

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЦИНКОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА МУФТАХ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ

И.А. ЧИЖОВ, аспирант

*В.В. БЕРЕЗОВСКАЯ, доктор техн. наук, профессор
(УРФУ, г. Екатеринбург)*

*А.В. МАКАРОВ, доктор техн. наук, ст. науч. сотр.
(ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург)*

*Ю.В. ХУДОРОЖКОВА, канд. техн. наук, доцент
(УРФУ, г. Екатеринбург)*

Статья поступила 23 января 2013 года

Чижов И.А. – 623109, Свердловская обл., г. Первоуральск,
ул. Комсомольская 23А-35, e-mail: chizh@pervouralsk.ru

Применение защитных покрытий является одним из перспективных направлений увеличения продолжительности срока службы резьбового соединения «труба-муфта» колонн насосно-компрессорных труб при добыче нефти. Изучены эксплуатационные свойства гальванических, термодиффузионных и горячих цинковых покрытий на трубных сталях 45, 30Г2, 37Г2Ф и 37Г2С разной группы прочности. Определены следующие свойства: толщина, равномерность, микротвердость и износостойкость покрытий. Показано, что цинковые покрытия разной технологии нанесения имеют существенные различия по исследуемым параметрам, однако значения этих показателей в рамках одной технологии практически не зависят от металла основы. Термодиффузионное покрытие имеет значительно более высокую твердость по сравнению с горячим и гальваническим, что обусловлено присутствием в нем промежуточной фазы δ_1 , а также – наибольшую износостойкость.

Ключевые слова: муфты НКТ, цинкование, адгезия, микротвердость, износостойкость.

Введение

По существующей статистике в 50–70 % случаев причиной отказа колонн насосно-компрессорных труб (НКТ) в условиях нефтедобычи в различных географических условиях является разрушение резьбового соединения «труба-муфта» и одним из перспективных направлений его предотвращения является применение защитных покрытий на муфтах [1, 2]. Основными требованиями, предъявляемыми к покрытию на резьбе, обладающему свойствами твердой смазки, являются высокие износостойкость и адгезия. Кроме того, покрытие должно быть сплошным и равномерным. Правильно подобранные материалы покрытий и способы их нанесения позволяют эффективно защитить металл от разрушения и повысить надежность резьбового соединения, что существенно снижает аварийность при работе колонн НКТ. Решение

указанных вопросов является актуальной проблемой.

Целью работы было сравнение свойств цинковых покрытий, полученных разными методами для оценки их эксплуатационной надежности. Наряду с обычно определяемыми толщиной, равномерностью и адгезией, была проведена сравнительная оценка таких показателей качества цинковых покрытий, как микротвердость и износостойкость, которую определяли разными способами.

Материалы и методы исследования

В работе проведены исследования покрытий на трубных сталях 45, 30Г2, 37Г2Ф и 37Г2С разных групп прочности. Химический состав сталей и режимы их термической обработки приведены соответственно в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей

Материал		Марочный состав сталей, масс. %								
Номер режима ТО	Марка стали	C	Si	Mn	Cr	V	Ni	Cu	S	P
1	30Г2	0,28	0,25	1,70	0,15	–	0,10	0,06	0,037	0,035
2	37Г2Ф	0,35	0,28	1,52	0,22	0,15	0,20	0,01	0,035	0,032
3	45	0,46	0,22	0,72	0,21	–	0,11	0,02	0,030	0,040
4	30Г2	0,29	0,26	1,67	0,12	–	0,13	–	0,040	0,030
5	37Г2С	0,37	0,89	1,45	0,10	–	0,10	0,03	0,035	0,030

В качестве защитных покрытий использовали цинкование трех видов: гальваническое (ГВЦ), термодиффузионное (ТДЦ) и горячее (ГЦ). Цинковые покрытия наносили на муфты НКТ условного диаметра 60 мм и образцы-свидетели (25×10×10 мм), вырезанные без нагрева из пяти заготовок муфт. Горячее цинкование проводили на предприятии ОАО «Уралэлектромедь» (УГМК) при температуре расплава 450°C в ванне объемом 72 м³. Состав ванны: Zn – 98 %, Pb – 0,56 %, Al – 0,003 %, Ni – 0,006 %. Примеси: Fe < 0,025 %, Cd < 0,0012, Sn < 0,001 %, Cu < 0,01 %.

