

**В. И. Большаков**, д-р техн. наук, проф.

**Д. А. Сухомлин\***, канд. хим. наук, доц., e-mail: sukhomlyndmitrij@gmail.com

**Е. В. Проскуркин\*\***, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: provi38@ukr.net

ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», Днепр

\*ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», Днепр

\*\*Государственное предприятие «Научно-исследовательский трубный институт им. Я. Е. Осады», Днепр

## **Насосно-компрессорные трубы высокой коррозионной стойкости и эксплуатационной надежности для жестких коррозионно-эрозионных условий добычи нефти и газа**

*Приведены результаты коррозионных испытаний диффузионных цинковых покрытий в осложненных коррозионно-эрозионных условиях газодобывающих скважин. Электрохимическими исследованиями показано торможение анодного процесса растворения покрытия и его солевое пассивирование в модельных растворах. Установлено, что скорости коррозии диффузионно оцинкованных стальных образцов были в 4, 1–6, 1 раз ниже, чем образцов без покрытия.*

*Разработанный специалистами Украины, России и Нидерландов новый международный стандарт на диффузионные цинковые покрытия ISO 17668:2016, будет способствовать дальнейшему повышению качества оцинкованных изделий и расширению областей использования данного защитного покрытия.*

*Показано перспективное применение диффузионных цинковых покрытий для защиты от коррозии различных металлоизделий, используемых в промышленности, строительстве и нефтегазовой отрасли.*

**Ключевые слова:** диффузионные цинковые покрытия, коррозионная стойкость, электрохимические измерения, интерметаллические соединения, микротвердость.

**В** условиях сложившегося в Украине экономического положения, особенно актуальными становятся задачи энергонезависимости и рационального использования национальных энергетических ресурсов.

Специалисты топливно-энергетического комплекса сходятся в оценке мер, направленных на решение проблемы энергетической независимости Украины, основные из которых:

- увеличение собственной добычи газа и нефти;
- освоение добычи нетрадиционных углеводородов;
- энергосбережения и др.

Известно, что основной причиной быстрого выхода труб из строя является коррозия, которая резко снижает их срок службы и уменьшает объемы добычи продукции, что в конечном итоге приводит к уменьшению рентабельности нефте- и газодобычи.

Аварии вследствие коррозионно-эрозионных разрушений нефтепромысловых труб приводят не только к потерям большого количества труб, простоям оборудования и недобору нефти, но и к необратимому загрязнению окружающей среды нефтью и сточными водами [1, 2].

Поэтому разработка способов эффективной защиты труб от воздействия агрессивных сред является актуальной и своевременной.

Насосно-компрессорные трубы (НКТ) являются одним из основных видов труб, используемых при добыче нефти и газа. Учитывая, что одной из характерных особенностей современной нефтегазодобычи является тенденция к ужесточению режи-

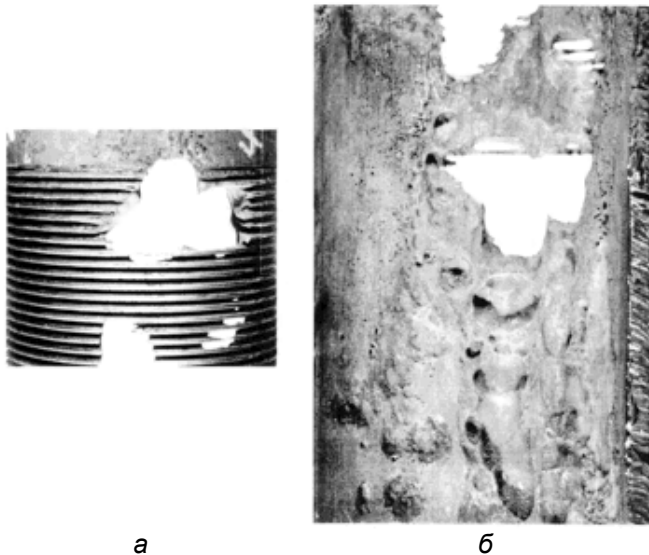
мов эксплуатации скважинного оборудования, в том числе и трубных колонн, подвергающихся не только воздействию механических нагрузок (растяжению, скручиванию, изгибу и др.), но и интенсивному влиянию агрессивных сред, содержащих различные соли (NaCl, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>), растворенные газы (H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>), твердые частицы (песок, гипс, сульфиды), истирающие в процессе эксплуатации поверхность труб и способствующие развитию коррозионно-эрозионных процессов.

Совместное воздействие вышеперечисленных факторов приводит к интенсивному разрушению трубного нефте- и газодобывающего оборудования. Наиболее распространенными причинами аварий черных (без покрытия) НКТ являются коррозия, износ резьбы и усталостные разрушения, что в свою очередь, требует значительного увеличения объемов работ, связанных с проведением спуско-подъемных операций (СПО) [1–3].

