

39/04. *Double-radius Rolled Roller* / Blyumenstein V.Yu.; applicant and patent holder: FBSBEI HVE “KuzSTU”. – No.2013135794/02; claimed: 30.07.2013; published: 10.10.2014. – pp. 7.

7. Pat. RU 2529335 C1 Russian Federation, IPC B24B 39/04. *Run Combined Roller* / Blyumenstein V.Yu.; applicant and patent holder FBSBEI HVE “KuzSTU”. – No.2013135796/02; claimed: 30.07.2013; published: 27.09.2014. – pp. 6.

8. Pat. RU 2673896 C1 Russian Federation, IPC B24B 39/04. *Run Roller* / Zaides S.A.; applicant and patent holder:

FBSBEI HE “IRNITU”. – No.2017108874; claimed: 16.03.2017; published: 03.12.2018 – pp. 9.

9. Saeed Moaveni Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS: International Edition (3rd Edition). USA: Pearson Education Hall, 2008 – 880 p.

10. Zaides, S.A., Kolesnik, A.V. mechanics of residual stresses formation at surface plastic deformation based on dynamic modeling // *Bulletin of IrSTU*, Vol.21 – Irkutsk, 2017. – pp. 24-31.

Рецензент д.т.н. В.П. Кольцов

УДК 621.793

DOI: 10.30987/article\_5d2df0884cc457.62830322

Ж.В. Князева<sup>1,2</sup>, аспирант, П.Е. Юдин<sup>1,2</sup>, к.т.н., А.П. Амосов<sup>1</sup>, д.т.н., С.С. Петров<sup>2</sup>, к. ф.-м.н., А.В. Максимук<sup>2</sup>, управляющий  
(<sup>1</sup>Самарский государственный технический университет, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244;  
<sup>2</sup>ООО «НПЦ «Самара», 443022, г. Самара, Гаражный пр-д, 3)  
E-mail: fmmt@samgtu.ru; office@npcsamara.ru

## Классификация причин разрушения металлизационного покрытия погружных электродвигателей при эксплуатации

*Представлена классификация основных причин и механизмов разрушения защитных металлизационных покрытий корпусов погружных электродвигателей (ПЭД). Представленная классификация основана на результатах визуального осмотра, определения характера и локализации повреждений, а также результатов микроструктурных исследований. Полученные результаты исследований позволят с большой степенью достоверности проводить первичную идентификацию причин разрушения металлизационного покрытия корпусов ПЭД.*

**Ключевые слова:** металлизация; газотермическое напыление; коррозия; износ; погружные электродвигатели; установка электрического центробежного насоса.

Zh.V. Knyazeva<sup>1,2</sup>, Post graduate student, P.E. Yudin<sup>1,2</sup>, Can. Sc. Tech., A.P. Amosov<sup>1</sup>, Dr. Sc. Tech., S.S. Petrov<sup>2</sup>, Can. Sc. Phys-Math., A.V. Maximuk<sup>2</sup>, Manager  
(<sup>1</sup>Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Str., Samara, 443100;  
<sup>2</sup>PC “SPC “Samara” 3, Garazhny Passage, Samara, 443022)

## Classification of destruction reasons of metalized coatings in submerged electro-motors during operation

*A classification of basic reasons and destruction mechanisms in housing protective coatings of submerged electro-motors (SEM) is presented. The classification presented is based on the results of the visual inspection, a definition of the character and localization of damages, and also the results of micro-structural researches. The investigation results obtained will allow carrying out with a high degree of reliability a primary identification of destruction reasons in the metalized coating of SEM housings.*

**Keywords:** metallization; gas-thermal sputtering; corrosion; wear; submerged electro-motors; installation of electric centrifugal pump.

## Введение

Эксплуатация скважин, оборудованных установкой электрического центробежного насоса (УЭЦН), значительно затруднена ввиду воздействия осложняющих факторов, характерных для завершающей стадии освоения месторождений. В большей степени на работу оборудования УЭЦН влияют сильная обводненность добываемой продукции, вынос механических примесей, выпадение солей и асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО). Основной ущерб наносит коррозия оборудования, на интенсивность которой влияют как физико-химические свойства транспортируемой жидкости, так и термодинамические условия (давление, температура).

По статистике наиболее уязвимым перед коррозией узлом в УЭЦН является корпус погружного электродвигателя (ПЭД), на долю которого приходится около 70 % разрушений [1]. Наиболее популярным в настоящее время способом защиты корпусов ПЭД от коррозии является нанесение защитных покрытий из коррозионностойких материалов. К менее востребованным способам относятся протекторная защита, а также применение ПЭД в коррозионностойком исполнении [2].