Термодиффузионное цинкование в порошковых смесях осуществляли в условиях «Финишного центра» цеха № 4 ОАО «Первоуральский новотрубный завод» (Группа ЧТПЗ). Процесс термодиффузионного цинкования проводили при температуре 380–420°C в атмосфере азота (остаточное давление воздуха составляло 0,1 атм.) при реверсивном движении печи в наклонном положении (5–10° к горизонту) в течение 3,5–4 часов. Состав насыщающей смеси:

модифицированный порошок цинка (99 % Zn) с размером частиц цинка 10–60 мкм и удельной поверхностью $\leq 0,8 \text{ м}^2/\text{г}$.

Гальваническое покрытие было выполнено на ОАО «Уральский завод тяжелого машиностроения» (Машиностроительная корпорация) и проходило в два этапа: пескоструйная обработка поверхности для улучшения адгезии цинка и цинкование в ванне с электролитом, состоящим из 200 г сернокислого цинка, 50 г сернокислого аммония, 15 г уксуснокислого натрия и 1000 г воды. Рабочая температура электролита составляла 20 °C, плотность тока – 1,5 А/дм². Цинковый электрод (катод) и защищаемый металл (анод) подключали к внешнему источнику тока. На рис. 1 показаны муфты резьбового соединения НКТ после горячего, гальванического и термодиффузионного цинкования.

Оценка толщины покрытия проводилась методом неразрушающего контроля по ГОСТ 9.302-88 с помощью прибора «Константа К5», работа которого основана на методе вихревых

Таблица 2

Режимы термообработки и механические свойства сталей

Материал		Режим термообработки	Группа прочности	Механические свойства				
Номер режима ТО	Марка стали			σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
1	30Г2	Закалка от 850°C, 40 мин, вода; отпуск 500°C, 80 мин	М	960	880	14	60	50
2	37Г2Ф	С прокатного нагрева (1280-1180°C); без ТО	Е	705	650	16	60	30
3	45	С прокатного нагрева (1280-1180°C); без ТО	Д	660	420	17	66	35
4	30Г2	Закалка 900°C, 50 мин, вода; отпуск 550°C, 60 мин	Л	800	740	14	65	55
5	37Г2С	С прокатного нагрева (1280-1180°C); без ТО	К	700	640	16	60	40



Рис. 1. Муфты НКТ с покрытиями:
а – ГЦ; б – ТДЦ; в – ГВЦ

токов. Относительная погрешность метода составляла $\pm 5\%$.

Прочность сцепления покрытия с основой (адгезия) определяли методом нагрева по ГОСТ 9.302-88. При проведении контроля адгезии цинковых покрытий деталь (образец) с покрытием нагревали до температуры 190°C , выдерживали при данной температуре в течение 1 ч и охлаждали на воздухе, после чего оценивали его внешний вид и целостность.

Измерение микротвердости проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 9450-76 по методу восстановления отпечатка с использованием четырехгранной пирамиды с квадратным основанием. В качестве материалов для определения микротвердости использовались микрошлифы после травления в 4% спиртовом растворе HNO_3 . Микротвердость цинкового покрытия измеряли на цифровом микротвердометре DM8 со шкалой измерения по Виккерсу при нагрузке 100 гс, а также на приборе ПМТ-3 при нагрузке 50 гс.

Для оценки износостойкости цинковых покрытий применили два метода. Первый метод проводили по заводской методике, он представлял собой 30-ти кратное «свинчивание-развинчивание» муфт, оцинкованных разными способами, с трубами тех же марок и групп прочности, на автоматической установке САМ Р-4,5/П-К цеха № 4 ОАО «Первоуральский новотрубный завод». Перед свинчиванием проводился замер натяга резьбы трубы и муфты, согласно ГОСТ 633-80. Натяг резьбы – это расстояние от торца муфты до конца резьбы на трубе. После этого проводилась процедура свинчивания-развинчивания муфты с трубой, и производился замер натяга на резьбе.