На рис. 1 приведен типичный внешний вид коррозионного разрушения (сквозная язвенная коррозия) резьбового конца НКТ с переходом на тело трубы.

Эффективным путем повышения коррозионной стойкости и эксплуатационной надежности труб, в том числе и нефтяного сортамента, является защита их антикоррозионными покрытиями, которые обеспечивают не только защиту от коррозии поверхности труб, но и высокую износостойкость и герметичность резьбовых соединений.

Анализ используемых антикоррозионных покрытий, многочисленных исследований и опыта эксплуатации НКТ на нефтяных и газовых месторождениях



**Рис. 1.** Внешний вид резьбового конца НКТ, пораженный язвенной коррозией (глубина проникновения 6–10 мм/год): а – наружная поверхность; б – внутренняя поверхность

показывает, что одним из наиболее эффективных видов покрытий для защиты НКТ являются диффузионные цинковые покрытия, которые по сравнению с гальваническими, фосфатными и другими обладают более высокой твердостью и износостойкостью, менее подвержены различным механическим воздействиям, имеют высокую степень сцепления со стальной поверхностью трубы за счет диффузионной связи.

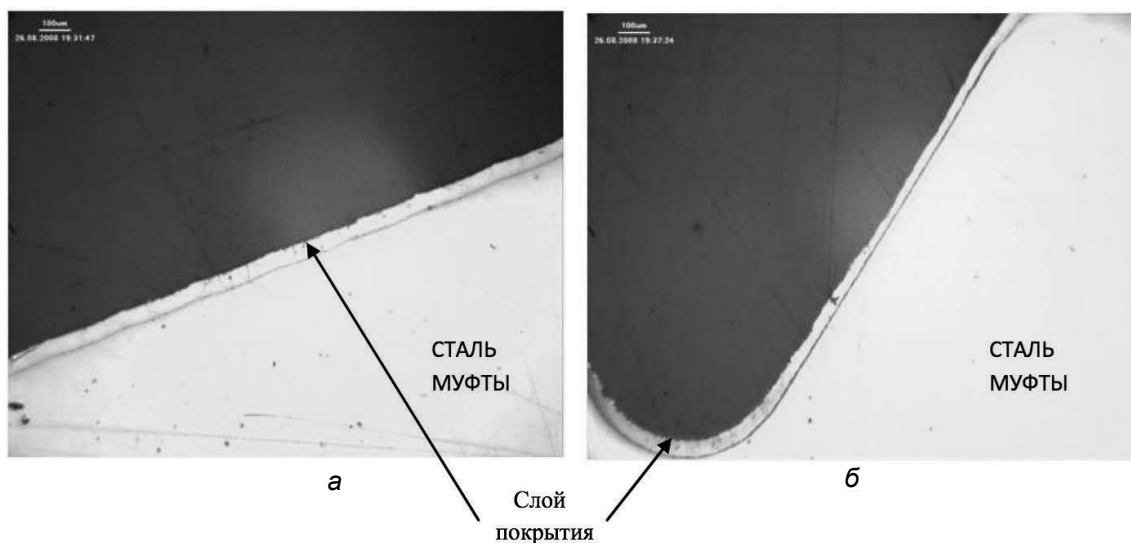
В отличие от не проникающих внутрь изделия покрытий (гальванических, фосфатных, полимерных), которые только экранируют поверхность защищаемого изделия от воздействия коррозионной среды, диффузионные покрытия, образуя защитный слой на изделии, также проникают в его поверхностные слои, упрочняя их за счет образования железоцинковых интерметаллидов:  $\text{FeZn}_{2,2}$  ( $\Gamma$ -фаза),  $\text{FeZn}_{3,2}$  ( $\Gamma_1$ -фаза),  $\text{FeZn}_{6,69}$  ( $\delta$ -фаза), с одновременным улучшением физико-химических свойств металлоизделия, повышением коррозионной стойкости и других эксплуатационных характеристик. Это, в первую очередь,

минимизирует снижение защитных свойств покрытия после механических воздействий при транспортировке, хранении и эксплуатации металлопродукции. Уникальные свойства диффузионного цинкового покрытия обусловлены его структурой, что обеспечивает ему хорошую пластичность, протекторные свойства и выполнение функции твердой смазки, что особенно важно для резьбовых соединений труб, их эксплуатационной надежности и долговечности. Важным показателем качества диффузионного цинкового покрытия является равномерность его распределения по профилю резьбового конца НКТ и муфты, что обеспечивает резьбовому соединению высокую герметичность и эксплуатационную надежность (рис. 2). Отмеченный комплекс свойств диффузионного цинкового покрытия обеспечивает повышение стойкости резьбы нарезных труб и исключает потерю герметичности резьбовых соединений при многократных (до 20–30 и более раз) операциях «свинчивания - развинчивания» [1, 4].

