

УДК 621.793

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-75-86

Применение металлизационных покрытий для защиты погружных электродвигателей насосного оборудования от воздействия осложняющих факторов в нефтяных скважинах

© 2020 г. Ж.В. Князева, П.Е. Юдин, С.С. Петров, А.В. Максимук

Самарский государственный технический университет (СамГТУ)

ООО «Научно-производственный центр «Самара» (ООО «НПЦ «Самара»), г. Самара

Статья поступила в редакцию 03.12.19 г., доработана 04.01.20 г., подписана в печать 20.01.20 г.

Представлен обзор результатов применения металлизационных покрытий для защиты наружной поверхности оборудования установок электрических центробежных насосов (УЭЦН) от воздействия осложняющих факторов в нефтяных скважинах. Металлизационное покрытие наносится по технологии газотермического напыления, выбор метода основывается исходя из химического состава, используемых материалов и свойств готового покрытия. К наиболее распространенным на рынке РФ покрытиям относятся монель и сплавы на основе аустенитной нержавеющей стали, наносимые методами электродуговой металлизации или высокоскоростного напыления. Получаемые методами газотермического распыления традиционные покрытия характеризуются недостаточно высоким уровнем физических, механических и химических свойств. Исследования аварийных корпусов погружных электродвигателей (ПЭД) показывают, что к числу наиболее существенных недостатков применяемых покрытий относятся: недостаточная стойкость к ударным механическим воздействиям, а также к абразивному износу; более высокий по отношению к основному металлу электрохимический потенциал; нарушения технологии нанесения; значительная пористость покрытий. Одной из основных причин наблюдаемых недостатков является ограниченное число традиционно используемых методов и материалов. Для решения проблемы применения защитных покрытий ПЭД, существенного повышения их свойств, ресурса работы и экономической эффективности необходимо использовать современные достижения науки в разработке покрытий для защиты металлических поверхностей от износа и коррозии, а именно: расширить число методов и материалов для нанесения покрытия; отработать методику оценки качества покрытий; разработать методику оценки экономической эффективности применения защитных покрытий. Решение поставленных задач позволит сделать обоснованный технико-экономический выбор конкретного покрытия ПЭД для конкретных условий эксплуатации.

Ключевые слова: металлизационное покрытие, газотермическое напыление, погружные электродвигатели, коррозия, износ, механизм.

Князева Ж.В. – аспирант кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» (МПМН) СамГТУ (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, гл. корп.), ст. науч. сотр. ООО «НПЦ «Самара» (443022, г. Самара, Гаражный пр., 3Е). E-mail: Knyazeva@npcsamara.ru.

Юдин П.Е. – канд. техн. наук, ст. препод. кафедры МПМН СамГТУ, директор по науке ООО «НПЦ «Самара». E-mail: Yudin@npcsamara.ru.

Петров С.С. – канд. физ.-мат. наук, начальник аналитического отдела ООО «НПЦ «Самара». E-mail: Petrov@npcsamara.ru.

Максимук А.В. – управляющий ООО «НПЦ «Самара». E-mail: Maximuk@npcsamara.ru.

Для цитирования: Князева Ж.В., Юдин П.Е., Петров С.С., Максимук А.В. Применение металлизационных покрытий для защиты погружных электродвигателей насосного оборудования от воздействия осложняющих факторов в нефтяных скважинах. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2020. No. 1. С. 75–86. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-75-86.

Knyazeva Zh.V., Yudin P.E., Petrov S.S., Maksimuk A.V.

Application of metallization coatings for protection of submersible electric motors of pumping equipment from influence of complicating factors in oil wells

The paper provides a review of results obtained when using metallization coatings to protect the outer surface of electric centrifugal pump (ECP) equipment against the complicating factors in oil wells. Metallization coating is applied by thermal spraying using the method selected based on the chemical composition, materials used and properties of the finished coating. The most common coatings on the Russian market are Monel and alloys based on austenitic stainless steel applied by methods of electric arc metallization or high-speed spraying. Traditional coatings obtained by thermal spraying feature by insufficiently high level of physical, mechanical and chemical properties. The studies of failed cases of submersible motors show that most critical shortcomings of the coatings used include insufficient resistance to mechanical impact and abrasive wear, higher electrochemical potential in relation

to the base metal, application technology violations, and significant coating porosity. One of the main reasons for the observed shortcomings is the limited number of traditionally used methods and materials. In order to solve the problem of using protective coatings for submersible motors, significantly improve their properties, service life and economic efficiency, it is necessary to use modern achievements of science in the development of coatings to protect metal surfaces from wear and corrosion, namely: to expand the number of methods and materials for coating application; to develop a methodology for coating quality assessment; to develop a methodology for assessing the economic efficiency of protective coatings. Solving these tasks will enable a reasonable technical and economic choice of a specific submersible motor coating for specific operating conditions.

Keywords: metallization coating, thermal spraying, submersible motors, corrosion, wear, mechanism.

Knyazeva Zh.V. – postgraduate student, Department «Metallurgy, powder metallurgy, nanomaterials» (MPMN), Samara State Technical University (443100, Russia, Samara, Molodogvardeiskaya str., 244), senior researcher of LLC «NPC «Samara» (443022, Russia, Samara, Garage passage, 3E). E-mail: Knyazeva@npcsamara.ru.

Yudin P.E. – Cand. Sci. (Tech.), senior lecturer, Department of MPMN, Samara State Technical University, director of science of LLC «NPC «Samara». E-mail: Yudin@npcsamara.ru.