Формирование металлизационного покрытия осуществляется методами газотермического напыления – высокоскоростное (HVOF), плазменное, газопламенное напыление, метод газопламенной наплавки и электродуговой металлизации (ЭДМ). Механизм нанесения покрытия заключается в подаче порошкового материала в струю газов и переносе частиц распыляемого материала с формированием на металле слоя покрытия [3]. В результате на подложке образуется защитный слой, полностью изолирующий поверхность металла от агрессивной среды за счет более высокой стойкости к коррозии. Нанесение металлизационного покрытия может быть использовано как для защиты новых ПЭД от коррозии, так и для восстановления ресурса изношенных в процессе эксплуатации корпусов.

Применение металлизационных покрытий позволяет значительно продвинуться в решении проблем коррозии ПЭД, но не решает эту проблему полностью. Как и в любой области техники для погружного скважного оборудования характерны процессы выхода из строя, периодического ремонта и замены в процессе эксплуатации нефтяной скважины, при этом простой оборудования могут приводить к большим затратам. Первичная идентификация

причин разрушения по визуальным признакам позволит оперативно переходить к проведению ремонтных работ, минимизируя затраты, связанные с простоем оборудования, и вносить корректировки в технологические процессы нанесения покрытия и проведения спуско-подъемных операций (СПО), повышая межремонтную наработку корпусов ПЭД и ЭЦН.

Выявление причин отказов представляет собой достаточно сложную задачу, решение которой должно быть основано на комплексном анализе результатов лабораторных исследований и эксплуатационных особенностей.

## Объект и методы исследований

Классификация причин разрушения основывалась на результатах оценки внешнего вида дефектов и результатах микроструктурных исследований поврежденных участков.

Микроструктурные исследования осуществлялись с помощью растрового электронного микроскопа FEI QUANTA INSPECT с приставкой для рентгеновского микроанализа EDAX.

В качестве объектов исследований использовались фрагменты аварийных корпусов ПЭД (23 шт.). Отбор образцов осуществлялся на ремонтных базах дочерних обществ ПАО «НК «Роснефть» различных регионов. Исследования проводились на образцах ПЭД с металлизационным покрытием следующих типов:

- монель (сплав на основе никеля и меди), нанесенная методом электродуговой металлизации (ЭДМ) и эпоксидная пропитка;
- механическая смесь монели (сплав на основе никеля и меди) и нержавеющей хром-никелевого сплава на основе железа (08X18H10), нанесенная методом ЭДМ и эпоксидная пропитка;
- нержавеющий хром-никелевый сплав на основе железа (06X19H9T/06X18H10/X13N7C2/09X17H), нанесенный методом ЭДМ;
- нержавеющий хром-никелевый сплав на основе железа с молибденом (04X19H11M3), нанесенный методом ЭДМ;
- нержавеющий хром-никелевый сплав на основе железа с добавлением интерметаллидных фаз на основе С, В, Si, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, нанесенный методом высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF).

## Результаты

Анализ результатов исследований образцов

ПЭД позволил выявить основные причины образования повреждений покрытия и металла корпуса. Рассмотрим подробнее каждый вид разрушения.

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

Результаты микроструктурных исследований (рис. 2) 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.



Рис. 1. 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 (рис. 3). В структуре покрытия корпуса ПЭД на участках локального снижения толщины защитного покрытия наблюдается развитие коррозионных процессов с образованием продуктов коррозии (рис. 4).

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 квадратных сантиметров (рис. 5). Для выявленных случаев отказа характерна низкая толщина слоя металлизации – до 150 мкм (рис. 6).

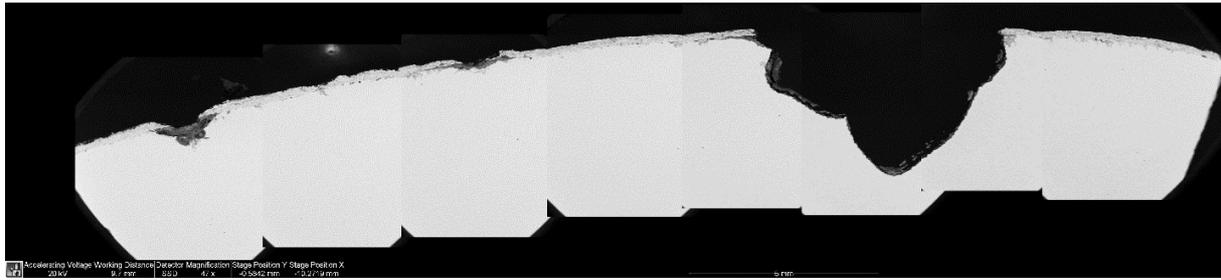
На исследованных образцах ПЭД с комбинированным способом защиты (металлизация + лакокрасочное покрытие) выявлено, что металлизационное покрытие нанесено на поверхность металла, не образуя единый сплошной слой, что также является нарушением технологии нанесения. Отсутствие сплошности слоя металлизационного 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 (рис. 7).

