

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

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

**В. И. Большаков\*\***, д-р техн. наук, профессор

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

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

\*\*ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», Днепр

## Опыт промышленной эксплуатации насосно-компрессорных труб с защитным диффузионным цинковым покрытием на глубоких нефтяных и газовых скважинах Украины

*Проведен анализ и сопоставление свойств различных цинковых покрытий на стальных изделиях. Особое внимание уделено диффузионным цинковым покрытиям и их применению для защиты насосно-компрессорных труб (НКТ) и соединительных муфт от коррозионно-эрозионного воздействия агрессивных сред при нефтедобыче. Приведены данные длительных (более 10 лет) промышленных испытаний диффузионно оцинкованных НКТ на глубоких нефтяных скважинах Украины.*

**Ключевые слова:** цинкование, диффузионные покрытия, коррозионная стойкость, трубы, муфты, нефтегазодобыча.

**Т**рубы нефтяного сортамента, прежде всего насосно-компрессорные трубы (НКТ) и нефтепроводные, в процессе эксплуатации особенно интенсивно подвергаются коррозионно-эрозионному воздействию агрессивных сред и различным механическим нагрузкам.

Наиболее распространенными причинами аварий черных (без покрытия) НКТ являются коррозия, износ резьбы и усталостные разрушения. Как отмечают специалисты, и подтверждает многолетний практический опыт, главная причина аварий – разрушение резьбового соединения. Согласно результатам проведенного российскими специалистами квалитметрического анализа эксплуатационной надежности насосно-компрессорных труб, применительно к сегодняшним условиям их эксплуатации (в частности, на месторождениях Западной Сибири, Оренбургской, Самарской областей России), в большинстве случаях «доминирующими» – порядка 50 %, являются отказы НКТ, связанные с резьбовым соединением (разрушение, потеря герметичности и т. д.). По данным Американского нефтяного института (API), по причине разрушения резьбовых соединений количество аварий НКТ составляет 55 % [1].

Отметим, что условия нефтедобычи Украины осложнены наличием глубоких (до 5000 м и более) скважин, в которых трубы подвергаются не только интенсивному коррозионному воздействию агрессивной среды, но и значительным знакопеременным механическим нагрузкам. Совместное воздействие этих отрицательных факторов приводит к активному разрушению труб и в конечном итоге к обрыву (полетам) труб. Впоследствии возникает необходимость проведения больших ремонтных работ, связанных с большими материальными и финансовыми затра-

тами, при этом также падает объем добываемой нефтепродукции.

Результаты проведенных широких исследований и промышленных испытаний различных видов цинковых покрытий показали, что способ получения цинковых покрытий во многом определяет их свойства и, прежде всего, коррозионную стойкость.

Испытаниями было установлено, что в слабощелочных растворах, в морской воде (атмосфере) или в переменной среде «морская вода - воздух» наибольшей коррозионной стойкостью обладают цинковые покрытия, полученные диффузионным способом.

Сравнение свойств и результатов коррозионных испытаний различных цинковых покрытий показывает, что в жестких условиях эксплуатации эффективным является применение диффузионных цинковых покрытий [1, 2, 3].

В табл. 1 приведены данные о коррозионной стойкости стали 20 без покрытий ( $V_{ст}$ ) и с диффузионным цинковым покрытием ( $V_{дп}$ ) в различных средах, полученных в результате коррозионных испытаний продолжительностью не менее 1 года.

Коррозия диффузионных цинковых покрытий во времени уменьшается и имеет затухающий характер. На гальванических, металлизационных и полученных методом горячего цинкования покрытиях наружные слои состоят из мягкого цинка, а в эксплуатационных условиях образуются рыхлые, легко удаляемые (дождем, ветром, движущейся водой и др.) продукты коррозии, что способствует разрушению покрытия и дальнейшему протеканию коррозионных процессов.