Проведенные в соответствии с методикой оценки долговечности цинковых покрытий [4] лабораторные коррозионные и технологические исследования диффузионно оцинкованных образцов в средах, содержащих агрессивные компоненты, присутствующие в газодобывающих скважинах, показали, что признаки коррозии на них были отмечены только через 78 часов, а к концу испытаний (156 часов) коррозии подверглось лишь 5 % поверхности указанных образцов.

Коррозионная стойкость диффузионного цинкового покрытия выше, чем гальванических, в первую очередь, за счет участия в пассивации покрытия ферритов цинка ( $\text{ZnFeO}_2$ ,  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ ) наряду с  $\text{ZnO}$ , что также было подтверждено данными химического анализа.

Для промышленных испытаний были выбраны наиболее агрессивные газодобывающие скважины, характеризующиеся: высокой плотностью, минерализацией и кислотностью пластовой воды; высоким содержанием (до 150 г/л) в ней хлоридов, способных вызывать питтинговую и язвенную коррозию стали; наличием  $\text{CO}_2$ , способствующего развитию углекислотной



**Рис. 2.** Распределение слоя диффузионного цинкового покрытия на боковой поверхности (с переходом во впадину резьбы) муфты НКТ после 30-го цикла свинчивания-развинчивания (С-Р). Увеличение:  $\times 200$ : а, б – разные места на витках резьбы муфт

коррозии. Диффузионно оцинкованные образцы и образцы без покрытия, вырезанные из НКТ групп прочности Д, Е, и Р 110, были собраны в специальные подвески по 3 образца каждой группы. Затем подвески были спущены в скважину на глубину 3500 м. Продолжительность испытаний составила 15 суток (360 часов).

Результаты промышленных испытаний, включающие исследование внешнего вида образцов, оценку толщины и структуры диффузионного цинкового покрытия, а также скорости коррозии образцов представлены на рис. 3 и в табл. 1.

Визуальный осмотр образцов после 15 суток (360 часов) промышленных испытаний в агрессивных газодобывающих скважинах показал, что на диффузионно оцинкованных образцах, независимо от их группы прочности, образовалась сплошная прочно сцепленная с поверхностью оксидная пленка, в результате чего цвет покрытия немного потемнел (стал темно-серого цвета), отложения продуктов коррозии отсутствовали (рис. 3, б, з).

На образцах без защитного покрытия после испытаний обнаружены продукты коррозии в виде рыхлой ржавчины на их поверхностях. На отдельных участках поверхности наблюдались углубления в виде лунок, образовавшихся, по-видимому, в результате воздействия на сталь движущегося потока газового конденсата (рис. 3, а, в).

Результаты замеров толщины диффузионного цинкового покрытия на образцах после промышленных испытаний в агрессивных газовых скважинах показали, что толщина диффузионного железозинкового слоя в процессе испытаний практически не изменилась.

Результаты коррозионных испытаний (гравиметрическим методом – по удельной потере массы на единицу времени) образцов в агрессивных средах скважин газоконденсатных месторождений показали закономерную, значительно более высокую коррозионную стойкость диффузионно оцинкованных образцов по сравнению с образцами без покрытий. Средняя скорость коррозии диффузионно оцинкованных образцов была в 4,1–6,1 раз ниже, чем стальных образцов без покрытий (табл. 1). При этом характерно, что чем агрессивнее среда скважины, тем больше разница в скорости коррозии образцов без покрытия и диффузионно оцинкованных образцов в пользу последних.

Для проверки коррозионной стойкости и износостойкости резьбовых соединений диффузионно оцинкованных НКТ и муфт с треугольной резьбой были проведены комплексные испытания диффузионно оцинкованных НКТ\_73x5,5 ГОСТ 633-80 групп прочности Д, Е, Р110 и муфт к ним. Испытания диффузионно оцинкованных стальных образцов, вырезанных из НКТ групп прочности Д, Е, Р110, на общую коррозию по методике NACE показали, что диффузионное цинковое покрытие обладает защитным эффектом при контакте со стандартной сероводородсодержащей средой NACE в течение регламентированного времени испытаний – 96 ч. Испытание образцов проводили при подаче в их внутреннюю полость сероводородсодержащей коррозионной среды NACE под гидравлическим давлением на стенде СТП-2000 при величинах испытательных давлений по ГОСТ 633-80 после 1, 4, 6, 10, 20 и 30 свинчивания. Установлено, что все предоставленные на испытания образцы,



**Рис. 3.** Вид поверхности образцов, отобранных от НКТ группы прочности Р-110, после промышленных испытаний в скважине: а, в – образцы без покрытия; б, з – диффузионно оцинкованные образцы

Таблица 1

**Обобщенные данные коррозионных промышленных испытаний гравиметрическим методом образцов НКТ газодобывающих скважин**

Номер скважины	Вид образцов	Средняя скорость коррозии 3-х образцов, К, г/м <sup>2</sup> час	К неоцинкованных / К оцинкованных
1	оцинкованные	0,06	6,1
	неоцинкованные	0,37	
2	оцинкованные	0,056	5,7
	неоцинкованные	0,32	
3	оцинкованные	0,03	4,4
	неоцинкованные	0,13	

выдержали требуемое для соответствующих групп прочности внутреннее гидравлическое давление после 1, 4, 6, 10, 20 свинчивания и после последнего (30) свинчивания [5, 6].

