

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Самара – 2021

Работа выполнена на кафедре в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»).

Научный руководитель: **Амосов Александр Петрович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Емелюшин Алексей Николаевич**
доктор технических наук, профессор кафедры
«Литейные процессы и материаловедение»
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск.

Балдаев Сергей Львович
кандидат технических наук, заместитель
генерального директора по технологиям
ООО «Технологические системы защитных
покрытий», г. Москва.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет», г. Уфа.**

Защита состоится «01» октября 2021 г. в 13:00 часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.039.02 (Д 999.122.02) на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, главный корпус, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» и на сайте http://d99912202.samgtu.ru/sites/d99912202.samgtu.ru/files/diss_kvazeva_j_new.pdf.

Отзывы на автореферат просьба выслать по адресу:
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, главный корпус.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент  Альфия Расимовна Луц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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). 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 иницированию 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. 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. 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 промысловых 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 CO₂- и H₂S- 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.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов, списка использованных источников, включающего 114 наименований, содержит 209 страниц машинописного текста, 71 рисунок, 39 таблиц и 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится обоснование актуальности диссертационной работы, цель и задачи исследований, обоснование практической значимости работы.

В первой главе приведен аналитический обзор научно-технической литературы, посвященный вопросам защиты погружного оборудования УЭЦН, в частности корпуса ПЭД, от коррозии и износа. В данной главе подробно рассмотрены основные осложняющие факторы, характерные для последней стадии разработки месторождений и приводящие к преждевременному отказу оборудования. Рассмотрены механизмы и виды коррозионных повреждений корпусов ПЭД, на которые приходится высокая доля отказов.

Особое внимание уделено способам защиты корпусов ПЭД от коррозии и износа, которые классифицируются на химические, физические и технологические. 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. Наиболее эффективным и экономически выгодным способом защиты корпуса ПЭД в нефтяной скважине является применение металлизационных покрытий, нанесение которых осуществляется по технологии газотермического напыления.

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 которых может осуществляться методами электродуговой металлизации или высокоскоростного напыления.

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 металлизационного покрытия в определенных условиях эксплуатации.

Во второй главе описаны методология, методы исследования и характеристики объектов исследования, используемых в диссертационной работе. В качестве объектов исследования использовались образцы следующих типов: корпуса ПЭД с наружным металлизационным покрытием (группа 1); образцы-свидетели в виде стальных пластин с металлизационным покрытием, технология нанесения которого идентична технологии нанесения покрытия на изделие (группа 2).

Объекты первой группы эксплуатировались на месторождениях нескольких добывающих предприятий ПАО «НК «Роснефть». Объекты

исследования второй группы наносились на базе нескольких производственных площадок. Перечень материалов, предназначенных для нанесения металлизационного покрытия на образцы-свидетели, сформирован на основании результатов исследований образцов первой группы и аналитического обзора материалов, применяемых для защиты корпусов ПЭД.

Исследование образцов первой группы предполагает определение основных причин и механизмов разрушения металлизационных покрытий в процессе эксплуатации. 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.

Во второй главе выбраны методы испытаний, результаты которых позволят оценить комплекс физических, механических, физико-механических, трибологических и коррозионных свойств металлизационных покрытий, и которые могут быть основой новой методики комплексной оценки свойств металлизационных покрытий из трех блоков. В первом блоке представлены методы контроля технологических показателей покрытия в исходном состоянии. Во втором блоке испытаний представлены методы, определяющие стойкость покрытий к внешним механическим воздействиям. Третий блок испытаний включает методы ускоренных испытаний в модельных средах для оценки коррозионного поведения металлизационных покрытий.

Третья глава посвящена анализу статистических данных отбраковки ПЭД по причине коррозионного повреждения, а также анализу полученных результатов экспериментальных исследований причин отказов корпусов ПЭД с металлизационным покрытием после эксплуатации.

По результатам анализа статистических данных коррозия корпуса ПЭД является одной из самых распространенных причин отказа нефтепогружного оборудования (рисунок 1), что в свою очередь согласуется с данными литературных источников, представленными в первой главе.