Petrov S.S. – Cand. Sci. (Phys.-Math.), head of analytical Department of LLC «NPC «Samara». E-mail: Petrov@npcsamara.ru.

Maksimuk A.V. – head manager of LLC «NPC «Samara». E-mail: Maximuk@npcsamara.ru.

Citation: Knyazeva Zh.V., Yudin P.E., Petrov S.S., Maksimuk A.V. Application of metallization coatings for protection of submersible electric motors of pumping equipment from influence of complicating factors in oil wells. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Universities' Proceedings. Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2020. No. 1. P. 75–86 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-75-86.

Введение

Развитие нефтяной промышленности включает несколько этапов, которые отражают как масштабы потребления нефти и газа, так и степень сложности их добычи. Современное состояние нефтяной промышленности Российской Федерации характеризуется осложненными условиями разработки месторождений, что обусловлено малыми темпами добычи вследствие высокой вязкости нефти, высокой агрессивностью и обводненностью сред. Практически весь фонд скважин эксплуатируется механизированным способом, преимущественно при помощи установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) [1]. Многосекционный ЭЦН приводится в действие погружным электродвигателем (ПЭД) и подает нефтесодержащую жидкость (флюид) из скважины в насосно-компрессорные трубы (НКТ) [1].

Далее представлен обзор способов защиты погружного насосного оборудования от воздействия осложняющих факторов, способствующих снижению ресурса и преждевременному отказу. Применение металлизационных покрытий (МП) в силу своих высоких физических, механических и химических свойств является наиболее эффективным способом защиты. Тем не менее наблюдались неоднократные случаи уменьшения ресурса оборудования, связанные с процессами разрушения МП [2, 9]. Согласно проведенным исследованиям, к основным причинам разрушения МП корпусов ПЭД относятся: механические повреждения, низкие

барьерные свойства, абразивный износ, несоблюдение технологии нанесения. При выборе того или иного типа покрытия необходимо уделять особое внимание возможности покрытия противостоять указанным механизмам разрушения, для чего необходима, в первую очередь, разработка методов контроля, моделирующих разрушающее воздействие.

Особенности условий эксплуатации Осложняющие факторы

Среди основных факторов, приводящих к отказу УЭЦН, преобладают засорение механическими примесями и солеотложения [2]. Статистика причин отказов УЭЦН показывает, что для высокодебитных скважин высокое содержание механических примесей является одной из главных проблем при добыче [3]. Их наличие представляет значительную проблему для дорогостоящего оборудования при его абразивном износе, заклинивании и засорении рабочих органов твердыми частицами.

Влияние отложений солей рассмотрено в работе [4]. Солеотложение, как правило, происходит вследствие пересыщения воды труднорастворимыми солями при изменениях температуры, давления, pH или при выделении газа. Наибольшее воздействие солей наблюдается на рабочих колесах УЭЦН, на поверхности которых при нагреве в про-

цессе эксплуатации образуются соленые налеты и накипь, которые, увеличиваясь, уменьшают проходные диаметры отверстий.

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 [5, 6].

Если при низкой температуре возрастает вероятность выпадения АСПО [6], то повышенная температура на забоях скважин (может достигать ≥ 140 °C) влияет на показатель надежности оборудования. По некоторым данным [7], 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 °C [8]). Проблема коррозионного разрушения погружного оборудования УЭЦН является особенно актуальной. На протекание коррозионных процессов влияет комплекс факторов — таких, как высокая обводненность, присутствие сероводорода и углекислого газа в пластовой жидкости, наличие механических примесей. Экспериментально доказано, что из-за механических примесей протекание коррозионных процессов ускоряется до 2—3 раз [3, 8]. Коррозионные повреждения чаще носят локальный характер [2, 3, 9], результатом которого является разрушение металла в глубину, вплоть до появления сквозных отверстий.

Коррозионному разрушению подвергаются различные узлы УЭЦН: внутренняя поверхность насосно-компрессорных труб, 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 [9]. На основании данных наработки на отказ ПЭД на предприятиях «Самаранефтегаз» за 2013—2017 гг., наблюдается тенденция постепенного снижения величины наработки на отказ с 601 до 503 суток. Представленные данные свидетельствуют о значительном износе электродвигателей и уменьшении их остаточного ресурса, что приводит к более частым капитальным ремонтам оборудования, со-

крашению 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 [10]. Из всего вышеперечисленного можно сделать однозначный вывод о том, что защита ПЭД от коррозии и износа является крайне актуальной задачей.

Способы защиты погружных электродвигателей

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

Химическая защита предполагает использование химических реагентов — ингибиторов коррозии — путем закачки через затруб или дозирования по капиллярным трубкам. Применение данного способа считается малоэффективным [9] ввиду быстрого выноса ингибитора из пласта и быстрого срыва пленки ингибитора с защищаемой поверхности металла при высоких дебитах скважины.

Технологические методы защиты от коррозии обеспечивают управление процессом коррозии и его контроль и включают мероприятия, направленные на водоизоляционные работы и снижение скорости потока, которые являются достаточно эффективными при их грамотном проведении. Однако данные методы имеют определенные риски ввиду их относительно недолгого положительного результата [11].

Наибольшее применение получили физические методы защиты: использование ПЭД в коррозионно-стойком исполнении (из нержавеющей стали); катодная защита; применение защитных полимерных и металлизационных покрытий [2, 9].