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

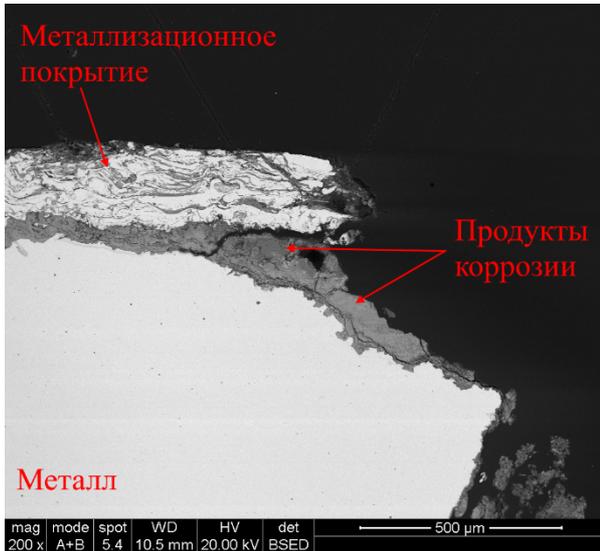
Данный вид разрушения характерен для ремонтных корпусов ПЭД (рис. 8), поверхность которых уже подвергалась коррозионному разрушению, вследствие чего поверхность корпуса обладает значительной неравномерностью (язвенные повреждения, кратеры). Нанесение покрытия на такую поверхность способствует образованию разнотолщинности покрытия (рис. 9), 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 (рис. 10).

### Обсуждение результатов

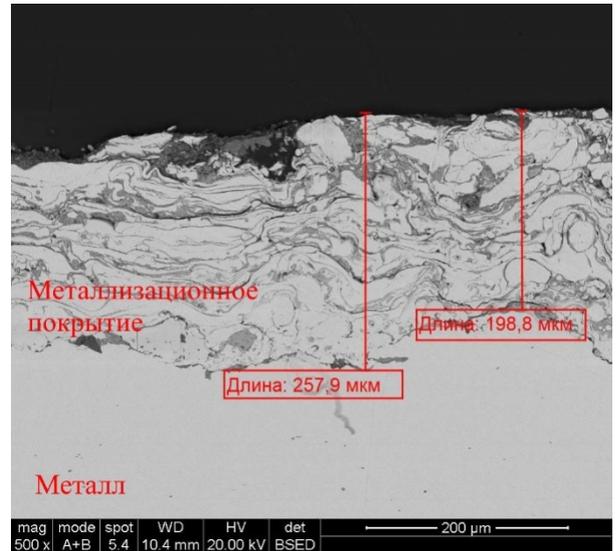
Характер механических повреждений, их протяженность свидетельствуют об определенных воздействиях на корпуса ПЭД, например, механический контакт при проведении СПО с элементами колонны или при транспортировке изделий. Известно, что износ поверхности за счет различных механизмов способствует сначала изменению поверхностных структурных состояний, а при более сильных воздействиях приводит и к объемным необратимым структурным деформациям вплоть до разрушения [4]. Более подробно механизмы износа рассмотрены в работе [4], при этом необходимо понимать, что протекание различных механизмов износа сопровождается действием множества факторов (физико-механических, физических и механических процессов), вызывающих дефектообразование и уменьшение прочности поверхностного слоя.



a)



б)



в)

Рис. 2. Микроструктура области повреждения защитного покрытия образца №1:

a – общий вид,  $\times 47$ ; б – участок нарушения сплошности покрытия,  $\times 100$ ; в – толщина защитного покрытия,  $\times 500$



Рис. 3. Повреждения (абразивный износ) корпуса ПЭД (образец №3)

Наибольший интерес для условий работы ПЭД представляют механизм гидроабразивного изнашивания, возникающий при контакте корпуса с жидкой средой, содержащей абразивные частицы. Здесь износ поверхности происходит за счет царапающего или режущего воздействия частиц на поверхность изделия. Разрушение поверхности металлизационного покрытия, как и любого изолирующего покрытия сопровождается инициированием процессов электрохимической коррозии при