На диффузионных цинковых покрытиях в эксплуатационных условиях при воздействии агрессивной среды образуются плотные слои продуктов коррозии, которые обладают защитными свойствами и

## Коррозионная стойкость диффузионных цинковых покрытий (ДП) в различных средах

№ п/п	Среда испытаний	Скорость коррозии, г/м <sup>2</sup> час (мкм/год)		Соотношение $V_{ст} / V_{дп}$
		Сталь 20	Диффузионно оцинкованная сталь 20	
1.	Поток влажного сжатого воздуха	0,0480	0,0020	24
2.	Вода, содержащая сероводород (H <sub>2</sub> S) (500 мг/л)	5,21	0,0565	92
3.	Морская среда (зона ватерлинии судов, где происходит хороший приток воздуха при наличии воды или водяной пленки с повышенной концентрацией растворенных солей)	0,30	0,005	60
4.	Системы горячего и холодного водоснабжения	0,0923	0,0022	42
5.	Техническая вода на нефтеперерабатывающих и коксохимических заводах	(200)	(40)	5

предохраняют нижележащие слои покрытия от разрушения [4].

Это объясняется тем, что при диффузионном способе цинкования на поверхности цинкуемых изделий образуется покрытие, представляющее собой железоцинковый сплав переменной концентрации. Покрытие из такого сплава содержит до 85–90 % цинка, но по своим свойствам резко отличается от металлического цинка.

Таким образом, важным свойством диффузионных цинковых покрытий является способность образовывать плотные защитные слои продуктов коррозии при эксплуатации диффузионно оцинкованных изделий в агрессивных условиях, то есть проявлять эффект самозащиты.

Выполненные в последнее время усовершенствования процессов диффузионного цинкования позволили не только повысить коррозионную стойкость и другие свойства диффузионных цинковых покрытий, но и расширить области их применения, использовать для защиты различных изделий, в жестких коррозионно-эрозионных условиях эксплуатации: нефтедобывающая отрасль, судостроение и морской флот, коксохимическая и нефтеперерабатывающая промышленность.

Диффузионные цинковые покрытия не склонны к старению, они обладают высокой твердостью, износостойкостью, а диффузионная связь обеспечивает высокую степень сцепления с подложкой (основой трубы). Цинковая составляющая обеспечивает покрытие достаточную пластичность, протекторные свойства и выполняет роль твердой смазки. Диффузионно оцинкованные трубы легко транспортировать без повреждения покрытия, что нельзя обеспечить для труб с неметаллическими покрытиями, особенно эмалевыми или стеклоэмалевыми [5].

В настоящее время трубные заводы Украины еще не выпускают насосно-компрессорные трубы с защитными покрытиями. Лишь на резьбу муфт для НКТ наносят гальваническое цинковое покрытие либо производят фосфатирование. Такие покрытия не обеспечивают необходимую защиту резьбовых соединений НКТ. После 3–4-х операций свинчивания-развинчивания эти покрытия полностью разрушаются

и резьба труб и муфт, подвергаясь активному коррозионному и механическому воздействиям, быстро выходит из строя [6].

Следует отметить, что герметичность резьбовых соединений и коррозионная стойкость их покрытий взаимосвязаны и во многом определяют срок надежной эксплуатации НКТ.

Применение неметаллических (полимерных, стеклоэмалевых, силикатно-эмалевых и др.) покрытий повышает коррозионную стойкость труб, однако, в связи с особенностями технологий нанесения таких покрытий, на резьбах труб и муфт не формируются износ- и коррозионностойкие покрытия, вследствие чего не обеспечивается эффективная защита труб в целом.

Перспективным способом защиты труб и оборудования нефтегазового сортамента является термохимическое диффузионное цинкование. Этот способ, научные основы которого были разработаны Н. С. Горбуновым, позволяет наносить защитное покрытие на гладкие трубы и на трубы с нарезными концами, а также на муфты к ним. Этим способом защитное покрытие может быть сформировано как на внутренней, так и на наружной поверхности труб и муфт.

Учитывая острую необходимость повышения коррозионной стойкости и эксплуатационной надежности труб нефтяного сортамента в Украине были выполнены научно-практические работы по диффузионному цинкованию НКТ и их промышленным испытаниям.