Использование оборудования в коррозионно-стойком исполнении показывает высокую эффективность и практически полностью исключает отказы по причине коррозии [2]. 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 форма которой ранжируется

на протекторную и катодную. Катодная защита осуществляется с помощью наземных станций и считается эффективным способом, однако имеет достаточно существенный недостаток — отсутствие данных по распределению потенциалов на дне скважины [12]. 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 [13].

Наибольшее распространение 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 [14].

Для обеспечения коррозионной стойкости используют различные защитные покрытия, в частности полимерные или металлизационные [4]. Выбор конкретного типа покрытия зависит прежде всего от условий эксплуатации оборудования. Тем не менее применение металлизационных покрытий является более предпочтительным [9], 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 используемого покрытия и технологии нанесения [15].

Применение металлизационных покрытий

Применение металлизационных покрытий для защиты корпусов ПЭД значительно повышает износ- и коррозионную стойкость, что в свою очередь способствует улучшению эксплуатационных свойств изделий, увеличению ресурса работы, повышению надежности изделий, снижению себестоимости их изготовления и обслуживания [16].

Технология газотермического распыления является одной из наиболее распространенных для производства металлических покрытий ввиду своей низкой стоимости относительно других методов и возможности нанесения покрытия на изделия различной конфигурации, что несомненно позво-

ляет расширить область ее применения [16–18]. В общем случае сущность процессов газотермического распыления заключается в образовании направленного потока дисперсных частиц напыляемого материала, обеспечивающего их перенос на поверхность обрабатываемого изделия и формирование слоя покрытия. Единая классификация способов газотермического напыления отсутствует, их принципиальное отличие определяется видом источника энергии. Так, в промышленности используются такие методы, как газопламенная наплавка, электродуговая металлизация, а также напыление — плазменное, детонационное, высокоскоростное газопламенное и холодное [17–20]. Выбор метода зависит от области применения, химического состава покрытия и материала подложки, геометрии изделия, требуемых свойств к формируемому покрытию, а также экономической целесообразности. Наибольшее распространение для защиты ПЭД получили электродуговая металлизация и высокоскоростное напыление [16].

Электродуговая металлизация (ЭДМ) представляет собой процесс расплавления двух проволок посредством горения электрической дуги между ними, диспергирования расплава и переноса частиц сжатым воздухом. Это наиболее эффективный метод газотермического напыления, позволяющий получать покрытия с высоким уровнем механических, физических и химических свойств (адгезия, пористость, микротвердость) [16]. К основным недостаткам электродуговой металлизации относятся: возможность перегрева и окисления напыляемого материала; формирование покрытий с большим количеством оксидов и высокой пористостью; значительные потери напыляемого материала [20].

При высокоскоростном газопламенном напылении (HVOF) порошковый материал разогревается и наносится струей с высокой скоростью, превышающей скорость звука в 7–9 раз. Для всех покрытий, создаваемых таким методом, характерны высокая адгезия, прочность сцепления и низкая пористость [16, 18].

При выборе того или иного способа нанесения необходимо учитывать основные характеристики получаемого покрытия. В настоящее время к числу перспективных относятся плазменное и газопламенные методы нанесения, позволяющие при правильной оптимизации режимов напыления получать защитные покрытия с достаточно низкой пористостью и высокой адгезионной прочностью

[20]. Если применение плазменного метода менее востребовано ввиду значительных энергозатрат, то газопламенное распыление характеризуется относительной простотой, надежностью и мобильностью оборудования, а также наименьшими среди всех технологий энергозатратами. При этом оптимально подобранные режимы газопламенного распыления позволяют получать защитные покрытия с высокими показателями физико-механических свойств, сопоставимыми с характеристиками покрытий, формируемых высокоскоростным и плазменным способами [20].

К наиболее распространенным на рынке РФ материалам покрытий корпусов ПЭД относятся монель, наносимая на поверхность металла методом электродуговой металлизации, и аустенитные сплавы на основе железа, чаще хромоникелевый сплав с добавлением различных компонентов, нанесение которого может осуществляться электродуговой металлизацией или высокоскоростным напылением (см. таблицу) [16].

Монель — это группа сплавов, состоящих из никеля (до 67 мас.%) 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 [20]. Несмотря на то, что пластичная и коррозионно-стойкая медь является не самым твердым материалом, ее присутствие в составе монели обеспечивает плотность и сплошность покрытия, его коррозионную стойкость, а также 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 [20]. До-

бавление различных легирующих элементов позволяет варьировать свойства создаваемого 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 [21], во-вторых, отмечено положительное влияние Мо при взаимодействии с хромом. Последний эффект проявляется следующим образом: присутствие молибдена в сплаве на основе Fe—Cr способствует обогащению пассивной пленки хрома ионами молибдена, которые, занимая пустое пространство, делают пленку более компактной и, следовательно, повышают ее защитные свойства [21, 22].

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 [21].

Еще одним легирующим, аустенитообразующим элементом является никель, введение которого повышает стойкость к растрескиванию, коррозионную стойкость и износостойкость. Он обладает самой высокой коррозионной стойкостью, которая обусловлена образованием защитных оксидов NiO₂. Добавление Ni способствует снижению плотности анодного тока и изменению потенциала коррозии [23].