Второй метод заключался в проведении трибологических испытаний покрытий. Для

проведения трибологических испытаний были использованы стальные образцы с тремя типами цинковых покрытий. Стальной подложкой служила конструкционная сталь 30Г2 после термической обработки по режиму 1 (табл. 2). Трибологические испытания в условиях сухого трения скольжения проводили на лабораторной установке при возвратно-поступательном движении образцов с рабочей поверхностью $5,0 \times 5,0$ мм по пластине из стали 45 (твердостью 50 HRC) на воздухе при нагрузке $N = 49$ Н, средней скорости скольжения $V = 0,07$ м/с и длине хода образца $l = 40$ мм. Испытания образцов проводили при последовательном изнашивании, при этом в отдельных испытаниях путь трения составлял $L = 40$ м (что соответствует 500 двойным ходам образца) и $L = 80$ м (1000 двойных ходов образца). Перед испытаниями и после каждого испытания образцы взвешивали на аналитических весах с точностью 0,00005 г. Определяли потери массы образцов при изнашивании Δm и силу трения F , которую измеряли с помощью упругого элемента – рессоры с наклеенными на нее тензометрическими датчиками сопротивления. В качестве характеристики износостойкости использовали приведенный на единицу пути трения весовой износ: $\Delta m/L$, где Δm – потери массы образца, мг и L – путь трения, м. Трибологические свойства определяли по результатам двух-трех серий параллельных испытаний.

Результаты исследования

Результаты измерений толщины покрытий приведены в табл. 3. Анализируя их можно сделать вывод о том, что толщина покрытия на образцах, оцинкованных горячим способом, значительно превышает толщину цинковых покрытий, полученных по технологиям гальванического (ГЦ) и термодиффузионного цинкования (ТДЦ). Толщина покрытия ГЦ в среднем на 60 мкм больше толщины покрытия ТДЦ и на 80 мкм толщины покрытия ГВЦ. Полученные результаты подтверждаются и металлографическими исследованиями покрытий [3]. Сравнивая значения толщины покрытия в зависимости от материала основы, отметим, что существенного

Таблица 3

Толщина цинковых покрытий

Материал		Режим термообработки (ТО)	Группа прочности	Среднее значение толщины цинковых покрытий, мкм		
Номер режима ТО	Марка стали			ГЦ	ГВЦ	ТДЦ
1	30Г2	Закалка от 850°C, 40 мин, вода; отпуск 500°C, 80 мин	М	100,4	21,6	41,8
2	37Г2Ф	С прокатного нагрева (1280-1180°C) без ТО	Е	99,6	20,4	41,4
3	45	С прокатного нагрева (1280-1180°C) без ТО	Д	105,4	22,8	42,6
4	30Г2	Закалка 900°C, 50 мин, вода; отпуск 550°C, 60 мин	Л	101,0	20,8	39,6
5	37Г2С	С прокатного нагрева (1280-1180°C) без ТО	К	99,0	20,4	40,2

различия не наблюдалось. Наиболее равномерными цинковыми покрытиями оказались термодиффузионное и гальваническое. Максимальное отклонение от среднего значения толщины у ГЦ-покрытия составило 17,4%.

При проведении оценки прочности сцепления покрытия с основой методом нагрева ни на одном из трех образцов не было обнаружено вздутий и отслаивания покрытия, что свидетельствует о высокой адгезии всех исследованных покрытий с основой.

Результаты измерения микротвердости на поперечных шлифах образцов приведены в табл. 4. Показано, что более твердыми оказались термодиффузионные покрытия, так как в этом случае в нем наблюдается промежуточная фаза δ_1 состава FeZn_{10} , имеющая высокую твердость. Отметим, что внутри одной технологии нанесения цинкового покрытия его твердость для разного материала подложки практически не меняется [4].

Установлено, что цинковое покрытие, полученное по технологии ТДЦ, обладает повышенной износостойкостью в сравнении с гальваническим покрытием. После 30 циклов

свинчивания-развинчивания на муфте с термодиффузионным покрытием отмечается уменьшение натяга резьбы на 1,5 мм, с гальваническим – на 2,6 мм, с горячим – на 4,3 мм. При этом размер натяга резьбы на первых двух муфтах остался в пределах допуска, а результаты измерения последней превысили это значение. Осмотр резьбовой поверхности муфт показал, что на муфтах с ТДЦ и ГВЦ покрытиями имеются разрушения по вершинам резьбы на первых трех и восьми витках, соответственно. Остальные витки резьбы остаются без повреждений. На муфте с цинковым покрытием, полученным горячим способом, наблюдается полное разрушение покрытия на первых восьми витках и незначительные по вершинам резьбы на пятнадцати.