Для выполнения этой программы была изготовлена опытная партия (60 т) диффузионно оцинкованных НКТ размером 73x5,5x6000 мм группы прочности Е с высаженными наружу концами. НКТ и муфты к ним имели защитное диффузионное цинковое покрытие как на внутренней и наружной поверхности, так и на резьбовых участках труб и муфт, что обеспечивало защиту их резьбовым соединениям. Диффузионно оцинкованные НКТ до спуска в нефтяные скважины в течение двух лет хранились на открытом воздухе на складе. При этом они прекрасно сохранились: их поверхность, включая резьбовые концы, не были подвержены коррозии [6, 7].

Внешний вид пакетов диффузионно оцинкованных НКТ группы прочности Е, изготовленных для глубоких (4000–5000 м) нефтяных скважин Украины, представлен на рис. 1.



**Рис. 1.** Внешний вид пакетов диффузионно оцинкованных НКТ группы прочности Е для глубоких нефтяных скважин

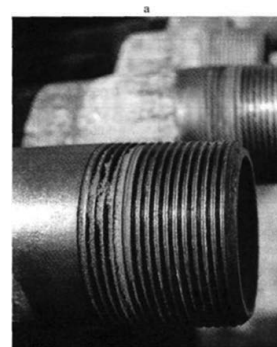
НКТ с диффузионным цинковым покрытием были установлены на промышленные испытания в глубокие нефтяные скважины Украины, эксплуатирующиеся газлифтным способом, с последующим проведением мониторинга в период испытаний. В табл. 2 приведены данные о характеристиках пластовой воды нефтяной скважины № 37.

Колонны НКТ периодически извлекались из скважины для осмотра и отбора образцов труб и муфт для обследования состояния диффузионного цинкового покрытия и физико-механических характеристик труб.

Проведенный контрольный подъем и осмотр технического состояния колонны диффузионно оцинкованных НКТ, проходящих испытания в течение 3 лет и 4 месяцев, показал удовлетворительные результаты (рис. 2).

Следует отметить, что в процессе эксплуатации поверхность НКТ покрывается тонким слоем песчано-глинистых отложений, который перед фотографированием труб был легко удален с их поверхности влажной протиркой.

После 5 лет и 5 месяцев эксплуатации в нефтяной скважине развинчивание труб с диффузионным цинковым покрытием проходило без срывов и поврежденной резьбы. Ни одна из 633 труб не была отбракована.



**Рис. 2.** Внешний вид резьбового конца НКТ после промышленных испытаний в глубокой нефтяной скважине в течение 3 лет и 4 месяцев

на. К моменту настоящей публикации продолжительность промышленных испытаний составляет более 10 лет, скважина № 37 по-прежнему функционирует нормально.

Осмотр труб после испытаний показал, что поверхность диффузионно оцинкованных НКТ не имела коррозионных повреждений и нарушений слоя покрытия. После отбора образцов труб для проведения исследований в лабораторных условиях колонна диффузионно оцинкованных НКТ снова была спущена в скважину для продолжения промышленных испытаний. При этом в колонну были установлены диффузионно оцинкованные муфты для определения их эксплуатационных характеристик.

Данные осмотров, представленные в табл. 3, показали, что поверхность диффузионно оцинкованных НКТ после 5 лет и 5 месяцев эксплуатации находится в отличном состоянии; на трубах даже сохранилась маркировка завода-изготовителя НКТ. В отдельных местах на поверхности труб были обнаружены следы от захвата инструментом при спуско-подъемных операциях. Однако, в этих местах был нарушен только верхний слой диффузионного цинкового покрытия, а нижележащие слои покрытия прекрасно защищали поверхность труб в отличие от того, как это происходит при механических повреждениях и нарушениях сплошности покрытий других видов, в частности, полимерных и силикатно-эмалевых.