Аустенитные нержавеющие покрытия обеспечивают защиту стали в агрессивных средах. В работе [24] рассматривалась система, %: 17Cr—12Ni—2,5Mo—(2÷3)Si—0,03C (ост. Fe). Порошковый материал наносился методом высокоскоростного газопламенного напыления. Было установлено, что при воздействии 3 % NaCl покрытие обладает коррозионной стойкостью в течение 7 дней, а в

Наиболее распространенные на российском рынке защитные металлизационные покрытия и их характеристики

Покрытие	Химический состав	Метод нанесения	Пористость, %	Пропитка	Микротвердость, HV	Адгезия, кг/мм ²
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

случае многослойного нанесения (3—4 слоя) эффективность покрытия против коррозии наблюдалась 48 дней.

Помимо аустенитных сплавов широкое применение нашли ферритные нержавеющие сплавы [25, 26]. Они характеризуются низким содержанием аустенитобразующих элементов — таких, как Mn, Ni. В работах [25, 26] рассматривалось влияние добавления ниобия на коррозионную стойкость этих сплавов. Введение небольшого количества Nb способствует повышению коррозионной стойкости сплава более чем в 2 раза [26], в частности при частичном замещении Mo. Частичное замещение объясняется более высокой коррозионной стойкостью сплавов, содержащих оба эти элемента (Mo и Nb), по отношению к сплавам, имеющим лишь один из них. Эффект добавления Nb можно проанализировать с точки зрения изменений характеристик пассивной пленки хрома: когда ионы Nb включаются в пассивный слой Cr, происходит ее физическое изменение. В электрохимическом отношении наличие ионов Nb способствует уменьшению плотности обменного тока, что, в свою очередь, обеспечивает снижение скорости коррозии [25, 26].

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 [27, 28]. Аморфные сплавы являются метастабильными материалами и, как известно, не имеют таких дефектов, как, например, границы зерен. К числу наиболее распространенных относятся сплавы на основе Fe—Cr. Более подробно влияние различных элементов на свойства аморфных покрытий представлено в работах [27, 28]. Металлоиды В, С и Р вводятся 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, а следовательно, повышается коррозионная стойкость. Добавки Si в сплавах Fe—Cr, помимо улучшения способности к стеклообразованию, положительно влияют на состав и однородность пассивной пленки хрома, что способствует повышению 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, покрытие на основе алюминия, разрушаясь, обеспечивает защиту, работая как равномерно распределенный анод [29]. Алюминиевые покрытия наносились методами электродуговой металлизации [29] или холодного напыления [30, 31] и характеризовались равномерной однородной структурой с низкой пористостью и достаточно высокой износостойкостью по сравнению с металлом подложки.

Рассмотренные выше методы нанесения и составы металлизационных покрытий на ПЭД являются традиционными и, как уже отмечалось, не всегда обеспечивают высокий ресурс работы погружного оборудования в нефтяных скважинах. Поэтому несомненный 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 [17, 32]. В практике напыления помимо однофазных материалов (чистые металлы и их сплавы, полимеры, керамика, интерметаллиды) используют гетерогенные — композиционные, а также их смеси [17, 32].

Композиционные материалы занимают особое место и представляют собой сочетание минимум двух разнородных компонентов с четкой границей раздела и свойствами, которыми не может обладать ни один из компонентов в отдельности [32]. Перспективно применение в покрытиях таких новых композиционных материалов, как наноструктурные материалы, — покрытия приобретают значительно лучшие защитные свойства [33]. Большими возможностями для получения композиционных и наноструктурных покрытий обладает простая энергосберегающая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) тугоплавких соединений (карбидов, нитридов, боридов и др.) и материалов на их основе в режиме горения [34, 35]. Наноструктурные покрытия могут быть достаточно дорогостоящими, но использование, например, ресурсосберегающей техноло-

гии СВЧ может сделать их вполне рентабельными. Промышленное нанесение наноструктурных покрытий 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 др. [36]. К самым последним достижениям следует отнести разработку современных функциональных и интеллектуальных так называемых smart-покрытий для повышенной защиты от коррозии металлических подложек [37]. Особое внимание уделяется самовосстановлению покрытий на основе полифункциональности за счет инкапсулирования ингибиторов коррозии, противообрастающих средств и добавок, обеспечивающих создание супергидрофобных поверхностей покрытия, а также посредством химической модификации гибридных матриц покрытий. Очевидно, что разработка и применение перечисленных современных покрытий могут существенно повысить стойкость ПЭД к износу и коррозии и ресурс работы погружного оборудования в нефтяных скважинах.

Механизмы разрушения металлизационных покрытий Результаты эксплуатации

Подробно механизмы разрушения защитных металлизационных покрытий с приведением большого количества иллюстраций рассмотрены в работе [38]. По результатам проведенных исследований аварийных корпусов ПЭД основные причины разрушений ранжируются на несколько групп:

Механические повреждения. Механические повреждения представляют собой нарушения сплошности покрытия в виде глубоких рисок, направленных вдоль корпуса электродвигателя. Повреждения покрытия в зависимости от интенсивности приводят к «оголению» металла и его растворению при взаимодействии с агрессивной средой по механизму электрохимической коррозии. Кроме того, механические повреждения покрытия неблагоприятно сказываются на свойствах

покрытия, способствуют снижению барьерных свойств и проникновению агрессивной среды к основному металлу с его последующим коррозионным разрушением.

Абразивный износ. Абразивный износ покрытия электродвигателей сопровождается изменением цвета и «стиранием» участков покрытия с образованием локальных очагов коррозионных повреждений. Абразивное изнашивание покрытия происходит в результате царапающего или режущего воздействия твердых частиц, присутствующих в скважинной жидкости. Результатам такого воздействия на поверхность корпуса является возникновение очагов коррозии.

