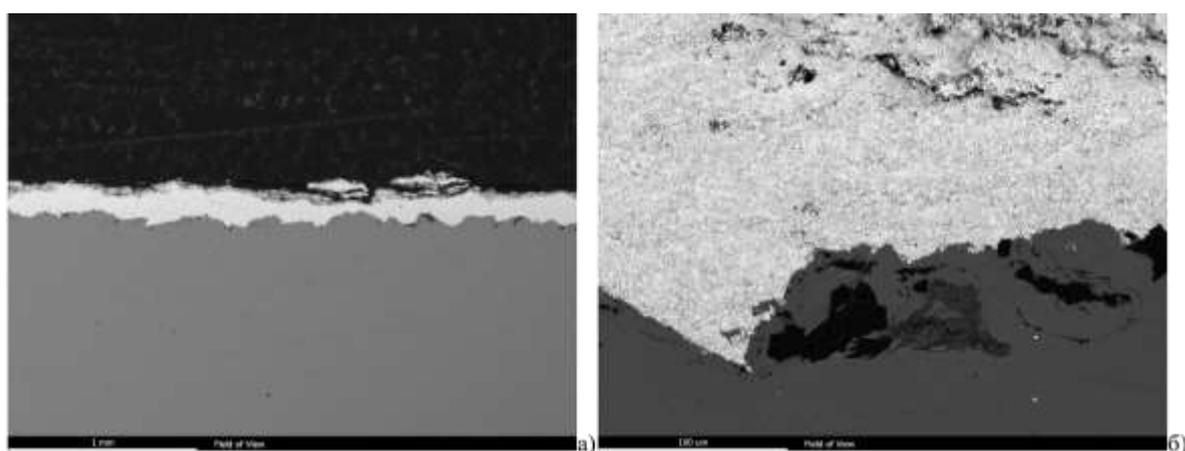
а) Увеличение x500; б) Увеличение x1000

Рисунок 4.11 – Микроструктура металлизационного покрытия РН-6



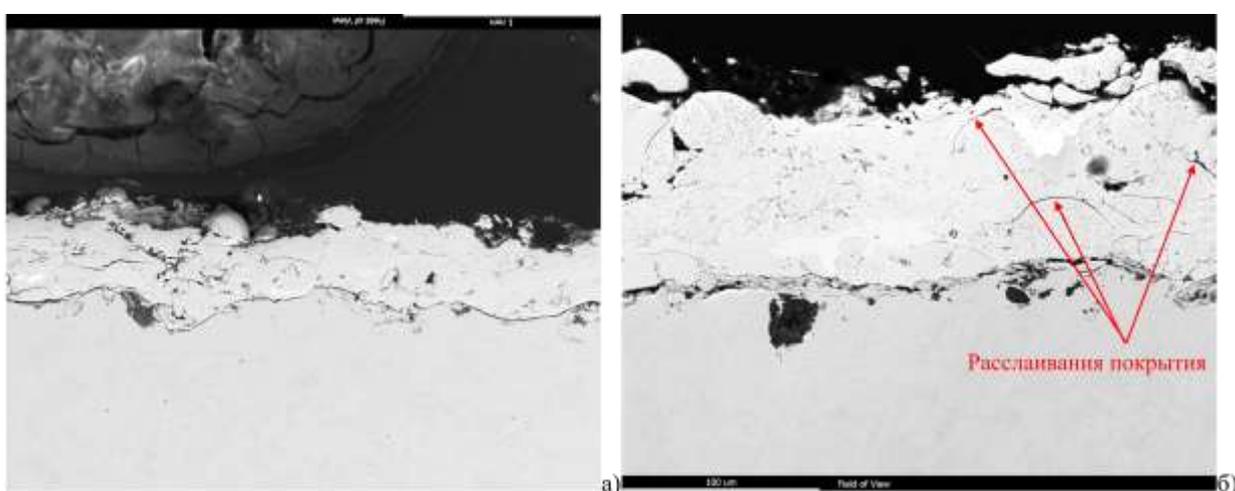
а) Увеличение x100; б) Увеличение x1000

Рисунок 4.12 – Микроструктура металлизационного покрытия РН-7



а) Увеличение x100; б) Увеличение x1000

Рисунок 4.13 – Микроструктура металлизационного покрытия РН-8



а) Увеличение x100; б) Увеличение x500

Рисунок 4.14 – Микроструктура металлизационного покрытия РН-13

По результатам металлографических исследований (таблица 4.3) все типы исследуемых металлизационных покрытий обладают низкой пористостью – не более 2 % в соответствии с эталонной шкалой [82]. Более критичным с точки зрения трибологических и коррозионных свойств является параметр сплошности слоя металлизационного покрытия, которые значительно ослабляют прочность сцепления и способствуют проникновению среды.

Таблица 4.3 – Результаты определения пористости, сплошности и качества сцепления металлизационного покрытия

Параметр/ маркировка	РН-1	РН-2	РН-3	РН-5	РН-6	РН-7	РН-8	РН-9	РН-11	РН-13
Пористость (среднее), %	2,00	0,50	0,50	0,50	0,50	0,25	0	0,50	1,00	0,50
Сплошность <sup>1</sup>	Н	Н30	Н	Н30	Н30	Н	О	Н	Н	Н
Качество сцепления	Без нарушения адгезионных связей									
Примечания: 1 – Н – нарушение когезионных связей, более 30 % от длины шлифа; О – трещины отсутствуют; Н30 – нарушения когезионных связей менее 30 % от длин шлифа.										

Второй блок испытаний состоит из методов, определяющих качественные и количественные характеристики механических, физико-механических и трибологических свойств покрытия: адгезионная прочность, микротвердость, абразивная стойкость, стойкость к прямому удару и прорезанию.

Адгезионная прочность металлизационных покрытий, нанесенных методом ВСГПН, выше значений прочности покрытий, нанесенных методом ЭДМ (таблица 4.4). Максимальными значениями адгезионной прочности обладает покрытие на основе карбида вольфрама (РН-8). Металлизационное покрытие образцов РН-8 имеет не только хорошие адгезионные свойства, но и когезионные – отрыв «заготовки» произошел между клеем и «заготовкой». Кроме того, как упоминалось выше, особое внимание необходимо уделять состоянию поверхности металла под покрытием. Низкие значения

адгезионной прочности образцов-свидетелей РН-1÷РН-5 (нанесенных методом ЭДМ) с соответствующим адгезионным характером отрыва покрытия от металла подложки в первую очередь обусловлены наличием включений абразивного материала на поверхности металла.

Для металлизационного покрытия РН-9 (монель-металл) характерно следующее: при недостаточно удовлетворительном качестве подготовки поверхности покрытие демонстрирует высокие адгезионные свойства с металлом подложки, при этом наблюдаемый характер отрыва свидетельствует о его низкой когезионной прочности. Полученные результаты согласуются с результатами микроструктурных исследований, в ходе которых в структуре покрытия зафиксированы нарушения когезионных связей.

Таблица 4.4 – Результаты определения адгезионной прочности покрытия

Маркировка/ Испытание	Адгезионная прочность, МПа, (характер отрыва*)
РН-1	7 МПа (А/В)
РН-2	6 МПа (А/В)
РН-3	7 МПа (А/В)
РН-5	7 МПа (А/В)
РН-6	14 МПа (В)
РН-7	11 МПа (В)
РН-8	17 МПа (Y/Z)
РН-9	7 МПа (В)
РН-11	9 МПа (А/В)
РН-13	18 МПа (А/В)
Примечание: * - В соответствии с ГОСТ 32299-2013.	

Микротвердость определялась по всему сечению металлизационного покрытия образцов-свидетелей, таким образом, чтобы оценить твердость каждой фазы металлизационного покрытия.

Твердость покрытия зависит как от компонентного состава применяемых материалов, так и от способа нанесения покрытия. В данном случае невозможно сделать однозначный вывод о том, что твердость систем, нанесенных методом ВСППН, выше твердости покрытий, нанесенных методом ЭДМ. Это в первую очередь обусловлено типом применяемых материалов. Минимальной твердостью обладает покрытие «монель + нержавеющая сталь 08X18H10» (РН-9), нанесенное методом ЭДМ. Медь, как известно, является не самым твердым материалом, ее присутствие в составе монели обеспечивает плотность и сплошность покрытия, а также смазывающий эффект, благодаря чему покрытия имеет хорошие антифрикционные свойства и высокую износостойкость. Максимальное значение твердости имеет покрытие на основе карбида вольфрама (РН-8), нанесенного методом высокоскоростного напыления – 1275,3 HV<sub>0,1</sub>. Карбид вольфрама широко известный сплав, обладающий высокой твердостью и повышенными износостойкими свойствами. Напыление карбида вольфрама в связке с кобальтом и хромом позволяю получить коррозионностойкое покрытие.

Твердость долгое время считалась основным параметром, влияющим на трение и износ материалов. Согласно уравнению Арчарда для абразивного износа потеря объема на расстояние скольжения линейно пропорциональна приложенной нормальной нагрузке и обратно пропорциональна твердости. Такая закономерность наблюдается на образцах-свидетелях с максимальными и минимальными значениями твердости – РН-8 (1275,3 HV<sub>0,1</sub>) и РН-9 (266,9 HV<sub>0,1</sub>). По результатам испытаний лучшей износостойкостью обладает покрытие с максимальной твердостью, наихудшие результаты характерны для покрытия с минимальными значениями твердости (таблица 4.5). Однако существуют случаи, что материалы с меньшей твердостью обладают лучшей износостойкостью [108]. Очевидно, что интенсивность изнашивания связана не только с начальными характеристиками покрытия. В данном случае необходимо учитывать структурные характеристики покрытия (неоднородное

распределение фазовых составляющих, слоистое строение, наличие оксидных прослоек, пористость, снижающих когезионную прочность покрытия, и, следовательно, их износостойкость), а также особенности процессов поведения металла при воздействии контактных нагрузок (структурная устойчивость, склонность к наклепу, механизмы поверхностного разрушения) [109-111].

В исходном состоянии металлизационное покрытие практически всех образцов-свидетелей (за исключением покрытия РН-7 и РН-8) обладает неблагоприятной структурой – наблюдается интенсивное расслаивание поверхностных слоев покрытия, что в первую очередь обусловлено наличием оксидных прослоек. Окисление частиц на дистанции напыления, и, как следствие, низкая прочность сцепления расплавленных частиц материала покрытия является одной из причин неудовлетворительной износостойкости металлизационного покрытия. Воздействие абразивного материала в данном случае способствует ускоренному удалению материала поверхностных слоев покрытия [112].

Таблица 4.5 – Результаты определения шероховатости, износостойкости и микротвердости покрытия

Маркировка	Шероховатость покрытия $R_a$ , мкм	Потеря массы, $\Delta m$ (среднее), мг	Микротвердость покрытия, HV0,1
РН-1	29,75	64,6	497,7
РН-2	28,87	36,2	455,3
РН-3	30,40	24,6	321,6
РН-5	22,73	26,2	313,6
РН-6	9,35	71,5	663,1
РН-7	7,39	59,8	723,3
РН-8	5,05	6,7	1275,3
РН-9	12,79	85,3	266,9
РН-11	24,42	83,3	318,8
РН-13	831,3	31,2	22,1
Сталь 35	-	66,5	-

Для сравнения проводилось определение износостойкости металлических образцов, изготовленных из стали 35. Согласно полученным результатам, износостойкость покрытия на основе карбида вольфрама

практически в 10 раз превосходит износостойкость металлических образцов. Покрытия образцов-свидетелей РН-6, РН-9, РН-11 обладают меньшей износостойкостью по сравнению с металлическими образцами. Среднее значение потери массы покрытия РН-11 составляет 83,3 мг, при этом необходимо учитывать, что исследуемая система является двухслойной и основной износ приходится на слой эпоксидной пропитки. Следовательно, сравнивать полученные результаты с однослойными металлизационными покрытиями некорректно.

Аналогичным образом можно рассмотреть влияние твердости покрытия на стойкость к изгибу, при котором образец, установленный на две опоры, подвержен изгибающему усилию, вызывающему прогиб образца. Анализ результатов определения стойкости покрытия образцов-свидетелей РН-6÷РН-9 позволяет установить четкую зависимость – максимальное значение стрелы прогиба характерно для образцов с низкой твердостью (РН-9), минимальной для образцов с твердостью от 700 HV<sub>0,1</sub> и выше (РН-7, РН-8) (таблица 4.6). Явной зависимости в случае с металлизационными покрытиями образцов-свидетелей РН-1÷РН-5, РН-11, нанесенных методом ЭДМ, не наблюдается. Здесь можно отметить, что максимальное значение стрелы прогиба до разрушения покрытия характерно для покрытия с минимальным значением твердости покрытия (РН-5).

Таблица 4.6 – Результаты определения микротвердости и стойкости покрытия к изгибу

Маркировка	Микротвердость покрытия, HV <sub>0,1</sub>	Значение стрелы прогиба (среднее), мм
РН-1	497,7	13,0
РН-2	455,3	7,2
РН-3	321,6	9,3
РН-5	313,6	20,7
РН-6	663,1	8,2
РН-7	723,3	4,9
РН-8	1275,3	4,7
РН-9	266,9	24,0
РН-11	318,8	10,8
РН-13	831,3	10,4

Явной зависимости глубины прорезания при воздействии конусного резца под нагрузкой 50 кг от твердости покрытия не выявлено. Среднее значение глубины прорезания исследуемых систем находится примерно на одном уровне (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Результаты определения микротвердости и стойкости к прорезанию покрытия

Маркировка	Микротвердость покрытия, HV0,1	Глубина прорезания, мкм	Глубина прорезания, % от толщины
РН-1	497,7	81,1	8,0
РН-2	455,3	76,1	19,7
РН-3	321,6	78,3	15,7
РН-5	313,6	82,2	16,7
РН-6	663,1	75,3	29,5
РН-7	723,3	48,5	28,2
РН-8	1275,3	63,6	34,8
РН-9	266,9	86,6	33,4
РН-11*	318,8	-	-
РН-13	831,3	31,2	22,1

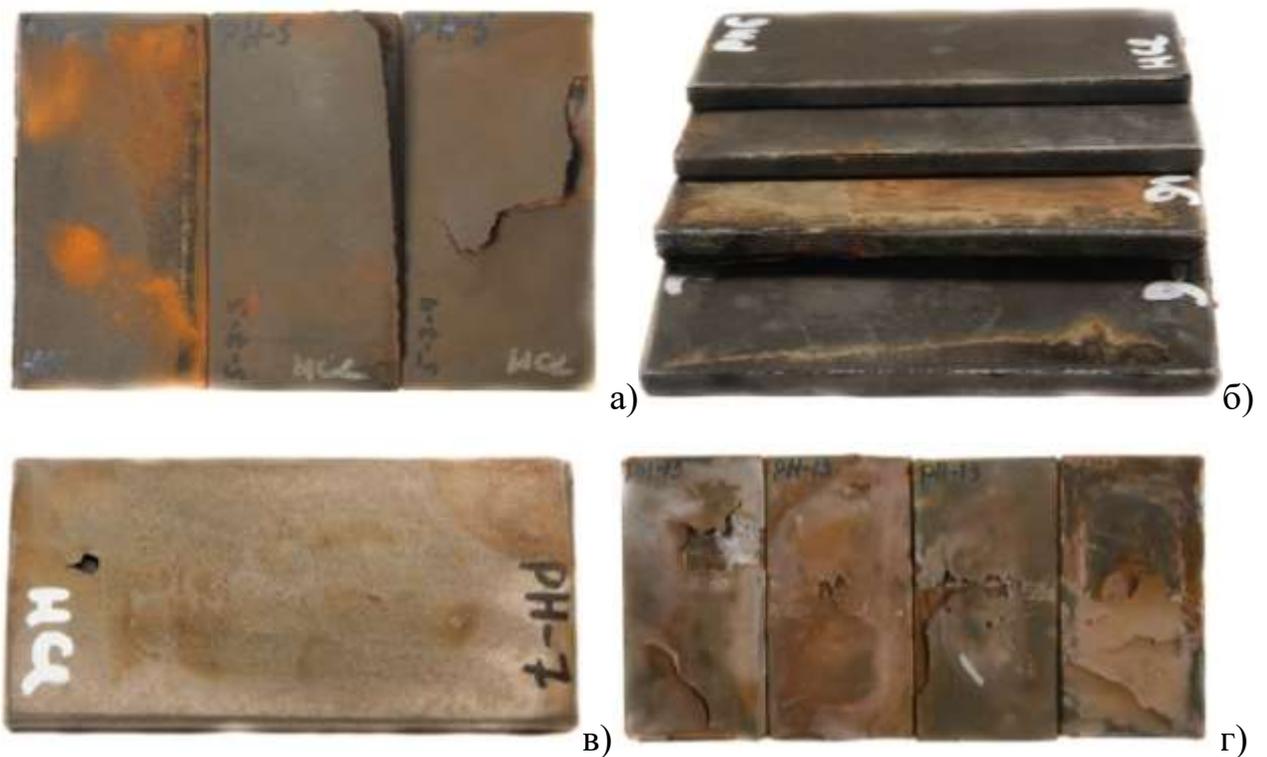
Примечание: \* - неполное прорезание слоя полимерной пропитки.

По результатам испытаний второго блока наиболее высоким уровнем механических свойств обладает покрытие на основе карбида вольфрама РН-8, нанесенное методом ВСППН. Заметно низким уровнем механических свойств характеризуется покрытие «монель-металл», нанесенное методом ЭДМ, что в первую очередь обусловлено свойствами применяемых материалов.

Третий блок испытаний предполагает проведение лабораторных выдержек образцов-свидетелей в средах, моделирующих скважинные условия: воздействие кислой среды, щелочной среды, воздействие минерализованных сред в том числе при повышенных давлении и температуре.

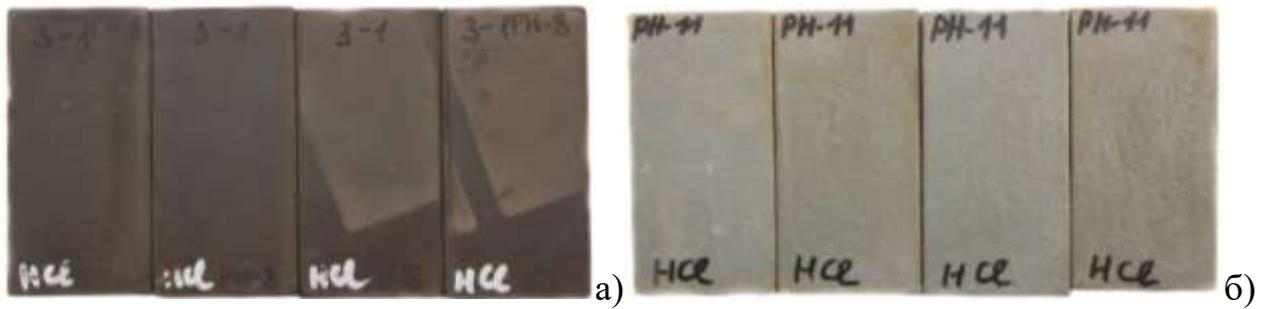
Выдержка образцов-свидетелей в кислой среде способствует окислению поверхности всех типов металлизационных покрытий, за исключением образцов-свидетелей РН-11 с нанесенным слоем эпоксидной пропитки (рисунок 4.15, 4.16). Кроме того, выдержка в кислой среде приводит к

образованию повреждений в виде отслаивания покрытий, нанесенных как методом ЭДМ (РН-5), так и методом ВСГПН (РН-6, РН-7, РН-13). Максимальной интенсивностью повреждений обладают образцы РН-5, РН-13 – наблюдается полное отслаивание защитного покрытия от поверхности металла. Поврежденность металлизационного покрытия образцов-свидетелей РН-7 проявляется в виде вздутий и отслаиваний покрытия на лицевой поверхности образцов-свидетелей. Отслаивание покрытия образцов-свидетелей РН-6 происходит по торцам, в данном случае имеет место краевой эффект.



а) РН-5; б) РН-6; в) РН-7; г) РН-13

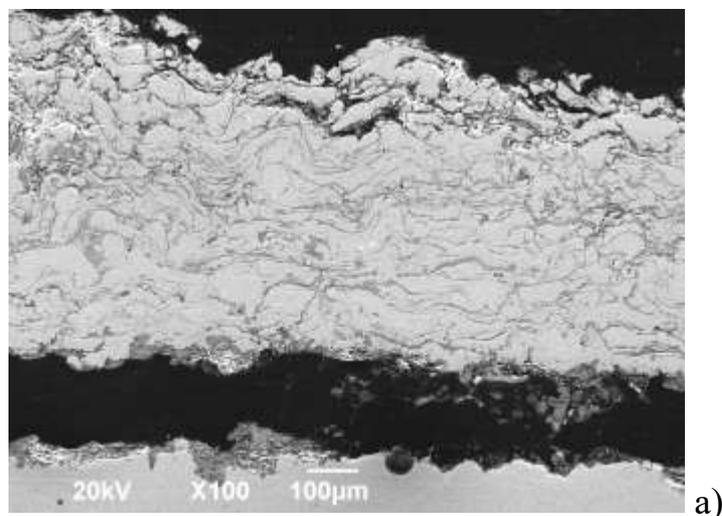
Рисунок 4.15 – Внешний вид образцов после выдержки в среде 10 %-го раствора HCl



а) РН-8; б) РН-11

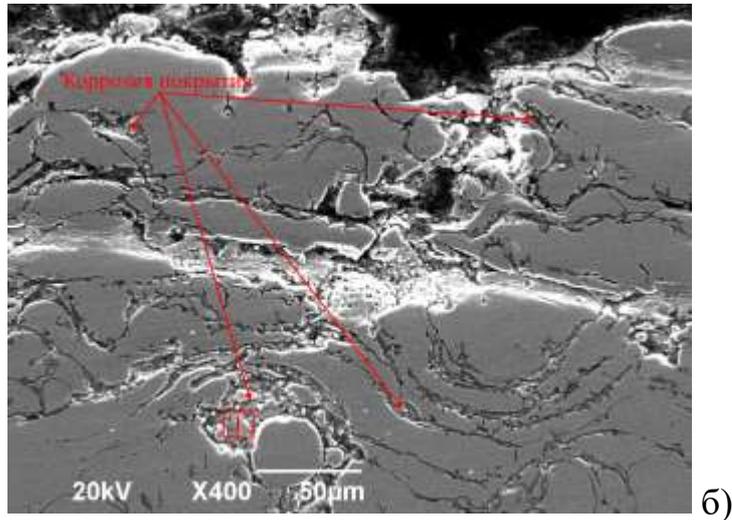
Рисунок 4.16 – Внешний вид образцов после выдержки в среде 10 %-го раствора HCl

По результатам микроструктурных исследований металлизационное покрытие образцов-свидетелей РН-1÷РН-5, РН-9 (нанесенных методом ЭДМ), а также РН-6, РН-7, РН-13 (нанесенных методом ВСГПН) показало неудовлетворительную стойкость к воздействию кислой среды 10 %-го р-ра HCl. Коррозионное разрушение металлизационного покрытия перечисленных образцов-свидетелей протекает по механизму электрохимического взаимодействия агрессивной среды с менее устойчивой фазой, которой в данном случае является оксидная прослойка (рисунок 4.17-4.19, таблицы 4.8-4.10).



а) Увеличение x100

Рисунок 4.17 – Микроструктура металлизационного покрытия РН-3 после выдержки в среде 10 %-го р-ра HCl



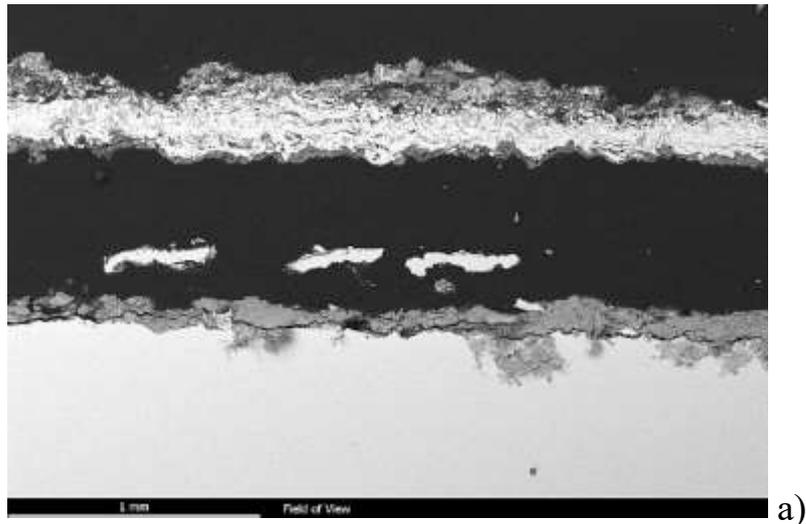
б) Увеличение x300

Рисунок 4.17 – Микроструктура металлизационного покрытия РН-3 после выдержки в среде 10 %-го р-ра HCl

Таблица 4.8 – Химический состав продуктов коррозии

Элемент/№ точки	C*	O	Al	Si	Cl	Cr	Fe	Ni	
1	Масс.%	36,92	15,93	0,16	0,16	0,18	10,97	31,76	3,92
	Ат.%	62,32	20,18	0,12	0,12	0,10	4,28	11,53	1,35

Примечание: \* в связи с использованием угольного напыления на плоскость шлифа, массовое содержание углерода может быть завышено.



а) Увеличение x100

Рисунок 4.18 – Микроструктура металлизационного покрытия РН-5 после выдержки в среде 10 %-го р-ра HCl



б)

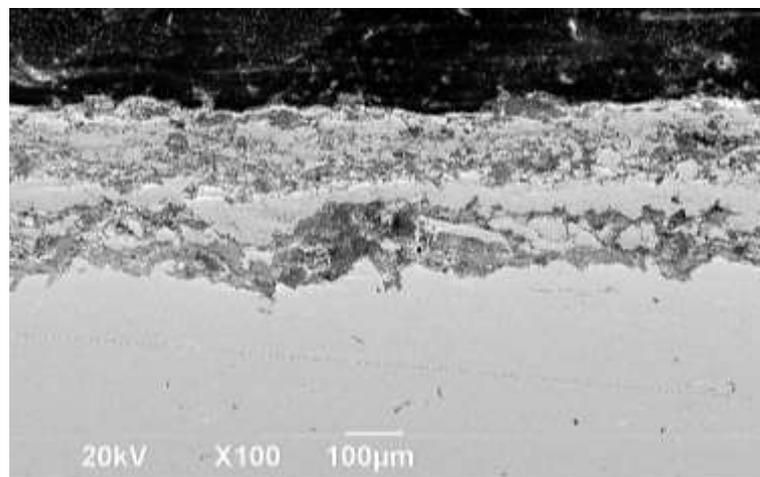
б) Увеличение x1000

Рисунок 4.18 – Микроструктура металлизационного покрытия РН-5 после выдержки в среде 10 %-го р-ра HCl

Таблица 4.9 – Химический состав продуктов коррозии

Элемент/№ точки		O	Cl	Cr	Fe	Ni
1	Масс.%	15,70	37,62	8,54	33,19	4,94
	Ат.%	34,02	36,77	5,69	20,60	2,92

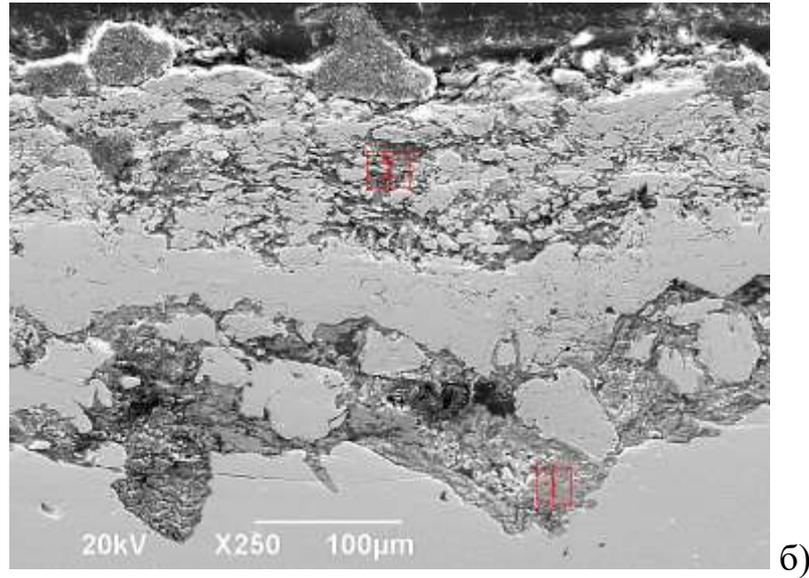
Примечание: \* в связи с использованием угольного напыления на плоскость шлифа, массовое содержание углерода может быть завышено.