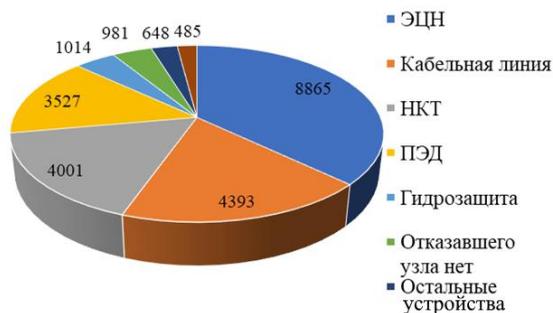


Рисунок 1 – Распределение отказов по типу оборудования

Исследования корпусов ПЭД с металлизационным покрытием после эксплуатации позволило установить несколько основных причин разрушения металлизационных покрытий: механические повреждения, абразивный износ покрытия, низкие барьерные свойства покрытия, несовершенства технологии нанесения покрытия. Также возможно комбинирование двух и более механизмов.

Механические повреждения покрытия (рисунок 2) являются наиболее частой причиной отказа электродвигателей. Механические повреждения проявляются в виде нарушения сплошности покрытия типа глубоких рисок, направленных строго вдоль корпуса, которые появляются в ходе спуско-подъемных операций, чаще всего при контакте с обсадной колонной. Поскольку все исследованные в работе покрытия относятся к катодным (по отношению к корпусу ПЭД) наличие сквозных рисок приводит к образованию гальванической пары и, как следствие, интенсификации процессов коррозионного разрушения.

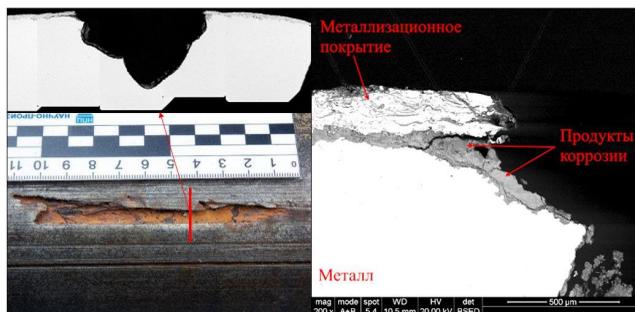


Рисунок 2 – Механические повреждения корпуса ПЭД. Образец №1

Абразивный износ покрытия сопровождается изменением цвета и «стиранием» участков покрытия с образованием локальных очагов коррозионных повреждений (рисунок 3). Повреждения, как правило, локализованы вблизи концов корпуса в виде полос шириной до 10 см.

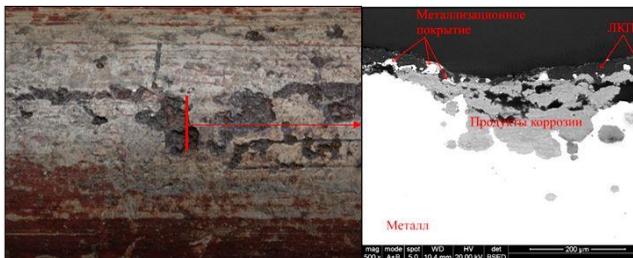


Рисунок 3 – Повреждения (абразивный износ) корпуса ПЭД. Образец №3

Низкие барьерные свойства покрытия проявляются в виде вздутий и отслоений покрытия, расположенных либо равномерно по поверхности корпуса, либо локально на участках площадью в несколько см² (рисунок 4). Для всех выявленных случаев отказа характерна низкая толщина слоя металлизации – до 150 мкм (рисунок 4).

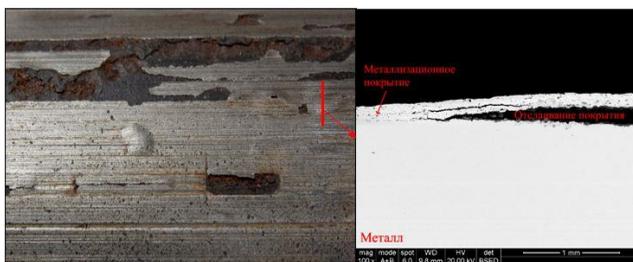


Рисунок 4 – Повреждения в виде вздутий и отслаиваний металлизационного покрытия корпуса ПЭД

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 5), 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 6), поскольку при нанесении оно полностью повторяет топографию поверхности корпуса ПЭД.