Низкие барьерные свойства. Низкие барьерные свойства покрытия не обеспечивают полноценного ограничения доступа агрессивной среды через слой покрытия. В результате электрохимического взаимодействия компонентов транспортируемой среды, диффундировавшей через слой покрытия, с основным металлом корпуса ПЭД происходит коррозионное разрушение металла. Далее образование и рост продуктов коррозии под покрытием приводят к увеличению внутренних напряжений, нарушению адгезионных связей и отслаиванию покрытия.

Несовершенства технологии нанесения. Качество напыляемого покрытия напрямую зависит от соблюдения технологии нанесения. Она состоит из ряда последовательных операций, над которыми должен осуществляться постоянный контроль для исключения возможных ее нарушений. Для исследованных погружных электродвигателей 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, поверхность которых уже подвергалась коррозионному разрушению, вследствие чего она обладает значительной неравномерностью. Нанесенное на нее покрытие будет иметь разнотолщинность, так как оно будет полностью повторять топографию поверхности корпуса ПЭД. К труднодоступным для напыления участкам относятся стенки полостей или углублений, которые при напылении находятся в одной плоскости с линией напыления покрытия.

Резюмируя вышесказанное, необходимо отметить, что при множестве достоинств метода использования защитных покрытий не решает пол-

ностью проблему защиты электродвигателей от воздействия осложняющих факторов. К наиболее существенным недостаткам применяемых покрытий относятся:

- недостаточная стойкость к абразивному износу, возникающему при контакте с жидкостью, содержащей абразивные частицы;
- недостаточная стойкость к ударным механическим воздействиям;
- более высокий электрохимический потенциал по отношению в защищаемому металлу;
- нарушения технологии нанесения, проявляющиеся в виде локального снижения толщины покрытия или его отсутствия на труднодоступных участках;
- значительная пористость покрытия, наличие которой существенно влияет на качество покрытия и в первую очередь зависит от применяемого метода и режимов распыления [16].

Рекомендации по оценке качества покрытий для защиты погружного оборудования

Перечисленные выше результаты исследований были использованы нами для разработки методик проведения испытаний и построения рейтинга качества антикоррозионных покрытий.

Рекомендации по выбору того или иного типа покрытия должны быть основаны на результатах лабораторных исследований, методы которых могут в полной мере отразить качество покрытия, а также способность противостоять воздействию разрушающих факторов. На сегодняшний день существует всего несколько действующих стандартов, распространяющихся на газотермические покрытия, напыляемые газопламенным, плазменным, электродуговым методами. Данные стандарты включают достаточно узкий набор методов и ограничиваются требованиями к толщине, прочности сцепления, пористости, шероховатости и коррозионной стойкости покрытия. Указанных методов явно недостаточно для моделирования описанных выше механизмов разрушения покрытия, в связи с чем возникает необходимость в разработке комплексной методики оценки качества.

Методика проведения лабораторных исследований разрабатывалась в соответствии с классификацией причин повреждений покрытий и содержит три базовых блока испытаний (см. рисунок). Комплекс испытаний металлизационных покрытий представлен методами контроля их основных физико-механических свойств в исходном состоянии и после моделирования эксплуатационных воздействий.



Структура методов испытаний

В первом блоке представлены методики по контролю технологических показателей покрытия в исходном состоянии: оценка внешнего вида покрытия и его физико-механических свойств, включающих шероховатость, толщину, пористость, сплошность и качество сцепления с металлом подложки.

Второй блок испытаний состоит из методов, оценивающих стойкость покрытий к внешним механическим воздействиям: определяются качественные и количественные характеристики адгезионной прочности, микротвердости, абразивной стойкости, стойкости к прямому удару и прочности сцепления при нанесении сетки царапин.

Третий блок испытаний включает методы ускоренных испытаний в модельных средах для оценки защитных и барьерных свойств металлизационных покрытий при воздействии кислот и щелочей, водных растворов (длительно), переменных температур, перепадов давления, агрессивных сред с высоким содержанием CO_2 , H_2S .

Поскольку для оценки качества испытуемых покрытий применяется большой набор методов исследования, имеющих как количественную, так и качественную оценку, для построения рейтинга работоспособности и надежности покрытий предлагается использовать методику интегральной оценки свойств покрытия, учитывающую результаты всех проведенных испытаний. В настоящее время ведется апробация разработанной методики, полученным экспериментальным данным будет посвящена отдельная статья.

Результаты интегральной оценки качества покрытий с учетом осложняющих факторов в конкретных условиях эксплуатации, увеличение ресурса работы ПЭД в этих условиях, экономический эффект от использования ПЭД с покрытием позволят сделать обоснованный технико-экономический выбор конкретного покрытия ПЭД для конкретных условий эксплуатации.