а)

а) Увеличение x100

Рисунок 4.19 – Микроструктура металлизационного покрытия РН-7 после выдержки в среде 10 %-го р-ра HCl



б) Увеличение x250

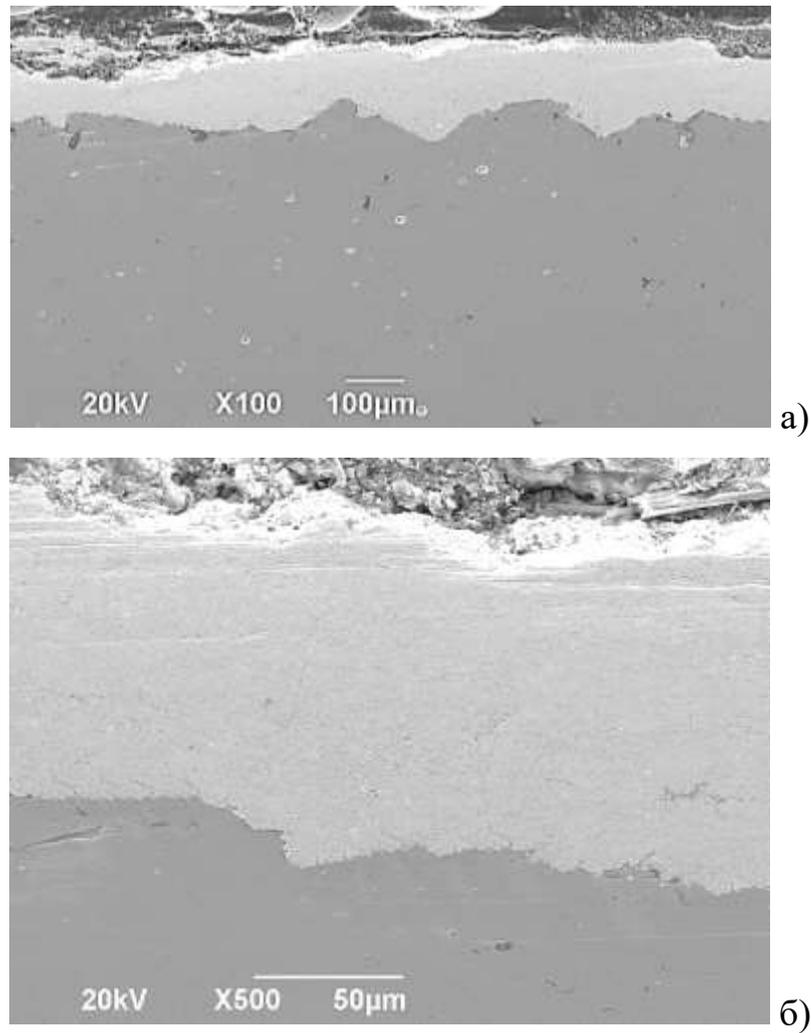
Рисунок 4.19 – Микроструктура металлизационного покрытия PH-7 после выдержки в среде 10 %-го р-ра HCl

Таблица 4.10 – Химический состав продуктов коррозии

Элемент/№ точки	C*	O	Al	Si	Cl	Cr	Fe	Ni	
1	<i>Масс.%</i>	19,82	36,95	3,45	0,27	1,92	0,58	36,99	—
	<i>Ам.%</i>	34,20	47,86	2,65	0,20	1,12	0,23	13,73	—
2	<i>Масс.%</i>	38,59	18,26	0,23	1,97	0,88	9,59	28,82	1,66
	<i>Ам.%</i>	61,95	22,00	0,16	1,35	0,48	3,56	9,95	0,54

Примечание: \* в связи с использованием угольного напыления на плоскость шлифа, массовое содержание углерода может быть завышено.

Металлизационное покрытие образцов-свидетелей PH-8 и PH-11 обладает удовлетворительными результатами – в структуре покрытия, а также на границе «металл-покрытие» повреждений коррозионного характера не выявлено (рисунок 4.20, 4.21). В случае покрытия, нанесенного методом ЭДМ, слой эпоксидной пропитки ограничивает доступ кислой среды к поверхности металлизационного покрытия, исключая возможность его окисления и последующего проникновения к поверхности металла.



а) Увеличение x100; б) Увеличение x500

Рисунок 4.20 – Микроструктура металлизационного покрытия РН-8 после выдержки в среде 10 %-го р-ра HCl

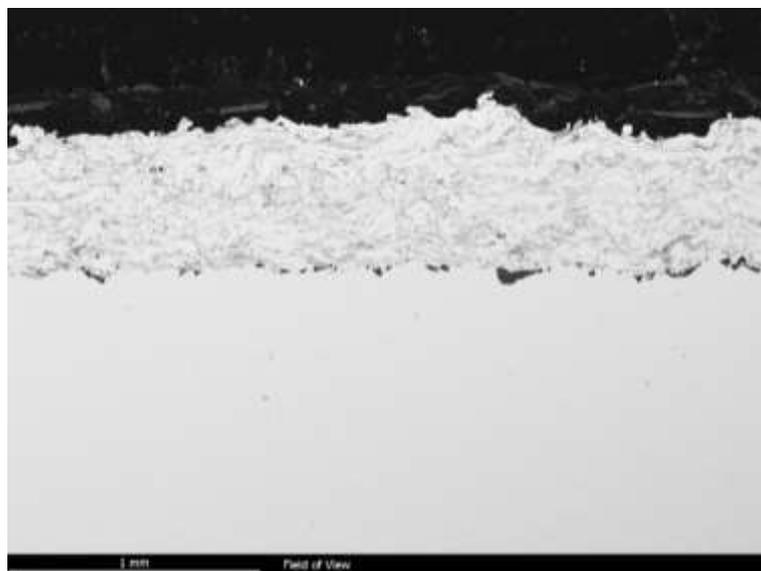
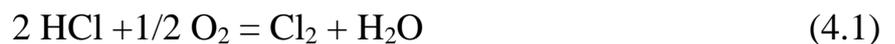


Рисунок 4.21– Микроструктура металлизационного покрытия РН-11 после выдержки в среде 10 %-го р-ра HCl. Увеличение x100

Коррозия покрытия на основе нержавеющей стали, легированной Cr, Ni, Mo – достаточно изученное явление, интенсивность которого во многом зависит от массового содержания легирующих элементов и микроструктуры покрытия. Известны случаи протекания коррозионных процессов в кислой среде HCl как при комнатной, так и при повышенных температурах [113, 114]. В общем случае механизм активного окисления состоит из нескольких этапов: формирование хлора на поверхности покрытия; проникновение хлора или ионов хлора через толщу покрытия, образование хлоридов из компонентов сплава покрытия и его последующее разрушение. Проникновение хлора через толщу покрытия может иметь как недиффузионный, так и электрохимический характер. В первом случае необходимо наличие открытой пористости или несплошностей в структуре покрытия. Во втором случае – является результатом взаимодействия хлора с оксидной прослойкой в структуре покрытия. В этом случае хлор образовывается в результате окисления HCl, катализируемого оксидами:



Как только Cl<sub>2</sub> сформировался он может диффундировать в оксидной прослойке по границе сплавления частиц к поверхности металла. Для исследуемых металлизационных покрытий возможны оба варианта или их комбинация. То есть на начальном этапе – это проникновение хлора через несплошности и дефекты к оксидной прослойке с последующим взаимодействием хлора с компонентами сплава. Интенсификация процесса проникновения среды через слой покрытия может быть обусловлена тем фактом, что оксидная прослойка, образованная на дистанции напыления частиц, как правило, является пористой и облегчает проникновение среды к поверхности металла.

Полученные результаты испытаний свидетельствуют о неудовлетворительной стойкости металлизационных покрытий, нанесенных методами ЭДМ и ВСПН, к воздействию кислой среды. Исключение составляют покрытия на основе карбида вольфрама, характеризующееся более

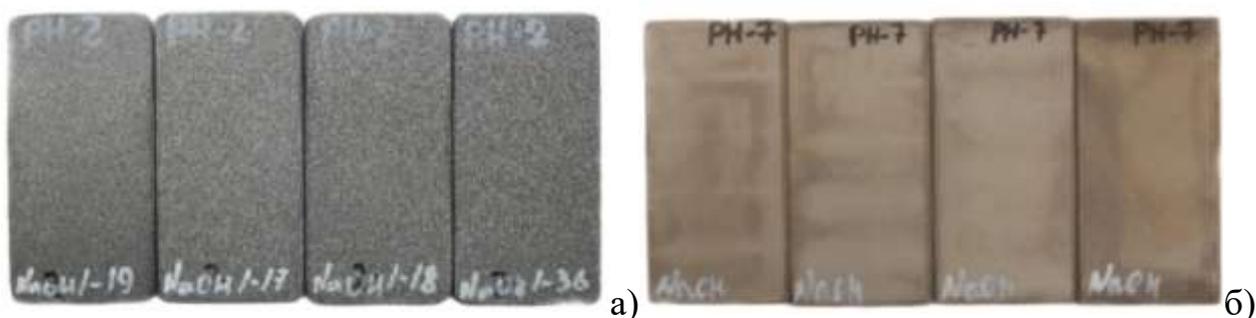
благоприятной структурой (однородная матрица с включениями карбидов), а также ЭДМ покрытие с дополнительным слоем эпоксидной пропитки, ограничивающем доступ среды к матрице покрытия и металлу.

Покрытие образцов-свидетелей РН-8 и РН-11 характеризуется отсутствием или незначительным снижением адгезионной прочности после воздействия кислой среды (таблица 4.11).

Таблица 4.11 – Результаты испытаний покрытия в среде 10 %-го р-ра HCl

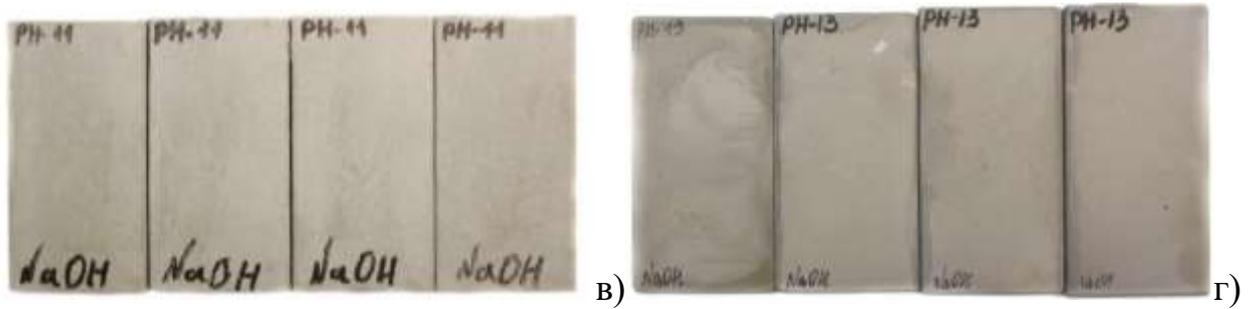
Маркировка	Внешний вид	$\sigma_0$ (среднее), МПа (характер отрыва)	$\sigma_1$ (среднее), МПа (характер отрыва)	Микроструктура
РН-8	Изменение цвета покрытия	17 МПа (Y/Z)	23 МПа (Y)	Коррозионные повреждения покрытия и металла под покрытием отсутствуют
РН-11	Без изменений	9 МПа (A/B)	7 МПа (A/B)	

Все исследуемые металлизационные покрытия могут быть рекомендованы к эксплуатации в щелочных средах. По результатам испытаний выдержка в щелочной среде 10 %-го раствора NaOH к образованию повреждений коррозионного характера и значительному снижению физико-механических свойств не привела (рисунок 4.22, 4.23; таблица 4.12).



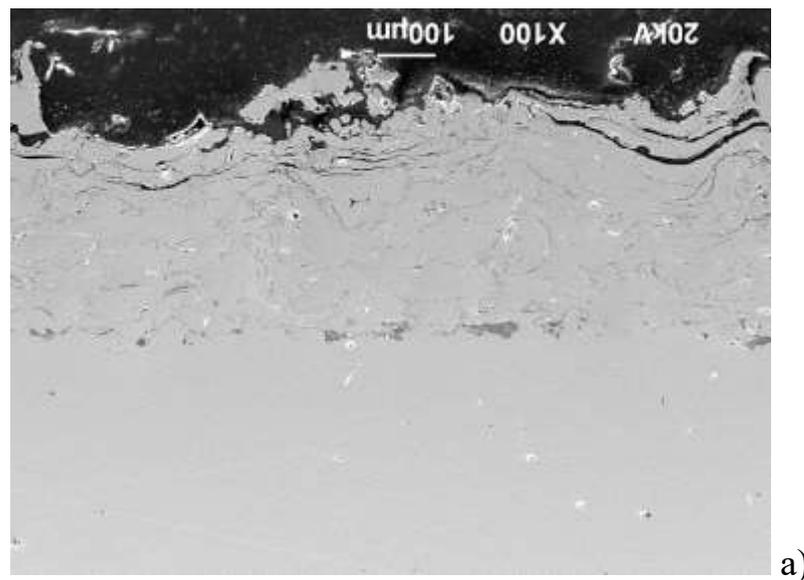
а) РН-2; б) РН-7

Рисунок 4.22 – Внешний вид образцов после выдержки в среде 10 %-го раствора NaOH:

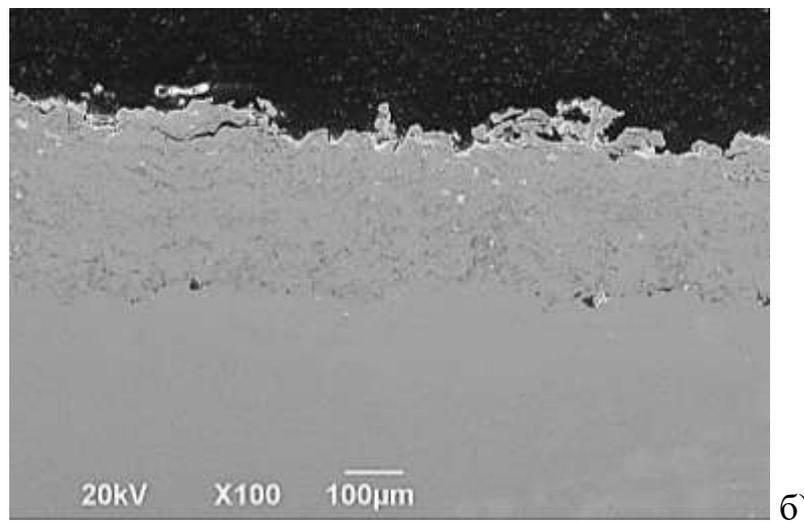


в) PH-11; г) PH-13

Рисунок 4.22 – Внешний вид образцов после выдержки в среде 10 %-го раствора NaOH:



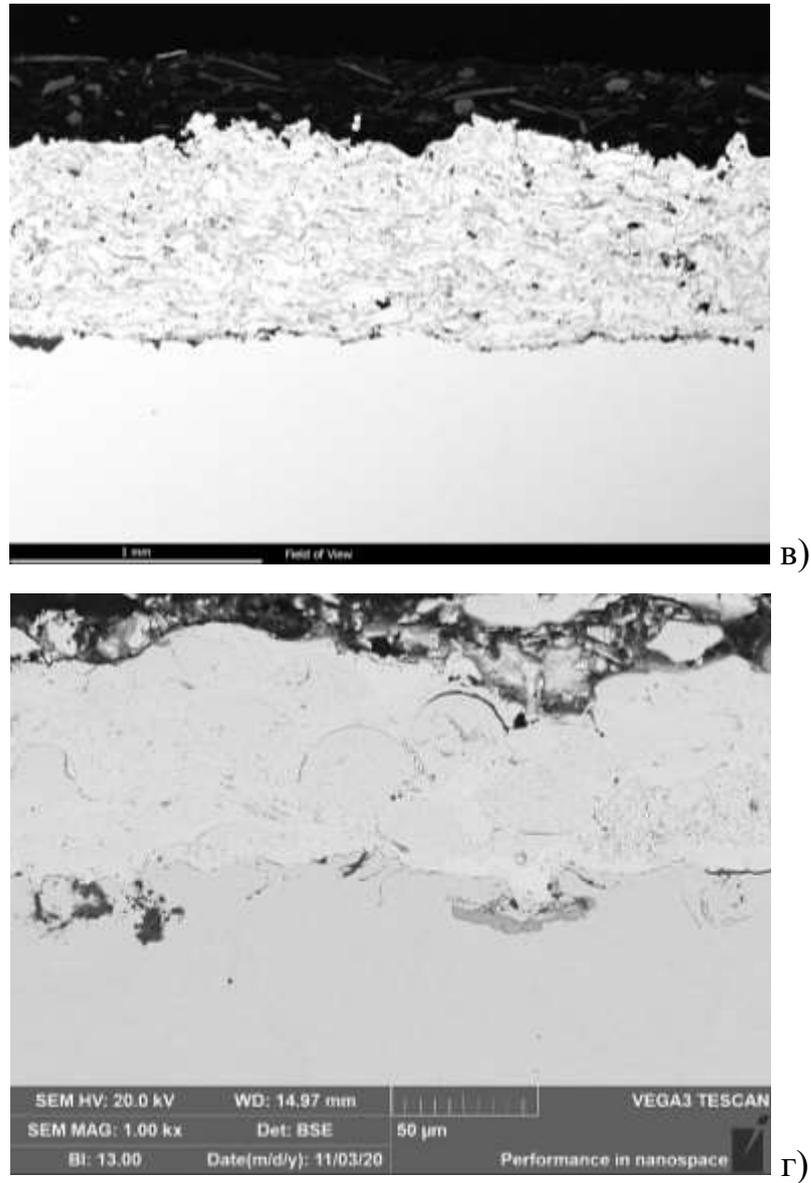
а)



б)

а) PH-2; б) PH-5

Рисунок 4.23 – Микроструктура металлизационного покрытия после выдержки в среде 10 %-го раствора NaOH



в) PH-11; г) PH-13

Рисунок 4.23 – Микроструктура металлизационного покрытия после выдержки в среде 10 %-го раствора NaOH

Таблица 4.12 – Результаты испытаний покрытия в среде 10 %-го р-ра NaOH

Маркировка	Внешний вид	$\sigma_0$ (среднее), МПа (характер отрыва)	$\sigma_1$ (среднее), МПа (характер отрыва)	Микроструктура
PH-1	Визуально- обнаруживаемых дефектов или повреждений металлизационного покрытия не выявлено	7 МПа (А/В)	8 (А/В)	Коррозионные повреждения отсутствуют
PH-2		6 МПа (А/В)	8 (А/В)	
PH-3		7 МПа (А/В)	8 (А/В)	

## Продолжение таблицы 4.12

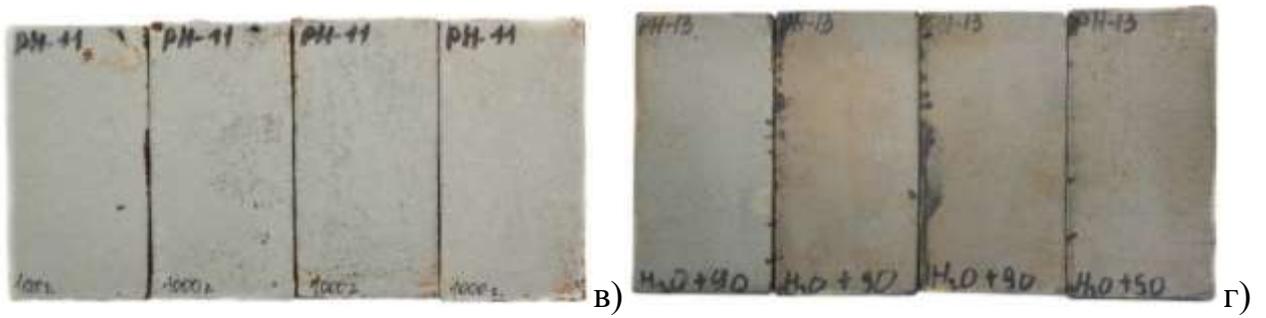
PH-5	Визуально- обнаруживаемых дефектов или повреждений металлизационного покрытия не выявлено	7 МПа (А/В)	6 (А/В)	Коррозионные повреждения отсутствуют
PH-6		14 МПа (В)	13 (А/В)	
PH-7		11 МПа (В)	11 (А/В)	
PH-8		17 МПа (Y/Z)	18 (Y)	
PH-9		7 МПа (В)	5 (В)	
PH-11		9 МПа (А/В)	4 (В)	
PH-13		18 МПа (А/В)	17 МПа (А/В)	

Длительное воздействие минерализованной среды 3 % раствора NaCl к образованию визуально-обнаруживаемых повреждений металлизационного покрытия всех образцов-свидетелей (PH-1÷PH-13) не привело (Рисунок 4.24). Тем не менее, по результатам микроструктурных исследований, поверхность защищаемого металла образцов-свидетелей подвержена воздействию коррозионной среды – на границе «металл-покрытие» выявлены продукты коррозии, в химическом составе которых присутствует большое количество коррозионно-активных соединений хлора (рисунок 4.25, 4.26; таблица 4.13, 4.14).



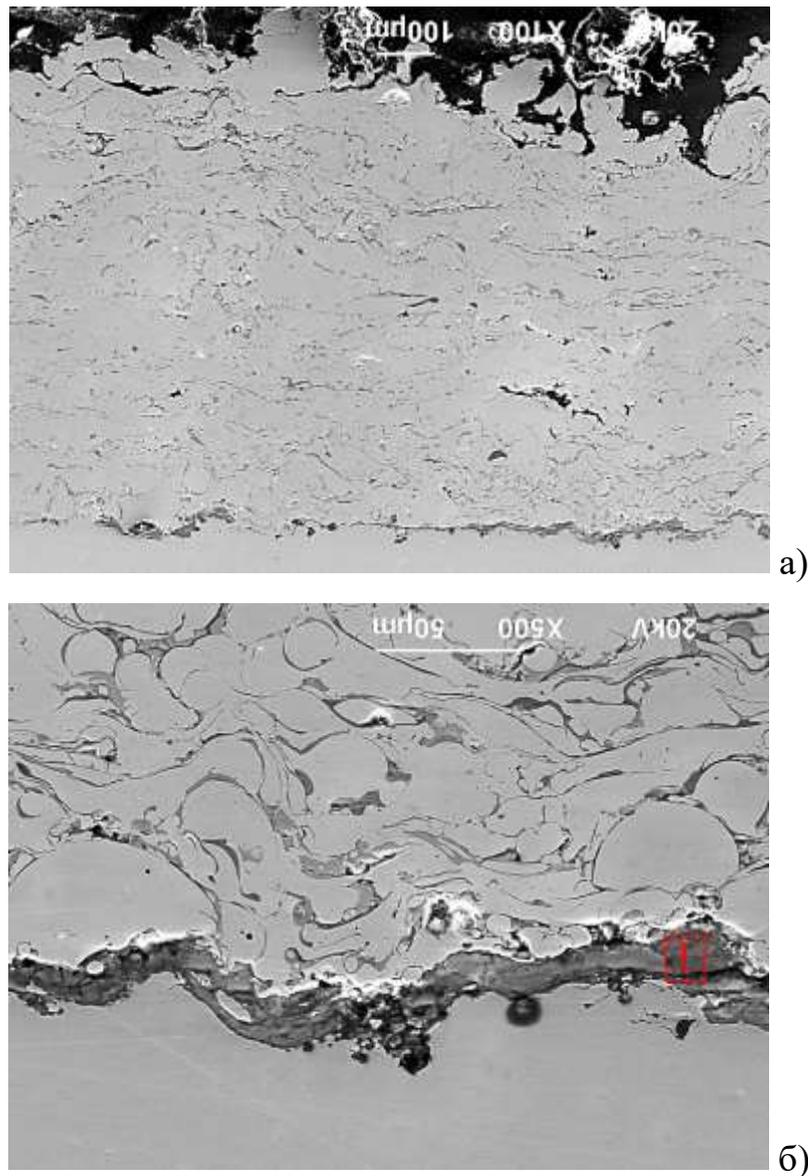
а) PH-1; б) PH-6

Рисунок 4.24 – Внешний вид образцов после выдержки в среде 3 %-го р-ра NaCl в течение 1000 часов



в) PH-11; г) PH-13

Рисунок 4.24 – Внешний вид образцов после выдержки в среде 3 %-го р-ра NaCl в течение 1000 часов



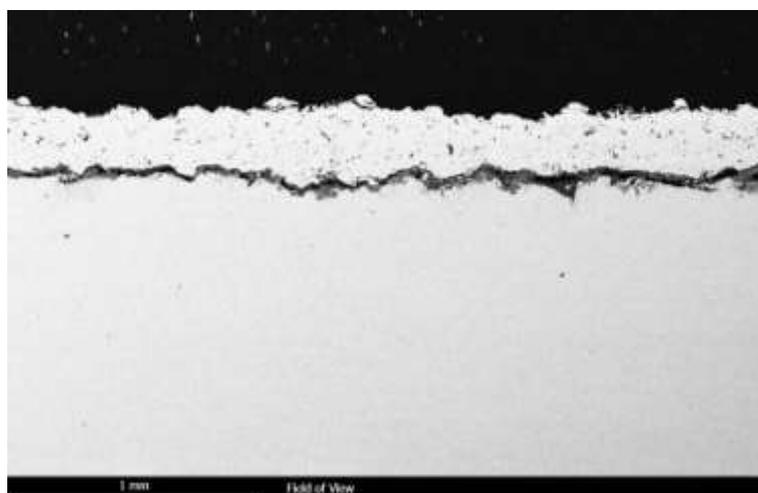
а) Увеличение x100; б) Увеличение x500

Рисунок 4.25 – Микроструктура металлизационного покрытия PH-1 после выдержки в среде 3 %-го р-ра NaCl в течение 1000 часов

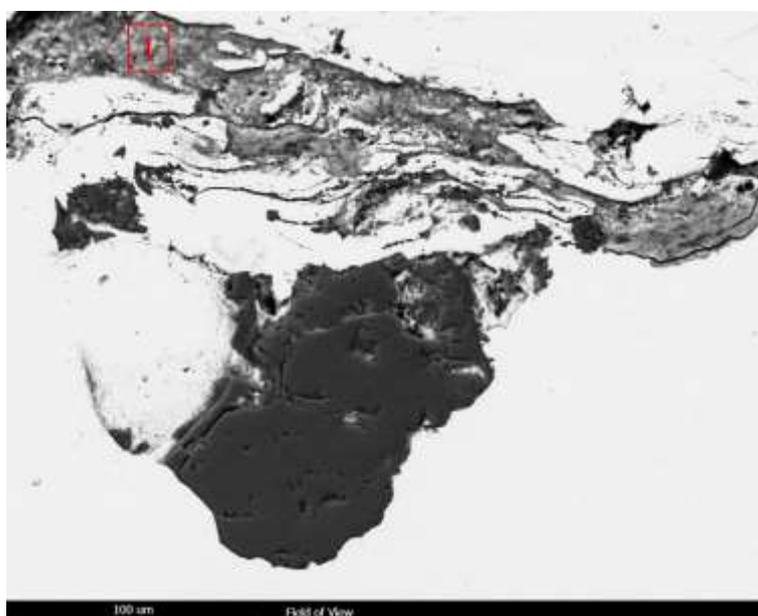
Таблица 4.13 – Химический состав продуктов коррозии

Элемент/№ точки		C	O	Si	Cl	Cr	Fe
1	Масс.%	11,35	30,58	1,67	8,77	0,82	46,81
	Ам.%	23,53	47,58	1,48	6,15	0,39	20,87

Примечание: \* в связи с использованием угольного напыления на плоскость шлифа, массовое содержание углерода может быть завышено.



а)



б)

а) Увеличение x100; б) Увеличение x1000

Рисунок 4.26 – Микроструктура металлизационного покрытия РН-6 после выдержки в среде 3 %-го р-ра NaCl в течение 1000 часов

Таблица 4.14 – Химический состав продуктов коррозии

Элемент/№ точки		C	O	Al	Si	Cl	Cr	Mn	Fe
1	Масс.%	7,66	20,60	10,14	0,55	2,38	0,94	0,52	57,21
	Ам.%	18,55	37,43	10,92	0,56	1,95	0,53	0,28	29,78

Примечание: \* в связи с использованием угольного напыления на плоскость шлифа, массовое содержание углерода может быть завышено.

Положительными результатами испытаний обладают образцы-свидетели с металлизационным покрытием на основе карбида вольфрама (РН-8), а также ЭДМ покрытие с дополнительным слоем эпоксидной пропитки (РН-13) – в структуре покрытия, а также на границе «металл-покрытие» отсутствуют повреждения коррозионного характера, обусловленные проникновением компонентов среды через толщу покрытия (рисунок 4.27). Проведение испытаний к значительному снижению физико-механических свойств не привело. Полученные результаты испытаний представлены в таблице 4.15.