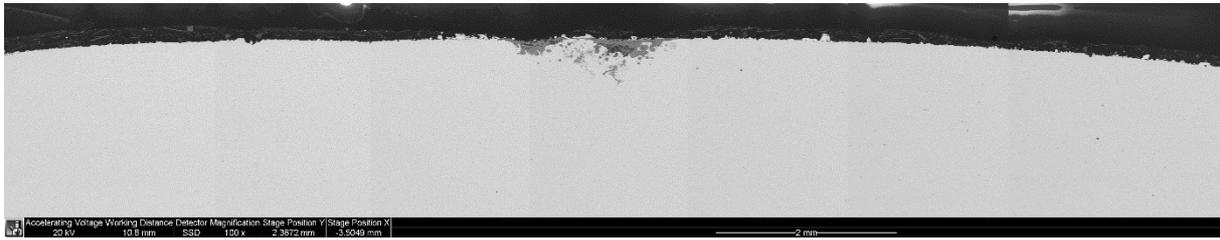
контакте с агрессивной скважинной жидкостью. При этом образуется гальваническая пара, где металлическое покрытие становится катодом по отношению к корпусу, а корпус – анодом.

В процессе электрохимической коррозии основной материал корпуса растворяется [5]. Указанные воздействия на металл корпуса могут иметь менее интенсивный характер, не вызывая нарушения слоя покрытия. В данном случае наличие таких повреждений может способствовать локальному снижению защитных свойств покрытия, тем самым облегчая доступ компонентов среды к металлу, что способствует развитию подпленочной коррозии [7].

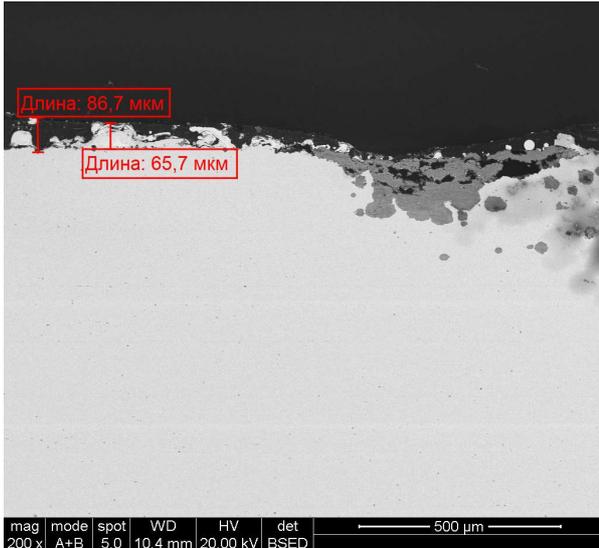
Процессы протекания подпленочной коррозии хорошо изучены для полимерных покрытий наружной и внутренней поверхности трубопроводов. Согласно общепринятой терминологии [8], подпленочная коррозия развивается под слоем лакокрасочного покрытия, нарушая адгезию с окрашенной поверхностью. Физический смысл механизма подпленочной коррозии заключается в диффузионном проникновении коррозионно-активных компо-

нентов среды через полимерное покрытие к поверхности металла с последующим разрушением адгезионных связей и образованием продуктов коррозии металла. При дальнейшем

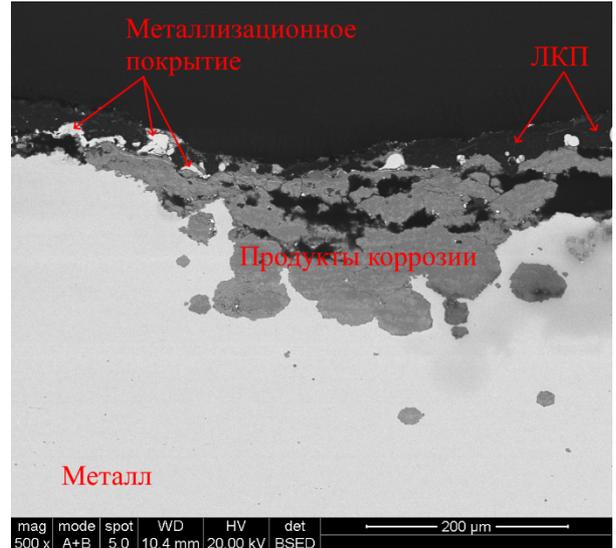
развитии процессов коррозии происходит рост напряжений в покрытии, возникающих из-за разницы плотности металла и продуктов коррозии, и его разрушение [9].