Заключение

Проведенный обзор показывает, что наиболее эффективным и экономически выгодным способом защиты поверхности погружного электродвигателя в нефтяной скважине является применение металлизационных покрытий. Традиционная технология термического напыления позволяет наносить различные типы металлизационных покрытий. В промышленности широко исполь-

зуются различные сплавы, обладающие высокой коррозионной стойкостью, износостойкостью и антифрикционными свойствами. К наиболее распространенным на рынке РФ покрытиям относятся монель и сплавы на основе аустенитной нержавеющей стали, наносимые методами электродуговой металлизации или высокоскоростного напыления. При множестве достоинств данного способа защиты применение покрытий не решает полностью проблему защиты электродвигателей от воздействия осложняющих факторов. К числу наиболее существенных недостатков используемых покрытий относятся: недостаточная стойкость к ударным механическим воздействиям и абразивному износу, более высокий по отношению к основному металлу электрохимический потенциал, нарушения технологии нанесения, значительная пористость покрытий. Ограниченное число традиционно применяемых методов и материалов является одной из основных причин наблюдаемых недостатков. Поэтому для решения проблемы защиты ПЭД, существенного повышения свойств используемых покрытий, увеличения ресурса работы и экономической эффективности необходимо привлекать современные достижения науки в разработке покрытий для защиты металлических поверхностей от износа и коррозии:

- расширить число применяемых методов нанесения покрытий;
- увеличить количество используемых материалов для нанесения покрытия, создавать композиционные, наноструктурные, функциональные и интеллектуальные покрытия;
- отработать методику интегральной оценки качества покрытий;
- разработать методику оценки экономической эффективности применения защитных покрытий с учетом всех затрат на их нанесение и доходов от продления ресурса работы ПЭД.

Результаты интегральной оценки качества покрытий с учетом осложняющих факторов в конкретных условиях эксплуатации, повышение ресурса работы ПЭД в этих условиях, экономический эффект от использования ПЭД с покрытием позволят сделать обоснованный технико-экономический выбор конкретного покрытия ПЭД для определенных условий эксплуатации. Представленный обзор свидетельствует о целесообразности проведения дальнейших исследований в выбранном направлении.

Литература/References

1. Пеняев И.Н. Анализ отказов глубинно-насосного оборудования в условиях высокого солеобразования при добыче нефти на месторождениях Западной Сибири: Бакалавр. работа. Томск: ТПУ, 2019.
Penyaev I.N. Analysis of failures of deep-well pumping equipment in conditions of high salt formation in oil production in the fields of Western Siberia: Bachelor's work. Tomsk: TPU, 2019 (In Russ.).
2. Ивановский В.Н. Коррозия скважинного оборудования и способы защиты от нее. *Коррозия территории нефтегаз.* 2011. No. 1. С. 18—25.
Ivanovskii V.N. Corrosion of downhole equipment and methods of protection against it. *Korroziya territorii neftegaz.* 2011. No. 1. P. 18—25 (In Russ.).
3. Ялалов А.А. Методы борьбы с механическими примесями. В сб.: *Наука и современность-2017*: Матер. LII междунар. науч.-практ. конф. «Наука и современность» (Новосибирск, 21 апр. 2017 г.). Новосибирск: Центр развития научного сотрудничества, 2017. С. 139—144.
Yalalov A.A. Methods of struggle with mechanical impurities. In: *Science and modernity-2017*: Mater. LII Int. Sci.-practical conf. «Science and modernity» (Novosibirsk, Apr. 21, 2017). Novosibirsk: Tsentr razvitiya nauchnogo sotrudnichestva, 2017. P. 139—144 (In Russ.).
4. Акопов Е.Ю. Обоснование и выбор методов повышения ресурса погружных центробежных насосов: Дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСиС, 2017.
Akopov E.Yu. Justification and selection of methods for increasing the service life of submersible centrifugal pumps: The dissertation of PhD. Moscow: MISIS, 2017 (In Russ.).
5. Александров А.А. Рогачев М.К. Повышение эффективности эксплуатации скважин электроцентробежными насосами в условиях образования асфальтосмолопарафиновых отложений. В сб.: *Материалы научной сессии ученых Альметьевского государственного нефтяного института.* 2016. No. 1. С. 32—34.
Aleksandrov A.A. Rogachev M.K. Improving the efficiency of operation of wells by an electrical submersible pump technology on hi-wax oil fields. In: *Materials of the scientific session of scientists of Almet'yevsk State Oil Institute.* 2016. No. 1. P. 32—34 (In Russ.).
6. Рогачева Е.В. Методы борьбы с осложнениями, связанными с АСПО. *Новая наука: от идеи к результату.* 2017. No. 1—3. С. 40—42.
Rogacheva E.V. Methods for controlling the complications associated with paraffin. *Novaya nauka: ot idei k rezul'tatu.* 2017. No. 1—3. P. 40—42 (In Russ.).
7. Байбурун И.Р., Булюкова Ф.З., Ямалиев В.У. Особенности эксплуатации УЭЦН в осложненных условиях ООО «РН-Ставропольнефтегаз». *Нефтегаз. дело.* 2011. No. 1. С. 31—34.
Baiburin I.R., Bulyukova F.Z., Yamaliev V.U. Features of ESP operation in complicated conditions in LLC «RN-Stavropol'neftegaz. *Neftegazovoe delo.* 2011. No. 1. P. 31—34 (In Russ.).
8. Bulchaev N.D., Mintshev M.Sh., Gairabekov I.G., Abumuslimov A.S. Mining technology using oil installations of electric centrifugal pumps in the harsh conditions (in case of Vankor Field). In: *Engineering and earth sciences: Applied and fundamental research (ISEES 2018)*: Proc. Int. Symp. P. 436—446. <https://doi.org/10.2991/isees-18.2018.83>.
9. Даминов А.А. Коррозия подземного оборудования добывающих скважин, оборудованных УЭЦН. *Территория нефтегаз.* 2009. No. 8. С. 32—36.
Daminov A.A. Corrosion of underground equipment for producing wells equipped by ESP. *Territoriya neftegaz.* 2009. No. 8. P. 32—36 (In Russ.).
10. Романов В.С., Гольдштейн В.Г., Васильева Н.С. Статистический анализ технологических нарушений в эксплуатации погружных электродвигателей. *Тр. Кольского науч. центра РАН.* 2018. No. 3—16 (9). С. 114—121.
Romanov V.S., Gol'dshtein V.G., Vasil'eva N.S. Statistical analysis of technological violations in the operation of submersible motors. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN.* 2018. No. 3—16 (9). P. 114—121 (In Russ.).
11. Мукамтисов Н.И., Фархутдинова А.Р., Елпидинский А.А. Методы борьбы с коррозией и преимущества ингибиторной защиты нефтепромыслового оборудования. *Вестн. Казанского технол. ун-та.* 2014. No. 3. С. 279—282.
Mukamdisov N.I., Farkhutdinova A.R., Elpidinskii A.A. Methods of combating corrosion and the benefits of inhibitory protection of oilfield equipment. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta.* 2014. No. 3. P. 279—282 (In Russ.).
12. О катодной защите скважин и погружного оборудования. URL: <http://ehz.su/index.php/publikatsii/item/49-o-katodnoj-zashchite-skvazhin-i-pogruzhnogo-oborudovaniya> (дата обращения 01.10.2019).
About cathodic protection of wells and submersible equipment. URL: <http://ehz.su/index.php/publikatsii/item/49-o-katodnoj-zashchite-skvazhin-i-pogruzhnogo-oborudovaniya> (accessed: 01.10.2019) (In Russ.).
13. Анасов Т.К., Анасов Г.Т., Порожняков Д.В., Саранча А.В. Протекторная защита от коррозии в скважинах с