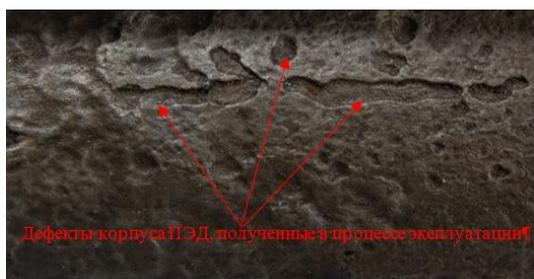
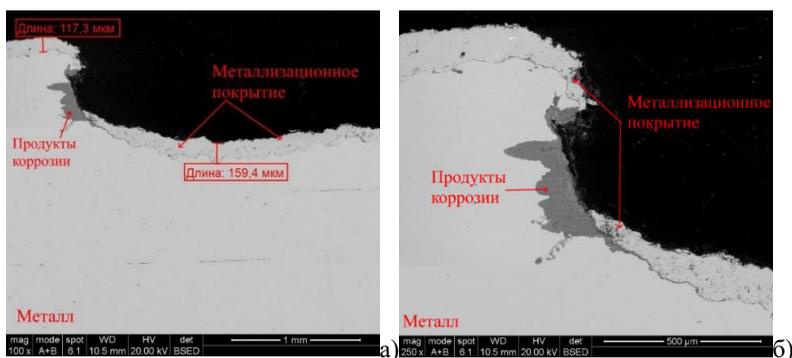


Рисунок 5 – Повреждения корпуса ПЭД. Образец №5



а) Увеличение x100; б) Увеличение x250

Рисунок 6 – 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 частиц металлизационного покрытия (для ЭДМ – оксидов), а также проникновение коррозионно-активных компонентов среды к металлической подложке через сквозную пористость (Рисунок 7). 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.

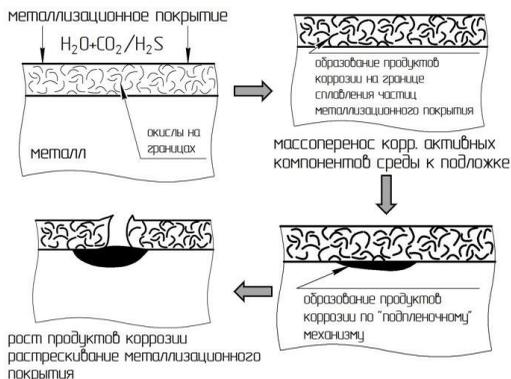


Рисунок 7 – Стадийность процесса разрушения корпусов ПЭД по коррозионному механизму

Четвертая глава посвящена разработке комплексной методики лабораторных испытаний металлизационных покрытий, имитирующих воздействие различных эксплуатационных факторов.

Разработанная комплексная методика лабораторных испытаний металлизационных покрытий представлена тремя блоками, включающими в себя методы 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 методы контроля 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 CO_2 , H_2S .

В основу предложенной методики 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. В качестве ключевых отличий было предложено:

- применение дополнительного «стакана» внутри автоклава для исключения контакта испытуемых образцов с металлом реактора, поскольку, было установлено, что такой контакт вносит существенный вклад в электрохимические процессы коррозии;

- предложены режимы испытаний, позволяющие одновременно имитировать карбонатную и сульфидную коррозию.

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

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.

Наибольший интерес представляет сплошность и однородность слоя металлизационного покрытия. По результатам исследований неудовлетворительные результаты трибологических и коррозионных испытаний в первую очередь связаны с неблагоприятным структурным состоянием

покрытия. Для металлизационного покрытия, нанесенного методом ЭДМ, характерно классическое пластинчатое строение, в котором 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 8). 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. Кроме того, окисление частиц негативно сказывается на коррозионной стойкости ввиду высокой пористости образованного на дистанции напыления оксида.

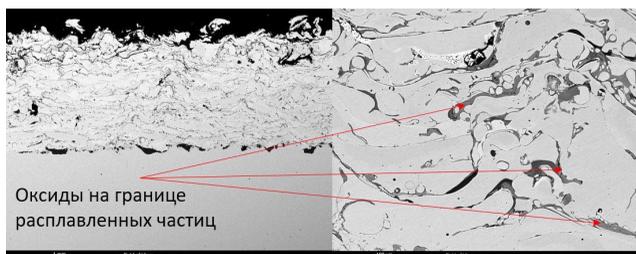


Рисунок 8 – Характерная микроструктура металлизационного покрытия, нанесенного методом ЭДМ

Металлизационные покрытия, нанесенные методом ВСПН, обладают более благоприятным строением структуры. Для них характерно более плотное строение, а также минимальная степень окисления частиц или ее отсутствие (рисунок 9). Несмотря на отсутствие или минимальное окисление частиц напыляемого материала в структуре покрытий, нанесенных методом ВСПН, 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 различные объемы.