a)



б)



в)

Рис. 4. Микроструктура области повреждения защитного покрытия образца №3:

a – общий вид,  $\times 100$ ; б –  $\times 200$ ; в –  $\times 500$



a)

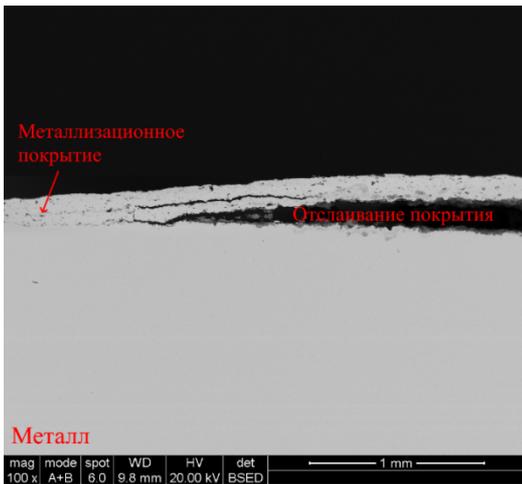


б)

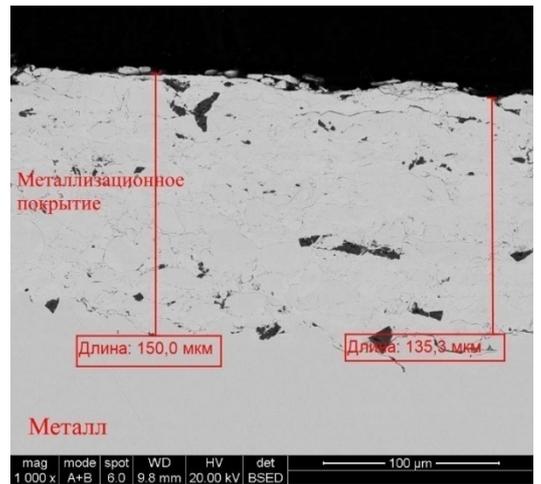
Рис. 5. Повреждения в виде вздутий и отслаиваний металлизационного (a) – образец №6 и комбинированного (б) – образец №4 покрытия корпуса ПЭД «ЛКП+металлизация»

Проникновение компонентов среды через толщу металлизационного покрытия, в отличие от полимерных, имеет недиффузионный характер. Металлизационные покрытия отличаются высокой пористостью, которая способствует проникновению компонентов среды под покрытие к поверхности металла и его электрохимическому растворению [10, 11].

Барьерные свойства покрытия определяются способностью покрытия противостоять воздействию среды, ее проникновению через толщу покрытия [12]. Согласно [10] барьерные свойства металлизационного покрытия определяются плотностью и пористостью покрытия. Повышение плотности покрытия способствует уменьшению проницаемости покрытия для коррозионно-активных компонентов среды. Как правило, для устранения пор (заполнение) слой покрытия пропитывают органическими или другими составами [10, 11], что представляет собой комбинированный способ защиты поверхности «металлизация + лакокрасочное покрытие».



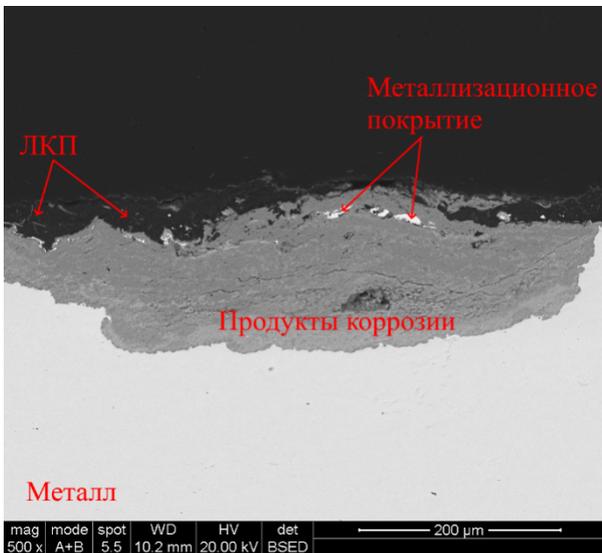
а)