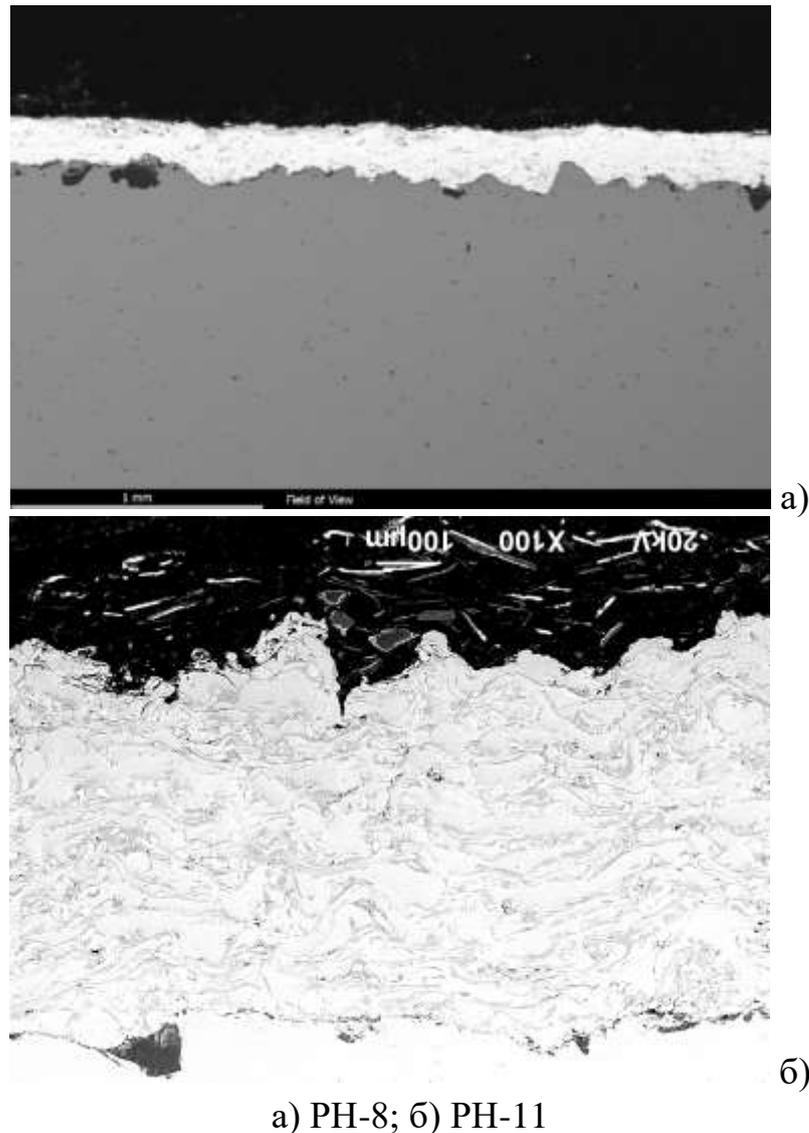


Рисунок 4.27 – Микроструктура металлизационного покрытия после выдержки в среде 3 %-го р-ра NaCl в течение 1000 часов. Увеличение x100

Таблица 4.15 – Результаты испытаний покрытия в среде 3 %-го р-ра NaCl

Маркировка	Внешний вид	$\sigma_0$ (среднее), МПа (характер отрыва)	$\sigma_1$ (среднее), МПа (характер отрыва)	Микроструктура
РН-8	Визуально- обнаруживаемых дефектов или повреждений металлизационного покрытия не выявлено	17 МПа (Y/Z)	21 (Y)	Коррозионные повреждения отсутствуют
РН-11		9 МПа (A/B)	8 (A/B)	Коррозионные повреждения отсутствуют

Циклическое изменение температур (от плюс  $60 \pm 2$  °С до минус  $40 \pm 2$  °С) к изменениям внешнего вида и образованию дефектов в структуре покрытия исследуемых образцов-свидетелей РН-1÷РН-13 не привело.

Проведение автоклавных испытаний на стойкость к быстрой декомпрессии к образованию визуально-обнаруживаемых дефектов металлизационного покрытия образцов-свидетелей РН-1÷РН-13 не привело. На поверхности металлизационного покрытия образцов-свидетелей РН-1÷РН-5, РН-9, нанесение которых осуществлялось методом ЭДМ, присутствуют следы ржавчины (рисунок 4.28).

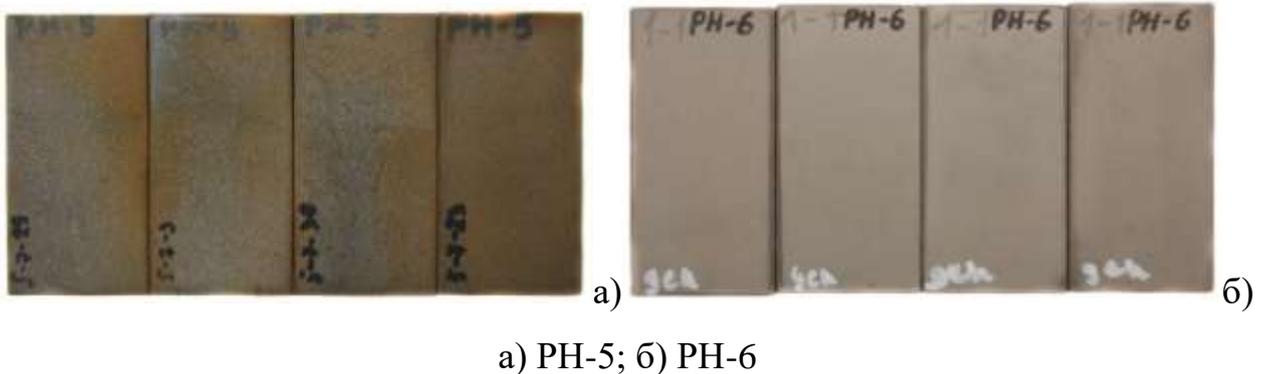


Рисунок 4.28 – Внешний вид образцов после испытаний на стойкость к быстрой декомпрессии

Металлизационное покрытие образцов РН-1 (рисунок 4.29), РН-2, РН-3, РН-5, РН-6 (рисунок 4.30), РН-7, РН-9, РН-13 не ограничивает доступ компонентов среды под покрытие – на границе «металл-покрытие»

наблюдаются нарушения адгезионных связей, на поверхности металла под покрытием выявлены продукты коррозии. По данным энергодисперсионного анализа в составе продуктов коррозии присутствуют коррозионно-активные соединения хлора, наличие которых свидетельствует о проникновении модельной среды под покрытие (таблица 4.16, 4.17). В структуре покрытия образцов РН-6, РН-7, РН-9, помимо продуктов коррозии под покрытием, выявлены нарушения адгезионных связей – отслаивание защитного металлизационного покрытия, что характерно для механизма декомпрессионного разрушения.

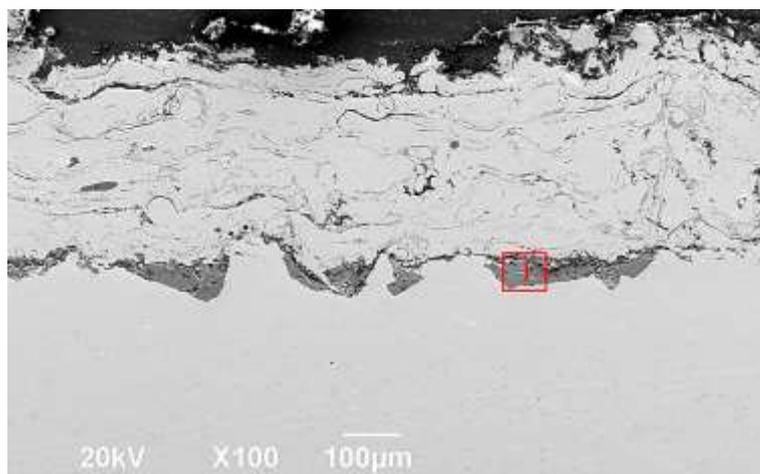
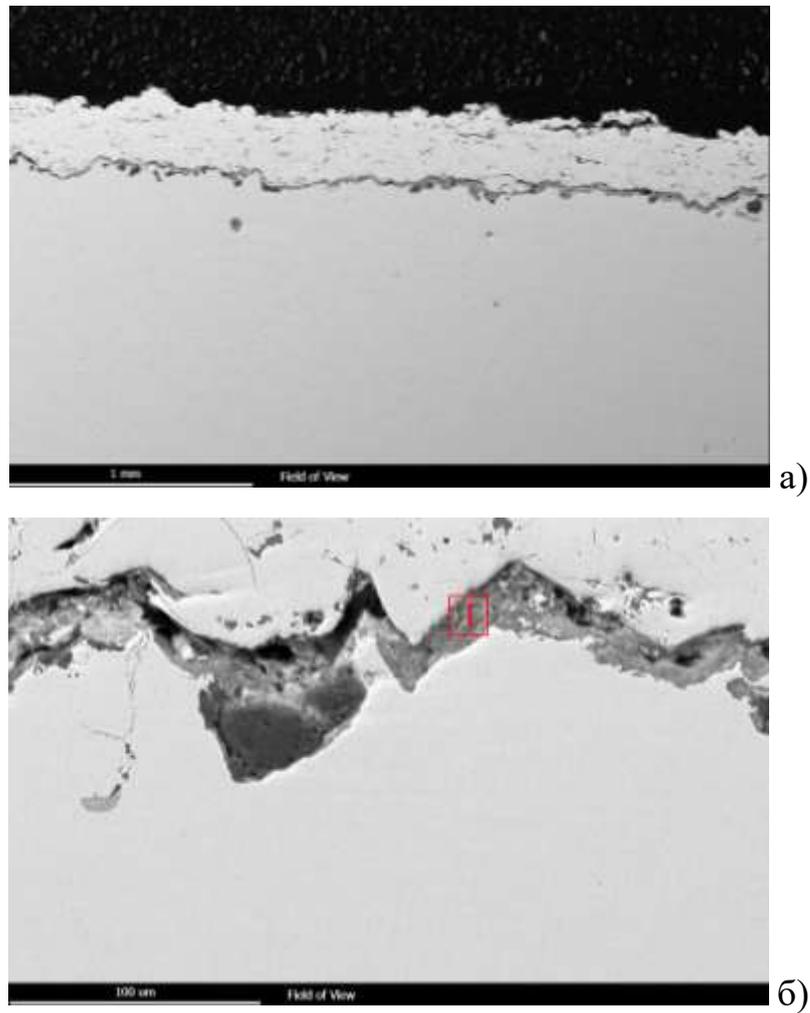


Рисунок 4.29 – Микроструктура покрытия РН-1 после автоклавных испытаний на стойкость к быстрой декомпрессии. Увеличение x100

Таблица 4.16 – Химический состав продуктов коррозии

Элемент/№ точки		С	О	Cl	Fe
1	Масс. %	11,38	25,38	2,03	61,20
	Ат. %	25,69	43,03	1,56	29,72
Примечание: * в связи с использованием угольного напыления на плоскость шлифа, массовое содержание углерода может быть завышено					



а) Увеличение x100; б) Увеличение x1000

Рисунок 4.30 – Микроструктура покрытия РН-6 после автоклавных испытаний на стойкость к быстрой декомпрессии

Таблица 4.17 – Химический состав продуктов коррозии

Элемент/№ точки		C	O	Si	Cl	Cr	Fe
1	Масс. %	7,24	34,27	0,42	0,41	1,23	56,43
	Атом. %	15,84	56,29	0,39	0,30	0,62	26,55

Примечание: \* в связи с использованием угольного напыления на плоскость шлифа, массовое содержание углерода может быть завышено.

Наличие коррозионных повреждений металла недопустимо, металлизационное покрытие образцов РН-1, РН-2, РН-3, РН-5, РН-6, РН-7, РН-9, РН-13 не может быть рекомендовано к эксплуатации в  $\text{CO}_2$ -содержащих средах.

Положительными результатами автоклавных испытаний обладают образцы-свидетели с покрытием на основе карбида вольфрама (РН-8), характеризующиеся более благоприятной структурой покрытия, а также ЭДМ покрытие с дополнительным слоем эпоксидной пропитки (РН-11). Согласно полученным результатам, проведение автоклавных испытаний к значительному снижению физико-механических свойств металлизационного покрытия образцов-свидетелей РН-8 и РН-11 не привело (рисунок 4.31; таблица 4.18).

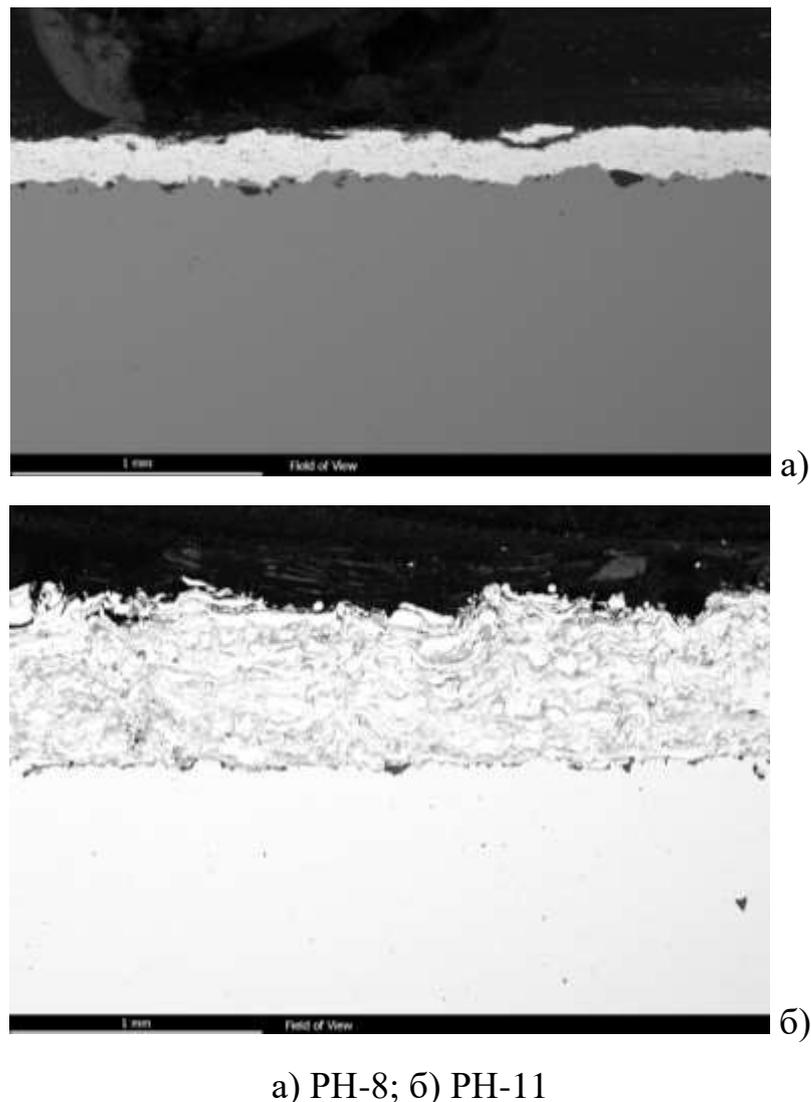


Рисунок 4.31 – Микроструктура металлизационного покрытия после автоклавных испытаний на стойкость к быстрой декомпрессии

Таблица 4.18 – Результаты автоклавных испытаний на стойкость к быстрой декомпрессии

Маркировка	Внешний вид	$\sigma_0$ (среднее), МПа (характер отрыва)	$\sigma_1$ (среднее), МПа (характер отрыва)	Микроструктура
РН-8	Визуально- обнаруживаемых дефектов или повреждений металлизационного покрытия не выявлено	17 МПа (Y/Z)	22 МПа (Y)	Коррозионные повреждения металла под покрытием отсутствуют
РН-11		9 МПа (A/B)	6 (A/B)	

Более длительные автоклавные испытания на стойкость к  $\text{CO}_2$ - и  $\text{H}_2\text{S}$ -содержащим средам при температуре  $90\text{ }^\circ\text{C}$  привели к потемнению металлизационного покрытия всех образцов-свидетелей, что характерно для выдержек в  $\text{H}_2\text{S}$ -содержащих средах. Наличие визуально-обнаруживаемых дефектов металлизационного покрытия всех образцов-свидетелей после проведения автоклавных испытаний не установлено (рисунок 4.32).

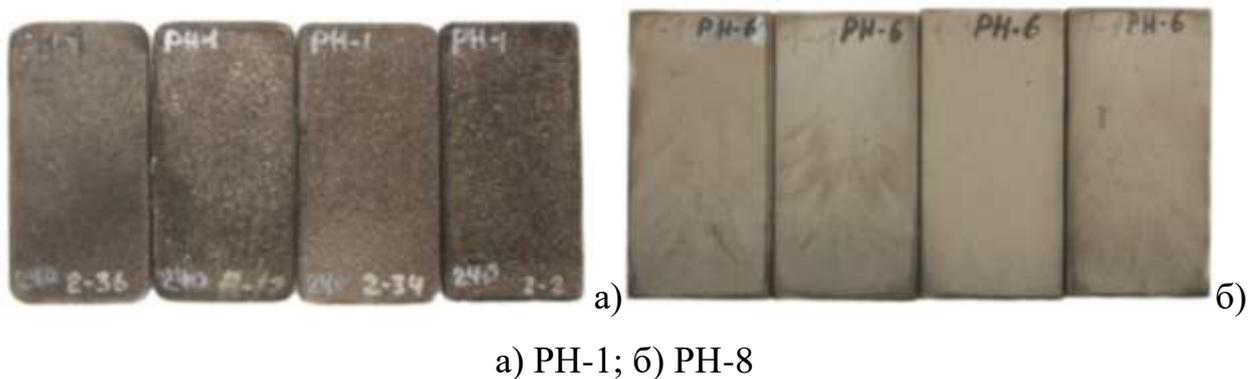
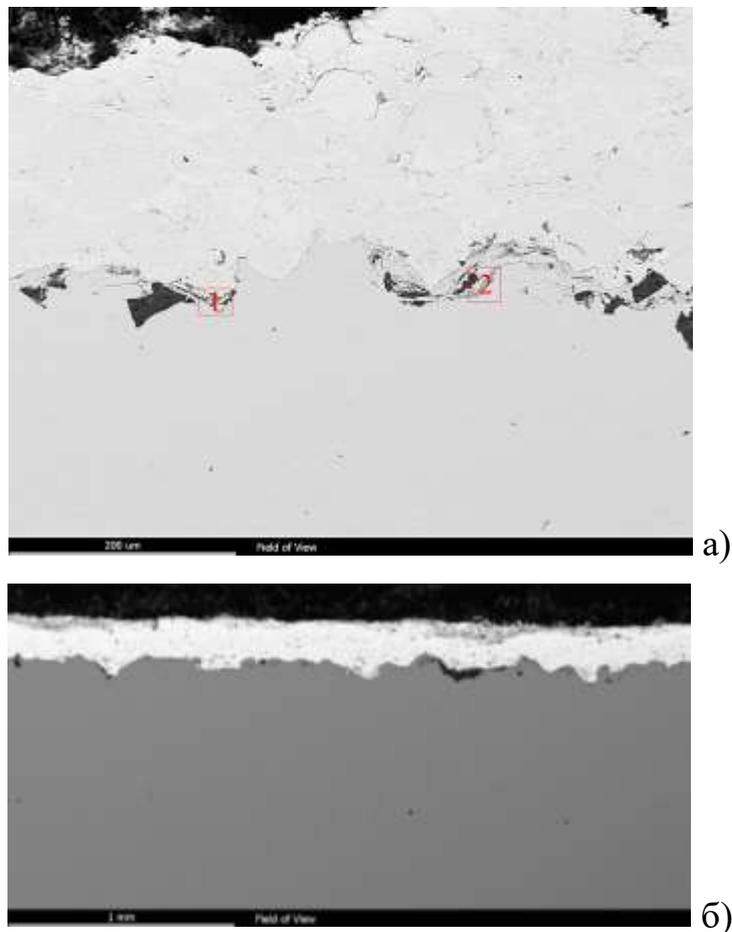


Рисунок 4.32 – Внешний вид образцов после испытаний на стойкость к  $\text{CO}_2$ - и  $\text{H}_2\text{S}$ -содержащей среде при температуре  $90\text{ }^\circ\text{C}$

Удовлетворительными результатами испытаний на стойкость к воздействию  $\text{CO}_2$ - и  $\text{H}_2\text{S}$ -содержащих сред обладают образцы-свидетели с металлизационным покрытием, нанесенным методом ВСГПН (РН-6, РН-8), а также образцы-свидетели с покрытием, нанесенным методом ЭДМ с дополнительным слоем эпоксидной пропитки (РН-11). На поверхности, в

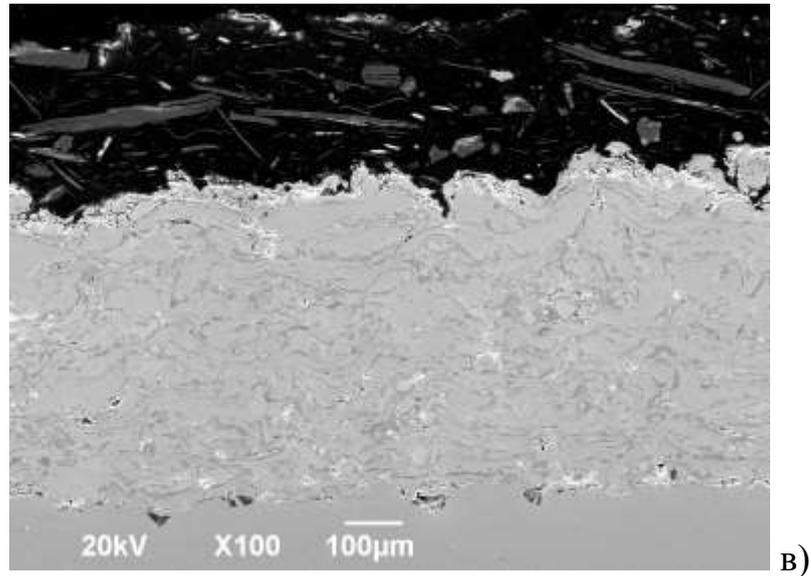
структуре покрытия, а также на границе «металл-покрытие» перечисленных образцов-свидетелей отсутствуют повреждения коррозионного характера (рисунок 4.33). Значительного снижения физико-механических свойств металлизационного покрытия перечисленных образцов-свидетелей не наблюдается (таблице 4.19).

Металлизационное покрытие ранее не упомянутых образцов-свидетелей ввиду взаимодействия оксидных прослоек с компонентами среды подвержено процессам коррозионного разрушения (рисунок 4.34, 4.35; таблица 4.20, 4.21). Нестабильность коррозионных свойств металлизационного покрытия образцов-свидетелей РН-6 в  $\text{CO}_2$ -содержащих средах может быть обусловлена отличающимися толщиной и однородностью структуры от пластины к пластине в пределах одной партии образцов.



а) РН-6. Увеличение  $\times 100$ ; б) РН-8. Увеличение  $\times 100$

Рисунок 4.33 – Микроструктура покрытия образцов после автоклавных испытаний на стойкость к  $\text{CO}_2$ - и  $\text{H}_2\text{S}$ -содержащей среде

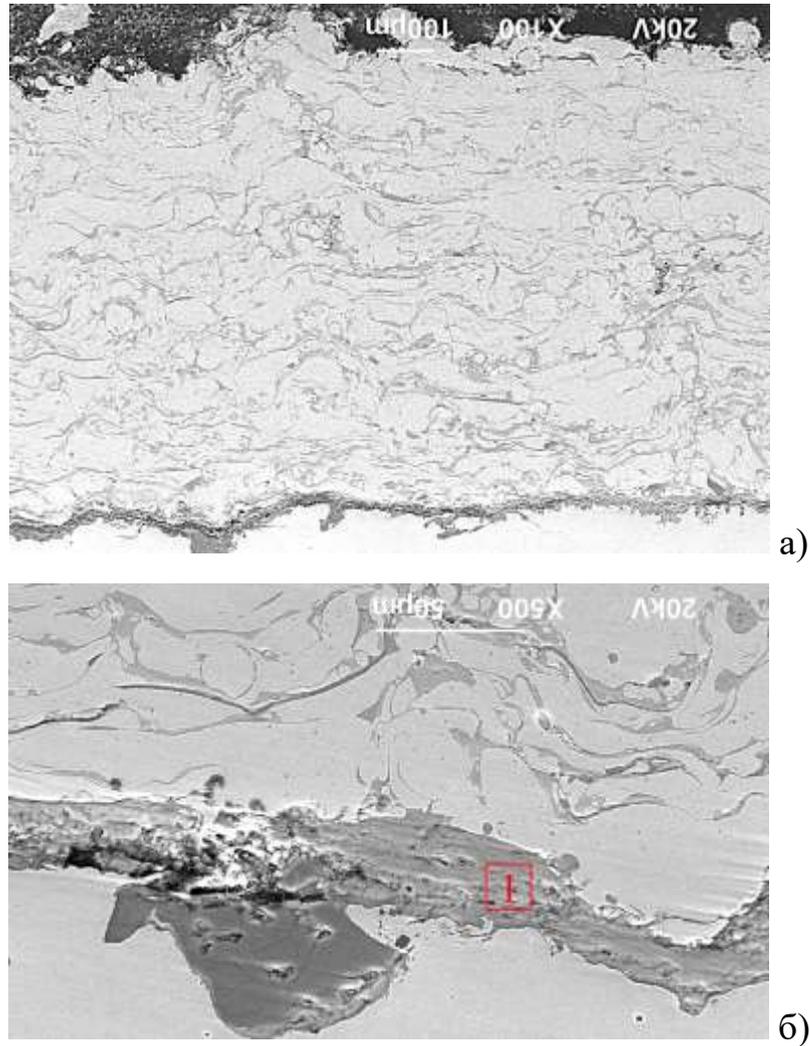


в) РН-11. Увеличение x100

Рисунок 4.33 – Микроструктура покрытия образцов после автоклавных испытаний на стойкость к  $\text{CO}_2$ - и  $\text{H}_2\text{S}$ -содержащей среде

Таблица 4.19 – Результаты автоклавных испытаний на стойкость к  $\text{CO}_2$ - и  $\text{H}_2\text{S}$ -содержащей среде

Маркировка	Внешний вид	$\sigma_0$ (среднее), МПа (характер отрыва)	$\sigma_1$ (среднее), МПа (характер отрыва)	Микроструктура
РН-6	Визуально- обнаруживаемых дефектов или повреждений металлизационного покрытия не выявлено	14 МПа (В)	16 (Y/Z)	Коррозионные повреждения отсутствуют
РН-8		17 МПа (Y/Z)	20 (Y/Z)	
РН-11		9 МПа (A/B)	6 (n/m)	



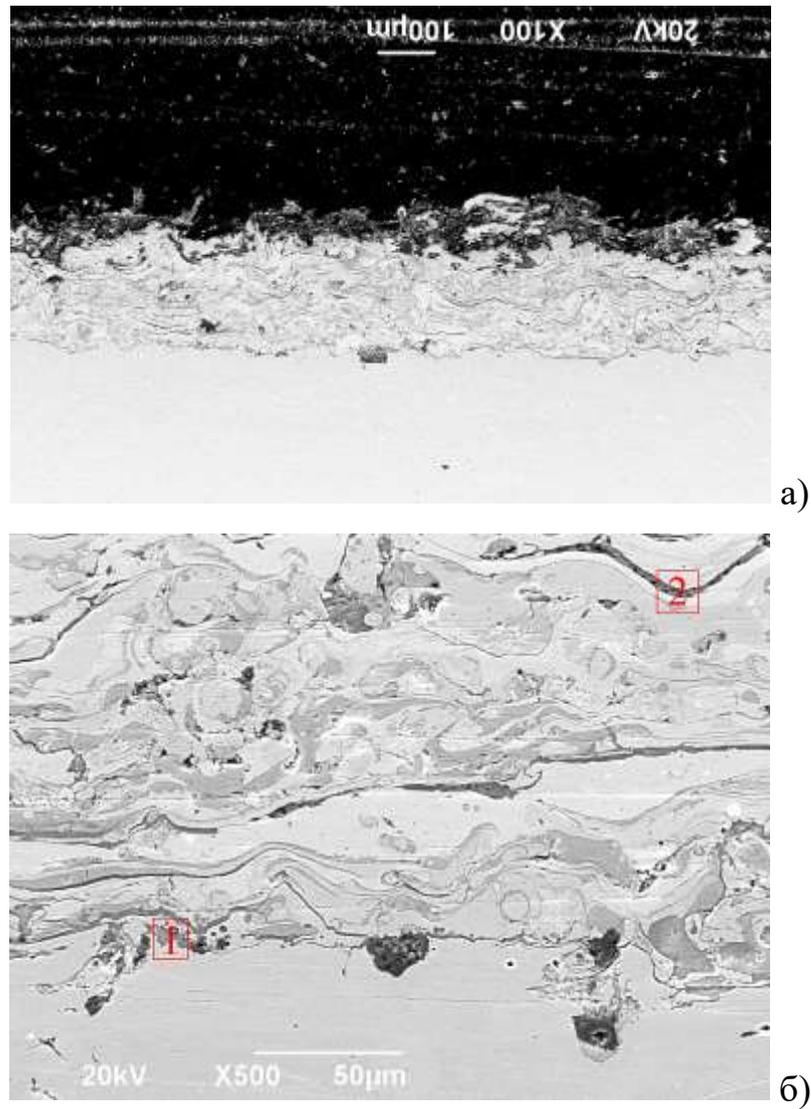
а) Увеличение x100; б) Увеличение x500

Рисунок 4.34 – Микроструктура покрытия РН-3 после автоклавных испытаний на стойкость к CO<sub>2</sub>- и H<sub>2</sub>S-содержащей среде

Таблица 4.20 – Химический состав продуктов коррозии

Элемент/№ точки		C	O	Si	Cl	Cr	Fe
1	Масс.%	13,37	41,34	0,21	2,24	0,54	42,29
	Ат.%	24,55	56,97	0,17	1,39	0,23	16,70

Примечание: \* в связи с использованием угольного напыления на плоскость шлифа, массовое содержание углерода может быть завышено.