- УЭЦН. *Совр. пробл. науки и образования*. 2015. No. 2. С. 283—291.
- Apasov T.K., Apasov G.T., Porozhnyakov D.V., Sarancha A.V. Protective corrosion protection in wells with ESP. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015. No. 2. P. 283—291 (In Russ.).
14. Джаббаров Ш.Н. Подверженность коррозии подземного оборудования по добыче нефти и газа. В сб.: *Точная наука*: Матер. 18 междунар. науч. конф. «Техноконгресс» (Кемерово, 11 дек. 2017 г.). С. 3—7. Dzhabbbarov Sh.N. Corrosion susceptibility of underground oil and gas equipment. In: *Exact science*: 18 Int. Sci. conf. «Tehnkongress» (Kemerovo, 11 Dec. 2017). P. 3—7 (In Russ.).
15. Абдрахманов Н.Х., Турдыматов А.А., Абдрахманова К.Н., Ворохобко В.В. Обеспечение безопасности технологических трубопроводных систем на предприятиях нефтегазового комплекса. *Нефтегаз. дело*. 2015. No. 4. С. 86—105. Abdrakhmanov N.Kh., Turdymatov A.A., Abdrakhmanova K.N., Vorokhobko V.V. Safety of technological pipeline systems at the enterprises of the oil and gas complex. *Neftegazovoe delo*. 2015. No. 4. P. 86—105 (In Russ.).
16. Лурье А.З. Применение газотермических покрытий для повышения ННО УЭЦН. *Инж. практика*. 2011. No. 04. С. 78—81. Lur'e A.Z. Application of thermal spray coatings to improve MTBF ESP. *Inzhenernaya praktika*. 2011. No. 04. P. 78—81 (In Russ.).
17. Dorfman M.R. Thermal spray coatings. In.: *Handbook of environmental degradation of materials*. 3-rd ed. Eds. M. Kutz, W. Andrew. Applied Science Publ., 2018. P. 469—488. DOI: doi.org/10.1016/B978-0-323-52472-8.00023-X.
18. Oksa M., Turunen E., Suhonen T., Varis T., Hannula S.-P. Optimization and characterization of high velocity oxy-fuel sprayed coatings: techniques, materials, and applications. *Coatings*. 2011. No. 1. P. 17—52. DOI: 10.3390/coatings1010017.
19. Assadi H., Kreye H., Gartner F., Klassen T. Cold spraying. A materials perspective. *Acta Mater*. 2016. Vol. 116. P. 382—407. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.034.
20. Лобанов Л.М., Кардонина Н.И., Россина Н.Г. Юровских А.С. Защитные покрытия: Учеб. пос. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. Lobanov L.M., Kardonina N.I., Rossina N.G. Yurovskikh A.S. Protective coatings. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2014 (In Russ.).
21. Pardo A., Merino M.C., Coy A.E., Viejo F., Arrabal R., Matykina E. Pitting corrosion behavior of austenitic stainless steels — combining effects of Mn and Mo ad-
ditions. *Corros. Sci*. 2008. No. 50. P. 1796—1806. DOI: doi:10.1016/j.corsci.2008.04.005.
22. Tomio A., Sagara M., Doi T., Amaya H., Otsuka N., Kudo T. Role of alloyed molybdenum on corrosion resistance of austenitic Ni—Cr—Mo—Fe alloys in H₂S—Cl—environments. *Corros. Sci*. 2015. No. 98. P. 391—398. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2015.05.053.
23. Zhang H., Zhang C.H., Wang Q., Wu C.L., Zhang S., Chen J., Abdullah A.O. Effect of Ni content on stainless steel fabricated by laser melting deposition. *Opt. Laser Technol*. 2018. No. 101. P. 363—371. DOI: https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.11.032.
24. Garcia-Rodriguez S., Lopez A.J., Torres B., Rams J. 316L stainless steel coatings on ZE41 magnesium alloy using HVOF thermal spray for corrosion protection. *Surf. Coat. Technol*. 2016. Vol. 287. P. 9—19. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.12.075.
25. Sousa C.A.C., Kuri S.E. Relationship between niobium content and pitting corrosion resistance in ferritic stainless steels. *Mater. Lett*. 2004. No. 25. P. 57—60. DOI: 10.1016/0167-577X(95)00134-4.
26. Alonso-Falleiros N., Wolyne S. Effect of niobium on corrosion resistance to sulfuric acid of 430 ferritic stainless steel. *Mater. Res*. 1998. Vol. 1. No. 1. P. 39—45. DOI: 10.1590/S1516-14391998000100007.
27. Sarkar K., Rai P.K., Katiyar P.K. Composite (glass + crystalline) coatings from blast furnace pig iron by high velocity oxy-fuel (HVOF) process and their electrochemical behavior. *Surf. Coat. Technol*. 2019. No. 372. P. 72—83. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.05/025.
28. Sousa C.A.C., Ribeiro D.V., Kiminami C.S. Corrosion resistance of Fe—Cr-based amorphous alloys: An overview. *J. Non-Cryst. Solids*. 2016. Vol. 442. P. 46—66. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2016.04.009.
29. Syrek-Gerstenkorn B., Paul S., Davenport A.J. Use of thermally sprayed aluminium (TSA) coatings to protect offshore structures in submerged and splash zones. *Surf. Coat. Technol*. 2019. Vol. 374. P. 124—133. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.04.048.
30. Spencer K., Fabijanic D.M., Zhang M.-X. The use of Al—Al₂O₃ cold spray coatings to improve the surface properties of magnesium alloys. *Surf. Coat. Technol*. 2009. Vol. 204. P. 336—344. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.07.032.
31. Bu H., Yandouzi M., Lu C., Jodoin B. Effect of heat treatment on the intermetallic layer of cold sprayed aluminum coatings on magnesium alloy. *Surf. Coat. Technol*. 2011. Vol. 205. P. 4665—4671. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.04.018.
32. Балдаев Л.Х., Борисов В.Н., Вахалин В.А., Затока А.Е., Захаров Б.М. Газотермическое напыление: Учеб. пос. Под ред. Л.Х. Балдаева. М.: ООО «Старая Басманная», 2015.