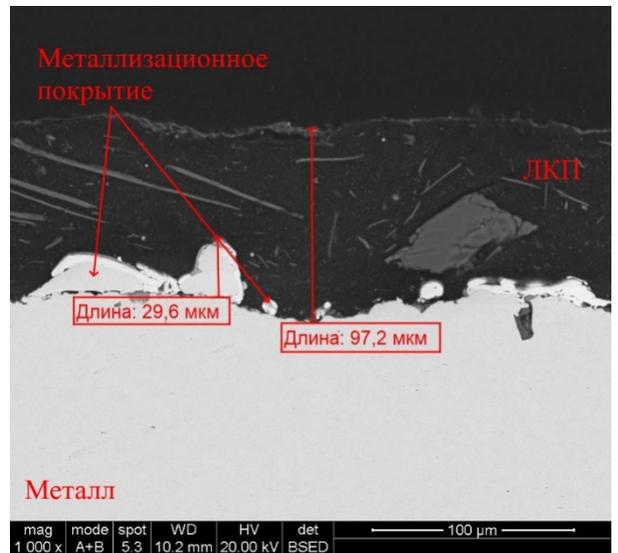
б)

**Рис. 6. Микроструктура покрытия образца №6:**

а – область отслаивания покрытия,  $\times 100$ ; б – толщина слоя покрытия,  $\times 1000$



а)



б)

**Рис. 7. Микроструктура образца №4 с комбинированным защитным покрытием:**

а – область разрушения покрытия и металла корпуса,  $\times 500$ ; б – толщина покрытия,  $\times 1000$



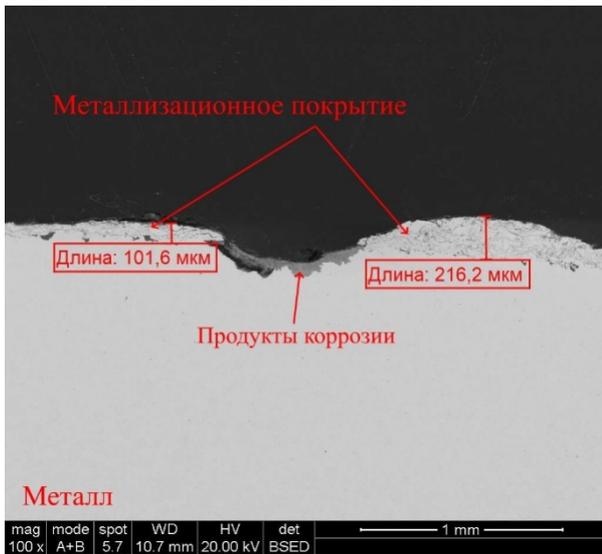
а)



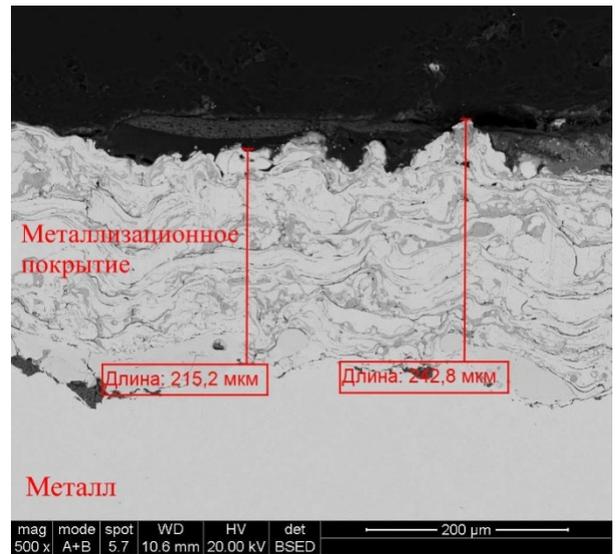
б)

**Рис. 8. Повреждения корпуса ПЭД:**

а – образец №10; б – образец №5



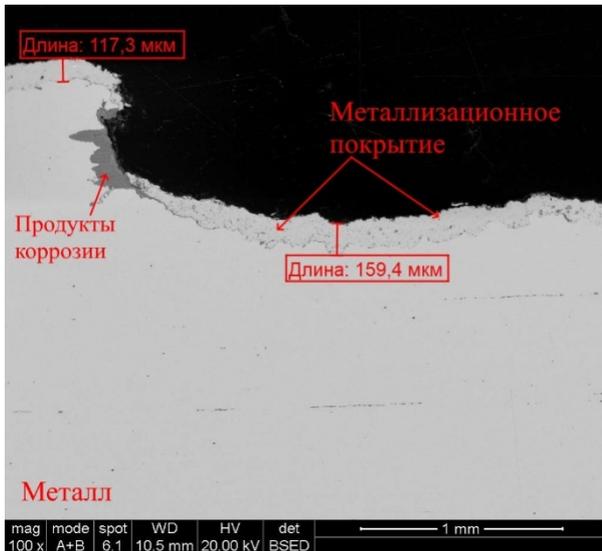
а)