а) Увеличение x100; б) Увеличение x500

Рисунок 4.35 – Микроструктура покрытия РН-9 после автоклавных испытаний на стойкость к к  $\text{CO}_2$ - и  $\text{H}_2\text{S}$ -содержащей среде

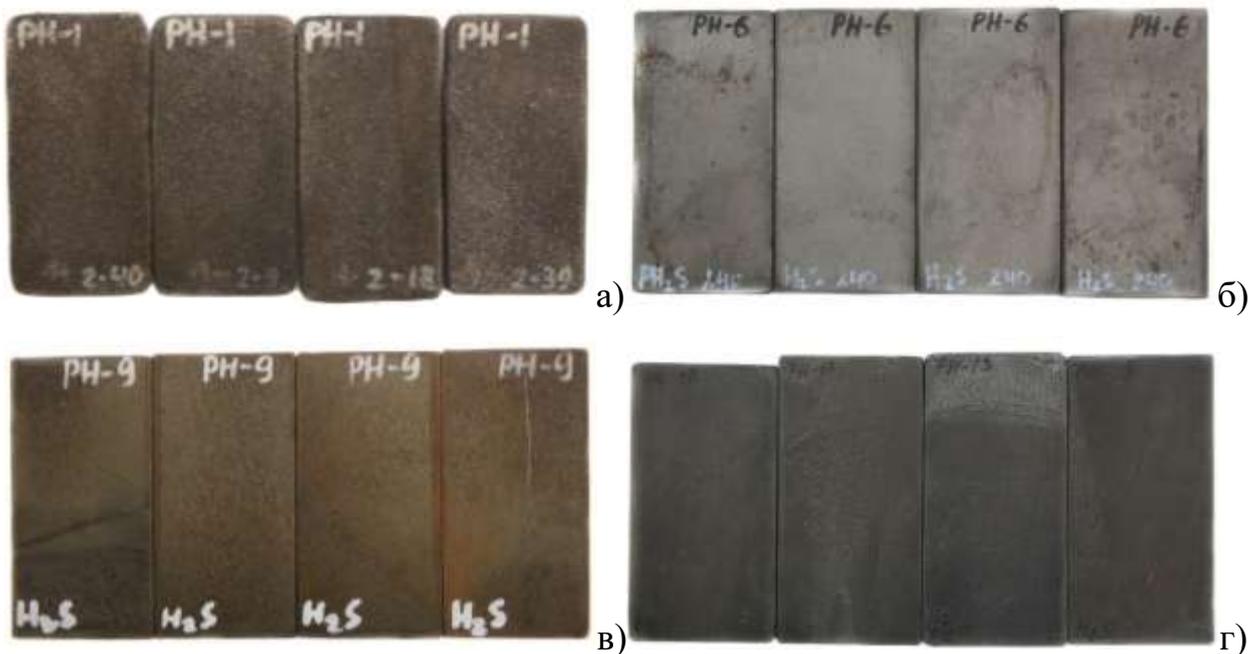
Таблица 4.21 – Химический состав продуктов коррозии

Элемент/№ точки		C	O	Al	Si	S	Cl	Cr	Fe	Ni
1	Масс.%	11,17	28,17	6,10	—	—	2,45	5,411	47,98	3,03
	Ат.%	23,74	44,93	5,77	—	—	1,76	0,54	21,93	1,32
2	Масс.%	6,93	15,87	—	0,65	0,68	11,76	—	61,05	3,06
	Ат.%	18,67	32,10	—	0,75	0,68	10,73	—	35,37	1,69

Примечание: \* в связи с использованием угольного напыления на плоскость шлифа, массовое содержание углерода может быть завышено.

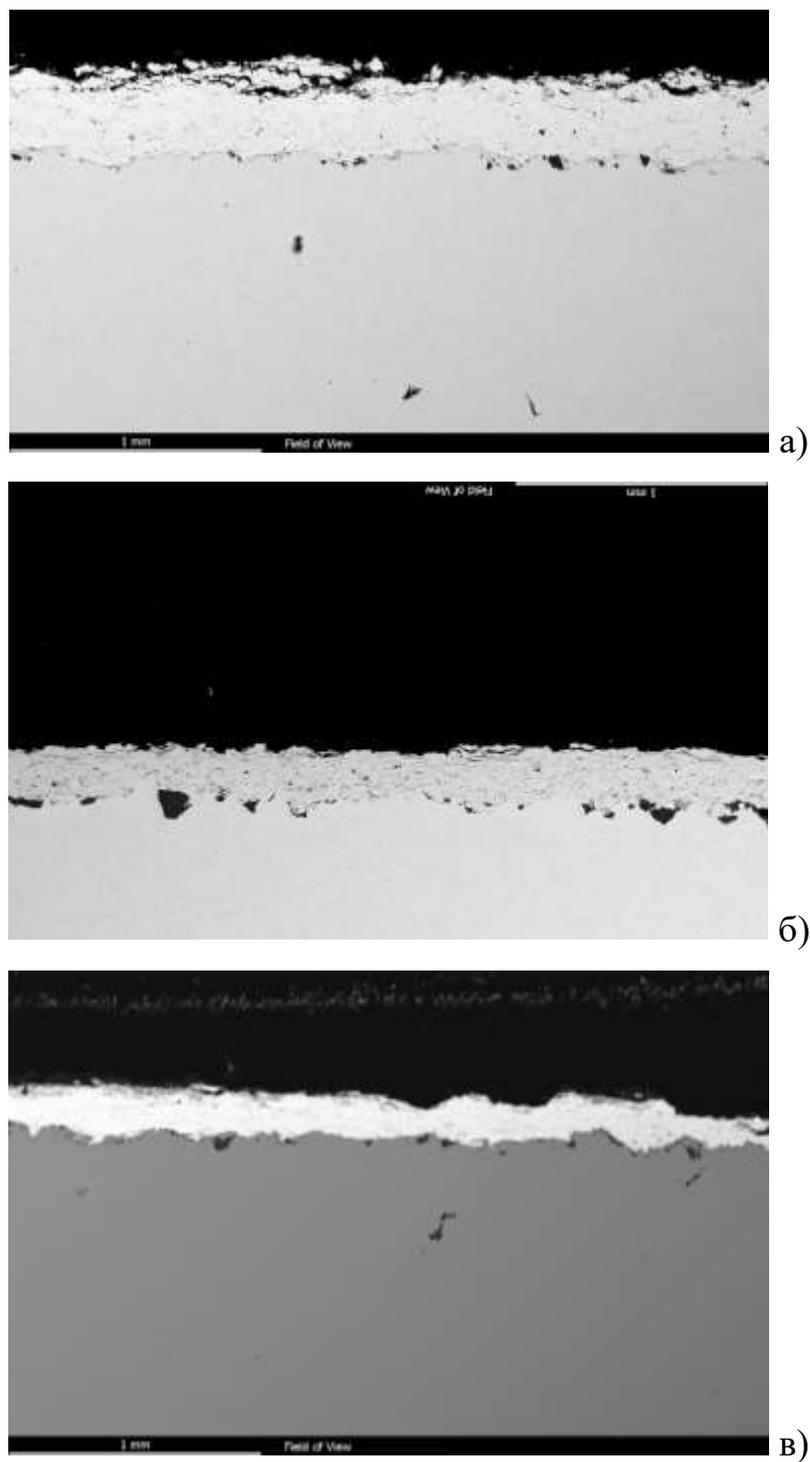
Внешний вид образцов после испытаний на стойкость к воздействию  $\text{H}_2\text{S}$ -содержащей среды представлен на рисунке 4.36. Удовлетворительными результатами автоклавных испытаний на стойкость к воздействию  $\text{H}_2\text{S}$ -

содержащей среды обладает металлизационное покрытие образцов-свидетелей РН-6, РН-7, РН-8, нанесенное методом ВСППН, а также образцы с ЭДМ покрытием (РН-11) с дополнительным слоем эпоксидной пропитки. На поверхности, в структуре покрытия, а также на границе «металл-покрытие» перечисленных образцов-свидетелей отсутствуют повреждения коррозионного характера (рисунок 4.37). Значительного снижения физико-механических свойств металлизационного покрытия перечисленных образцов-свидетелей не наблюдается (таблица 4.22). Металлизационное покрытие не упомянутых выше образцов-свидетелей ввиду взаимодействия оксидных прослоек с компонентами среды подвержено процессам коррозионного разрушения (рисунок 4.38, 4.39; таблица 4.23, 4.24).



а) РН-1; б) РН-6; в) РН-9; г) РН-13

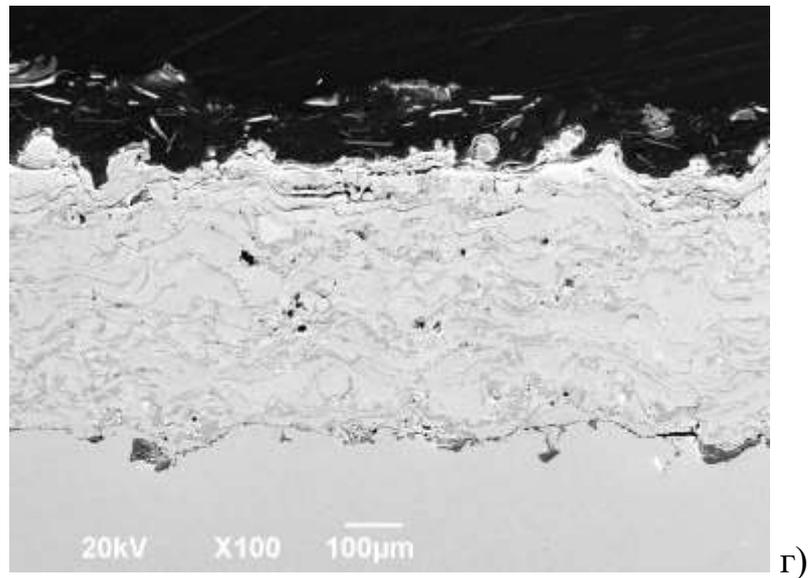
Рисунок 4.36 – Внешний вид образцов после испытаний на стойкость к  $H_2S$ -содержащей среде при температуре  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$



а) РН-6. Увеличение x100; б) РН-7. Увеличение x100;

в) РН-8. Увеличение x100

Рисунок 4.37 – Микроструктура металлизационного покрытия после автоклавных испытаний на стойкость к  $H_2S$ -содержащей среде

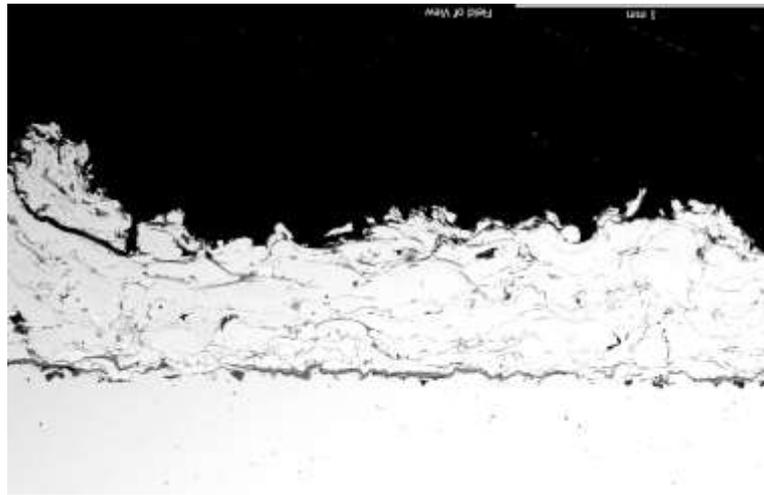


г) РН-11. Увеличение x100

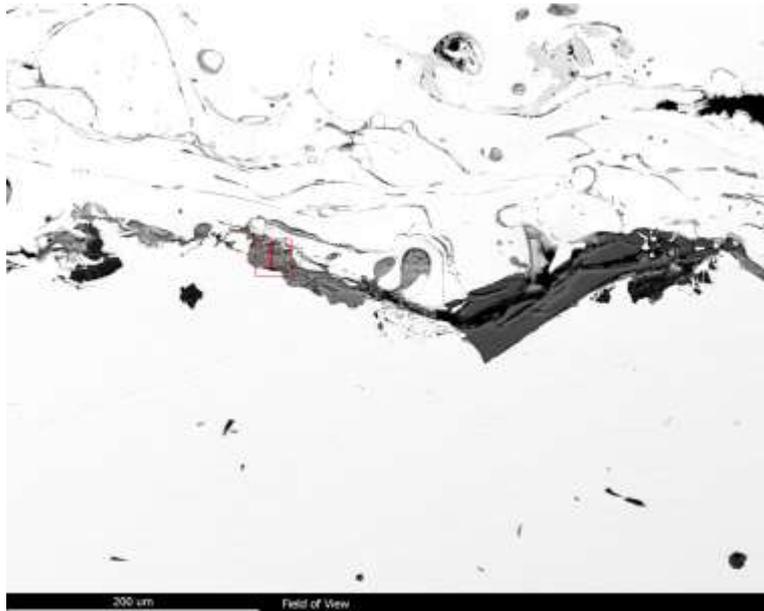
Рисунок 4.37 – Микроструктура металлизационного покрытия после автоклавных испытаний на стойкость к H<sub>2</sub>S-содержащей среде

Таблица 4.22 – Результаты автоклавных испытаний на стойкость к H<sub>2</sub>S-содержащей среде

Маркировка	Внешний вид	$\sigma_0$ (среднее), МПа (характер отрыва)	$\sigma_1$ (среднее), МПа (характер отрыва)	Микроструктура
РН-6	Визуально- обнаруживаемых дефектов или повреждений металлизационного покрытия не выявлено	14 МПа (B)	13 (A/B)	Коррозионные повреждения отсутствуют
РН-7		11 МПа (B)	13 (B)	Коррозионные повреждения отсутствуют
РН-8		17 МПа (Y/Z)	22 (Y/Z)	Коррозионные повреждения отсутствуют
РН-11		9 МПа (A/B)	6 (n/m)	Коррозионные повреждения отсутствуют



а)



б)

а) Увеличение x100; б) Увеличение x1000

Рисунок 4.38– Микроструктура покрытия образцов РН-1 после автоклавных испытаний на стойкость к  $H_2S$ -содержащей среде

Таблица 4.23 – Химический состав продуктов коррозии

Элемент/№ точки	C*	O	Na	Mg	Al	Si	P	
1	Масс.%	4,47	25,78	0,78	0,83	3,92	15,80	0,35
	Ат.%	10,07	43,57	0,92	0,92	3,93	15,21	0,30

Продолжение таблицы 4.23

Элемент/№ точки	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe	Zn	
1	Масс.%	0,65	2,05	0,52	5,16	0,82	37,68	1,20
	Ат.%	0,55	1,56	0,36	3,48	0,40	18,24	0,50

Примечание: \* в связи с использованием угольного напыления на плоскость шлифа, массовое содержание углерода может быть завышено.

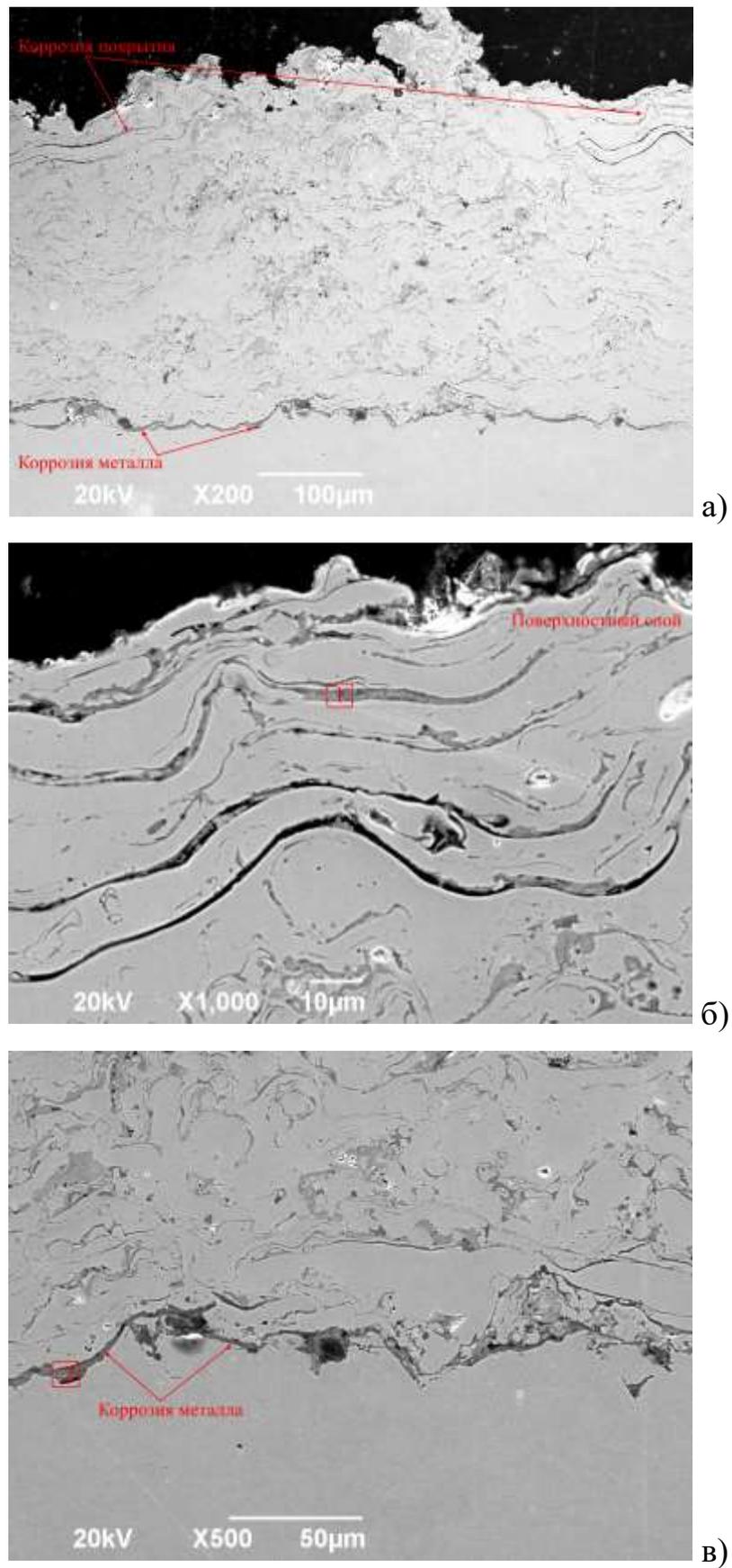


Рисунок 4.39 – Микроструктура покрытия образцов РН-5 после автоклавных испытаний на стойкость к  $H_2S$ -содержащей среде

Таблица 4.24 – Химический состав продуктов коррозии

Элемент/№ точки		C*	O	Si	S	Cr	Fe	Ni	Mo	Al	Cl
1	Масс.%	23,50	5,91	0,08	3,18	2,30	21,57	2,07	41,39	—	—
	Ам.%	58,84	11,12	0,09	2,99	1,33	11,61	1,06	12,97	—	—
2	Масс.%	16,27	38,40	—	0,24	—	11,61	—	—	32,77	0,71
	Ам.%	26,02	46,11	—	0,16	—	4,00	—	—	23,33	0,39

Примечание: \* в связи с использованием угольного напыления на плоскость шлифа, массовое содержание углерода может быть завышено.

Результаты автоклавных испытаний образцов-свидетелей РН-1÷РН-5, РН-9 (нанесенные методом ЭДМ) свидетельствуют о неудовлетворительной стойкости перечисленных покрытий к воздействию CO<sub>2</sub>- и/или H<sub>2</sub>S-содержащих сред в заданном диапазоне давлений и температур. Металлизационное покрытие перечисленных образцов-свидетелей не ограничивает проникновение компонентов среды через слой покрытия к поверхности металла. При воздействии CO<sub>2</sub>- и H<sub>2</sub>S-содержащих сред на границе «металл-покрытие» формируется слой карбонатов железа, следовательно, доминирующим механизмом разрушения является углекислотная коррозия. При воздействии H<sub>2</sub>S-содержащих сред коррозионное разрушение металла подложки протекает менее интенсивно.

Положительными результатами автоклавных испытаний на стойкость к воздействию CO<sub>2</sub>- и H<sub>2</sub>S-содержащих сред обладают покрытия образцов-свидетелей РН-6, РН-8 (нанесенные методом ВСГПН) и покрытие образцов-свидетелей РН-11 (нанесенное методом ЭДМ с дополнительным слоем эпоксидной пропитки). Неудовлетворительными результатами среди металлизационных покрытий, нанесенных методом ВСГПН, обладают образцы-свидетели РН-7 – на границе «металл-покрытие» присутствуют локальные очаги коррозионного разрушения.

По результатам испытаний металлизационное покрытие образцов-свидетелей, нанесенное методом ЭДМ, не обладает необходимым уровнем барьерных свойств и не может применяться в качестве защиты ПЭД от коррозии в существующем исполнении. Все исследованные металлизационные покрытия обладают неблагоприятной структурой и



значения толщины покрытия образцов-свидетелей РН-6 и РН-7 составляют 163 мкм и 98,5 мкм соответственно).

Как самостоятельная единица, без применения дополнительных способов модифицирования поверхности проявило себя покрытие на основе карбида вольфрама (РН-8). Металлизационное покрытие на основе карбида вольфрама, нанесенное методом ВСГПН обладает высоким уровнем физико-механических и антикоррозионных свойств и может быть рекомендовано в качестве защиты для корпусов ПЭД.

### **Выводы по главе**

1. Представлена новая комплексная методика проведения лабораторных испытаний антикоррозионных металлизационных покрытий ПЭД, имитирующих различные эксплуатационные факторы, в том числе влияние агрессивных сред на основе водных растворов, содержащих  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  при повышенных температурах и давлении, абразивный износ и механические воздействия.

2. Практическая реализация разработанной комплексной методики лабораторных испытаний на образцах второй группы свидетельствует о возможности корректного моделирования разрушающего воздействия основных осложняющих факторов.

3. Установлено, что основное влияние на коррозионные свойства металлизационных покрытий ПЭД оказывает сплошность и пористость слоя покрытия, последняя из которых обусловлена значительной неоднородностью структуры (оксидная прослойка, образованная на дистанции напыления, как правило, является пористой).

4. Показано, что основной причиной преждевременного разрушения корпуса ПЭД является неблагоприятное структурное состояние металлизационного покрытия ПЭД, поэтому для повышения износо- и коррозионной стойкости металлизационных покрытий ПЭД необходимо минимизировать или исключить возможность окисления напыляемых частиц,

которые снижают когезионную прочность покрытия и способствуют проникновению среды через слой покрытия к поверхности металла. Для достижения благоприятного структурного состояния особое внимание необходимо уделить технологии распыления и оптимизации параметров процесса распыления.

5. В условиях эксплуатации ПЭД эффективность применения электродугового металлизационного покрытия на основе нержавеющей стали проявляется при наличии слоя эпоксидной пропитки, который ограничивает доступ агрессивной среды к поверхности металлизационного покрытия

6. Метод ВСГПН нержавеющей стали, легированного Cr, Ni, Mo (РН-6, РН-7) позволяет получить более выгодное с точки зрения структурных особенностей покрытие. Но, тем не менее, не исключает риск проникновения компонентов среды через слой покрытия к поверхности металла. Это может быть связано в первую очередь с низкой толщиной слоя металлизационного покрытия, а также ее локальным снижением.

7. Металлизационное покрытие на основе карбида вольфрама, нанесенное методом ВСГПН является лидером среди испытанных защитных металлизационных покрытий ввиду своего высокого уровня физико-механических и антикоррозионных свойств. Однако, ввиду своей высокой стоимости может оказаться не рентабельным в качестве антикоррозионной защиты ПЭД. Необходимо оценить возможность испытаний альтернативного покрытия с добавлением карбида вольфрама.

## **5 РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМ МЕТАЛЛИЗАЦИОННЫМ ПОКРЫТИЯМ КОРПУСОВ ПЭД**

Результаты исследований защитных металлизационных покрытий, выполненные в рамках данной диссертации, свидетельствуют о необходимости внедрения технических требований, регламентирующих минимальный уровень физических, механических, физико-механических, трибологических и коррозионных свойств для повышения качества металлизационных покрытий и снижения аварийности эксплуатируемых ПЭД.

### **5.1 Технические требования к газотермическим металлизационным покрытиям корпусов ПЭД**

На основании проведенного анализа условий эксплуатации, причин отказов изолированных корпусов ПЭД, а также результатов комплексных лабораторных исследований металлизационных покрытий были разработаны и внедрены на предприятия, осуществляющих нанесение металлизационных покрытий, «Технические требования к газотермическим металлизационным покрытиям погружных электродвигателей» (Приложение Б).

Разработанные технические требования направлены на повышение качества и, как следствие, снижение аварийности эксплуатируемых ПЭД. Технические требования регламентируют минимальный уровень физических, механических, трибологических и коррозионных свойств и не нормируют требования к металлу ПЭД.

Технические требования включают следующие разделы:

Вводные положения. В данном разделе рассмотрены предмет и область применения технических требований.

Общая часть. Раздел 1 «Требования к изделиям, подлежащим нанесению металлизационного покрытия». Включает подразделы с общими

требованиями к состоянию поверхности изолируемых труб, используемых в качестве корпусов ПЭД, их геометрии, сортаменту, а также к качеству подготовки поверхности перед нанесением покрытия.

Необходимость внедрения требования к состоянию поверхности перед нанесением покрытия обусловлена в первую очередь неудовлетворительным качеством подготовки поверхности образцов, прошедших лабораторные испытания. Подготовка поверхности включает работы, связанные с очисткой поверхности, которую так же можно рассматривать как физическую активацию поверхности. Качество подготовки поверхности определяет уровень прочности сцепления покрытия с металлом корпуса (адгезионную прочность).

Раздел 2 «Требования к материалам, используемых для нанесения покрытия». Включает требования к качеству применяемых порошковых материалов и проволоки. Химический состав порошков или проволок, применяемых для формирования покрытия ПЭД должен обеспечивать регламентированный техническими требованиями уровень механических, физико-механических и коррозионных свойств.

Раздел 3 «Требования к технологии нанесения металлизационного покрытия». В данном разделе представлены требования к процессу напыления. Режимы напыления для каждого метода должны обеспечивать необходимую степень однородность сформированного слоя покрытия для обеспечения регламентируемого уровня механических, физико-механических и коррозионных свойств.

Раздел 4 «Технические требования к металлизационному покрытию». В данном разделе представлены минимальные требования к уровню физических, механических, трибологических и коррозионных свойств металлизационных покрытий. Регламентированные в технических требованиях свойства основаны на результатах комплексных лабораторных испытаний, разработанной в рамках проведения данной работы и представленной в Главе 4.

По показателям свойств металлизационное покрытие должно соответствовать требованиям таблицы 5.1, испытательные среды и параметры испытаний указаны в таблице 5.2.

Таблица 5.1 – Технические требования к свойствам металлизационного покрытия

№ п/п	Требования	Покрывтие корпуса		Метод испытания
		Тип - 1	Тип - 2	
	Метод нанесения покрытия	Электродуговая металлизация (ЭДМ)	Высокоскоростное газопламенное напыление (ВСН)	
<b>Минимальные граничные требования</b>				
1	Внешний вида покрытия:  - в исходном состоянии  - после воздействия сред 1-6 (табл.№3)	Равномерное, однородное покрытие без наплывов, частиц нерасплавленного материала, трещин, отслоений, сколов и других видимых дефектов, обнажающих поверхность металла.  Слой пропитки должен обладать равномерной сплошной поверхностью без вздутий, отслоений и прочих дефектов.  Не допускаются разрушения: вздутия, отслаивания, растрескивание, коррозия металла.		ГОСТ 9.302 ГОСТ 9.407
2	Толщина металлизационного покрытия, минимальная, мкм		350	ГОСТ 31993
3	Шероховатость покрытия, R <sub>a</sub> , мкм		≤ 15	ГОСТ 2789
4	Структура покрытия:  - в исходном состоянии  - после воздействия сред 1-6 (табл.№3)	При электродуговой металлизации: слоистая структура, состоящая из полностью расплавленных частиц материала.  При высокоскоростном напылении: структура должна быть представлена однородной металлической матрицей, наличие нерасплавленных частиц (за исключением карбидной фазы). Допускается окисление напыляемых частиц при нанесении дополнительного слоя пропиточного материала.  Отсутствие коррозии металлической матрицы и поверхности защищаемого металла		Приложение 1*
5	Пористость покрытия, %		≤ 1,0 отсутствие сквозной пористости, пор, каверн	Приложение 1*

## Продолжение таблицы 5.1

6	Сплошность покрытия	Отсутствие микротрещин и расслоений в структуре покрытия		Приложение 1*
7	Качество сцепления покрытия	Отсутствие отслаивания покрытия от поверхности металла		Приложение 1*
8	Адгезионная прочность покрытия, МПа:  - в исходном состоянии  - после воздействия сред 1-6 (табл.№3)	$\geq 10$	$\geq 15$	ГОСТ 32299  Не допускается снижение более 30 % от исходного значения и коррозия в месте отрыва покрытия
9	Микротвердость покрытия, HV	200 - 500	$\geq 500$	ГОСТ 2999
10	Стойкость к абразивному износу, потеря массы, мг	$\leq 30$		ГОСТ 23.208
11	Прочность при ударе, Дж	$\geq 65$		ГОСТ Р 51164
12	Стойкость покрытия при изгибе, стрела прогиба, мм	$\geq 4$		ГОСТ Р 58346
13	Стойкость покрытия к прорезанию, глубина реза в % от толщины слоя покрытия	$\leq 20$		ОТТ-25.220.01-КТН-054-15
Примечание: * - Приложение 1 разработанных Технических требований.				