Оценку коррозионного воздействия на резьбовые соединения НКТ с диффузионным цинковым покрытием проводили по методике NACE на диффузионно оцинкованных свинченных образцах «труба-муфта-труба» общей длиной 700 мм.

Испытание образцов проводили при подаче в их внутреннюю полость сероводородсодержащей коррозионной среды NACE с последующим созданием давления  $P_{исп} = 30,0$  МПа. Разрушения и потери герметичности испытуемых изделий за базовое время испытаний (720 ч) не произошло (рис. 4).

Таким образом, гидроиспытания сероводородсодержащей средой NACE показали, что резьбовые соединения НКТ с диффузионным цинковым покрытием обеспечивают герметичность в течение регламентированного времени (720 ч).

Испытание на свинчивание-развинчивание (С-Р) резьбовых соединений проводили на базе ОАО ВНИИТнефть (г. Самара, Россия) на стенде СИНКТ-450 с моментом свинчивания 900–1500 Нм, что соответствует п. 6.10 РД 39-136-95. Испытания проводили с применением резьбоуплотнительного пластичного смазочного материала ВНИИТнефть (ПСМ ВНИИТнефть) ТУ 0254-142-0147016-01. Испытания проводили при действии осевого сжимающего усилия 1000 Н,

имитирующего нагрузку на резьбовое соединение, создаваемую весом одной трубы НКТ. Контроль резьбовыми калибрами натяга резьбы образцов проводили до начала стендовых испытаний на (С-Р) а также по достижении 1, 4, 6, 10, 20 и 30 циклов (С-Р).

Испытания на (С-Р) резьбовых соединений проводили до состояния, когда конец сбега резьбы ниппельного конца утопится относительно торца муфты более чем на один шаг резьбы (натяг резьбового соединения превышал минус 2,5 мм). Если такое состояние не достигалось до 30 циклов (С-Р), то испытания прекращались.

Визуальный осмотр резьбы муфт и ниппельных концов в ходе (через каждые три цикла свинчивания-развинчивания) и после испытаний на (С-Р) показал равномерный абразивный износ покрытия на боковой поверхности витков резьбы, сплюсываний и задигов резьбы не обнаружено. Наблюдались точечные сколы и незначительные отслоения покрытия с вершин витков резьбы на образцах всех групп прочности, на остальной поверхности образцов покрытие сохранилось до конца испытаний.

Представляет практический интерес характер воздействия коррозионно-активной среды на материал покрытия сложно-профилированных нагруженных изделий, таких как муфтовые соединения труб нефтяного сортамента. Были изучены анодные потенциодинамические кривые (АПК) в электролитах, имитирующих воздействие агрессивных сред на стальные образцы с диффузионным цинковым покрытием, а также влияние продуктов коррозии, накапливающихся на поверхности стали. Установлено, что в 0,1%-ом растворе  $Na_2SO_4$ , подкисленном серной кислотой до  $pH 5$ , анодный процесс заторможен в большей мере, а при высоких плотностях анодного тока возможно небольшое солевое пассивирование, то есть осаждение на поверхности электрода сульфатов, образующихся при интенсивном анодном растворении [7].

Изучение характера АПК, полученных на поверхности оцинкованной стали после испытаний различной продолжительности, показало, что на диффузионно оцинкованных стальных образцах с увеличением продолжительности испытаний наблюдается торможение анодного процесса, которое при малых изменениях потенциала возрастает и подчиняется закономерностям Тафеля, а при более положительных значениях потенциала происходит значительное торможение, связанное, вероятно, с солевой пассивацией. Продукты коррозии, образующиеся на поверхности стали с покрытием, сокращают активную поверхность образца и снижают плотность тока, что может быть связано с образованием плотных внутренних слоев ржавчины на поверхности покрытия, или, если покрытие уже растворилось, то обогащенного  $Fe_3O_4$  на поверхности стали [8]. Подобный вывод можно сделать, если исходить из того, что стандартный стационарный потенциал термодиффузионного цинкового покрытия по отношению к нормальному водородному электроду (н.в.э) в исследуемом растворе составляет примерно -730 мВ и в процессе ускоренных испытаний в течение 60 суток составлял уже -560 мВ. При более длительных испытаниях, когда покрытие уже полностью



**Рис. 4.** Муфты (разрез) и НКТ группы прочности Д после гидроиспытаний коррозионной средой по методике NACE: образцы полностью погружали в испытательный раствор NACE (5%-ый раствор NaCl по ГОСТ 4233 + 0,5%-ый раствор  $CH_3COOH$  по ГОСТ 19814, насыщенный сероводородом,  $pH \leq 3,5$ ;  $T = 297$  К). Время испытаний – 720 часов.