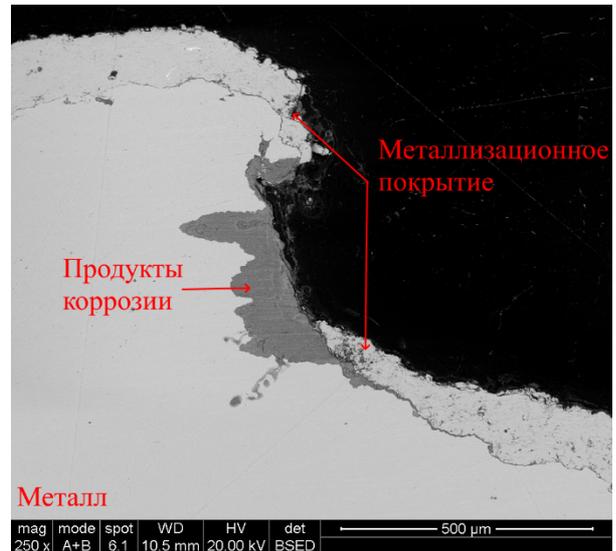
б)

Рис. 9. Микроструктура защитного покрытия ПЭД (образец №10):

а – коррозионное разрушение,  $\times 100$ ; б – толщина покрытия,  $\times 500$



а)



б)

Рис. 10. Микроструктура защитного покрытия ПЭД (образец №5):

а –  $\times 100$ ; б –  $\times 250$

При низких барьерных свойствах металлизационного покрытия происходит проникновение компонентов среды под покрытие и разрушение слоя покрытия по механизму подпленочной коррозии. При этом необходимо отметить, что реальные условия протекания коррозионного процесса зависят от множества факторов (условия эксплуатации, технология нанесения, физико-механические свойства покрытия, наличие или отсутствие дефектов).

Одним из таких факторов являются несовершенства технологии нанесения покрытия, которая состоит из множества этапов – от подготовки поверхности до окончательного

формирования покрытия. В данном случае наблюдается развитие коррозионных процессов на поверхности ремонтных ПЭД на участках с значительным снижением толщины слоя покрытия и на участках нарушения сплошности покрытия. В последнем случае несплошность покрытия выявляется в основном в труднодоступных для нанесения участках. Локальное снижение толщины покрытия способствует снижению защитных свойств покрытия. Такие изменения свойств покрытия оказывают влияние на развитие процессов подпленочной коррозии, увеличивая ее интенсивность [6].

### Заключение

В ходе исследований 23-х аварийных корпусов ПЭД с различными типами металлизационных покрытий определены 4 основные причины разрушения защитных покрытий. По полученным результатам можно сформулировать следующие рекомендации:

1. При наличии механических повреждений покрытия необходимо осуществлять более тщательный контроль за проведением СПО или применять более прочное покрытие;

2. При обнаружении абразивного износа покрытия требуется замена типа металлизационного покрытия на более износостойкое;

3. При наличии признаков, характерных для низких барьерных свойств покрытия необходимо более тщательный подбор и замена применяемого типа покрытия для конкретных условий эксплуатации;

4. Выявление признаков нарушения технологии нанесения покрытия говорит о необходимости ужесточения мероприятий по контролю качества готового покрытия и контролю технологии нанесения покрытия.

Таким образом, разработанный альбом повреждений металлизационного покрытия в процессе эксплуатации будет способствовать оперативному принятию мер по устранению и предупреждению аварийных ситуаций.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Даминов, А.А. Коррозия подземного оборудования добывающих скважин, оборудованных УЭЦН // Территория нефтегаз. – 2009. – №8. – С. 32-36.
2. Хасанов, И.Г. Опыт эксплуатации ПЭД в условиях ТПП «Покачевнефтегаз» ООО «Лукойл – Западная Сибирь» // Инженерная практика. – 2016. – №04. – С.24.
3. Лурье, А.З. Применение износостойких покрытий для сокращения затрат и снижения рисков при добыче трудноизвлекаемых запасов // Инженерная практика. – 2015. – №12. – С.15.
4. Акопов, Е. Ю. Обоснование и выбор методов повышения ресурса погружных центробежных насосов [Текст]: дисс. канд. техн. наук: 05.05.06.: защищена 18.05.2017. – Москва, 2017. – 165 с.
5. Ивановский, В.Н. Коррозия скважинного оборудования и способы защиты от нее // Коррозия территории нефтегаз. – 2011. – №1. – С.18-25.
6. Дреньков, В.А., Щербо, И.В., Холодков, С.А., Бельков, Д.Н., Жулин, А.А. Анализ развития коррозии под изоляционным покрытием по результатам совмещения данных внутритрубной дефектоскопии и электрометрии // Газовая промышленность. – 2017. – № 6. – С.86-92.
7. Харисов Р.А., Хабирова А.Р., Мустафин Ф.М., Хабиров Р.А. Современное состояние защиты трубопроводов от коррозии полимерными покрытиями // Электронный научный журнал нефтегазовое дело. – 2005. – №5. – С.26.
8. ГОСТ 9.072-2017. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия лакокрасочные. Тер-