Развинчивание оцинкованных НКТ прошло без осложнений, резьба на nipple-концах труб была гладкой и не имела повреждений и забоин. Следует особо отметить высокое качество резьбы на диффузионно оцинкованных НКТ после испытаний

Таблица 2

### Характеристики пластовой воды

Месторождение	Чижевское
Горизонт	В-15
Тип воды	Хлоркальциевый
Интервал перфорации	3788-3809,3843-3847
Место отбора проб воды	Устье

Дата отбора	14.01.04 г.	28.02.05 г.	02.02.06 г.	24.01.07 г.	28.01.08 г.	27.01.09 г.
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,093	1,121	1,135	1,139	1,121	1,131
рН	5,40	4,40	4,39	3,57	5,24	5,26

(рис. 2). На трубах без покрытия (контрольные) были зафиксированы отказы при развинчивании труб при их подъеме. Резьба на этих трубах была повреждена (срезы резьбы).

Эксплуатационные свойства диффузионно оцинкованных насосно-компрессорных труб во многом определяются микротвердостью покрытий, транспортированием нефтесодержащей жидкости с частицами песка, гипса, глины и т. п. В принципе в процессе эксплуатации в жестких коррозионных условиях физико-механические свойства покрытия могут изменяться. Однако после эксплуатации в скважине микротвердость покрытия на диффузион-

но оцинкованных НКТ не изменилась и составляла 342–415 кгс/мм<sup>2</sup> (3351,6–4067,0 МПа). Микротвердость стальной основы НКТ составила 234–357 кгс/мм<sup>2</sup> (2293,2–3498,6 МПа).

Испытания механических свойств диффузионно оцинкованных НКТ после эксплуатации их в нефтяной скважине № 37 НГДУ «Полтаванефтегаз» подтвердили высокие адгезионные свойства и пластичность диффузионного цинкового покрытия нового поколения (табл. 4).

Широкие исследования свойств диффузионных цинковых покрытий и результаты промышленных испытаний диффузионно оцинкованных НКТ в раз-

Таблица 3

**Результаты осмотров состояния диффузионно оцинкованных НКТ на нефтепромыслах НГДУ «Полтаванефтегаз»**

Поверхность НКТ	Характеристика состояния НКТ после испытаний в течение		
	1 года и 9 месяцев	3 лет и 4 месяцев	5 лет и 5 месяцев (испытания продолжаются)
Наружная поверхность	Гладкая, темно-серого цвета, без коррозионных повреждений и нарушения слоя покрытия	Гладкая, слой диффузионного цинкового покрытия без коррозионных повреждений	Покрыта темным налетом, после удаления которого наблюдается гладкая поверхность без коррозионных повреждений
Внутренняя поверхность	Без повреждений, покрыта остатками нефти, после удаления которых наблюдался слой покрытия	Без повреждений, покрыта остатками нефти, после удаления которых наблюдался сплошной слой покрытия	Покрыта остатками нефти и песчано-глинистых отложений, после удаления которых наблюдался слой покрытия
Резьбовые (ниппельные) концы	Повреждения витков резьбы отсутствуют, резьба гладкая без забоин. Покрытие по профилю резьбы полностью сохранилось и не имеет коррозионных повреждений <sup>1)</sup>	Ниппельные концы труб и резьба муфт не имели следов коррозии и повреждений. Развинчивание труб с диффузионным цинковым покрытием проходило без срывов и повреждений резьбы.	Резьба муфт и ниппельных концов труб не имеет следов механических повреждений

Примечание: <sup>1)</sup> На НКТ без покрытия (контрольных) при их подъеме из скважины и развинчивании муфт зафиксированы повреждения (срезы резьбы)

Таблица 4

**Механические свойства насосно-компрессорных труб размером 73x5,5 мм группы прочности Е с высаженными наружу концами**

Наименование показателя механических свойств	ГОСТ 633-80	Показатели механических свойств											
		до цинкования			после цинкования			после испытаний в нефтяной скважине					
								1 год 9 мес.		3 года 4 мес.		5 лет 5 мес.	
		№№ испытываемых образцов											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Временное сопротивление $\sigma_v$ , МПа, не менее	689	932	941	941	941	932	922	912	922	863	853	853	843
Предел текучести $\sigma_t$ , МПа, не менее	552	667	677	667	735	696	716	657	647	637	647	647	647
	758												
Относительное удлинение $\delta_5$ , %, не менее	13	20	19,5	19,5	19	20	19,5	19,5	20	17,5	20	19	19,5

личных условиях нефтедобычи дают основание рекомендовать использовать их как эффективное и надежное средство для противокоррозионной защиты НКТ и их резьбовых соединений.