растворено, а на поверхности кроме оксидов цинка будут присутствовать и плотные слои оксидов железа, особенно коррозионностойкое соединение  $Fe_3O_4$ , типа шпинели, то потенциал, по-видимому, будет приближаться к еще более положительному значению, а продукты коррозии экранируют поверхность, предотвращая зарождение трещин в материале подложки.

Международная Организация по Стандартизации (*the International Organization for Standardization*; подкомитет *ISO/TC 107/SC4* и *CEN Standards*) в 2011 г. начали подготовку по разработке нового международного стандарта на диффузионные цинковые покрытия, особенно для изделий из высокопрочных сталей со сложной структурой, используемых в производстве труб для нефтегазовой отрасли и строительных конструкций

В результате совместной работы специалистов Нидерландов, Украины, Германии, России, Великобритании, Китая, США, Израиля и других стран был разработан новый международный стандарт ISO 17668:2016 на диффузионные цинковые покрытия [13; 14].

Так, новый международный стандарт ISO 17668:2016 устанавливает требования к качеству диффузионных цинковых покрытий по:

- внешнему виду;
- сплошности покрытия (отсутствию на изделии непокрытых участков);
- адгезии (сцеплению) покрытия с основой покрываемого изделия;
- толщине (массе) слоя покрытия и его коррозионной стойкости.

Необходимо также отметить такую важную характеристику покрытия, как твердость, которая во многом определяет такие важные эксплуатационные показатели, как износостойкость, пластичность, прочность и, в конечном счете – срок службы цинкового покрытия, особенно на изделиях с резьбой (трубы, крепежные изделия).

В соответствии с данным международным стандартом, установлены требования к минимальной толщине покрытия для шести классов диффузионных цинковых покрытий, наносимых на изделия из черных металлов (табл. 2), а также приведены рекомендации для их применения.

Покрытия класса 10 используют в качестве подслоя (грунтовки) под лакокрасочное или органическое покрытие, поскольку они имеют ограниченную катодную защиту и не рекомендуются для коррозионной защиты без дополнительной обработки.

Покрытия класса 15 предназначены для малоагрессивной окружающей среды внутри и вне помещений, а покрытия класса 30 предназначены для применения в более агрессивной окружающей среде или там, где требуется продолжительный срок службы изделия.

Покрытия класса 45 рекомендуются для применения в высокоагрессивной окружающей среде или в условиях абразивного износа, например, в промышленных или морских условиях.

Покрытия классов 60 и 75 применяют для изделий, эксплуатирующихся в особо жестких условиях. Если требуется наносить на изделия покрытия большей толщины, применяют специальную предобработку.

Настоящий стандарт характеризует цинковые покрытия, наносимые диффузионным методом, как покрытия, предназначенные для защиты стальных изделий от коррозии и абразивного износа.

Одним из наиболее эффективных путей повышения коррозионной стойкости и увеличения срока службы НКТ является защита их покрытиями типа «дуплекс-система» [15].

Дуплексную систему на стальной поверхности в целом можно определить как комбинацию металлического покрытия (из цинка или железоцинкового сплава), на которое нанесен слой полимерного покрытия. Сочетание в дуплекс-системе металлического и полимерного покрытий обеспечивает оптимальные противокоррозионные свойства стальному изделию в агрессивных средах, поскольку при этом суммируется электрохимический защитный эффект цинкового покрытия с гидроизолирующим защитным эффектом лакокрасочного. Поэтому комбинированные покрытия можно рассматривать как разновидность электрохимического метода защиты от коррозии. В комбинированных покрытиях цинковое покрытие выполняет не только роль эффективного грунтового слоя, но и обеспечивает электрохимическую защиту стальной основе в местах возможных повреждений (например, царапины, трещины, сколы) верхнего покровного слоя.

Дуплексные покрытия обладают синергетическим действием, то есть степень защиты дуплексной системы выше суммы степеней защиты цинкового покрытия и полимерного покрытия, взятых в отдельности. С одной стороны, полимерное покрытие защищает цинковое, достаточно реакционно-активное покрытие от преждевременного окисления, а с другой стороны, цинковое покрытие (образовавшее ин-терметаллический сплав со стальной поверхностью)

Таблица 2

**Минимальная толщина диффузионных цинковых покрытий, наносимых на изделия из черных металлов**

Класс покрытия	Локальная толщина покрытия, мин, мкм	Локальная масса покрытия, мин, г/м <sup>2</sup>
Класс 10	10	72
Класс 15	15	100
Класс 30	30	216
Класс 45	45	324
Класс 60	60	432
Класс 75	75	540

предотвращает образование ржавчины на стали.