- Baldaev L.Kh., Borisov V.N., Vakhlin V.A., Zatoka A.E., Zakharov B.M. Thermal spraying: study guide. Ed. L.Kh. Baldaev. Moscow: ООО «Staraya Basmannaya», 2015 (In Russ.).
33. Левашов Е.А., Штанский Д.В. Многофункциональные наноструктурированные пленки. *Успехи химии*. 2007. Т. 76. No. 5. С. 501—509.
Levashov E.A., Shtansky D.V. Multifunctional nanostructured films. *Uspekhi khimii*. 2007. Vol. 76. No. 5. P. 501—509 (In Russ.).
 34. Levashov E.A., Mukasyan A.S., Rogachev A.S., Shtansky D.V. Self-propagating high-temperature synthesis of advanced materials and coatings. *Int. Mater. Reviews*. 2017. Vol. 62. No. 4. P. 203—239. DOI: 10.1080/09506608.2016.1243291.
 35. Амосов А.П. Наноматериалы технологии СВС для триботехнического применения: Обзор. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2016. No. 4. С. 17—33. DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-4-17-33.
Amosov A.P. Nanomaterials of SHS technology for tribological applications: A review. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2017. Vol. 58. No. 5. P. 530—539.
 36. Штанский Д.В., Бондарев А.В., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Левашов Е.А. Наноконпозиционные антифрикционные покрытия для инновационных триботехнических систем. *Металловедение и терм. обраб. металлов*. 2015. No. 7. С. 77—84.
Shtansky D.V., Bondarev A.V., Kiryukhantsev-Korneev F.V., Levashov E.A. Nanocomposite antifriction coatings for innovative tribotechnical systems. *Metal. Sci. Heat Treat.* 2015. Vol. 57. No. 7—8. P. 443—448.
 37. Montemor M.F. Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances. *Surf. Coat. Technol.* 2014. Vol. 258. P. 17—37. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.06.031.
 38. Князева Ж.В., Юдин П.Е., Амосов А.П., Петров С.С., Максимук А.В. Классификация причин разрушения металлизационного покрытия погружных электродвигателей при эксплуатации. *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2019. No. 9. С. 25—32. DOI: 10.30987/article_5d2df0884cc457.62830322.
Knyazeva Zh.V., Yudin P.E., Amosov A.P., Petrov S.S., Maksimuk A.V. Classification of the submersible electric motors (SEM) metallization coating destruction causes during operation. *Naukiemkie tekhnologii v mashinostroenii*. 2019. No. 9. P. 25—32 (In Russ.).

Уважаемые подписчики!

Издательство ООО «Калвис» сообщает, что со второго полугодия 2020 г. оно выходит из каталога агентства «Роспечать» «Газеты. Журналы» и объединенного каталога «Пресса России».

Вы можете подписаться на журналы издательства: «Известия вузов. Цветная металлургия», «Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия», «Экология и промышленность России» и «Катализ в промышленности» в печатной и электронной формах:

- через редакцию, отправив заявку на e-mail: podpiska@kalvis.ru; info@kalvis.ru
- через агентство «Урал-Пресс» (www.ural-press.ru)