Таким образом, проведенные работы в области повышения эксплуатационной надежности труб нефтяного сортамента показали, что для защиты НКТ и их резьбовых соединений от коррозионно-эрозийного воздействия агрессивных сред, перспективным является использование диффузионных цинковых покрытий нового поколения.

## Выводы

Изучены свойства диффузионно оцинкованных НКТ и муфт к ним. Длительные промышленные испытания показали, что диффузионное цинкование является эффективным и экономически выгодным средством защиты НКТ и их резьбовых соединений.

В процессе нанесения диффузионных цинковых покрытий происходит упрочнение поверхностных слоев труб, муфт и их резьбовых поверхностей, которые при хранении, транспортировке и эксплуатации подвергаются коррозионным и механическим воздействиям.

Положительный опыт промышленной эксплуатации диффузионно оцинкованных НКТ и муфт к ним в условиях нефтедобычи в Украине позволяет расширить их применение и на газодобычу в Украине.

Использование диффузионных цинковых покрытий заданного состава и структуры для защиты НКТ позволяет одновременно:

– улучшить герметичность резьбовых соединений труб;

– повысить в 2–3 и более раз срок службы труб, коррозионную стойкость и износостойкость резьбовой пары «труба-муфта»;

– увеличить количество операций «свинчивание-развинчивание» (20–30 и более раз);

– снизить число и трудоемкость ремонтных работ скважин.

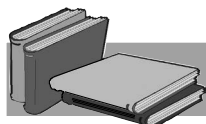
Использование диффузионно оцинкованных НКТ не должно рассматриваться только как средство экономии металла. При этом улучшаются экологическая ситуация, условия труда рабочих и упрощается эксплуатация оборудования, повышается надежность труб и трубопроводов, снижаются затраты на их эксплуатацию и ремонт, увеличивается объем добываемой продукции и снижается ее себестоимость.

В заключение приведены условия, в которых с успехом могут использоваться трубы нефтяного сортамента с диффузионным цинковым покрытием:

– в пластовых водах нефтепромыслов, содержащих сероводород, углекислоту и другие агрессивные компоненты;

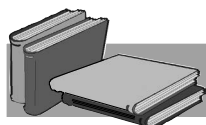
– в скважинах, эксплуатирующихся эрлифтом (газ-лифтом);

– на нефтепромысловых сооружениях при морской добыче нефти и в шельфовой зоне моря, а также при закачке морской воды.



## 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. Проскуркин Е. В., Попович В. А., Мороз А. Т. Цинкование: справочное издание. – М.: Metallurgiya, 1988. – 528 с.
3. Проскуркин Е. В. Путь в Европу // Энергополитика – Нефть и газ. – 2011. – № 2. – С. 14–15.
4. Проскуркин Е. В., Сухомлин Д. А. Анализ цинковых покрытий на основе их структурных и электрохимических свойств // Коррозия: материалы, защита. – 2013. – № 10. – С. 30–38.
5. Проскуркин Е. В., Петров И. В., Журавлев А. Ю., Иванов О. В., Поликарпов М. П., Сухомлин Д. А. Диффузионные цинковые покрытия нового поколения «Дельта 5+» для защиты от коррозии труб нефтяного сортамента // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 56–58.
6. Проскуркин Е. В., Сухомлин Д. А. Исследование коррозионной стойкости насосно-компрессорных труб с диффузионным цинковым покрытием в осложненных условиях газодобывающих скважин // Коррозия: материалы, защита. – 2016. – № 5. – С. 40–45.
7. Опыт промышленной эксплуатации оцинкованных насосно-компрессорных труб на глубоких нефтяных скважинах / Козловский А. И., Пинчук С. И., Проскуркин Е. В. и др. // Коррозия: материалы, защита. – 2007. – № 10. – С. 6–10.