По результатам трибологических испытаний горячее покрытие на пути трения $L = 40 - 120$ м характеризуется существенно большими значениями износа ($\Delta m/L = (57,3 - 89,1) \cdot 10^{-3}$ мг/м и коэффициента трения ($f = 0,60 - 0,53$) по сравнению с покрытиями ГВЦ и ТДЦ (рис. 2). При увеличении пути трения до $L = 200$ и $L = 240$ м у образца, подвергнутого горячему цинкованию,

Таблица 4

Результаты измерения микротвердости цинковых покрытий

Материал		Группа прочности по ГОСТ 633-80	Микротвердость покрытия, $\text{HV}_{0,1}$		
Номер режима ТО	Марка стали		ГВЦ	ТДЦ	ГЦ
1	30Г2	М	43	408	56
2	37Г2Ф	Е	47	402	57
3	45	Д	48	389	58
4	30Г2	Л	48	413	58
5	37Г2С	К	47	392	57
Средние значения			47	401	57

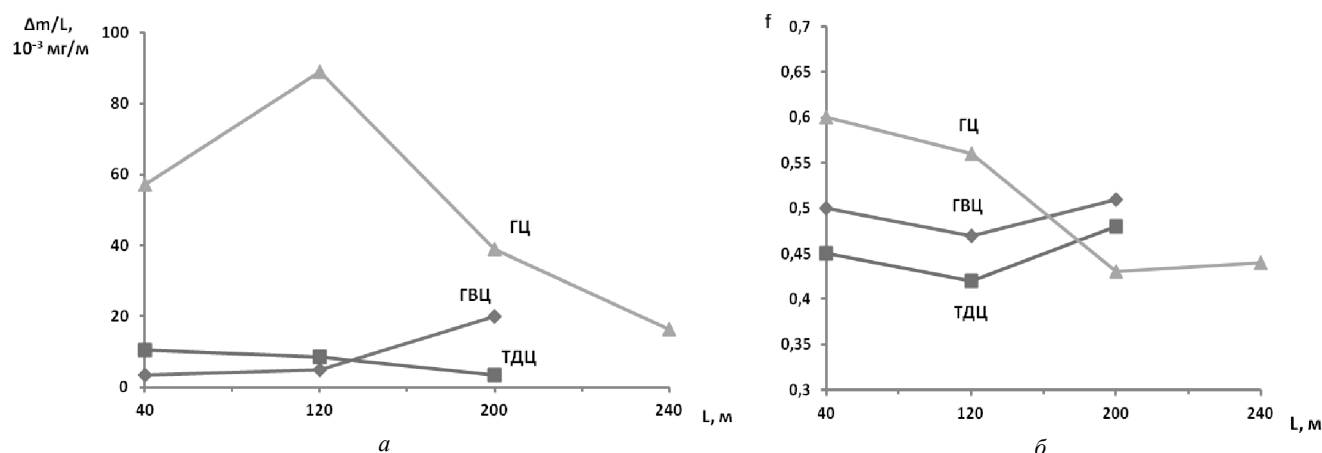


Рис. 2. Зависимости приведенного весового износа $\Delta m/L$ от пути трения L (а) и коэффициента трения f от пути трения L (б) при последовательных испытаниях на трение скольжения стали 30Г2 с цинковыми покрытиями

приведенный износ последовательно снижается до $\Delta m/L = 38,9 \cdot 10^{-3} \text{ мг/м}$ и $\Delta m/L = 16,3 \cdot 10^{-3} \text{ мг/м}$, а коэффициент трения уменьшается до $f = 0,43-0,44$. Это связано с изнашиванием в процессе испытания покрытия и влиянием на результаты трибологических испытаний материала основы, обладающего повышенной износостойкостью и меньшим коэффициентом трения, чем цинковое покрытие. В отличие от ГВЦ и ТДЦ покрытий ускоренный износ ГЦ-покрытия связан с присутствием в нем хрупкой ζ -фазы состава FeZn_{13} [5], что отражается на меньшей его сохранности при увеличении пути трения $L > 120 \text{ мм}$.