Таблица 5.2 – Испытательные среды и условия испытаний покрытия

Испытательная среда	Параметры испытания			Метод испытания
	Температура, °С	Давление, МПа	Продолжительность	
1 Кислота соляная, раствор с массовой долей 10 %	(60 ± 3)	Атмосферное	24 ч.	ГОСТ 9.403, метод А
2 Натрия гидроокись, раствор с массовой долей 10 %				
3 Минерализованная среда 5 %-го р-ра NaCl	(90 ± 3)		1000 ч.	

4 Жидкая фаза: 5 %-ый (масс.) раствор NaCl газовая фаза: а) CO <sub>2</sub> под давлением (4,0 ± 0,5) МПа + H <sub>2</sub> S под давлением 0,5 МПа, N <sub>2</sub> остальное. б) H <sub>2</sub> S под давлением 0,5 МПа + N <sub>2</sub> остальное	(90 ± 3)	(10,0 ± 0,5)	240 ч. Сброс давления не менее 10 мин	ГОСТ Р 58346
5 Жидкая фаза: 5 %-ый (масс.) раствор NaCl газовая фаза: CO <sub>2</sub> под давлением (5,0 ± 0,5) МПа, N <sub>2</sub> остальное.		(10,0 ± 0,5)	24 ч. Сброс давления не более 5 с	
6 Среда воздушная	От минус (40 ± 3) до плюс (60 ± 3)	Атмосферное	15 циклов	ГОСТ 27037

Поскольку разработанные технические требования распространяются на металлизационные покрытия, нанесение которых осуществляется методами ЭДМ и ВСГПН, предусмотрено ранжирование требований по методам нанесения и температуре эксплуатации:

Тип 1 – металлизационное покрытие, нанесенное методом ЭДМ, с дополнительным слоем пропиточного материала – температура эксплуатации до плюс 90 °С;

Тип 2 – металлизационное покрытие, нанесенное методом ВСГПН – температура эксплуатации до плюс 120 °С.

Для металлизационного покрытия, нанесенного методом ВСГПН, допускается отсутствие дополнительного слоя пропитки при условии соблюдения однородности структуры и отсутствия сквозной пористости.

Исходя из полученных результатов комплексных лабораторных испытаний для обеспечения износостойкости и коррозионной стойкости

особое внимание необходимо уделить однородности структуры металлизационного покрытия.

В качестве пропиточного слоя рекомендуется применять лакокрасочные материалы на основе полиуретановых, эпоксидных и эпокси-фенольных материалов.

Раздел 5 «Требования безопасности и охраны окружающей среды». Раздел содержит требования к рабочему персоналу, средствам индивидуальной защиты и к контролю предельно допустимых выбросов в атмосферу.

Раздел 6 «Правила приемки». Содержит требования к порядку контроля продукции, порядку и условиям предъявления и приемки продукции органами технического контроля предприятия-изготовителя и потребителем (заказчиком), размер предъявляемых партий, сопроводительную предъявительскую документацию, а также порядок оформления результатов приемки.

Испытания металлизационных покрытий могут осуществляться как на готовом изделии (ПЭД), так и на образцах-свидетелях, прошедших весь технологический цикл с изделием данной партии.

Раздел 7 «Методы контроля». В разделе представлены методы оценки свойств металлизационных покрытий, необходимость контроля которых предусмотрена в разделе «Правила приемки».

Раздел 8 «Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение». Раздел содержит требования к способам маркировки ПЭД с металлизационным покрытием и ее содержанию, требования к условиям хранения и транспортирования.

Раздел 9 «Указания по эксплуатации». В разделе представлены требования, ограничивающие механические ударные нагрузки на корпус ПЭД при транспортировании и эксплуатации.

Раздел 10 «Гарантии изготовителя». При условии соблюдения норм и правил при транспортировке, погрузочно-разгрузочных работах, хранении и

эксплуатации изготовитель покрытия должен гарантировать качество покрытия ПЭД при хранении в течение не менее 24 месяцев с момента отгрузки или 12 месяцев с момента ввода в эксплуатацию.

В разделе 11 представлен перечень нормативных документов, используемых при разработке технических требований.

Разработанные технические требования к газотермическим металлизационным покрытиям были внедрены на предприятиях ООО «ТСК «Урал» г. Екатеринбург, ООО «ТСЗП» г. Москва, ООО «КОМТЭК» г. Екатеринбург (Приложение В).

### **Выводы по главе**

1. В разработанных технических требованиях впервые сформулированы требования к основным физическим, механическим, физико-механическим, трибологическим и коррозионным свойствам газотермических металлизационных покрытий, применяемых для защиты корпуса ПЭД.

2. В разработанном нормативном документе регламентированы параметры, моделирующие воздействие осложняющих факторов в процессе эксплуатации (стойкость к удару, прорезанию, износостойкость при воздействии абразивных частиц, воздействие агрессивных сред).

4. Ранжирование технических требований обусловлено различным уровнем свойств, получаемых методами ЭДМ и ВСГПН покрытий.

5. На основании лабораторных испытаний в разработанных технических требованиях применение металлизационного покрытия, нанесенного методом ЭДМ, ограничено максимально допустимой температурой эксплуатации 90 °С, а также обязательным наличием дополнительного слоя пропиточного материала. Максимально допустимая температура эксплуатации металлизационного покрытия, нанесенного методом ВСГПН – 120 °С при соблюдении требований по однородности структуры.

6. Для обеспечения регламентируемого уровня свойств необходимо соблюдать требования по однородности структуры металлизационного

покрытия, которая, как показывают результаты лабораторных исследований, оказывает большое влияние на коррозионную стойкость и трибологические свойства металлизационных покрытий.

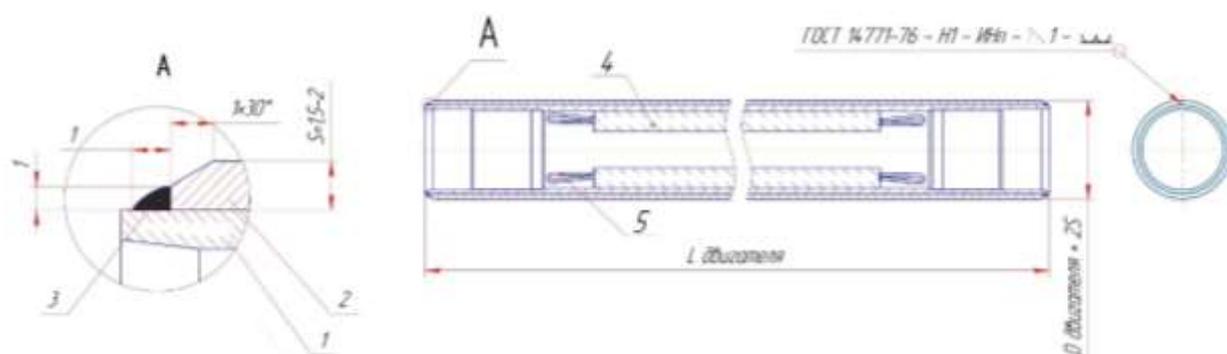
## **6 РАЗРАБОТКА СПОСОБА КОМБИНИРОВАННОЙ ЗАЩИТЫ НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСОВ ПЭД**

Применение металлизационных покрытий для защиты корпуса ПЭД несмотря на очевидные и многочисленные преимущества имеет один серьезный недостаток. В случае спуска насосного агрегата в скважину, в особенности с большой кривизной ствола, подвесное оборудование соударяется со стенками обсадной колонны. При соударениях на металлизационном покрытии, главным образом, цилиндрической части возникают дефекты – царапины и задиры, которые впоследствии при соприкосновении с пластовым флюидом становятся очагами коррозии.

### **6.1 Способ защиты от коррозии и износа ПЭД путем футеровки наружной поверхности**

Для защиты от коррозии и износа корпуса ПЭД разработан и запатентован [116] новый способ комбинированной защиты, сочетающий в себе футеровку цилиндрической части ПЭД с дополнительной металлизацией нефутерованных поверхностей. Данный способ защиты осуществляется путем размещения корпуса ПЭД обычного исполнения внутри полого цилиндрического защитного кожуха из нержавеющей стали таким образом, чтобы места сочленения рабочих узлов, токоввод на корпусе электродвигателя не были закрыты футеровкой и зазор между наружной поверхностью защищаемого узла и внутренней поверхностью защитного кожуха был равномерным и позволял обеспечить собираемость конструкции. Торцы защитного кожуха привариваются по контуру к корпусу узла насосного агрегата аргоно-дуговой сваркой с созданием непрерывного нахлесточного вакуумно-плотного сварного шва между ним и корпусом узла насосного агрегата и получением единой герметичной сварной конструкции (рисунок 6.1). Сварные швы и незакрытые футеровкой для обеспечения своей работоспособности элементы насосного агрегата покрываются

металлизационным покрытием. Монолитное состояние металла позволяет исключить негативное влияние структурных факторов на коррозионную стойкость и износ, и, несомненно, является более выгодной альтернативой применению ПЭД в коррозионнстойком исполнении.



1 – корпус; 2 – футеровка (защитная оболочка); 3 – сварное соединение; 4 – пакеты статора; 5 – обмотка

Рисунок 6.1 – Футерованный корпус погружного электродвигателя. Вид в разрезе

Стойкость основного металла корпуса к коррозии обеспечивается применением коррозионнстойкой стали. В ходе дальнейших исследований проводились исследования нескольких коррозионнстойких марок сталей AISI 316L, AISI 304, 20X13 и сравнение их с распространенными низколегированными сталями.

Коррозионная стойкость определялась в условиях минерализованных водных растворов, насыщенных коррозионно-активными газами (CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>S) при помощи лабораторных автоклавов, оборудованных устройствами автоматического поддержания заданного давления и температуры. Параметры проведения испытаний представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Параметры проведения испытаний

№	Жидкая фаза	Газовая фаза, МПа			Общее давление, МПа	Температура, °С	Длительность, часы
		CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	N <sub>2</sub>			
1	5 % р-р NaCl в воде	3	1	6	10	120	240
2		3	1	6	10	200	240
3		5	1	9	15	120	240
4		5	1	9	15	200	240
5		2	1	0	3	120	1000
6		2	1	0	3	200	1000

Скорость коррозии оценивалась гравиметрическим методом. Скорость коррозии ( $V_k$ ) определялась по формуле 6.1:

$$V_k = \frac{87600 \cdot \Delta m}{S \cdot t \cdot \rho}, \quad (6.1)$$

где:  $V_k$  - скорость коррозии в мм/год;

87600 - коэффициент для перевода размерности показателя скорости коррозии в мм/год;

$\Delta m$  - потеря массы образцов, г;

$S$  - площадь поверхности образца, подвергшейся коррозионному воздействию, см<sup>2</sup>;

$t$  - продолжительность испытания, ч;

$\rho$  - плотность материала, г/см<sup>3</sup>.

Потеря массы в г рассчитывается по формуле 6.2:

$$\Delta m = m_1 - m_2, \quad (6.2)$$

где:  $m_1$  - масса образца до испытания, г;

$m_2$  - масса образца после испытания, г.

По результатам испытаний установлено, что применение стали типа AISI 316L позволяет снизить скорость коррозии более чем на порядок, что обеспечивает антикоррозионную защиту на всем жизненном цикле изделия во всем диапазоне температур и парциальных давлений, возможных в процессе эксплуатации (рисунок 6.2, 6.3; таблица 6.2).

Таблица 6.2 – Результаты испытаний

№ испытания	Марка стали	№ образца	Вес образца с точностью до 0,0001 г.		Скорость коррозии, мм/год	
			До испытаний	После испытаний		
1	AISI 316L	1	2,4723	2,4705	0,010	
		2	2,6614	2,6593	0,011	
		3	2,2978	2,2962	0,009	
	Среднее					<b>0,01</b>
	AISI 304	1	2,7587	2,7547	0,022	
		2	2,7622	2,7586	0,020	
		3	2,7635	2,7607	0,015	
	Среднее					<b>0,02</b>
	35	1	12,5377	12,4909	0,181	
		2	12,6398	12,5948	0,174	
		3	12,5606	12,5107	0,193	
	Среднее					<b>0,18</b>
	30ХГСА	1	11,1657	11,1383	0,109	
		2	11,1297	11,1001	0,117	
		3	11,1287	11,0997	0,115	
	Среднее					<b>0,12</b>
	30Х3МФ	1	12,1015	12,0793	0,088	
		2	12,2142	12,1886	0,101	
3		12,2481	12,2243	0,094		
Среднее					<b>0,09</b>	
20Х13	1	12,5693	12,5597	0,038		
	2	12,5445	12,5335	0,044		
	3	12,5503	12,5407	0,038		
Среднее					<b>0,04</b>	
2	AISI 316L	1	2,8126	2,808	0,025	
		2	2,7664	2,7616	0,026	
		3	2,7755	2,7714	0,022	
	Среднее					<b>0,02</b>
	AISI 304	1	2,3810	2,3735	0,041	
		2	2,3914	2,3858	0,030	
		3	2,1688	2,1637	0,028	
	Среднее					<b>0,03</b>
	35	1	12,6264	12,4566	0,658	
		2	12,6363	12,5022	0,520	
3		12,6443	12,4990	0,563		
Среднее					<b>0,58</b>	

Продолжение таблицы 6.2

	30XГСА	1	11,3003	11,1857	0,455
		2	11,3851	11,2668	0,469
		3	11,2519	11,1328	0,472
	Среднее				<b>0,47</b>
	30X3МФ	1	13,0217	12,9401	0,3236
		2	13,0075	12,9313	0,3022
		3	13,1123	13,0299	0,3268
	Среднее				<b>0,32</b>
	20X13	1	12,5382	12,5043	0,134
		2	12,5121	12,4829	0,118
		3	12,5916	12,5593	0,128
	Среднее				<b>0,13</b>
3	AISI 316L	1	2,7575	2,7548	0,015
		2	2,8032	2,8004	0,015
		3	2,7784	2,7754	0,016
	Среднее				<b>0,02</b>
	AISI 304	1	2,3686	2,3639	0,025
		2	2,4917	2,4862	0,030
		3	2,1472	2,1421	0,028
	Среднее				<b>0,03</b>
	35	1	12,5310	12,3198	0,818
		2	12,5815	12,3914	0,737
		3	12,6158	12,4079	0,806
	Среднее				<b>0,79</b>
20X13	1	12,5615	12,5464	0,060	
	2	12,5950	12,5810	0,056	
	3	12,6543	12,6378	0,065	
Среднее				<b>0,06</b>	
4	AISI 316L	1	2,8343	2,8192	0,082
		2	2,7528	2,7358	0,092
		3	2,7915	2,7765	0,081
	Среднее				<b>0,09</b>
	AISI 304	1	2,3471	2,3289	0,098
		2	2,4258	2,4087	0,093
		3	2,2354	2,2177	0,096
	Среднее				<b>0,10</b>
	35	1	12,1583	11,7582	1,550
		2	12,6472	12,2351	1,597
		3	12,6394	12,2789	1,397
	Среднее				<b>1,51</b>

Продолжение таблицы 6.2

20X13	1	12,6321	12,5921	0,159
	2	12,5748	12,5337	0,163
	3	12,6582	12,6079	0,199
Среднее				<b>0,17</b>
AISI 316L	1	2,7536	2,7524	0,002
	2	2,7590	2,7577	0,002
	3	2,7787	2,7773	0,002
Среднее				<b>0,002</b>
AISI 304	1	2,4401	2,4381	0,003
	2	2,7948	2,7933	0,002
	3	2,3934	2,3913	0,003
Среднее				<b>0,003</b>
35	1	12,6317	12,5178	0,106
	2	12,6201	12,5069	0,105
	3	12,6592	12,5447	0,107
Среднее				<b>0,106</b>
20X13	1	12,5685	12,5516	0,016
	2	12,5013	12,4907	0,010
	3	12,5129	12,5016	0,011
Среднее				<b>0,012</b>

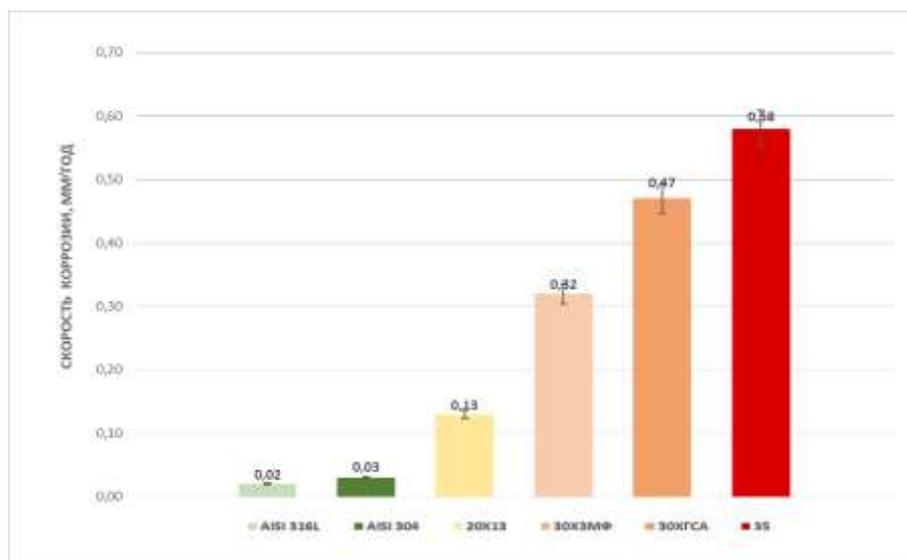


Рисунок 6.2 – Диаграмма скорости коррозии в зависимости от марки стали после выдержки в минерализованной водной среде, насыщенной коррозионно-активными газами (жидкая фаза: 5% NaCl, газовая фаза 3 МПа CO<sub>2</sub>, 1 МПа H<sub>2</sub>S, 6 МПа N<sub>2</sub>) при температуре 120 °С

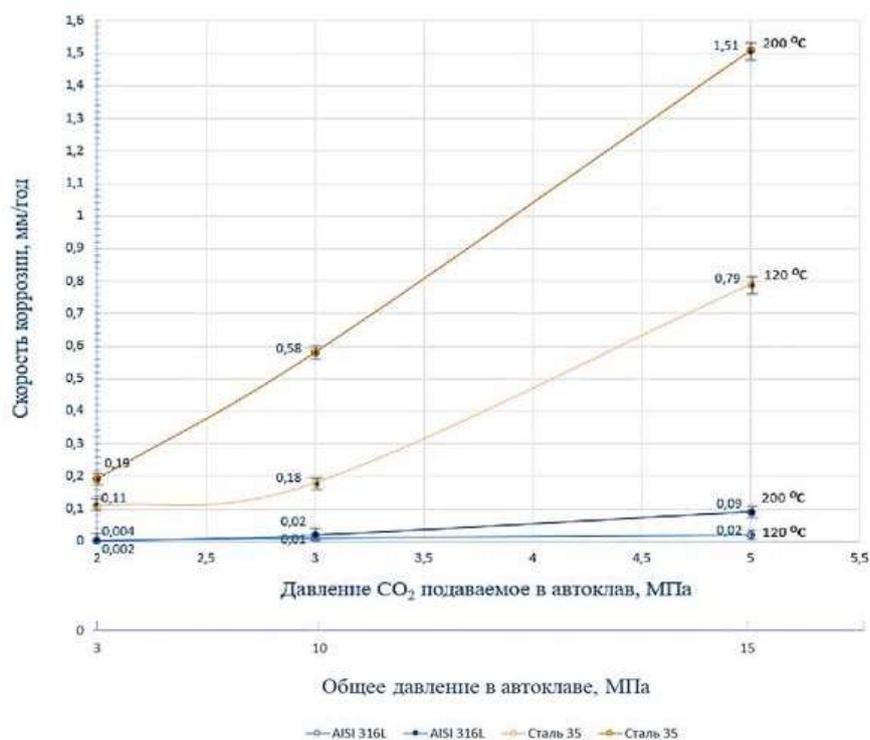


Рисунок 6.3 – Зависимость скорости коррозии от марки стали, температуры, давления и содержания CO<sub>2</sub>

### Выводы по главе

1. Разработанный комбинированный способ защиты заключается в размещении защищаемого узла погружного насосного агрегата внутри полого цилиндрического кожуха из нержавеющей стали и дополнительной металлизации незащищенных поверхностей.

2. Монолитное состояние металла футеровки позволяет исключить негативное влияние структурных факторов на коррозионную стойкость и износ и является более выгодной альтернативой применению ПЭД в коррозионностойком исполнении.

3. Применение стали AISI 316L позволяет снизить скорость коррозии более чем на порядок, что обеспечивает антикоррозионную защиту на всем жизненном цикле изделия во всем диапазоне температур и парциальных давлений, возможных в процессе эксплуатации ПЭД.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. По результатам проведенных исследований и анализа статистических данных установлено, что самой распространенной причиной отказа является коррозия корпуса ПЭД. Исследование аварийных корпусов ПЭД позволило выявить основные причины, инициирующие коррозионное разрушение металла корпуса: механические повреждения, абразивный износ, низкая толщина слоя покрытия или ее локальное снижение, а также нарушения сплошности слоя покрытия. В результате разработан альбом отказов, на основании которого возможна первичная идентификация причин разрушения по визуальным признакам.

2. Установлена стадийность процесса протекания коррозионного разрушения в условиях эксплуатации ПЭД, а также то, что основное влияние на коррозионную стойкость оказывает не химический состав покрытия, а его пористость, поскольку разрушение происходит по механизму подпленочной коррозии с образованием карбонатов и/или сульфидов железа.

3. Разработана методика ускоренных коррозионных испытаний металлизационных покрытий и показано, что результаты испытаний по предложенной методике коррелируют с наблюдаемыми коррозионными разрушениями, полученными в ходе эксплуатации ПЭД. Условия проведения испытаний по разработанной методике позволили исключить влияние вклада электрохимических процессов при контакте корпуса автоклава с образцами, а также сократить объем испытаний вследствие оценки совместного влияния сероводорода и углекислого газа.

4. Установлено, что основное влияние на коррозионные свойства металлизационных покрытий ПЭД оказывает сплошность и пористость слоя покрытия, последняя из которых обусловлена значительной неоднородностью структуры (оксидная прослойка, образованная на дистанции напыления, как правило, является пористой).

5. Показано, что основной причиной преждевременного разрушения корпуса ПЭД является неблагоприятное структурное состояние металлизационного покрытия ПЭД, поэтому для повышения износо- и коррозионной стойкости металлизационных покрытий ПЭД необходимо минимизировать или исключить возможность окисления напыляемых частиц, которые снижают когезионную прочность покрытия и способствуют проникновению среды через слой покрытия к поверхности металла. Для достижения благоприятного структурного состояния особое внимание необходимо уделить технологии распыления и оптимизации параметров процесса распыления.

6. В условиях эксплуатации ПЭД эффективность применения электродугового металлизационного покрытия на основе нержавеющей стали проявляется при наличии слоя эпоксидной пропитки, который ограничивает доступ агрессивной среды к поверхности металлизационного покрытия.

7. На основании проведенного анализа условий эксплуатации, причин отказов изолированных корпусов ПЭД, а также результатов комплексных лабораторных исследований металлизационных покрытий разработаны и внедрены на предприятиях, осуществляющих нанесение металлизационных покрытий «Технические требования к газотермическим металлизационным покрытиям погружных электродвигателей» с целью обеспечения их повышенной коррозионной стойкости.

В разработанных технических требованиях сформулированы требования к основным физическим, механическим, физико-механическим, трибологическим и коррозионным свойствам газотермических металлизационных покрытий, применяемых для защиты корпуса ПЭД.

8. Разработан способ комбинированной защиты корпуса ПЭД путем футеровки его наружной цилиндрической поверхности и дополнительной металлизации нефутерованных поверхностей, в том числе сварных швов. Доказано, что применение стали AISI 316L для футеровки обеспечивает необходимый ресурс во всем диапазоне температур и давлений, возможных

при эксплуатации корпуса ПЭД. (Патент на изобретение № 2734201).

9. В целом в диссертационной работе изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения и разработки по совершенствованию защитных металлизационных покрытий корпусов погружных электродвигателей, имеющие существенное значение для развития нефтепромыслового машиностроения.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Пеняев, И.Н. Анализ отказов глубинно-насосного оборудования в условиях высокого солеобразования при добыче нефти на месторождениях Западной Сибири: бакалаврская работа. Томск: ТПУ. – 2019.
2. Даминов, А.А. Коррозия подземного оборудования добывающих скважин, оборудованных УЭЦН / А.А. Даминов // Территория нефтегаз. – 2009. – №8. – С.32-36.
3. Романов, В. С. Статистический анализ технологических нарушений в эксплуатации погружных электродвигателей / В.С. Романов, В.Г. Гольдштейн, Н.С. Васильева // Труды Кольского научного центра РАН. – 2018. – №3-16 (9). – С.114-121.
4. Молчанов, А.Г. Подземный ремонт скважин: учебное пособие для учащихся профтехобразования и рабочих на производстве / А.Г. Молчанов. – М.: Недра, 1986. – 208 с.
5. Боровик, О.В. Анализ эффективности работы УЭЦН на месторождениях Краснодарского края / О.В. Боровик, О.В. Савенок // Научный журнал «Наука. Техника. Технологии» (политехнический вестник). – 2017. – № 2. – С.34-61.
6. Romanov, V.S. The dynamic improvement methods of energy efficiency and reliability of oil production submersible electric motors / V.S. Romanov, V.G. Goldstein // Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – Vol. 944. – DOI:10.1088/1742-6596/944/1/012099.
7. ТУ 14-3-1941-1994. Трубы стальные бесшовные холоднотянутые особовысокой точности для корпусов подвижных электродвигателей и насосов. Технические условия. – Введен 01.11.1994, 1994. – 18 с.
8. ТУ 14-3Р-134-2014. Трубы бесшовные холоднокатаные особо высокой точности из конструкционных и коррозионностойких марок стали. – Введен 05.05.2014, 2014. – 18 с.

9. №П1-01.05 М-0005. Методические указания компании «Единые технические требования к УЭЦН, ШСНУ, НКТ и другому оборудованию для добычи нефти». – Введен 26.05.2016, 2016. – 17 с.
10. ТУ 3381-010-27285465-2016. Электродвигатели асинхронные погружные серии ПЭД-Я. – Введен 20.10.2016, 2016. – 59 с.
11. Кудряшов, С.И. Надежность погружного оборудования в осложненных условиях месторождений ОАО «Юганскнефтегаз» / С.И. Кудряшов, Ю.А. Левин, В.Д. Маркелов, О.М. Перельман, С.Н. Пещеренко, А.И. Рабинович, С.Д. Слепченко // Научно-технический журнал «Технологии ТЭК». – 2004. – №5. – с. 54-59.
12. Ивановский, В.Н. Анализ современного состояния и перспектив развития скважинных насосных установок для добычи нефти / В.Н. Ивановский // Территория Нефтегаз. – 2007. – №11. – С.26-47.
13. Ивановский, В.Н. Коррозия скважинного оборудования и способы защиты от нее / В.Н. Ивановский // Территория Нефтегаз. – 2011. – №1. – С.18-25.
14. Байбурин, И.Р. Особенности эксплуатации УЭЦН в осложненных условиях ООО «РН-Ставропольнефтегаз» / И.Р. Байбурин, Ф.З. Булюкова, В.У. Ямалиев // Нефтегазовое дело. – 2011. – №1. – С.31-34.
15. Апасов, Т.К. Протекторная защита от коррозии в скважинах с УЭЦН [Электронный ресурс] / Т.К. Апасов, Г.Т. Апасов, Д.В. Порожняков, А.В. Саранча // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – Режим доступа: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=21994>.
16. Левин, И.С. Анализ эффективности эксплуатации нефтяных скважин установками электроцентробежных насосов на нефтяном месторождении «N» (Томская область): бакалаврская работа. Томск: ТПУ. – 2019. – 82 с.
17. Казанчева, А.Н. Эксплуатация скважин, оборудованных УЭЦН, на Вачимском месторождении / А.Н. Казанчева // Академический журнал Западной Сибири. – 2019. – №1. – С.3-4.
18. Выбойщик, М.А. Научные основы разработки и методология создания сталей для производства нефтепромысловых труб повышенной прочности

- и коррозионной стойкости / М.А. Выбойщик, А.В. Иоффе // Вектор науки ТГУ. – 2019. – №1 (47). – С.13-20.
19. Розен, А.Е. Актуальность внедрения труб с повышенными эксплуатационными характеристиками из слоистых металлических материалов с внутренним протектором в нефтегазодобывающую промышленность / Е. Г. Исаков, А. Е. Розен // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте: Сборник статей VI Всероссийской научно-технической конференции для молодых ученых и студентов с международным участием, Пенза, 19–20 марта 2020 года / Под общей редакцией В.В. Салмина. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет. – 2020. – С. 49-51.
20. Ялалов, А.А. Методы борьбы с механическими примесями / А.А. Ялалов // Наука и современность: сборник материалов ЛII Международной научно-практической конференции (27 апреля 2017 г.), Новосибирск. – 2017. – С.139-144.
21. Bulchaev, N.D. Abumuslimov. Mining Technology Using Oil Installations of Electric Centrifugal Pumps in the Harsh Conditions (in case of Vankor Field) / N.D. Bulchaev, M.Sh. Mintsayev, I.G. Gairabekov, A.S. Abumuslimov // Proceedings of the International Symposium «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» (ISEES 2018). – 2018. – Vol. 177. – С. 436-446. – DOI: <https://doi.org/10.2991/isees-18.2018.83>.
22. Акопов, Е. Ю. Обоснование и выбор методов повышения ресурса погружных центробежных насосов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Акопов Енок Юрьевич. – Москва, 2017. – 165 с.
23. Александров, А.Н. Повышение эффективности эксплуатации скважин электроцентробежными насосами в условиях образования асфальтосмолопарафиновых отложений / А.Н. Александров, М.К. Рогачев // Булатовские чтения. – 2017. – Т. 2. – С.14-19.
24. Рогачева, Е.В. Методы борьбы с осложнениями, связанными с АСПО / Е.В. Рогачева // Новая наука: от идеи к результату. – 2017. – № 1-3. – С.40-42.