Такие покрытия представляют собой комбинацию металлического покрытия (из цинка или железо-цинкового сплава), с нанесенными одним или несколькими слоями краски или порошкового покрытия. Наличие в дуплекс-системе металлических и неметаллических покрытий обеспечивает оптимальные противокоррозионные свойства стальному изделию в агрессивных средах, за счет сочетания электрохимического защитного эффекта цинкового покрытия с гидроизолирующим защитным эффектом лакокрасочного. Степень защиты дуплексной системы выше суммы степеней защиты цинкового и полимерного покрытий из краски.

На рис. 5. приведена структурная схема НКТ с покрытием типа «дуплекс-система». НКТ с таким покрытием обладают высокой коррозионной стойкостью и длительным сроком службы.

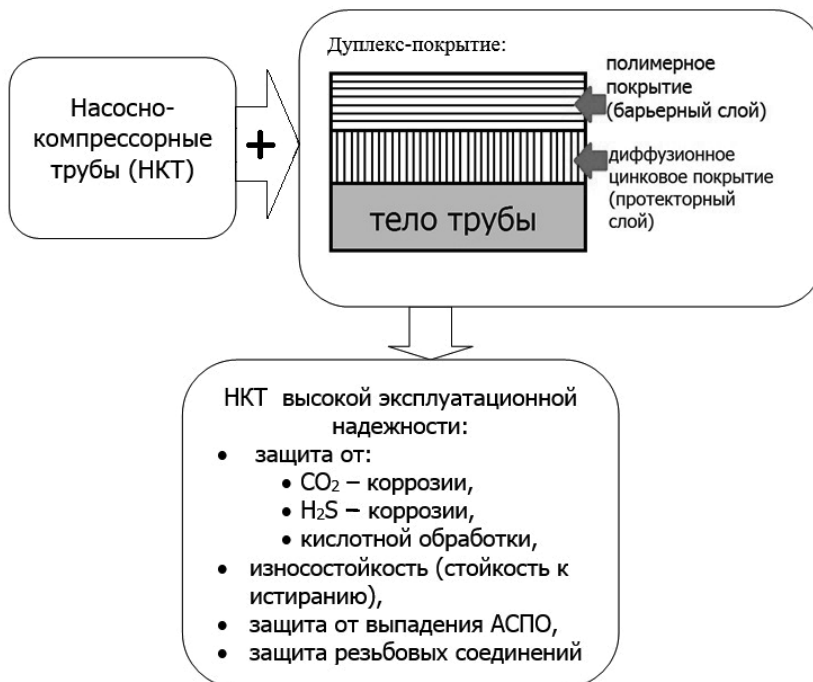


Рис. 5. Структурная схема НКТ с покрытием типа «дуплекс-система»

## Выводы

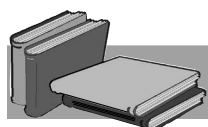
Использование диффузионных цинковых покрытий нового поколения для защиты насосно-компрессорных труб, эксплуатирующихся на газоконденсатных месторождениях, характеризующихся высокой агрессивностью скважин, позволяет одновременно:

- значительно повысить срок службы труб, коррозионную стойкость и износостойкость резьбовой пары «труба-муфта»;
- улучшить герметичность резьбовых соединений труб;
- увеличить количество операций «свинчивание-развинчивание» (до 20–30 и более раз);

– снизить число и трудоемкость ремонтных работ скважин, расходы на мероприятия по защите природной окружающей среды, повысить экологическую безопасность при газодобыче.

Диффузионные цинковые покрытия нового поколения (однородной структуры и заданного фазового состава) отвечают требованиям нового международного стандарта на диффузионные цинковые покрытия.