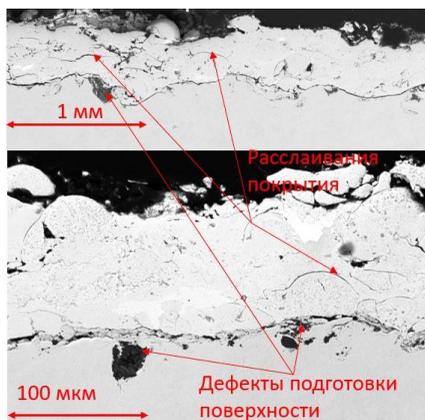


Рисунок 9 – Характерная микроструктура металлизационного покрытия, нанесенного методом ВСГПН

В пятой главе предложены технические требования к газотермическим металлизационным покрытиям, разработанные на основании проведенного анализа условий эксплуатации, причин отказов изолированных корпусов ПЭД, а также результатов комплексных лабораторных исследований металлизационных покрытий. Разработанные технические требования направлены на повышение качества металлизационных покрытий и снижение аварийности эксплуатируемых ПЭД.

Разработанные технические требования состоят из 11 разделов и содержат в себе требования к свойствам металлизационных покрытий ПЭД, технологии их нанесения, контролю, приемке и поставке.

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.

В разработанном документе предусмотрено ранжирование требований к свойствам металлизационных покрытий в зависимости от метода нанесения и максимальной температуры эксплуатации.

Ограничение максимально допустимой температуры эксплуатации металлизационного покрытия, нанесенного методом ЭДМ (плюс 90 °С), обусловлено неудовлетворительными результатами лабораторных испытаний,

согласно которым применение данного типа покрытия целесообразно исключительно при наличии дополнительного слоя пропиточного материала. В качестве дополнительного пропиточного слоя металлизационного покрытия, нанесенного методом ЭДМ, рекомендуется использование лакокрасочных материалов на основе полиуретановых, эпоксидных, эпоксидно-фенольных материалов. При этом толщина пропиточного слоя подбирается с учетом возможности обеспечения необходимого уровня барьерных свойств, а также минимизации влияния слоя пропитки на теплоотдачу корпусов ПЭД.

Возможность применения металлизационного покрытия, нанесенного методом ВСГПН, при температуре 120 °С должна быть обусловлена технологией нанесения покрытия, в особенности соблюдением требований по однородности структуры.

В шестой главе представлены результаты разработки комбинированного способа защиты наружной поверхности ПЭД, сочетающего в себе футеровку цилиндрической части ПЭД и дополнительную металлизацию незащищенных поверхностей. Несмотря на очевидные и многочисленные преимущества применения металлизации для защиты от коррозии корпуса ПЭД этот метод 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.

Предлагаемый способ заключается в размещении защищаемого узла погружного насосного агрегата внутри полого цилиндрического кожуха из нержавеющей стали так, чтобы зазор между ними обеспечивал собираемость и места сочленения узла с другими узлами агрегата не закрывались футеровкой. После чего торец защитного кожуха обваривается по контуру аргоно-дуговой сваркой с созданием непрерывного вакуумно-плотного сварного шва между ним и корпусом узла насосного агрегата. Между погружным электродвигателем и футеровкой должен обеспечиваться зазор с последующим заполнением его герметиком с хорошей теплопроводностью для интенсификации отвода тепла от

корпуса электродвигателя во время его работы. Незащищенные футеровкой поверхности насосного агрегата и области сварных швов должны быть металлизированы монелью или нержавеющей сталью методом высокоскоростного газотермического напыления или электродуговой металлизации.

В ходе дальнейших исследований проводились исследования нескольких коррозионностойких марок сталей AISI 316L, AISI 304, 20X13 и сравнение их с распространенными низколегированными сталями (рисунок 10).

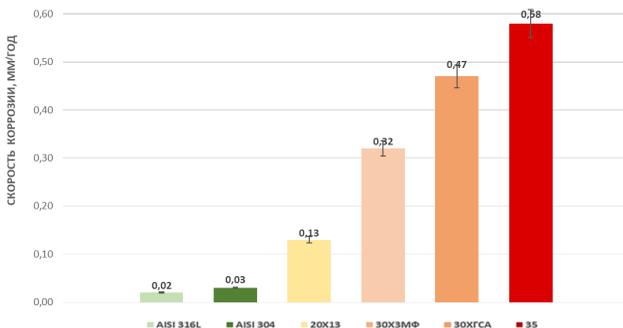


Рисунок 10 – Диаграмма скорости коррозии в зависимости от марки стали после выдержки в минерализованной водной среде, насыщенной коррозионно-активными газами (жидкая фаза: 5% NaCl, газовая фаза 3 МПа CO₂, 1 МПа H₂S, 6 МПа N₂) при температуре 120 °С

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 11).