Выводы

Изучены свойства трех видов Zn-покрытий на трубных сталях 45, 30Г2, 37Г2Ф и 37Г2С разных групп прочности. Цинковые покрытия разной технологии нанесения имеют существенные различия по толщине, твердости и износостойкости. Однако значения этих показателей в рамках одной технологии нанесения Zn-покрытия практически не зависят от металла основы.

Горячее Zn-покрытие имеет наибольшую толщину ($\sim 100 \text{ мкм}$), но менее равномерное. Различий в адгезионных свойствах покрытий разной технологии нанесения не выявлено, степень сцепления с основой у всех исследованных покрытий оказалась высокой.

Твердость термодиффузионного цинкового покрытия оказалась почти на порядок выше, чем покрытий, полученных горячим и гальваническим способом, что обусловлено присутствием

в поверхностном слое твердой промежуточной фазы δ_1 .

По результатам испытаний износостойкости термодиффузионное цинковое покрытие показало наиболее высокие свойства: минимальное уменьшение натяга резьбы после 30 циклов свинчивания-развинчивания муфты, а также наименьший приведенный износ и повышенный коэффициент трения по результатам трибологических испытаний в условиях сухого трения скольжения при высоких значениях пути трения.

В целом, наиболее высокий комплекс механических свойств основы и эксплуатационных свойств покрытия показала сталь 30Г2, обработанная на группу прочности «Л» и прошедшая операцию термодиффузионного цинкования.

Список литературы

1. Проскуркин Е.В. Защитные покрытия – качество и долговечность труб // Национальная металлургия. – 2003. – № 5. – С. 86–96.
2. Чижов И.А., Березовская В.В. Управление качеством и стоимостью цинкового покрытия муфт насосно-компрессорных труб для добычи нефти. XXI Уральская школа металлургов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов». Материалы международной конференции. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. – 2012. – С. 100–101.
3. Чижов И.А., Пачколина П.А., Худорожкова Ю.В. Структура и свойства Zn-покрытий разной технологии нанесения на трубную сталь 30Г2 // XIII Международная научно-техническая уральская школа-семинар молодых ученых – металлургов:



Сборник научных трудов. Екатеринбург: УрФУ. – 2012. – С. 303–306.

4. Чижов И.А. Анализ технологии термодиффузионного цинкования муфт для НКТ на ОАО «ПНТЗ» // XI Международная научно-техническая уральская школа-семинар молодых ученых – металлургов: Сборник научных трудов. Екатеринбург: УрФУ. – 2010. – С. 237–239.

5. Чижов И.А., Пачколина П.А., Березовская В.В. Влияние технологии цинкования трубных сталей на структуру и свойства покрытий // Инновации в материаловедении и металлургии. Материалы II международной интерактивной научно-практической конференции. Екатеринбург: УрФУ. – 2012. – С. 106–109.

Evaluation of operational properties of zinc coating on couplings of tubing pipes

I.A. Chizhov, V.V. Berezovskaya,
A.V. Makarov, Y.V. Khudorozhkova

The application of protective coatings is one of the promising directions of prolonging the life of a threaded connection “pipe-coupling” of tubing pipes for oil production. The coating must have high operational properties. The aim of the research work was to compare the properties of zinc coatings, obtained by different methods, to estimate their reliability.

We have studied the operational properties of galvanic, thermo-diffusion and hot dip zinc coatings on steel 45, 30G2, 37G2F and 37G2S varying the strength group. Thickness, uniformity, micro hardness and wear resistance of the coatings were determined. All measurements of the coating properties were conducted in accordance with the requirements of actual standards and methods.

The research showed that zinc coatings of different application techniques had significant differences in studied parameters, but their values within the same technology were virtually independent of the base metal. The hot dip zinc coating had the largest thickness (~ 100 microns), but less uniform. No differences in the adhesive properties of zinc coatings of different application techniques were identified. For all coatings the degree of adhesion to the base metal was high. The thermo-diffusion coating had a significantly higher hardness compared to hot and galvanic ones due to the presence in it of intermediate phase δ_1 and it had the highest wear resistance.

Key words: a threaded connection “pipe-coupling”, zinc coating, adhesion, micro-hardness, wear resistance.