25. Фаритов, А.Т. Исследование закономерностей внутренней коррозии нефтегазопроводов на поздней стадии разработки месторождений и повышение их эксплуатационной надежности: дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.19, 05.26.03 / Фаритов Айрат Табрисович. – Уфа, 2006. – 130 с.
26. Борисенкова, Е.А. Разработка и применение методов исследования влияния состава и структуры материалов стальных труб на коррозионную стойкость в нефтяных средах: дисс. ... канд.техн.наук: 05.16.09 / Борисенкова Екатерина Александровна. – Самара, 2016. – 198 с.
27. Топольников, А.С. Прогнозирование углекислотной коррозии подземного оборудования нефтедобывающих скважин / А.С. Топольников // Инженерная практика. – 2011. – №8. – С.94-101.
28. De Waard, C. Prediction of CO<sub>2</sub> Corrosion of Carbon Steel / C. De Waard, U. Lotz // Corrosion. – 1993. – Paper 69.
29. Netic, S. On the Dependence of Steel Corrosion in Oxygen-Free Aqueous Media on pH and the Pressure of CO<sub>2</sub>/ S. Netic, G.T. Solvi, J. Energhaug // Corrosion. – 1995. – Vol. 51. – № 10. – P. 773.
30. Маркин, А.Н. Исследование углекислотной коррозии стали в условиях осаждения солей / А.Н. Маркин, Н.Е. Легезин // Защита металлов. – 1993. Т. 29. – № 3. – С. 452–459.
31. Burke, P.A. Assessment of CO<sub>2</sub>-Corrosion in the cotton valley Limestone trend / P.A. Burke, R.H. Hausler // Materials Performance. – 1985. – Vol. 24. – № 8. – P. 26–35.
32. Кузнецов, В.П. Нефтяная промышленность. РНТС. Сер. Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности. К вопросу о механизме углекислотной коррозии углеродистой стали / В.П. Кузнецов. Н.Г. Черная. – М.: ВНИИО ЭНГ, 1980. Вып. 8. – С. 2–5.
33. Ikeda, A., Prevention of CO<sub>2</sub> Corrosion of Line Pipe and Oil Country Tubular Goods / A. Ikeda, S. Mukai, M. Ueda // Corrosion. – 1984. – P. 289.

34. Videm, K. Effect of Flow Rate, pH, Fe<sup>2+</sup> concentration and steel quality on the CO<sub>2</sub> corrosion of carbon steels / K. Videm, A. Dugstad // Corrosion. – 1987. – P. 42.
35. Videm, K. Film covered corrosion, Film breakdown and Pitting attack of carbon steels in aqueous CO<sub>2</sub> / K. Videm, A. Dugstad // Corrosion. – 1988. – P. 186.
36. Hausler, R.H. CO<sub>2</sub> corrosion and its prevention by chemical inhibition in oil and gas production / R.H. Hausler, D.W. Stegmann // Corrosion. – 1988. – P. 363.
37. Кузнецов, В.П. Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности. Влияние объема воды на величину углекислотной коррозии стальных труб газоконденсатных скважин и некоторые вопросы механизма этого процесса // В.П. Кузнецов, С.А. Цепелев. – М.: ВНИИО ЭНГ, 1978. – Вып. 6. – С. 9-12.
38. Хуршудов, А.Г. Борьба с коррозией и защита окружающей среды. Отечественный опыт. Эффективность ингибирования углекислотной коррозии в условиях образования вторичных осадков // А.Г. Хуршудов, А.Н. Маркин, И.С. Сивоконь. – М.: ВНИИО ЭНГ, 1988. – Вып. 2. – С. 1-4.
39. Маркин, А.Н. О прогнозировании углекислотной коррозии углеродистой стали в условиях образования осадков солей / А.Н. Маркин // Защита металлов. – 1995. – Т. 31. – № 4. – С. 405–411.
40. Хуршудов, А.Г. Прогнозирование углекислотной коррозии нефтегазопроводов / А.Г. Хуршудов, И.С. Сивоконь, А.Н. Маркин // Нефтяное хозяйство. – 1989. – № 11. – С. 59–61.
41. Маркин, А.Н. Нефтепромысловая химия: практическое руководство / А.Н. Маркин, Р.Э. Низамов, С.В. Суховерхов. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 288 с.
42. Саакян, Л.С. Защита нефтегазопромыслового оборудования от коррозии / Л.С. Саакян, А.П. Ефремов. – М.: Недра, 1982. – 206 с.
43. Jones, L.W. Corrosion and Water Technology for Petroleum Producers / L.W. Jones // Oil & Gas Consultants Int. Inc. – Tulsa, 1998. – 202 p.

44. Гоник, А.А. Коррозия нефтепромыслового оборудования и меры ее предупреждения / А.А. Гоник. – М.:Недра, 1976. – 192 с.
45. Иоффе, А.В. Научные основы разработки сталей повышенной прочности и коррозионной стойкости для производства нефтепромысловых труб: дисс. ... д-ра техн.наук: 05.16.09 / Иоффе Андрей Владиславович. – Тольятти, 2018. – 362 с.
46. Гареев, А. Г. Коррозия и защита металлов в нефтегазовой отрасли / А. Г. Гареев, Р. Г. Ризванов, О. А. Насибуллина. – Уфа: Издательство «Гилем» НИК «Башкирская энциклопедия», 2016. – 352 с. – ISBN 9785881853259.
47. Мукатдисов, Н.И. Методы борьбы с коррозией и преимущества ингибиторной защиты нефтепромыслового оборудования / Н.И. Мукатдисов, А.Р. Фархутдинова, А.А. Елпидинский // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – №3. – С.279-282.
48. Лось, И.С. Разработка фундаментальных закономерностей создания слоистых металлических коррозионно-стойких материалов с внутренним протектором: дисс. ... д-ра техн.наук: 05.16.09 / Лось Ирина Сергеевна. – Пенза, 2020. – 338 с.
49. Валюшок, А. В. О катодной защите скважин и погружного оборудования / А. В. Валюшок // Территория Нефтегаз. – 2010. – № 2. – С. 30-33.
50. Кантор, О.Г. Сравнительный анализ методов устранения коррозионного растрескивания под напряжением в газопроводах / О.Г. Кантор, Б.Р. Нурдаулетов, И.Р. Кузеев // Азимут научных исследований: экономика и управление. – 2019. – Т. 8. – № 3(28). – С. 278-281. – DOI 10.26140/anie-2019-0803-0066.
51. Джаббаров, Ш.Н. Подверженность коррозии подземного оборудования по добыче нефти и газа / Ш.Н. Джаббаров // Точная наука: Сб. стат. 18 междунар. науч. конф. «Техноконгресс» (11 декабря 2017 г.), г. Кемерово. – 2017. – С. 3-7.
52. Абдрахманов, Н.Х. Обеспечение безопасности технологических трубопроводных систем на предприятиях нефтегазового комплекса / Н.Х.

- Абдрахманов, А.А. Турдыматов, К.Н. Абдрахманова, В.В. Ворохобко // Нефтегазовое дело. – 2015. – №4. – С.86-105.
53. Лурье, А.З. Применение износостойких покрытий для сокращения затрат и снижения рисков при добыче трудноизвлекаемых запасов / А.З. Лурье // Инженерная практика. – 2015. – №12. – С. 15-17.
54. Лурье, А.З. Применение газотермических покрытий для повышения ННО УЭЦН / А.З. Лурье // Инженерная практика. – 2011. – №04. – С.78-80.
55. Dorfman, M.R. Thermal Spray Coatings / M.R. Dorfman // Handbook of Environmental Degradation of Materials (Third Edition) Edited by M. Kutz. W. Andrew. Applied Science Publishers. – 2018. – P. 469-488. – DOI: doi.org/10.1016/B978-0-323-52472-8.00023-X.
56. Oksa, M. Optimization and Characterization of High Velocity Oxy-fuel Sprayed Coatings: Techniques, Materials, and Applications / M. Oksa, E. Turunen, T. Suhonen, T. Varis, S.-P Hannula // Coatings. –2011. – №1. – P. 17-52. – DOI:10.3390/coatings1010017.
57. Балдаев, Л.Х. Газотермическое напыление / Л. Х. Балдаев, В. Н. Борисов, В. А. Вахалин [и др.]. – Москва: ООО «Старая Басманная», 2015. – 540 с. – ISBN 9785906470454.
58. Assadi, H. Cold spraying. A materials perspective / H. Assadi, H. Kreye, F. Gartner, T. Klassen // Acta Materialia. – 2016. – Vol. 116. – P. 382-407. – DOI: dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.034.
59. Лобанов, М.Р. Защитные покрытия: Учебное пособие / М. Л. Лобанов, Н. И. Кардолина, Н. Г. Россина, А. С. Юровских. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2014. – 200 с. – ISBN 9785799611019.
60. Pardo, A. Pitting corrosion behavior of austenitic stainless steels – combining effects of Mn and Mo additions / A. Pardo, M.C. Merino, A.E. Coy, F. Viejo, R. Arrabal, E. Matykina // Corrosion Science. – 2008. – № 50. – P. 1796-1806. – DOI: doi:10.1016/j.corsci.2008.04.005.
61. Tomio, A. Role of alloyed molybdenum on corrosion resistance of austenitic Ni–Cr–Mo–Fe alloys in H<sub>2</sub>S–Cl<sup>-</sup> environments / A. Tomio, M. Sagara, T. Doi, H.

- Amaya, N. Otsuka, T. Kudo // *Corrosion Science*. – 2015. – № 98. – P. 391-398. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2015.05.053>.
62. Zhang, H. Effect of Ni content on stainless steel fabricated by laser melting deposition / H. Zhang, C.H. Zhang, Q. Wang, C.L. Wu, S. Zhang, J. Chen, A.O. Abdullah // *Optics and Laser Technology*. – 2018. – №101. – P. 363-371. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.11.032>.
63. Garcia-Rodriguez, S. 316L stainless steel coatings on ZE41 magnesium alloy using HVOF thermal spray for corrosion protection / S. Garcia-Rodriguez, A.J. Lopez, B. Torres, J. Rams // *Surface & Coat. Tech.* – 2016. – Vol. 287. – P. 9-19. – DOI: [10.1016/j.surfcoat.2015.12.075](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.12.075).
64. Sousa, C.A.C. Relationship between niobium content and pitting corrosion resistance in ferritic stainless steels / C.A.C. Sousa, S.E. Kuri // *Material Letters*. – 2004. – № 25. – P. 57-60. – DOI: [10.1016/0167-577X\(95\)00134-4](https://doi.org/10.1016/0167-577X(95)00134-4).
65. Alonso-Falleiros, N. Effect of Niobium on Corrosion Resistance to Sulfuric Acid of 430 Ferritic Stainless Steel / N. Alonso-Falleiros, S. Woly nec // *Materials Research*. – 1998. – Vol.1. – No. 1. – P. 39-45. – DOI: [10.1590/S1516-14391998000100007](https://doi.org/10.1590/S1516-14391998000100007).
66. Sarkar, K. Composite (glass+crystalline) coatings from blast furnace pig iron by high velocity oxy-fuel (HVOF) process and their electrochemical behavior / K. Sarkar, P.K. Rai, P.K. Katiyar // *Surface & Coat. Tech.* – 2019. – № 372. – P.72-83. – DOI: [10.1016/j.surfcoat.2019.05/025](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05/025).
67. Sousa, C.A.C. Corrosion resistance of Fe-Cr-based amorphous alloys: An overview / C.A.C. Sousa, D.V. Ribeiro, C.S. Kiminami // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2016. – Vol. 442. – P. 46-66. – DOI: [10.1016/j.jnoncrysol.2016.04.009](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.04.009).
68. Syrek-Gerstenkorn, B. Use of thermally sprayed aluminium (TSA) coatings to protect offshore structures in submerged and splash zones / B. Syrek-Gerstenkorn, S. Paul, A. J. Davenport // *Surface & Coat. Tech.* – 2019. – Vol. 374. – P. 124-133. – DOI: [10.1016/j.surfcoat.2019.04.048](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.048).

69. Spencer, K. The use of Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cold spray coatings to improve the surface properties of magnesium alloys / K. Spencer, D.M. Fabijanic, M.-X. Zhang // *Surface & Coat. Tech.* – 2009. – Vol. 204. – P. 336-344. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.07.032.
70. Bu, H. Effect of heat treatment on the intermetallic layer of cold sprayed aluminum coatings on magnesium alloy / H. Bu, M. Yandouzi, C. Lu, B. Jodoin // *Surface & Coat. Tech.* – 2011. – Vol. 205. – P. 4665-4671. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.04.018.
71. Knuuttila, J. Sealing of thermal spray coatings by impregnation. / J. Knuuttila, P. Sorsa, T. Mäntylä et al // *Therm Spray Tech* 8. – 1999. – P.249–257. – <https://doi.org/10.1007/s11666-999-0002-2>.
72. Лобанов, Н. Ф. Создание объёмно-пространственной структуры газотермического подслоя противокоррозионного покрытия / Н. Ф. Лобанов, М. Н. Каменский // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* – 2014. – № 2. – С. 62-67.
73. Елагина, О. Ю. Особенности применения протекторных металлизационных покрытий для коррозионной защиты металлоконструкций, работающих в морской среде / О. Ю. Елагина, А. В. Бурякин, В. В. Жук // *Территория Нефтегаз.* – 2016. – № 11. – С. 70-75.
74. Гафарова, В.А. Материалы и способ заделки трещин в нефтегазовом оборудовании в межремонтный период эксплуатации: дисс. ... канд.техн.наук: 05.16.09 / Гафарова Виктория Александровна. – Уфа, 2019. – 145 с.
75. Штанский, Д. В. Многофункциональные наноструктурированные пленки / Д. В. Штанский // *Успехи химии.* – 2007. – Т. 76. – № 5. – С. 501-509.
76. Levashov, E.A. Self-propagating high-temperature synthesis of advanced materials and coatings / E.A. Levashov, A.S. Mukasyan, A.S. Rogachev, D.V. Shtansky // *Int. Mater. Reviews.* – 2016. – DOI: 10.1080/09506608.2016.1243291.

- 77.Амосов, А. П. Наноматериалы технологии СВС для триботехнического применения Обзор / А. П. Амосов // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2016. – № 4. – С. 17-33. – DOI 10.17073/1997-308X-2016-4-17-33.
- 78.Штанский, Д.В. Нанокпозиционные антифрикционные покрытия для инновационных триботехнических систем / Д. В. Штанский, А. В. Бондарев, Ф. В. Кирюханцев-Корнеев, Е. А. Левашов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2015. – № 7(721). – С. 77-83.
- 79.Montemor, M.F. Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances / M.F. Montemor // Surface & Coat. Tech. – 2014. – Vol. 258. – P. 17–37. – DOI: dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.06.031.
- 80.ГОСТ 31993-2013 Материалы лакокрасочные. Определение толщины покрытия. – М.: Стандартиформ. – 2014.
- 81.ГОСТ 9.304-87 Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия газотермические. Общие требования и методы контроля. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 2001.
- 82.ТУ 2458-001-51944091-2015. Системы покрытий для защиты внутренних поверхностей емкостного оборудования от интенсивного коррозионного разрушения. – Введен 25.11.2015, 2015. – 35 с.
- 83.ГОСТ 32299-2013 Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва. – М.: Стандартиформ. – 2014.
- 84.ГОСТ 2999-75 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. – М.: Издательство стандартов. – 1987.
- 85.ГОСТ 23.208-79 Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы. – М.: Стандартиформ. – 2005.
- 86.ОТТ-25.220.01-КТН-054-15 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Заводское эпоксидное покрытие труб. Общие технические требования. – 38 с.

- 87.ГОСТ 27037-86 Материалы лакокрасочные. Метод определения устойчивости к воздействию переменных температур. – М.: Издательство стандартов. – 1987.
- 88.Князева, Ж.В. Классификация причин разрушения металлизационного покрытия погружных электродвигателей при эксплуатации / Ж.В. Князева, П.Е. Юдин, А.П. Амосов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2019. – No. 9. – С. 25—32. – DOI: 10.30987/article\_5d2df0884cc457.62830322
89. Князева, Ж.В. Применение металлизационных покрытий для защиты погружных электродвигателей насосного оборудования от воздействия осложняющих факторов в нефтяных скважинах / Ж.В. Князева, П.Е. Юдин, С.С. Петров, А.В. Максимук // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2020. – No. 1. – С. 75–86. – DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-75-86.
- 90.Knyazeva, Zh. V. Using Metal-Sprayed Coatings to Protect Submersible Electric Pump Motors from the Impact of Complicating Factors in Oil Wells / Zh. V. Knyazeva, P. E. Yudin, S. S. Petrov, A. V. Maksimuk. // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2020. – Vol. – 61. – No. 5. – p. 592–599.
- 91.ISO 2815-2003 Краски и лаки. Испытание на вдавливание по Бухгольцу. – 2003.
- 92.ГОСТ 24621-2015 (ISO 868:2003) Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору). – М.: Стандартиформ. – 2016
- 93.ГОСТ Р 54586-2011 (ИСО 15184:1998) Материалы лакокрасочные. Метод определения твердости покрытия по карандашу. – М.: Стандартиформ. – 2012.
- 94.ГОСТ Р 58346-2019 Трубы и соединительные детали стальные для нефтяной промышленности. Покрытия защитные лакокрасочные внутренней поверхности. Общие технические требования. – М.: Стандартиформ. – 2019.

95. Князева, Ж.В. Исследование барьерных свойств металлизационных покрытий / Ж.В. Князева, П.Е. Юдин, С.С. Петров, А.В. Максимук // Нефтегазовое дело. – 2021. – №1. – С.121-130. – DOI: 10.17122/ngdelo-2021-1-121-130.
96. Князева, Ж.В. Автоклавные испытания металлизационных покрытий / Ж.В. Князева, П.Е. Юдин // Перспективное развитие науки, техники и технологий: сб. научн. стат. 10-й Междунар. научно-практич. конф. (30 октября 2020 года) / редкол.: Горохов А.А. (отв. ред.); Юго-Зап. гос. ун-т. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. – 2020. – С.74-77. – DOI: 10.47581/2020/30.10.2020/МТО53/1/018.
97. Князева, Ж.В. Оценка барьерных свойств внутренних антикоррозионных покрытий нефтепроводных и насосно-компрессорных труб с помощью автоклавного теста / П.Е. Юдин, Ж.В. Князева // Трубопроводный транспорт [теория и практика]. – 2016. – №1. – С.14-19.
98. Князева, Ж.В. Новая методика автоклавного теста для экспресс-анализа антикоррозионных покрытий / Е.В. Александров, П.Е. Юдин, Ж.В. Князева // Трубопроводный транспорт [теория и практика]. – 2015. – №3. – С.16-24.
99. Bolelli, G. HVOF-sprayed WC–CoCr coatings on Al alloy: Effect of the coating thickness on the tribological properties / G. Bolelli, L. Lusvarghi, M. Barletta // Wear. – Vol. 267. – Issues 5–8. – 2009. – P. 944-953. – ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.066>.
100. Stupnyts'kyi, T.R. Optimization of the Chromium Content of Powder Wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B Systems According to the Corrosion Resistance of Electric-Arc Coatings / T.R. Stupnyts'kyi, M.M. Student, H.V. Pokhmurs'ka // Mater Sci 52. – 2016. – P. 165–172. – <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9939-8>.
101. Freyman, C. Suppression of Moisture Sensitivity of Friction in Carbon-Based Coatings / C. Freyman, B. Zhao, Y-W. Chung // Northwestern University. – 2220 N Campus Dr. – Evanston. – IL 60208. – USA.

102. Cho, D.-H. The Effects of Surface Roughness and Coatings on the Tribological Behavior of the Surfaces of a Piston Skirt / D.-H. Cho, S.-A. Lee, Y.-Z. Lee // *Tribology Transactions*. – 53(1). – 2009. – P. 137–144. – doi:10.1080/10402000903283276/.
103. Лебедев, Д.И. Формирование структуры и свойств контактной поверхности порошковых покрытий системы Ni-Cr-B-Si с ультрадисперсными добавками: автореферат дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.09 / Лебедев Дмитрий Иосифович. – Комсомольск на Амуре, 2014. – 23 с.
104. Gedzevicius, I. Analysis of wire arc spraying process variables on coatings properties / I. Gedzevicius, A.V. Valiulis // *Journal of Materials Processing Technology*. – Vol. 175. – Issues 1–3. – 2006. – P. 206-211. – ISSN 0924-0136, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.019>.
105. Zhao, W.-M. Electrochemical evaluation of corrosion resistance of NiCrBSi coatings deposited by HVOF / W.-M. Zhao, Y. Wang, T. Han, K.-Y. Wu, J. Xue // *Surface and Coatings Technology*. – 183 (1). – 2004. – P. 118–125. – doi:10.1016/j.surfcoat.2003.09.053.
106. Полетаев, В. А. Исследование деталей электронасосов, упрочненных металлизацией, на износостойкость / В. А. Полетаев, Н. В. Третьякова, И. А. Карамов // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. – 2007. – № 3. – С. 56-58.
107. Коробов, Ю. С. Анализ свойств газотермических покрытий: учебное пособие: в 2-х ч. М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. Ч. 2: Оценка параметров покрытий / Ю. С. Коробов. 92 с.
108. Ni, W. Effects of the ratio of hardness to Young's modulus on the friction and wear behavior of bilayer coatings / W. Ni, Y.-T. Cheng, M. J. Lukitsch, A. M. Weiner, L. C. Lev, D. S. Grummon // *Applied Physics Letters*. – 85 (18). – 2004. – 4028–4030. – doi:10.1063/1.1811377.

109. Верхорубов, В.С. Влияние плазменного оплавления на износостойкость металлизационных покрытий системы Fe-C-Cr-Ti-Al: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10 / Верхорубов Вадим Сергеевич. – Екатеринбург, 2015. – 22 с.
110. Емелюшин, А.Н. Исследование структуры и ударно-абразивной износостойкости покрытий системы Fe-C-Cr-Mn-Si, дополнительно легированных азотом / А.Н. Емелюшин, Е.В. Петроченко, С.П. Нефедьев // Сварочное производство. – №. 10. –2011. – С. 18-22.
111. Емелюшин, А. Н. Повышение эксплуатационной стойкости инструментальных материалов плазменно-порошковой наплавкой / А. Н. Емелюшин, С. П. Нефедьев, В. А. Казанков // Современное образование: опыт прошлого, взгляд в будущее: сб. стат. Всеросс. методико-практической конф., Петрозаводск, 06 декабря 2020 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская Ирина Игоревна), 2020. – С. 173-178. – DOI 10.46916/09122020-2-978-5-00174-065-0.
112. Князева, Ж.В. Исследование механических свойств и структуры газотермических металлизационных покрытий / Ж.В. Князева, П.Е. Юдин // Научно-практический рецензируемый журнал «Современные материалы, техника и технологии». – №4 (35). – 2020 г. – ISSN 2411-9792. – С.42-47. DOI: 10.47581/2020/30.10.2020/SMТТ/32.5.006.
113. Сергеев, Н.Н. Металлографические и коррозионные исследования металлических покрытий, напыляемых на сталь 30ХГСА / Н.Н. Сергеев, М.В. Ушаков, А.Н. Сергеев // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2019. – №7. – С. 35-52.
114. Grabke, H. J. The effects of chlorides, hydrogen chloride, and sulfur dioxide in the oxidation of steels below deposits / H. J. Grabke, E. Reese, M. Spiegel // Corrosion Science. – 37(7). – 1995. – P. 1023–1043. – doi:10.1016/0010-938x(95)00011-8.

115. Sadeghimeresht, E. Corrosion performance of bi-layer Ni/Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>–NiCr HVAF thermal spray coating / E. Sadeghimeresht et al. //Applied Surface Science. – 2016. – Т. 369. – Р. 470-480.
116. Патент на изобретение №2734201. Способ защиты от коррозии погружного насосного агрегата путем футеровки наружной поверхности и его узлов / Н.А. Баранов, П.Е. Юдин, А.В. Максимук, М.В. Желдак, С.С. Петров, Ж.В. Князева – Заявка №2019125064. Заявлено 06.08.2019. Зарегистрировано 13.10.2020. Опубликовано 13.10.2020. Бюллетень №29.