## REFERENCES

1. Proskurkin E. V., Gelovani V. A., Sonk A. N. (2017). Diffuzionnye tsinkovye pokrytiia: svoistva, oblasti primeneniia: spravochnik [Diffusion zinc coatings: properties, applications: reference book]. Ed. by E. V. Proskurkin, D. A. Sukhomlin. Moscow: Nauka, 311 p., ISBN 978-5-02-039978-5 [in Russian].
2. Proskurkin E. V., Popovich V. A., Moroz A. T. (1988). Tsinkovanie: spravochnoe izdanie [Zinc plating: reference edition]. Moscow: Metallurgiya, 528 p. [in Russian].

3. Proskurkin E. V. (2011). Put' v Evropu [Way to Europe]. Energopolitika – Neft' i gaz, no. 2, pp. 14–15 [in Russian].
4. Proskurkin E. V., Sukhomlin D. A. (2013). Analiz tsinkovykh pokrytii na osnove ikh strukturnykh i elektrokhimicheskikh svoistv [Analysis of zinc coatings on the basis of their structural and electrochemical properties]. Korroziia: materialy, zashchita, no. 10, pp. 30–38 [in Russian].
5. Proskurkin E. V., Petrov I. V., Zhuravlev A. Yu., Ivanov O. V., Polikarpov M. P., Sukhomlin D. A. (2013). Diffuzionnye tsinkovye pokrytiia novogo pokoleniia «Del'ta 5» dlia zashchity ot korrozii trub neftianogo sortamenta [Diffusion zinc coatings of the new generation "Delta 5+" for corrosion protection of oil-grade pipes]. Neftianoe khoziaistvo, no. 2, pp. 56–58 [in Russian].
6. Proskurkin E. V., Sukhomlin D. A. (2016). Issledovanie korroziionnoi stoikosti nasosno-kompressornykh trub s diffuzionnym tsinkovym pokrytiem v oslozhnionnykh usloviakh gazodobyvaiushchikh skvazhin [Investigation of corrosion resistance of tubing with diffusion zinc coating in complicated conditions of gas producing wells]. Korroziia: materialy, zashchita, no. 5, pp. 40–45 [in Russian].
7. Kozlovskii A. I., Pinchuk S. I., Proskurkin E. V. et al. (2007). Opyt promyshlennoi ekspluatatsii otsinkovannykh nasosno-kompressornykh trub na glubokikh neftianykh skvazhinakh [Experience in the industrial operation of galvanized tubing in deep oil wells]. Korroziia: materialy, zashchita, no. 10, pp. 6–10 [in Russian].

### Анотація

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

Досвід промислової експлуатації насосно-компресорних труб із захисним дифузійним цинковим покриттям на глибоких нафтових та газових свердловинах України

Проведено аналіз та порівняння властивостей різних цинкових покриттів на сталевих виробках. Особливу увагу приділено дифузійним цинковим покриттям та їх застосуванню для захисту насосно-компресорних труб (НКТ) і сполучних муфт від корозійно-ерозійної дії агресивних середовищ при нафтовидобутку. Наведено дані тривалих (понад 10 років) промислових випробувань дифузійно оцинкованих НКТ на глибоких нафтових свердловинах України.

### Ключові слова

*Цинкування, дифузійні покриття, корозійна стійкість, труби, муфти, нафтогазовидобування.*

### Summary

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

The experience of field operation of tubing with protective diffusion zinc coating in deep oil and gas wells in Ukraine

The properties of various zinc coatings on steel products are analyzed and compared. The special attention is given to diffusion galvanizing coats and their application for protection of pumping and compression pipe and tubing couplings from corrosion-erosive effect of aggressive medium in oil production. Data of long-term (more than 10 years) industrial tests of diffusion galvanized pumping and compression pipe on deep oil wells of Ukraine are presented.

### Keywords

*Galvanizing, diffusion coatings, corrosion resistance, pipes, couplings, oil and gas production.*

Поступила 26.12.17