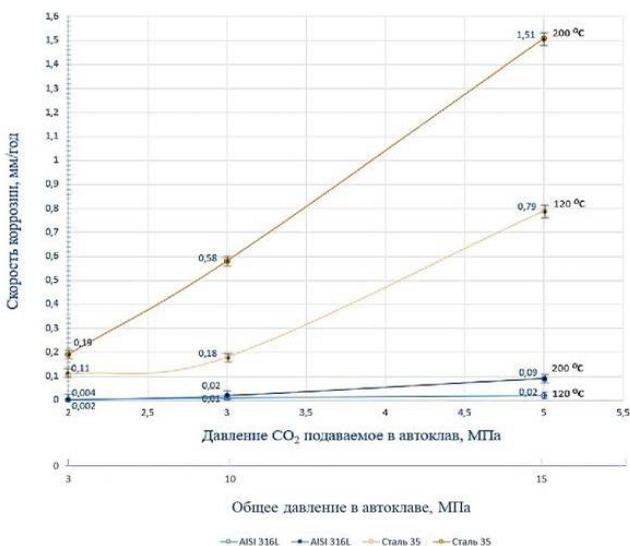


Рисунок 11 – Зависимость скорости коррозии от марки стали, температуры, давления и содержания CO₂

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.

Основное содержание диссертации представлено в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Князева, Ж.В. Новая методика автоклавного теста для экспресс-анализа антикоррозионных покрытий / Ж.В. Князева, П.Е. Юдин, Е.В. Александров // Трубопроводный транспорт: теория и практика. –2015. – № 3 (49). – С. 16-24.

2. Князева, Ж.В. Обзор методов автоклавных испытаний, описанных в зарубежных стандартах / Ж.В. Князева, П.Е. Юдин, Ю.М. Марков // Трубопроводный транспорт: теория и практика. –2015. – № 4 (50). – С. 6-7.

3. Князева, Ж.В. Классификация причин разрушения металлизационного покрытия погружных электродвигателей при эксплуатации / Ж.В. Князева, П.Е. Юдин, А.П. Амосов, С.С. Петров, А.В. Максимук // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2019. – No. 9. – С. 25—32. DOI: 10.30987/article_5d2df0884cc457.62830322.

4. 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-

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и входящих в базы данных SCOPUS:

5. 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](https://doi.org/10.17073/1997-308X-2020-75-86). 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 and A. V. Maksimuk // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2020. – Vol. – 61. – No. 5. – pp. 592–599.

Публикации в других изданиях:

6. 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/SMTT/32.5.006](https://doi.org/10.47581/2020/30.10.2020/SMTT/32.5.006).

7. Князева, Ж.В. Автоклавные испытания металлизационных покрытий / Ж.В. Князева, П.Е. Юдин // Перспективное развитие науки, техники и технологий: сборник научных статей 10-й Международной научно-практической конференции (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](https://doi.org/10.47581/2020/30.10.2020/МТО53/1/018).

8. Князева, Ж.В. Электрохимическая коррозия газотермических металлизационных покрытий / Ж.В. Князева, П.Е. Юдин // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сборник научных трудов 15-ой Международной научно-практической конференции (19-20 марта 2020 года)/ редкол.: Горохов А.А.(отв. ред.); Юго-Зап. гос. ун-т, Курск: Юго-Зап. гос. ун-т – 2021. – С.119-125.

9. Князева, Ж.В. Влияние структурных особенностей на износостойкость

металлизационных газотермических покрытий / Ж.В. Князева // Современные проблемы материаловедения: сборник трудов II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 65-летию ЛГТУ, Липецк, 18 февраля 2021 года. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2021. – С. 107-112.

Патенты:

1. 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.

Научное издание

Князева Жанна Валерьевна

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук на тему:

Исследования причин разрушения и разработка комплексной методики оценки свойств защитных металлизационных покрытий корпусов погружных электродвигателей, эксплуатирующихся в нефтяных скважинах

Автореферат отпечатан с разрешения объединенного диссертационного совета 99.2.039.02 (Д 999.122.02) на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика

С.П. Королева»

(протокол № 9 от «28» июня 2021 г.).

Формат 60 x 84 1/16. Набор компьютерный.

Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ №__.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «СамГТУ»

Отдел типографии и оперативной печати
443100 г. Самара ул. Молодогвардейская, 244