мины и определения.

9. Юдин П.Е., Петров С.С., Князева Ж.В., Максимук А.В. Сравнительный анализ лабораторных и опытно-промышленных испытаний внутренних антикоррозионных покрытий промысловых трубопроводов // Производственно-технический журнал «Инженерная практика». – 2017. – №10. – С.46-51.

10. Хайбулина Р.А., Каверзин Д.Г., Айдаргалин Р.Б., Глазырин В.А. Технологические методы защиты от коррозии резервуарного парка и нефтегазового оборудования // Вестник ПГУ. Энергетическая серия. – 2011. – №04. – С. 106-111.

11. M. Musztyfaga-Staszuk, A. Czupryński, M. Kciuk. Investigation of mechanical and anti-corrosion properties of flame sprayed coatings // Advances in materials science. 2018. Vol. 18, No. 4 (58). S. 42-53.

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

### REFERENCES

1. Daminov, A.A. Underground equipment corrosion in producing wells equipped with UETN // *Oil and Gas Territory*. – 2009. – No.8. – pp. 32-36.
2. Khasanov, I.G. Field experience of SEM under TPP conditions of “Pokachevoilgas” of PC “Lukoil-Western Siberia” // *Engineering Practice*. – 2016. – No.4. – pp. 24.
3. Lurie, A.Z. Wear-resistant coating application to decrease costs and risks at extraction hard-to-recover reserves // *Engineering Practice*. – 2015. – No.12. – pp. 15.
4. Akopov, E.Yu. Substantiation and choice of methods to increase submerged centrifugal pump life [Text]: *Thesis of Can. Sc. Tech. Degree*: 05.05.06.: presented: 18.05. 2017. – Moscow, 2017. – pp. 165.
5. Ivanovsky, V.N. Well equipment corrosion and corrosion prevention methods // *Oil and Gas Territory Corrosion*. – 2011. – No.1. – pp. 18-25.
6. Drenkov, V.A. Shcherbo, I.V., Kholodkov, S.A., Belkov, D.N., Zhulin, A.A. Analysis of corrosion development under insulated coating on comparison results of in-tube defectoscopy data and electro-metering // *Gas Industry*. – 2017. – No.6. – pp. 86-92.
7. Kharisov, R.A., Khabirova, A.R., Mustafin, F.M., Khabirov, R.A. Current state of pipeline corrosion prevention protection with polymeric coatings // *Electronic Scientific Journal of Oil and Gas Business*. – 2005. – No.5. – pp. 26.
8. RSS 9.072-2017. *Uniform Corrosion and Ageing Prevention System (UCAPS). Lacquer Coatings. Terms and definitions*.
9. Yudin, P.E., Petrov, S.S., Knyazeva, Zh.V., Maximuk, A.V. Comparative analysis of laboratory and field tests of inner antirust coatings of field pipelines // “*Engineering Practice*” *Production-Technical Journal*. 2017. – No.10. – pp. 46-51.
10. Khaibulina, R.A., Kaverzin, D.G., Aidargalin, R.B., Glazyrin, V.A. Technological methods of anti-corrosion protection of tank farm oil and gas equipment // *Bulletin of PSU. Energy Series*. – 2011. No.4. – pp. 106-111.
11. M. Musztyfaga-Staszuk, A. Czupryński, M. Kciuk. Investigation of mechanical and anti-corrosion properties of flame sprayed coatings // *Advances in materials science*. 2018. Vol. 18, No. 4 (58). S. 42-53.
12. Yudin, P.E., Alexandrov, E.V., Knyazeva, Zh.V. New method of autoclave test for express-analysis of antirust coatings // *Pipeline Transportation [theory and practice]*. – 2015. – No.3 (49). – pp. 16-24.

Рецензент д.т.н. М.Г. Шалыгин