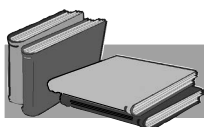
Применение комбинированного защитного покрытия типа «дуплекс-система» является одним из наиболее эффективных путей повышения коррозионной стойкости и увеличения срока службы НКТ.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Проскуркин Е. В., Геловани В. А., Сонк А. Н. Диффузионные цинковые покрытия: свойства, области применения: Справочник / под. ред. Е. В. Проскуркина, Д. А. Сухомлина. – М.: Наука, 2017. – 311 с. – ISBN 978-5-02-039978-5.
2. Саакян Л. С., Ефремов А. П. Защита нефтегазопромыслового оборудования от коррозии. – М.: Недра, 1982. – 227 с.
3. Гоник А. А. Коррозия нефтепромыслового оборудования и меры ее предупреждения. – М.: «Недра», 1976. – 192 с.
4. Проскуркин Е. В., Попович В. А., Мороз А. Т. Цинкование. Справ. изд. – М.: Металлургия, 1988. – 528 с.
5. NACE Standard TM 0177-96. Standard Test Method Laboratory Testing of Metals for Resistance to Specific Forms of Environmental Cracking in H<sub>2</sub>S Environments, 32 p.
6. NACE Standard TM 0284-96. Standard Test Method Evaluation of Pipeline and pressure Vessel Steels for Resistance to Hydrogen-Induced Cracking, 10 p.
7. Сотсков Н. И. Коррозионное растрескивание высокопрочных болтов в промышленной атмосфере: автореферат ... канд. тех. наук. – М., 1983. – 27 с.
8. Сотсков Н. И. Комплексный метод исследования коррозионного растрескивания высокопрочного крепежа и повышение его долговечности в агрессивных средах // Промышленное и гражданское строительство. – 1999. – № 5. – С. 36–38.
9. Сотсков Н. И. Термодиффузионное цинкование – высокоэффективный метод антикоррозионной защиты высокопрочного крепежа и элементов строительных конструкций // Труды ЦНИИПСК им. Мельникова к 100-летию со дня рождения академика Н. П. Мельникова. – М.: [Б. и.], 2009. – С. 179–196.

10. Розенфельд И. Л. Коррозия и защита металлов (локальные коррозионные процессы). Контактная коррозия. Щелевая коррозия. Питтинговая коррозия. Коррозия и вопросы конструирования. – М.: Metallurgiya, 1970. – 448 с.
11. Шляфирнер А. М., Якубова Г. П., Голубев А. И., Сотсков Н. И. Исследование свойств ржавчины на атмосферостойкой стали после натуральных и ускоренных испытаний // Защита металлов. – 1975. – Т. 11. – № 2. – С. 200–204.
12. Ажогин Ф. Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей. – М.: «Metallurgiya», 1974. – С. 186–192.
13. Проскуркин Е. В., Журавлев А. Ю. Сотрудничество специалистов России, Украины и Европейского Союза в создании международного стандарта на диффузионные цинковые покрытия // Коррозия: материалы, защита. – 2012. – № 3. – С. 45–47.
14. Проскуркин Е. В. Путь в Европу // Энергополитика-Нефть и газ. – 2011. – № 2. – С. 14–15.
15. J. F. H. van Eijnsbergen Duplex systems: hot-dip galvanizing plus painting // Amsterdam-London-New York-Tokyo, Elsevier Science B., 1994. – 223 p.