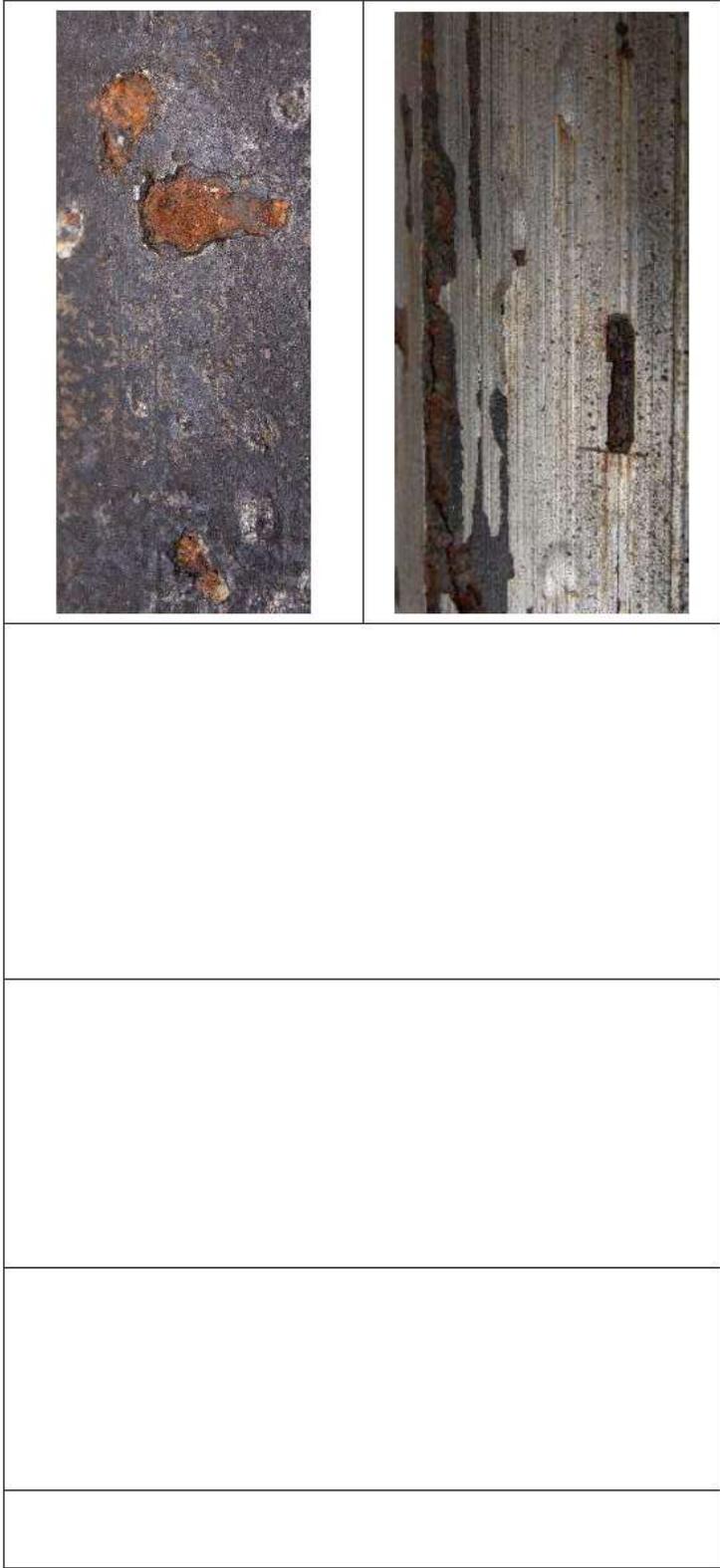
## ПРИЛОЖЕНИЕ А

**Альбом. Виды повреждений металлизационного покрытия корпусов погружных электродвигателей при эксплуатации**

	<p>ООО «Научно-производственный центр «Самара»          Юридический адрес: Россия, 443001, г. Самара, ул. Ульяновская/Ярмарочная, д. 52/55          Фактический/почтовый адрес: Россия, 443022, г. Самара, Гаражный проезд, д. 3, лит. Е          +7 (846) 932-03-23          office@nprsamara.ru</p>
<p>СОГЛАСОВАНО          Директор по науке          ООО «НПЦ «Самара»  <i>Юдин П.Е.</i>          «20» <i>ноя</i> 2019 г.</p>	<p>УТВЕРЖДАЮ          Управляющий          ООО «НПЦ «Самара»          Максимук А.В.          «20» <i>ноя</i> 2019 г.</p> 
<p><b>АЛЬБОМ</b></p>	
<p><b>Виды повреждений металлизационного покрытия корпусов погружных электродвигателей при эксплуатации</b></p>	
<p>РАЗРАБОТАНО          Научный сотрудник          ООО «НПЦ «Самара»  <i>Князева Ж.В.</i>          «20» <i>ноя</i> 2019 г.</p>	
<p>Самара – 2019</p>	

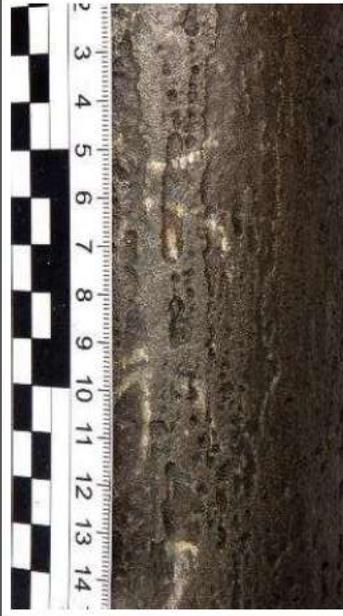
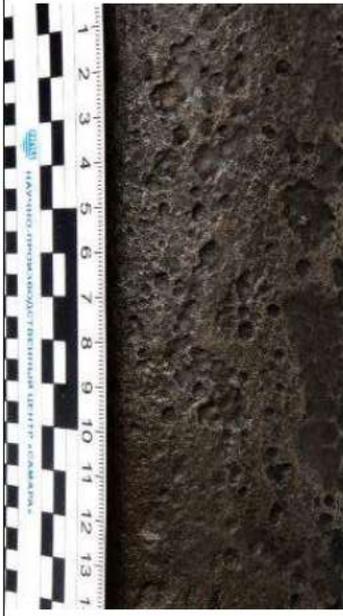
№п/п	Классификация повреждения	Описание	Причины возникновения	Фото
I	Механические повреждения	Представляют собой задиры – глубокие царапины на поверхности корпусов ПЭД и ЭЦН продольной (реже поперечной ориентации).	<p>Образование повреждений происходит при механическом контакте корпуса с обсадной колонной, либо соприкасающимся оборудованием во время проведения СПО. В основном это происходит за счет кривизны ствола скважины.</p> <p><b>Кинетика процесса:</b></p> <p>Механические повреждения корпуса в зависимости от интенсивности приводят к «оголению» металла и его растворению при взаимодействии с агрессивной средой по классическому электрохимическому механизму. Кроме того, механические повреждения покрытия неблагоприятно сказываются на свойствах покрытия, способствуют снижению барьерных свойств и проницаемости агрессивной среды к основному металлу</p>	

II	Низкие барьерные свойства	Проявляются в виде вздутий и отслоений покрытия	<p>Возникновение повреждений обусловлено диффузией компонентов транспортируемой среды через покрытие.</p> <p><b>Кинетика процесса:</b></p> <p>Образование и рост продуктов коррозии под покрытием приводит к увеличению внутренних напряжений, нарушению адгезионных связей и отслаиванию покрытия.</p>		
----	---------------------------	---	---	---	--



III	<p>Локальное снижение толщины покрытия</p>	<p>Недостаточная толщина покрытия способствует образованию несплошности слоя покрытия в виде, локальных повреждений, сквозных пор либо микротрещин.</p>	<p>Снижение толщины может быть обусловлено как эксплуатационными, так и технологическими факторами. Низкая толщина слоя покрытия не обеспечивает нужный уровень защитных свойств.</p> <p><b>Кинетика процесса:</b></p> <p>Локальное снижение свойств способствует проникновению агрессивной среды к металлу и его электрохимическому растворению с образованием продуктов коррозии. Рост покрытия приводит к увеличению внутренних напряжений, снижению адгезионных связей и отслаиванию покрытия с последующим активным развитием коррозии на участках с отслоенным покрытием</p>	
-----	--	---	--	--

IV	<p>Несовершенство технологии нанесения</p>	<p>Повреждения проявляются на труднодоступных участках в виде несплошностей покрытия</p>	<p>Образование повреждений связано с технологическими особенностями процесса нанесения покрытия.  <b>Кинетика процесса:</b>          На участках с локальным отсутствием слоя покрытия беспрепятственное взаимодействие транспортируемой среды с основным металлом приводит к растворению последнего по механизму электрохимической коррозии.</p>
----	--	--	---





## Содержание

ВВОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ	3
НАЗНАЧЕНИЕ	3
ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	3
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	4
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	6
Общая часть	6
1. Требования к изделиям, подлежащим нанесению металлизационного покрытия	6
1.1 Общие положения	6
1.2 Сортамент	7
1.3 Требования к подготовке поверхности перед нанесением покрытия	7
2. Требования к материалам, используемым для нанесения покрытия	10
3. Требования к технологии нанесения металлизационного покрытия	11
4. Технические требования к металлизационному покрытию	12
5. Требования безопасности и охраны окружающей среды	16
6. Правила приемки	18
7. Методы контроля	23
8. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение	27
9. Указания по эксплуатации	28
10. Гарантии изготовителя	28
11. Ссылочные нормативные документы	29
Приложение 1. Методика проведения металлографических исследований	32
Лист регистрации изменений	34

## **ВВОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

### **НАЗНАЧЕНИЕ**

1.1 Настоящие технические требования (ТТ) разработаны на основе данных по отказам погружных электродвигателей (ПЭД) с наружным металлизационным покрытием, не отработавших гарантийный срок службы на месторождениях ПАО «НК «Роснефть», а также на основе результатов лабораторных испытаний различных типов металлизационных покрытий.

1.2 Настоящие ТТ направлены на повышение качества газотермических металлизационных покрытий и снижения аварийности эксплуатируемых ПЭД.

1.3 ТТ регламентируют требования к металлизационному покрытию ПЭД, предназначенным для эксплуатации на месторождениях ПАО «НК Роснефть» и не нормируют требования к металлу ПЭД.

### **ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

2.1 ТТ устанавливают требования к качеству антикоррозионных металлизационных покрытий ПЭД базового исполнения в состоянии поставки, а также подлежащих ремонтному нанесению антикоррозионного покрытия.

2.2 Газотермическое металлизационное покрытие должно соответствовать требованиям настоящих ТТ.

2.3 Металлизационное покрытие должно наноситься методами газотермического напыления в заводских условиях на технологической линии в соответствии с технологической инструкцией, разработанной и утвержденной Предприятием-изготовителем в установленном порядке.

2.4 Металлизационное покрытие должно обеспечивать защиту стальной поверхности от износа, коррозионного и коррозионно-эрозийного

воздействия транспортируемых сред, в том числе содержащих сероводород и углекислый газ.

2.5 Металлизационное покрытие должно применяться в следующем исполнении:

*Тип 1* - покрытие, нанесенное методом электродуговой металлизации (ЭДМ), с дополнительным слоем пропиточного материала – температура эксплуатации до плюс 90 °С;

*Тип 2* - покрытие, нанесенное методом высокоскоростного напыления (ВСН) – температура эксплуатации до плюс 120 °С.

2.6 Металлизационное покрытие должно обеспечивать защиту стальной поверхности от воздействия осложняющих факторов и выдерживать следующие внешние воздействия без отслаивания, растрескивания и растрескивания в интервале температур:

- при хранении - от минус 60 °С до плюс 60 °С;
- при транспортировании, проведении погрузочно-разгрузочных работ - от минус 50 °С до плюс 60 °С;
- при эксплуатации до плюс 90 °С/120 °С (в зависимости от исполнения).

## **ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

**ПОГРУЖНОЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ (ПЭД)** – устройство, предназначенное для продолжительного режима работы от сети переменного тока частотой от 35 до 70 Гц в качестве привода погружных центробежных насосов для откачки пластовой жидкости из нефтяных скважин.

**ДЕФЕКТ** – несплошность или неоднородность поверхности или стенки изделия, имеющая вид и (или) размер, не допустимый установленными требованиями к качеству поверхности и сплошности изделия.

**ЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ** – сплошное покрытие, полученное в результате нанесения одного или нескольких слоев на окрашиваемую

поверхность и обеспечивающее защиту внутренней поверхности трубных изделий от воздействия осложняющих факторов при эксплуатации на нефтепромыслах.

**ГАЗОТЕРМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ** – процесс нагрева, диспергирования, переноса частиц распыляемого материала газовым потоком и формирования на подложке компактного слоя материала.

**ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ (ЭДМ)** – процесс нанесения покрытия, при котором для нагрева/расплава проволочного материала используется электричество. Постоянный ток различной полярности подается на две расходные проволоки, благодаря чему зажигается дуга, происходит расплавление проволок и отделяемые частицы материалы потоком сжатого воздуха переносятся на поверхность напыления.

**ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ НАПЫЛЕНИЕ (HVOF)** – процесс напыления, использующий продукты горения газов (например, водорода и кислорода) или жидкого горючего (керосина и кислорода). Горючее и кислород смешиваются и атомизируются в камере сгорания, обеспечивающей оптимальное давление и режим горения.

**ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ** - свойство защитного покрытия долговременно противостоять разрушающим воздействиям транспортируемой среды.

**СРОК СЛУЖБЫ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ** - предполагаемая долговечность покрытия в условиях эксплуатации, в течение которой оно сохраняет заданные свойства.

**ЗАДАННЫЕ СВОЙСТВА** - допустимый уровень ухудшения (потери) исходных свойств защитного покрытия.

**АГРЕССИВНАЯ СРЕДА** – среда, обладающая кислотным, основным или окислительным действием и вызывающая разрушение (или ухудшение параметров) материалов и (или) изделий.

**АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС** – механическое изнашивание материала в результате истирающего, царапающего и режущего воздействия закрепленного абразива.

**КОГЕЗИЯ** – сцепление атомов (молекул) в физическом теле. Когезия характеризует прочность связи частиц в толще напыленного покрытия.

## **ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ**

**ПЭД** – погружной электродвигатель.

**ЭДМ** – электродуговая металлизация.

**ВСН (HVOF)** – высокоскоростное напыление.

**ДСК** – дробь стальная колотая.

**ДЧК** – дробь чугунная колотая.

**ПМ** – программа и методика испытаний.

**НД** – нормативная документация.

## **ОБЩАЯ ЧАСТЬ**

### **1 Требования к изделиям, подлежащим нанесению металлизационного покрытия**

#### **1.1 Общие положения**

1.1.1 ПЭД должны соответствовать требованиям нормативно-технической документации (ГОСТ, ТУ и др.) Завода-изготовителя, утвержденной в установленном порядке.

1.1.2 Нанесение металлизационного покрытия осуществляется на наружную поверхность корпуса ПЭД.

1.1.3 Перед нанесением покрытия ПЭД подвергают входному контролю:

- проверке геометрических параметров на соответствие требованиям, указанным в нормативно-технической документации на изделия, подлежащие нанесению покрытия;

- оценке состояния наружной поверхности на наличие консервационного покрытия, масляных и других загрязнений;

- оценке состояния наружной поверхности для выявления поверхностных дефектов: вмятины, раковины, острые выступы, заусенцы, задиры, прилипшие капли металла, шлака, «плены» и др.

1.1.4 На наружной поверхности корпуса ПЭД не допускаются:

- загрязнения в виде остатков масел, смазок, технологических жидкостей, наличие консервационного покрытия;

- дефекты в виде вмятин, раковин, задигов, острых выступов, наплавленных капель металла и других поверхностных дефектов;

- плены, трещины, рванины, закаты, расслоения и дефекты с острыми кромками;

- отслоения металла (плены) после проведения абразивной обработки.

## **1.2 Сортамент**

Типоразмеры труб, применяемых для корпусов ПЭД и подлежащих нанесению покрытия: диаметр 87-130 мм, толщина стенки 4-8,5 мм, длина 4-10 м. По согласованию с Заказчиком допускается поставка труб иной длины и толщины.

## **1.3 Требования к подготовке поверхности перед нанесением покрытия**

1.3.1 Подготовку поверхностей необходимо проводить в помещении при температуре воздуха не ниже 16 °С и относительной влажности не выше 75 %.

1.3.2 Перед струйно-абразивной обработкой поверхности изделий должны быть обезжирены с целью удаления жировых, масляных и других загрязнений моющими составами или органическими растворителями по ГОСТ 9.402.

1.3.3 Степень обезжиривания поверхности должна соответствовать первой по ГОСТ 9.402.

1.3.4 Струйно-абразивная обработка.

1.3.4.1 Температура поверхности перед абразивной очисткой должна быть не менее, чем на 3 °С выше точки росы, определяемой по ISO 8502-4.

1.3.4.2 Струйно-абразивная обработка поверхности проводится с использованием следующих материалов:

- дробь чугунная колотая типа ДЧК номеров 0,5; 0,8; 1; 1,4 по ГОСТ 11964;

- дробь стальная колотая типа ДСК номеров 0,5; 0,8; 1; 1,4 по ГОСТ 11964;

- стальной песок с содержанием кремния 14-20 % марки СП-17 с размером фракции зерна от 0,4 до 1,6 мм;

- электрокорунд или карбид кремния зернистостью 32, 40, 50, 63, 80, 100, 125 по ГОСТ 3647 с размером частиц от 0,4 до 1,6.

1.3.4.3 Абразивный материал должен быть острогранным, сухим, чистым, не содержать следов масла, грязи, ржавчины и других веществ, прилипающих к поверхности.

1.3.4.4 После струйно-абразивной обработки поверхность, подлежащая напылению покрытия, должна быть обдута сжатым воздухом не ниже первого класса загрязненности по ГОСТ 17433.

1.3.4.5 Сжатый воздух, применяемый для подготовки поверхности и напыления покрытия, должен быть очищен от масла и влаги и соответствовать нечетному классу загрязненности по ГОСТ 17433.

### 1.3.5 Требования к состоянию поверхности

1.3.5.1 Степень очистки поверхности от окислов после обработки должна быть не выше второй по ГОСТ 9.402.

1.3.5.2 Остатки пыли и иных частиц, загрязняющих поверхность, удаляют путем обдува чистым воздухом или пылесосом (запыленность не должна превышать 2 балла с размером частиц не более 2 класса по ISO 8502-3).

1.3.5.3 Содержание на обрабатываемой поверхности водорастворимых солей не должно превышать 20 мг/м<sup>2</sup>.

1.3.5.4 Шероховатость поверхности ( $R_z$ ), подготовленной под напыление, должна соответствовать значениям от 40 мкм до 100 мкм по ГОСТ 2789.

1.3.5.5 Промежуток времени между окончанием процесса абразивной очистки поверхности трубы и началом напыления покрытия не должен превышать 2-х часов при влажности воздуха не более 80 % и 3-х часов при влажности не более 60 %.

1.3.5.6 Оборудование, используемое для струйно-абразивной обработки должно обеспечивать требуемое качество подготовки поверхности.

Таблица №1 – Требования к состоянию поверхности изделий

Параметр	Показатель	Норма	Метод испытаний
Степень обезжиривания	не более	1	ГОСТ 9.402
Наличие окислов	Степень очистки, не более	2	ГОСТ 9.402
Запыленность	Количество пыли, не более	2 балл	ISO 8502-3
	Размер частиц пыли, не более	2 класс	
Шероховатость	Средняя высота микронеровностей $R_z$ , мкм, в пределах	40-100	ГОСТ 2789
Наличие водорастворимых солей	Содержание солей мг/м <sup>2</sup> , не более	20	ИСО 8502-6 ИСО 8502-9

## **2 Требования к материалам, используемым для нанесения покрытия**

2.1 Все материалы должны проходить входной контроль на соответствие требованиям нормативно-технической документации (НТД) производителя.

2.2 Каждая партия напыляемых материалов (порошков, проволоки) должна сопровождаться паспортом или сертификатом качества с указанием наименования материала, его марки, химического состава, размера частиц, диаметра проволоки, даты изготовления.

2.3 Поверхность проволоки для напыления покрытия должна быть чистой, без видимых следов коррозии, без вмятин, заусенцев, расслоений, перегибов. Консервационная смазка (при наличии) должна быть удалена с помощью растворителей или моющих средств.

2.4 Используемые материалы должны храниться в соответствии с НТД на каждый конкретный порошок или проволоку.

2.5 Химический состав порошков или проволок, применяемых для формирования покрытия ПЭД должен обеспечивать регламентированный настоящими ТТ уровень механических, физико-механических и коррозионных свойств.

2.6 Выбор состава и типа покрытий для определенных условий эксплуатации ПЭД проводит Заказчик на основании следующих данных предоставленных производителем материалов:

- технические характеристики и периодические испытания покрытия, проведенные аттестованной лабораторией;

- технические возможности нанесения материалов согласно требованиям, регламенту и рекомендациям производителя.

### **3 Требования к технологии нанесения металлизационного покрытия**

3.1 Нанесение металлизационного покрытия должно осуществляться методами ЭДМ (с дополнительным слоем пропиточного материала) и ВСН. По согласованию с Заказчиком допускается применение иных методов газотермического напыления. Нагрев защищаемой поверхности металла не должен превышать 150 °С.

3.2 Процесс напыления должен проводиться при температуре воздуха не ниже 16 °С и относительной влажности воздуха не выше 75 %, в условиях, исключающих попадание атмосферных осадков и конденсацию влаги на поверхности изделий.

3.3 Напыление металлизационного покрытия производят на очищенную в соответствии с разделом 1.3 настоящих ТТ поверхность труб.

3.4 Режимы напыления для каждого метода должны обеспечивать необходимую степень однородность сформированного слоя покрытия.

3.5 Дефекты сформированного покрытия в виде вздутий, отслоений, трещин и пр. должны устраняться зачисткой с последующим повторным нанесением покрытия.

3.6 При необходимости добора толщины покрытия напыление нового слоя покрытия необходимо проводить на сухом ранее нанесенном слое покрытия.

3.7 В качестве рабочих газов при нанесении покрытий можно использовать:

- азот технический или особой чистоты по ГОСТ 9293;
- аргон по ГОСТ 10157;
- ацетилен технический по ГОСТ 5457;
- водород технический по ГОСТ 3022;
- кислород газообразный по ГОСТ 5583;
- пропан ПА по ГОСТ Р 52087;
- сжатый воздух по ГОСТ 17433.

#### **4 Технические требования к металлизационному покрытию**

4.1 Металлизационное покрытие должно соответствовать требованиям настоящих ТТ.

4.2 При выборе типа покрытия и метода нанесения необходимо учитывать следующие условия эксплуатации ПЭД:

- температуру среды;
- парциальное давление углекислого газа и сероводорода;
- значение pH среды;
- концентрацию растворенных хлоридов и иных галогенидов;
- наличие механических примесей;
- давление среды.

4.3 Металлизационное покрытие должно обладать равномерной, сплошной, однородной поверхностью без частиц нерасплавленного материала. Трещины, наплывы, брызги, участки с крупнозернистой, рыхлой структурой, следы местной коррозии не допускаются.

4.4 По показателям свойств покрытие должно соответствовать требованиям таблицы №2, испытательные среды и параметры испытаний указаны в таблице №3.

4.5 Металлизационное покрытие, нанесенное методами ЭДМ, должно быть покрыто дополнительным слоем пропиточного материала, ограничивающим доступ среды к поверхности покрытия.

4.6 В качестве дополнительного пропиточного слоя используются лакокрасочные материалы на основе полиуретановых, эпоксидных, эпоксидно-фенольных материалов.

4.7 Для металлизационного покрытия, нанесенного методом ВСН, допускается отсутствие дополнительного слоя пропитки при условии соблюдения однородности структуры и отсутствия сквозной пористости.

4.8 Тип и толщина пропитывающего состава или ЛКМ подбираются таким образом, чтобы минимизировать влияние на теплоотдачу корпусов ПЭД.

4.9 ЛКМ должны полностью перекрывать слой металлизационного покрытия и обладать высокой адгезией к покрываемой поверхности.

4.10 Ремонт покрытия производится с использованием материалов для нанесения покрытия или ремонтных материалов, аналогичных материалам основного покрытия.

4.11 Ремонт покрытия производится в соответствии с рекомендациями изготовителей покрытия по технологической документации, согласованной в установленном порядке.

4.12 Покрытие на отремонтированных участках по показателям свойств должно соответствовать требованиям настоящих технических условий.

4.13 Отремонтированные участки покрытия подлежат повторному контролю внешнего вида и сплошности.

4.14 Необходимость контроля и объем испытаний для определения коррозионной стойкости покрытия определяется Заказчиком.

Таблица №2 – Технические требования к свойствам металлизационного покрытия

№ п/п	Требования	Покрытие корпуса		Метод испытания
		Тип - 1	Тип - 2	
	Метод нанесения покрытия	Электродуговая металлизация (ЭДМ)	Высокоскоростное газопламенное напыление (ВСН)	
<b>Минимальные граничные требования</b>				
1	Внешний вид покрытия:  - в исходном состоянии  - после воздействия сред 1-6 (табл.№3)	<p>Равномерное, однородное покрытие без напылов, частиц расплавленного материала, трещин, отслоений, сколов и других видимых дефектов, обнажающих поверхность металла.</p> <p>Слой пропитки должен обладать равномерной сплошной поверхностью без вздутий, отслоений и прочих дефектов.</p> <p>Не допускаются разрушения: вздутия, отслаивания, растрескивание, коррозия металла.</p>		ГОСТ 9.302 ГОСТ 9.407
2	Толщина металлизационного покрытия, минимальная, мкм	350		ГОСТ 31993
3	Шероховатость покрытия, R <sub>a</sub> , мкм	≤ 15		ГОСТ 2789
4	Структура покрытия:  - в исходном состоянии	<p>При электродуговой металлизации: слоистая структура, состоящая из полностью расплавленных частиц материала.</p> <p>При высокоскоростном напылении: структура должна быть представлена однородной металлической матрицей, наличие расплавленных частиц (за исключением карбидной фазы).</p> <p>Допускается окисление напыляемых частиц при нанесении дополнительного слоя прощиточного материала</p>		Приложение 1

	- после воздействия сред 1-6 (табл.№3)	Отсутствие коррозии металлической матрицы и поверхности защищаемого металла		
5	Пористость покрытия, %	$\leq 1,0$ отсутствие сквозной пористости, пор, каверн		Приложение 1
6	Сплошность покрытия	Отсутствие микротрещин и расслоений в структуре покрытия		Приложение 1
7	Качество сцепления покрытия	Отсутствие отслаивания покрытия от поверхности металла		Приложение 1
8	Адгезионная прочность покрытия, МПа:  - в исходном состоянии  - после воздействия сред 1-6 (табл.№3)	$\geq 10$	$\geq 15$	ГОСТ 32299
		Не допускается снижение более 30 % от исходного значения и коррозия в месте отрыва покрытия		
9	Микротвердость покрытия, HV	200 - 500	$\geq 500$	ГОСТ 2999
10	Стойкость к абразивному износу, потеря массы, мг	$\leq 30$		ГОСТ 23.208
11	Прочность при ударе, Дж	$\geq 65$		ГОСТ Р 51164
12	Стойкость покрытия при изгибе, стрела прогиба, мм	$\geq 4$		ГОСТ Р 58346
13	Стойкость покрытия к прорезанию, глубина реза в % от толщины слоя покрытия	$\leq 20$		ОТТ-25.220.01-КТН-054-15

Таблица №3 – Испытательные среды и условия испытаний покрытия

Испытательная среда	Параметры испытания			Метод испытания
	Температура, °С	Давление, МПа	Продолжительность	
1 Кислота соляная, раствор с массовой долей 10 %	(60 ± 3)	Атмосферное	24 ч.	ГОСТ 9.403, метод А
2 Натрия гидроксид, раствор с массовой долей 10 %			1000 ч.	
3 Минерализованная среда 5 %-го р-ра NaCl	(90 ± 3)			
4 Жидкая фаза: 5 %-ый (масс.) раствор NaCl газовая фаза: а) CO <sub>2</sub> под давлением (4,0 ± 0,5) МПа + H <sub>2</sub> S под давлением 0,5 МПа, N <sub>2</sub> остальное. б) H <sub>2</sub> S под давлением 0,5 МПа + N <sub>2</sub> остальное	(90 ± 3) (120 ± 3)	(10,0 ± 0,5)	240 ч. Сброс давления не менее 10 мин	ГОСТ Р 58346
5 Жидкая фаза: 5 %-ый (масс.) раствор NaCl газовая фаза: CO <sub>2</sub> под давлением (5,0 ± 0,5) МПа, N <sub>2</sub> остальное.		(10,0 ± 0,5)	24 ч. Сброс давления не более 5 с	
6 Среда воздушная	От минус (40 ± 3) до плюс (60 ± 3)	Атмосферное	15 циклов	

## 5. Требования безопасности и охраны окружающей среды

5.1 При проведении работ по напылению металлизационных покрытий необходимо учитывать возможность действия опасных производственных факторов на организм человека (воздействие металлической пыли; паров

органических растворителей, шума, световозлучения электрической дуги и пламени, опасность поражения электрическим током и тепловым излучением).

5.2 Требования безопасности при нанесении покрытия должны соответствовать ГОСТ 12.3.002, ГОСТ 12.3.005, ГОСТ 12.3.016. Класс опасности – 3 по ГОСТ 12.1.007.

5.3 Требования пожарной безопасности должны соответствовать ГОСТ 12.1.004, требования взрывобезопасности - ГОСТ 12.1.010.

5.4 К работам по нанесению покрытия допускают рабочих не моложе 18 лет, прошедших медицинское освидетельствование, обучение, инструктаж и аттестацию по ГОСТ 12.0.004.

5.5 Персонал, непосредственно связанный с работой на линии нанесения покрытия, должен быть обеспечен средствами индивидуальной защиты (защитные очки, перчатки, респираторы или противогазы, защитные шлемы, беруши) в соответствии с требованиями ГОСТ 12.3.002, ГОСТ 12.3.005 и ГОСТ 12.3.016.

5.6 Контроль соблюдения предельно-допустимых выбросов в атмосферу при нанесении покрытия осуществляют по ГОСТ 17.2.3.02, а также в соответствии с действующим законодательством РФ в области охраны окружающей природной среды.

5.7 При разработке и выполнении работ по нанесению покрытия следует обеспечивать меры и способы нейтрализации и уборки, пролитых и рассыпанных материалов и химикатов, а также способы эффективной очистки сточных вод и пылегазовыделений перед выпуском их в водоемы и атмосферу в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.3.02.

5.8 Недопустимо попадание компонентов покрытия или их смеси в канализацию, сточные воды, грунт.

5.9 Сформированное покрытие не является токсичным и не оказывает вредного воздействия на организм человека и окружающую среду.

## **6. Правила приемки**

6.1 Проверку качества и приемку ПЭД с нанесенным металлизационным покрытием осуществляет служба отдела технического контроля (ОТК) предприятия.

6.2 Изделия принимают партиями или единичными изделиями. Партией считается количество изделий одного типоразмера, изготовленных на одной технологической линии из одной марки сырья без изменения технологических режимов нанесения. Количество изделий в партии не должно превышать 200 шт.

6.3 Для обеспечения соответствия покрытия требованиям настоящих технических условий проводят контроль качества, который включает:

- входной контроль стального изделия и материалов для нанесения покрытия;

- контроль подготовки поверхности;

- приемо-сдаточные испытания;

- периодические испытания.

- квалификационные испытания.

6.4 На каждую партию изделий с покрытием оформляют документ о качестве (сертификат, паспорт), удостоверяющий соответствие покрытия требованиям настоящих технических требований. В сертификате качества указывают помимо данных на изделие следующие данные покрытия:

- сведения о неизолированном изделии;

- полное наименование предприятия-изготовителя;

- обозначение настоящих технических требований;

- номер партии покрытия изделий;

- тип покрытия;

- дата нанесения покрытия на изделия;

- показатели свойств покрытия в объеме приемо-сдаточных испытаний.

Каждый сертификат должен быть подписан уполномоченным лицом и заверен штампом службы отдела технического контроля предприятия-изготовителя.