## REFERENCES

1. Proskurkin Ye. V., Gelovani V. A., Sonk A. N. (2017). Diffuzionnye tsynkovye pokrytiia: svoistva, oblasti primeneniia: Spravochnik [Diffusion zinc coatings: properties, applications: Directory]. Ed. by E. V. Proskurkin, D. A. Sukhomlin, Moscow: Nauka, 311 p., ISBN 978-5-02-039978-5 [in Russian].
2. Saakiian L. S., Efremov A. P. (1982). Zashchita neftegazopromyslovogo oborudovaniia ot korrozii [Protection of oil and gas equipment against corrosion]. Moscow: Nedra, 227 p. [in Russian].
3. Gonik A. A. (1976). Korroziia neftepromyslovogo oborudovaniia i mery ee preduprezhdeniia [Corrosion of oilfield equipment and measures to prevent it]. Moscow: Nedra, 192 p. [in Russian].
4. Proskurkin Ye. V., Popovich V. A., Moroz A. T. (1988). Tsynkovanie. Sprav. izd. [Zinc plating. Ref. ed.]. Moscow: Metallurgiya, 528 p. [in Russian].
5. NACE Standard TM 0177-96. Standard Test Method Laboratory Testing of Metals for Resistance to Specific Forms of Environmental Cracking in H<sub>2</sub>S Environments, 32 p. [in English].
6. NACE Standard TM 0284-96. Standard Test Method Evaluation of Pipeline and pressure Vessel Steels for Resistance to Hydrogen-Induced Cracking, 10 p. [in English].
7. Sotskov N. I. (1983). Korroziionnoe rastreskivanie vysokoprochnykh boltov v promyshlennoi atmosfere: Avtoreferat ... kand. tekhn. nauk [Corrosion cracking of high-strength bolts in the industrial atmosphere: extended abstract of candidate's thesis]. Moscow, 27 p. [in Russian].
8. Sotskov N. I. (1999). Kompleksnyi metod issledovaniia korroziionnogo rastreskivaniia vysokoprochnogo krepzha i povyshenie ego dolgovechnosti v agressivnykh sredakh [Comprehensive method for studying corrosion cracking of high-strength fasteners and increasing its durability in corrosive environments]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo, no. 5, pp. 36–38 [in Russian].
9. Sotskov N. I. (2009). Termodiffuzionnoe tsynkovanie – vysokoeffektivnyi metod antikorrozionnoi zashchity vysokoprochnogo krepzha i elementov stroitel'nykh konstruktsey [Thermodiffusion galvanizing is a highly effective method of anticorrosive protection of high-strength fasteners and elements of building structures]. Trudy TSNIIPSK im. Mel'nikova k 100-letiu so dnia rozhdeniia akademika N. P. Mel'nikova, Moscow: [B.i.], pp. 179–196 [in Russian].
10. Rozenfel'd I. L. (1970). Korroziia i zashchita metallov (lokal'nye korroziionnye protsessy). Kontaktnaia korroziia. Shchelevaia korroziia. Pittingovaia korroziia. Korroziia i voprosy konstruirovaniia [Corrosion and protection of metals (local corrosion processes). Contact corrosion. Crevice corrosion. Pitting corrosion. Corrosion and construction issues]. Moscow: Metallurgiya, 448 p. [in Russian].
11. Shliafirner A. M., Yakubova G. P., Golubev A. I., Sotskov N. I. (1975). Issledovanie svoistv rzhavchiny na atmosferostoikoii stali posle naturnykh i uskorennykh ispytaniy [Investigation of rust properties on weather-resistant steel after full-scale and accelerated tests]. Zashchita metallov, vol. 11, no. 2, pp. 200–204 [in Russian].
12. Azhogin F. F. (1974). Korroziionnoe rastreskivanie i zashchita vysokoprochnykh staley [Corrosion cracking and protection of high-strength steels]. Moscow: Metallurgiya, pp. 186–192 [in Russian].
13. Proskurkin Ye. V., Zhuravliov A. Yu. (2012). Sotrudnichestvo spetsialistov Rossii, Ukrainy i Evropeiskoho Soiuza v sozdanii mezhdunarodnogo standarta na diffuzionnye tsynkovye pokrytiia [Cooperation of specialists from Russia, Ukraine and the European Union in the creation of the International Standard for Diffusion Zinc Coatings]. Korroziia: materialy, zashchita, no. 3, pp. 45–47 [in Russian].
14. Proskurkin Ye. V. (2011). Put' v Evropu [Way to Europe]. Energo-politika-Neft' i gaz, no. 2, pp. 14–15 [in Russian].
15. J. F. H. van Eijnsbergen (1994). [Duplex systems: hot-dip galvanizing plus painting]. Amsterdam-London-New York-Tokyo, Elsevier Science B, 223 p. [in English].

## Анотація

*Большаков В. І., Сухомлин Д. А., Проскуркін Є. В.*

Насосно-компресорні труби високої корозійної стійкості та експлуатаційної надійності для жорстких корозійно-ерозійних умов видобування нафти та газу

*Наведено результати корозійних випробувань дифузійних цинкових покриттів в ускладнених корозійно-ерозійних умовах свердловин з видобутку нафти та газу. Електрохімічними дослідженнями доведено гальмування анодного процесу розчинення покриття та його сольове пасивування у модельних розчинах.*

*Встановлено, що швидкості корозії дифузійно оцинкованих сталевих зразків були в 4, 1–6, 1 рази нижче, ніж зразків без покриття.*

*Розроблений фахівцями України, Росії та Нідерландів новий міжнародний стандарт на дифузійні цинкові покриття ISO 17668:2016, буде сприяти подальшому підвищенню якості оцинкованих виробів та розширенню галузей використання даного захисного покриття.*

*Показано перспективне використання дифузійних цинкових покриттів для захисту від корозії різних металовиробів, що використовуються в промисловості, будівництві та нафтогазовій галузі.*

## Ключові слова

*Дифузійні цинкові покриття, корозійна стійкість, електрохімічні вимірювання, інтерметалічні з'єднання, мікротвердість.*

## Summary

*Bol'shakov V., Sukhomlin D., Proskurkin Ye.*

Tubing of high corrosion resistance and operational reliability for severe corrosion-erosion conditions of oil and gas production

*Results of corrosion tests of diffusion zinc coated tubing in hard corrosion-erosion conditions of oil and gas production wells are given. Electrochemical tests have shown inhibition of the process of anodic solution of the coating and its salt passivation in standard test solutions.*

*It was established that corrosion rate in diffusion zinc coated specimens of steel was 4.1 to 6.1 times lower than in non-coated specimens.*

*Ukrainian, Russian and The Netherland specialists have developed a new International Standard for diffusion zinc coatings ISO 17668:2016 that will contribute to further improvement of zinc coated product quality and expansion of fields of application of this protective coating.*

*Availability of diffusion zinc coating application for corrosion protection of various metal products used in manufacturing, construction and oil and gas industries is shown.*

## Keywords

*Diffusion zinc coatings, corrosion resistance, electrochemical measurements, intermetallic compounds, microhardness.*

Поступила 28.11.17