6.5 Входной контроль стальных изделий проводят по п. 1.1, 1.2 настоящих ТТ в соответствии с технологической инструкцией, разработанной и утвержденной на предприятии-изготовителе в установленном порядке. При наличии неустраняемых дефектов изделия отбраковывают.

6.6 Контроль подготовки поверхности включает:

- контроль наличия загрязнений на наружной поверхности ПЭД до абразивной очистки (на каждом изделии);

- контроль наличия дефектов поверхности ПЭД после абразивной очистки (на каждом изделии);

- контроль степени очистки наружной поверхности ПЭД (на каждом изделии);

- контроль шероховатости наружной поверхности изделия (1 % изделий, но не менее, чем на двух изделиях от партии, при этом один замер в начале смены на одном изделии);

- контроль запыленности наружной поверхности (1 % изделий, но не менее, чем на двух изделиях от партии, при этом один замер в начале смены на одном изделии);

- контроль содержания водорастворимых солей на наружной поверхности изделия (1 % изделий, но не менее, чем на двух изделиях от партии, при этом один замер в начале смены на одном изделии).

6.7 Поверхность, подлежащая окрашиванию, должна соответствовать требованиям п. 1.3.1-1.3.5.

6.8 Результаты контроля подготовки поверхности должны быть зарегистрированы в рабочих журналах или в других отчетных документах, разработанных и утвержденных по установленной форме, или в электронном виде.

6.9 При выявлении отклонений контролируемых показателей подготовки поверхности от установленных норм незамедлительно предпринимаются меры по устранению выявленных несоответствий.

6.10 При невозможности удаления несоответствий изделие бракуется и к нанесению покрытия не допускается.

6.11 Контроль качества нанесенного металлизационного покрытия выполняется ОТК в соответствии с технологической инструкцией, разработанной и утвержденной на Предприятии-изготовителе в установленном порядке. Контроль качества осуществляется:

- внешний вид – на готовом изделии;
- толщина покрытия – на готовом изделии или образцах-свидетелях, прошедших весь технологический цикл с изделием данной партии;
- шероховатость поверхности – на образцах-свидетелях, прошедших весь технологический цикл с изделием данной партии;
- однородность структуры, пористость, сплошность, качество сцепления – на образцах-свидетелях, прошедших весь технологический цикл с изделием данной партии;
- адгезионная прочность – на образцах-свидетелях, прошедших весь технологический цикл с изделием данной партии;
- микротвердость – на образцах-свидетелях, прошедших весь технологический цикл с изделием данной партии;
- стойкость к абразивному износу – на образцах-свидетелях, прошедших весь технологический цикл с изделием данной партии;
- прочность при ударе – на готовом изделии или образцах-свидетелях, прошедших весь технологический цикл с изделием данной партии;
- стойкость покрытия при изгибе – на готовом изделии или образцах-свидетелях, прошедших весь технологический цикл с изделием данной партии;

- стойкость покрытия к прорезанию – на готовом изделии или образцах-свидетелях, прошедших весь технологический цикл с изделием данной партии.

6.12 Приемо-сдаточные испытания проводятся при приемочном контроле изделий с покрытием.

6.13 Приемо-сдаточные испытания проводят для каждой партии ПЭД с металлизационными покрытием. Приемо-сдаточные испытания труб с покрытием проводят по контролируемым показателям, указанным в таблице №4, качество покрытия должно соответствовать требованиям указанным в таблице №2:

- внешний вид покрытия (100 % от партии);
- толщина готового покрытия (100 % от партии);
- шероховатость покрытия (100 % от партии);
- структура, пористость, сплошность и качество сцепления покрытия (не менее, чем один раз от партии);
- определение адгезии покрытия к стали методом нормального отрыва (не менее чем один раз от партии);
- микротвердость покрытия (не менее чем один раз от партии).

6.14 При неудовлетворительных результатах приемо-сдаточных испытаний незамедлительно предпринимаются меры по устранению выявленных несоответствий и проводят повторные испытания на удвоенном количестве образцов. При получении неудовлетворительных результатов повторных испытаний проверяют все изделия, покрытые после получения последнего положительного результата. Изделия, на которых были получены неудовлетворительные результаты бракуют.

6.15 Результаты приемо-сдаточных испытаний должны быть зарегистрированы в рабочих журналах или в других отчетных документах, разработанных и утвержденных по установленной форме, или в электронном виде.

6.16 Периодические испытания покрытия проводят с целью контроля стабильности качества для каждой применяемой системы материалов не реже 1 раза в год.

6.17 Испытания покрытия проводят в лабораторных условиях на образцах-свидетелях, по контролируемым показателям, указанным в таблице №4, качество покрытия должно соответствовать требованиям указанным в таблице №2 в исходном состоянии и после воздействия испытательных сред согласно таблице №3.

6.18 При неудовлетворительных результатах периодических испытаний покрытия проводятся повторные испытания покрытия по неудовлетворительному показателю на удвоенном количестве образцов. При повторном получении отрицательных результатов технологический процесс нанесения покрытия должен быть приостановлен до выяснения и устранения причин несоответствия покрытия техническим требованиям.

6.19 Квалификационные испытания проводятся для установочной серии или первой промышленной партии с целью оценки готовности предприятия-изготовителя к выпуску продукции при освоении технологии нанесения для каждой применяемой системы материалов, при изменении марки материалов или конструкции покрытия, при изменении параметров технологического процесса.

6.20 Испытания покрытия проводят в лабораторных условиях на образцах-свидетелях, по контролируемым показателям, указанным в таблице №4, качество покрытия должно соответствовать требованиям, указанным в таблице №2 в исходном состоянии, и после воздействия испытательных сред согласно таблице №3.

6.21 При неудовлетворительных результатах квалификационных испытаний покрытия проводятся повторные испытания по неудовлетворительному показателю на удвоенном количестве образцов. При

повторном получении отрицательных результатов технологический процесс нанесения покрытия должен быть приостановлен до выяснения и устранения причин несоответствия покрытия техническим требованиям.

Таблица №4 – Объем испытаний покрытия по категориям

Показатель	Квалификационные	Приемосдаточные	Периодические
1 Внешний вид покрытия: - исходный	+	+	+
- после испытаний в средах 1–6 (см. таблицу №3)	+	-	+
2 Толщина покрытия	+	+	+
3 Шероховатость покрытия	+	+	+
4 Структура, пористость, сплошность и качество сцепления покрытия	+	+	+
5 Адгезионная прочность покрытия	+	+	+
6 Микротвердость покрытия	+	+	+
7 Стойкость к абразивному износу	+	-	-
8 Стойкость к прямому удару	+	-	-
9 Стойкость покрытия при изгибе	+	-	-
10 Стойкость покрытия к прорезанию	+	-	-

6.21 Квалификационные и периодические испытания должны проводиться в испытательной лаборатории, аккредитованной по ГОСТ ИСО/МЭК 17025 и имеющей необходимое оборудование, квалифицированный персонал и опыт проведения подобных испытаний.

## 7. Методы контроля

7.1 Проверку (входной контроль) изделий, материалов на соответствие требованиям нормативной и технической документации выполняют в соответствии с ГОСТ 24297 на основании сравнения сертификатов на материалы, комплектующие изделия с нормативной документацией.

7.2 Качество поверхности проверяют визуально без применения увеличительных приборов при дополнительном освещении, обеспечивающем просматриваемость всей поверхности изделия.

7.3 Проверка геометрических размеров и параметров изделий должна осуществляться с помощью универсальных измерительных средств или специальных приборов, обеспечивающих необходимую точность измерения, в соответствии с технической документацией, утвержденной в установленном порядке.

7.4 Толщину стенки изделия в месте зачистки поверхностных дефектов измеряют с помощью ультразвукового толщиномера с точностью не менее 0,1 мм. Глубину дефектов контролируют с помощью линейки измерительной металлической по ГОСТ 427, штангенциркуля по ГОСТ 166 с точностью не менее 0,05 мм или набора шаблонов предприятия.

7.5 Наличие жировых загрязнений на поверхности контролируют визуальным или тактильным методом в соответствии с требованиями таблицы №1.

7.6 Степень очистки поверхности изделия контролируют по ГОСТ 9.402 в соответствии с требованиями таблицы №1.

7.7 Шероховатость поверхности изделия после абразивной очистки контролируют по ГОСТ 2789 в соответствии с требованиями таблицы №1.

7.8 Запыленность поверхности по количеству частиц пыли контролируют по эталонам ISO 8502-3 в соответствии с требованиями таблицы №1.

7.9 Содержание водорастворимых солей на поверхности изделия контролируют по одному из методов согласно ИСО 8502-6, ИСО 8502-9 в соответствии с требованиями таблицы №1.

7.10 Температуру трубы перед абразивной обработкой и нанесением покрытия контролируют термопарой контактного типа с погрешностью измерения  $\pm 3$  °С.

7.11 Влажность воздуха на участке абразивной очистки и нанесения покрытия контролируют с помощью приборов с погрешностью не более 1%.

7.12 Время между абразивной очисткой поверхности и нанесением покрытия обеспечивается технологией производства. При остановках время контролируют с помощью часов любого типа.

7.13 Внешний вид покрытия контролируют визуально со всех концов каждого изделия трубной продукции при высокой интенсивности освещенности без применения увеличительных средств по ГОСТ 9.302.

7.14 Толщину сформированного покрытия контролируют неразрушающим методом с использованием толщиномера по ГОСТ 31993, либо разрушающим металлографическим методом. За результат испытаний принимают среднее из всех измеренных значений. Более достоверным методом является металлографический.

7.15 Шероховатость покрытия контролируют по ГОСТ 2789 с помощью профилографа (профилометра) с требуемым диапазоном измерения параметров  $R_a$ .

7.16 Структуру покрытия, пористость, сплошность и качество сцепления покрытия контролируют металлографическим методом (Приложение 1). Методика подготовки металлографических шлифов должна исключать возможность искажения структуры покрытия.

7.17 Адгезию покрытия к стали определяют методом отрыва по ГОСТ 32299. При проведении испытаний используется клей, обеспечивающий более высокие адгезионные свойства относительно испытываемого покрытия.

7.18 Микротвердость покрытия контролируют по ГОСТ 2999. Измерение твердости должно проводиться по всему сечению покрытия. За результат испытаний принимается среднее из всех измеренных значений.

7.19 Определение износостойкости металлизационного покрытия при воздействии абразивных частиц осуществляют в соответствии с методикой

ГОСТ 23.208. Испытания проводятся на образцах-свидетелях размером 50 (30)х30 мм в количестве не менее 5 шт.

7.20 Стойкость покрытия при прямом ударе определяют в соответствии с ГОСТ Р 51164. Испытания проводятся на образцах-свидетелях размером не менее 100х50 мм. За результат испытаний принимается среднее из 10 измеренных значений.

7.21 Стойкость покрытия при изгибе определяется по методике, представленной в ГОСТ Р 58346. Испытание проводят до момента разрушения покрытия. При этом фиксируют значение стрелы прогиба, при котором происходит разрушение покрытия.

7.22 Стойкость покрытия к прорезанию определяется в соответствии с методикой ОТГ-25.220.01-КТН-054-15 при минимальной нагрузке на конусный резец не менее 50 кг. Испытания проводятся на образцах-свидетелях размером не менее 150х100 мм, количество образцов – не менее 3 шт. На одном образце проводится не менее 6 измерений глубины канавки. За результат испытаний принимается среднее из всех измеренных значений.

7.23 Испытания на стойкость к воздействию 10 % раствора соляной кислоты проводится при температуре 60 °С в течении 24 ч по ГОСТ 9.403 (метод А).

7.24 Испытания на стойкость к воздействию 10 % раствора NaOH проводится при температуре 60 °С в течении 24 ч по ГОСТ 9.403 (метод А).

7.25 Испытания на стойкость к воздействию среды минерализованной среды 5 %-го раствора NaCl проводятся при температуре 90 °С, в течении 1000 ч по ГОСТ 9.403 (метод А).

7.26 Испытания на стойкость к быстрой декомпрессии проводятся в жидкой среде 5 % раствора NaCl, насыщенной CO<sub>2</sub> (5 МПа), при общем давлении 10 МПа и температуре 90 °С или 120 °С (в зависимости от исполнения). Методика проведения испытаний – в соответствии с ГОСТ Р 58346. Продолжительность испытаний 24 ч.

7.27 Автоклавные испытания на стойкость к воздействию CO<sub>2</sub> и/или H<sub>2</sub>S-содержащих сред проводятся при общем давлении системы 10 МПа и температуре 90 °С или 120 °С (в зависимости от исполнения). Состав испытательных сред представлен в таблице №3. Методика проведения испытаний – в соответствии с ГОСТ Р 58346. Продолжительность испытаний 240 ч.

7.28 Стойкость к воздействию переменных температур от минус 40 °С до плюс 60 °С определяют в соответствии с ГОСТ 27037. Продолжительность – 15 циклов.

### **8. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение**

8.1 Маркировка наносится на специальные таблички, которые устанавливаются на концевые детали секций ПЭД в специальной проточке.

8.2 Наносится маркировка клейменем или несмываемой краской, в соответствии с ГОСТ 10692 и должна содержать, в том числе:

- заводское обозначение ПЭД по ТУ;
- заводской номер;
- завод-изготовитель;
- дата изготовления;
- ток номинального и холостого хода;
- напряжение номинальное;
- масса;
- длина;
- обозначение настоящих технических требований;
- тип покрытия;
- номер партии изделий с покрытием;
- дату нанесения покрытия (месяц, год);
- дополнительные требования Заказчика (по требованию Заказчика).

8.3 Транспортирование и хранение изделий должно проводиться в соответствии с требованиями ГОСТ 10692.

8.4 Погрузо-разгрузочные работы, связанные с перемещением корпусов ПЭД с покрытием, должны производиться в условиях, предотвращающих механические повреждения покрытия. Сбрасывание ПЭД с покрытием категорически запрещается.

8.5 ПЭД следует хранить в штабелях, рассортированным по диаметрам. ПЭД должны складироваться на предварительно выровненную площадку горизонтальными рядами. Каждый корпус ПЭД должен иметь не менее, чем три точки опоры для исключения возможности деформации.

8.6 Допускается хранение ПЭД на открытом воздухе. Условия хранения продукции не должны приводить к нарушению сплошности покрытия.

#### **9. Указания по эксплуатации**

9.1 При эксплуатации ПЭД металлизационным не допускаются ударные механические нагрузки на изолированный корпус. Эксплуатация ПЭД в скважинных условиях должна предполагать использование специальных центраторов при спуске оборудования.

#### **10. Гарантии изготовителя**

10.1 Изготовитель гарантирует качество покрытия ПЭД при хранении в течение не менее 24 месяцев с момента отгрузки или 12 месяцев с момента ввода в эксплуатацию при условии соблюдения норм и правил при транспортировке, погрузочно-разгрузочных работах, хранении и эксплуатации.

10.2 При отказах оборудования в гарантийный период, не связанных с эксплуатацией за пределами допустимых характеристик пластовой жидкости и скважинных условий, гарантийные обязанности изготовителя сохраняются.

10.3 Не считаются заводским браком дефекты покрытия, возникшие в результате механических повреждений из-за нарушений норм и правил при транспортировании от места поставки, погрузочно-разгрузочных работах, складировании, хранении и монтаже.

### 11. Нормативные ссылки

ГОСТ 9.402	Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрyтия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию
ISO 8502-4	Подготовка стальных подложек перед применением красок и сопутствующих товаров - Испытаний на оценку поверхностной чистоты - Часть 4: Руководство на оценке вероятности конденсации до нанесения краски
ГОСТ 11964	Дробь чугунная и стальная техническая. Общие технические условия
ГОСТ 3647	Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля
ГОСТ 17433	Промышленная чистота. Сжатый воздух. Классы загрязненности
ISO 8502-3	Подготовка стальных поверхностей перед нанесением лакокрасочных материалов и относящихся к ним продуктов. Испытания для оценки чистоты поверхности. Часть 3: Оценка запыленности стальных поверхностей, подготовленных к окрашиванию (метод липкой ленты)
ГОСТ 2789	Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики
ISO 8502-6	Подготовка стальных подложек перед применением красок и связанных продуктов - испытания для оценки чистоты поверхности - Часть 6: извлечения из воды растворимых примесей для анализа (метод Брель)
ISO 8502-9	Методы проверки эквивалентности ISO 8502-9 на Измерение уровней растворимых солей
ГОСТ 9293	Азот газообразный и жидкий. Технические условия
ГОСТ 10157	Аргон газообразный и жидкий. Технические условия
ГОСТ 5457	Ацетилен растворенный и газообразный технический. Технические условия
ГОСТ 3022	Водород технический. Технические условия

ГОСТ 5583	Кислород газообразный технический и медицинский. Технические условия
ГОСТ Р 52087	Газы углеводородные сжиженные топливные. Технические условия
ГОСТ 17433	Промышленная чистота. Сжатый воздух. Классы загрязненности
ГОСТ 9.302	Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля
ГОСТ 9.407	Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида
ГОСТ 31993	Материалы лакокрасочные. Определение толщины покрытия
ГОСТ 32299	Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва
ГОСТ 2999	Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу
ГОСТ 23.208	Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы
ГОСТ Р 51164	Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии
ГОСТ Р 58346	Трубы и соединительные детали стальные для нефтяной промышленности. Покрытия защитные лакокрасочные внутренней поверхности. Общие технические требования
ОПТ-25.220.01-КТН-054-15	Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. ЗАВОДСКОЕ ЭПОКСИДНОЕ ПОКРЫТИЕ ТРУБ. Общие технические требования
ГОСТ 9.403	Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия лакокрасочные. Методы испытаний на стойкость к статическому воздействию жидкостей
ГОСТ 27037	Материалы лакокрасочные. Метод определения устойчивости к воздействию переменных температур

ГОСТ 12.3.005	Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Работы окрасочные. Общие требования безопасности
ГОСТ 12.3.016	Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Строительство. Работы антикоррозионные. Требования безопасности
ГОСТ 12.3.002	Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Процессы производственные. Общие требования безопасности
ГОСТ 12.1.007	Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности
ГОСТ 12.1.010	Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Взрывобезопасность. Общие требования
ГОСТ 12.0.004	Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Организация обучения безопасности труда. Общие положения
ГОСТ 17.2.3.02	Правила установления допустимых выбросов загрязняющих веществ промышленными предприятиями
ГОСТ ИСО/МЭК 17025	Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий
ГОСТ 24297	Верификация закупленной продукции. Организация проведения и методы контроля
ГОСТ 427	Линейки измерительные металлические. Технические условия
ГОСТ 166	Штангенциркули. Технические условия
ГОСТ 10692	Трубы стальные, чугунные и соединительные детали к ним. Приемка, маркировка, упаковка, транспортирование и хранение

## **Приложение 1 (обязательное)**

### **Методика проведения металлографических исследований**

#### **Сущность метода**

Сущность метода заключается в определении типа и однородности структуры, объемной пористости, сплошности и качества сцепления покрытия с металлом на срезе покрытия металлографическим методом.

#### **Требования к образцам**

Образцы изготавливаются холодным механическим способом. Методика изготовления шлифов для проведения металлографического исследования предполагает принятие мер защиты исследуемой поверхности от внешнего воздействия способного разрушить или повредить исследуемый объект. Для этого происходит предварительная фиксация отдельных частей объекта клеем (эпоксидная смола), при подготовке поверхности применяется тонкое ручное шлифование на наждачной бумаге и окончательное полирование на кругах с алмазной пастой.

От каждого изделия или образца-свидетеля изготавливается металлографический шлиф поперечной ориентации. Длина покрытия на каждом шлифе должна быть не менее 20 мм.

#### **Оборудование и материалы**

- Инструмент и устройства для холодной разрезки и изготовления металлографических шлифов;
- Оптический с увеличением 200 крат.

#### **Поведение испытаний**

Металлографический шлиф фиксируется на предметном столике оптического микроскопа и при увеличении 200 крат с помощью эталонных шкал (рис. 1) производится оценка пористости покрытия.

Далее при том же увеличении по всей длине металлографического шлифа фиксируется наличие нарушений адгезионных связей на границе «металл-покрытие» в виде отслоений, вздутий и пр.

Затем в поле зрения микроскопа необходимо поместить слой исследуемого покрытия и оценить его сплошность по наличию/отсутствию трещин в слое покрытия.

#### **Обработка результатов испытаний**

При оценке пористости за результат принимается среднее значение пористости всех исследуемых шлифов.

При наличии отслоений покрытия от металла на участке более 50 % от длины шлифа качество сцепления следует считать неудовлетворительным.

При наличии трещин протяженностью более 50 % от толщины покрытия сплошность следует считать неудовлетворительной.

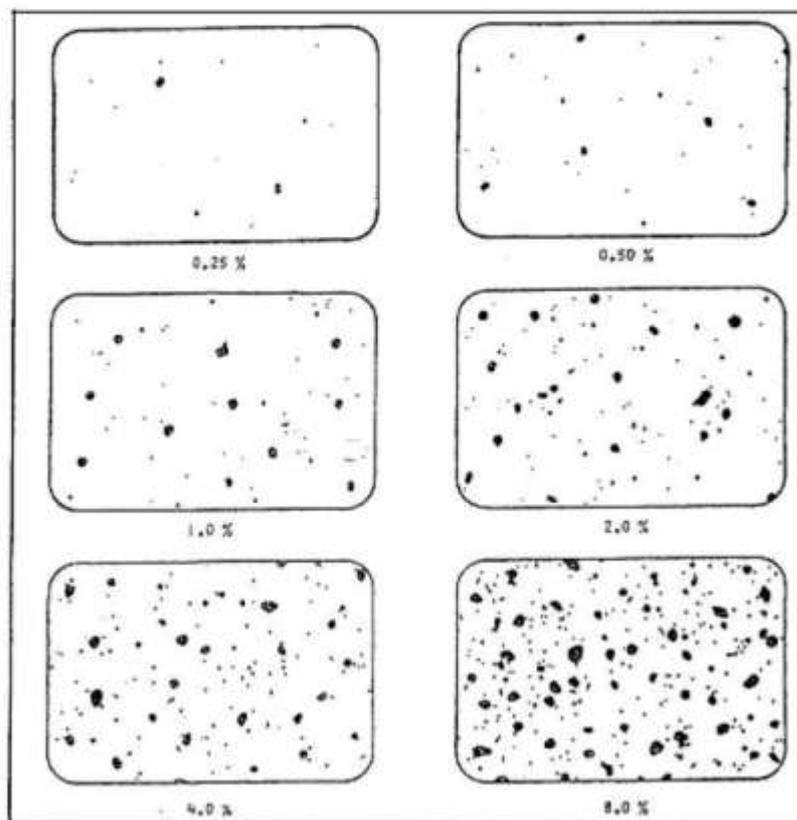


Рис.1 Эталон для определения пористости покрытия (0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0; - доля пор в % от общей площади видимой поверхности при увеличении x200)

**Лист регистрации изменений**

Номер изме- нения	Основание для внесения	Номера листов (страниц)			Всего листов (страниц) в доку- менте	Дата внесения изм.	Дата ввода изм. в действие	Подпись ответствен- ного за внесение
		Изменен- ных	Новых	Аннулиро- ванных				



УТВЕРЖДАЮ  
 Генеральный директор ООО «ТСК Урал»  
 К.А. Романов  
 «16» марта 2021 г.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ  
 К ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМ МЕТАЛИЗАЦИОННЫМ ПОКРЫТИЯМ  
 ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

(Утверждены впервые)

СОГЛАСОВАНО

Главный инженер  
 ООО «ТСК Урал»



С.Я.Клепнин  
 «16» марта 2021 г.

РАЗРАБОТАНО

Директор по науке  
 ООО «НПЦ «Самара»

П.Е. Юдин  
 «16» марта 2021 г.

Научный сотрудник  
 ООО «НПЦ «Самара»

Ж.В. Князева  
 «16» марта 2021 г.

Самара  
 2021

**ПРИЛОЖЕНИЕ В****Акты внедрения результатов диссертационной работы**

Генеральный директор

УТВЕРЖДАЮ

ООО «КОМТЭК»

И.М. Бердников

2021 г.

## АКТ

Внедрения результатов диссертационной работы Князевой Ж.В.

Настоящий акт составлен в подтверждение внедрения результатов диссертационной работы Князевой Жанны Валерьевны на тему «Исследования причин разрушения и разработка комплексной методики оценки свойств защитных металлизационных покрытий корпусов погружных электродвигателей, эксплуатирующихся в нефтяных скважинах» на производственной линии по нанесению металлизационных покрытий ООО «КОМТЭК».

Внедрение результатов диссертационной работы, а именно «Технические требования к газотермическим металлизационным покрытиям корпусов ПЭД», содержащих требования к минимальному уровню свойств, а так же требования к подготовке поверхности позволило в значительной степени повысить качество напыляемых металлизационных покрытий.

В разработанных в диссертационной работе Технических требованиях отражены важные аспекты для получения металлизационных покрытий с высоким уровнем свойств, которые позволили усовершенствовать технологический процесс напыления защитных металлизационных покрытий.

Ведущий инженер на производственной  
линии по нанесению защитных покрытий

А. С. Мальцев



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ООО «ТСК Урал»

К.А. Романов

«16» марта 2021 г.

## АКТ

Внедрения результатов диссертационной работы Князевой Ж.В.

Настоящий акт подтверждает тот факт, что разработки, включенные в диссертацию Князевой Жанны Валерьевны «Исследования причин разрушения и разработка комплексной методики оценки свойств защитных металлизационных покрытий корпусов погружных электродвигателей, эксплуатирующихся в нефтяных скважинах» были использованы и внедрены на производственной линии по нанесению металлизационных покрытий ООО «ТСК Урал», а именно:

- внедрены Технические требования к газотермическим металлизационным покрытиям, применяемым для защиты корпусов ПЭД, содержащие минимальный уровень свойств.

- переработаны технологический процесс и технологическая инструкция по подготовки поверхности металла перед нанесением металлизационного покрытия.

- переработаны и изменены режимы напыления металлизационных покрытий, позволяющий получать более однородное покрытие. Данное изменение внесено в технологическую инструкцию предприятия.

- в технологическую инструкцию предприятия внесено изменение, касающееся минимальной толщины и степени однородности структуры металлизационных покрытий, применяемых для защиты ПЭД, для гарантии обеспечения необходимого уровня свойств.

Генеральный директор

К.А. Романов

Главный инженер

С.Я.Клепинин



УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор ООО «ТСЗП»

Л.Х. Балдаев

«20» 03 2021 г.

АКТ

Внедрения результатов диссертационной работы Князевой Ж.В.

Настоящий акт подтверждает внедрение результатов диссертационной работы Князевой Жанны Валерьевны на тему «Исследования причин разрушения и разработка комплексной методики оценки свойств защитных металлизационных покрытий корпусов погружных электродвигателей, эксплуатирующихся в нефтяных скважинах» на производственной линии по нанесению металлизационных покрытий ООО «ТСЗП».

Внедрение Технических требований к газотермическим металлизационным покрытиям, применяемым для защиты ПЭД, разработанных на основе результатов исследования аварийных корпусов ПЭД после эксплуатации, а также на основе результатов комплексных лабораторных исследований, позволили значительно повысить качество напыляемых металлизационных покрытий.

Разработанные в диссертационной работе Технические требования позволили сформировать требования к серийному процессу нанесения металлизационных покрытий, приближенных к реальным условиям эксплуатации. Разработанные Технические требования содержат важное дополнение о необходимости применения дополнительного слоя пропитки для металлизационного покрытия, нанесенного методом электродуговой металлизации, что позволяет исключить негативное влияние особенностей структуры на свойства покрытия. Поскольку Технические требования являются обобщенными, выбор требований к качеству покрытий должен осуществляться в зависимости от условий эксплуатации и технико-экономических характеристик покрытий.

Начальник отдела  
опытно-производственных работ

А.О. Жуков

Зам. нач. ПО ОПР

Ю. Ищенко





ООО «Научно-производственный центр «Самара»  
 Юридический адрес: Россия, 443001, г. Самара, ул. Ульяновская/Ярмарочная, д. 52/55  
 Фактический/почтовый адрес: Россия, 443022, г. Самара, Гаражный проезд, д. 3, лит. Е  
 +7 (846) 932-03-23  
 office@npsc-samara.ru

УТВЕРЖДАЮ  
 Управляющий ООО «НПЦ «Самара»  
 А.В. Максимук  
 «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.



### АКТ

#### Внедрения результатов диссертационной работы Князевой Ж.В.

Настоящим актом подтверждаем внедрение результатов диссертационной работы Князевой Жанны Валерьевны на тему «Исследования причин разрушения и разработка комплексной методики оценки свойств защитных металлизационных покрытий корпусов погружных электродвигателей, эксплуатирующихся в нефтяных скважинах» на соискание ученой степени кандидата технических наук в испытательную лабораторию ООО «НПЦ «Самара». Разработанные Технические требования содержат необходимый перечень испытаний, который дает возможность корректной оценки комплекса свойств металлизационных покрытий и оценки его применимости в определенных условиях эксплуатации. Предложенная методика комплексных испытаний внедрена в испытательную лабораторию ООО «НПЦ «Самара» для дальнейшего применения при исследовании металлизационных покрытий.

Начальник испытательной лаборатории  М.А. Добрикова  
 Ведущий инженер испытательной лаборатории  А.А. Рожков