

Чигиринець О.Е.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мамренко О.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КОРОЗІЯ ТЕРМОДИFUЗІЙНОГО ЦИНКОВОГО ПОКРИТТЯ У ІМІТОВАНОМУ СІРКОВОДНЕВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

У статті розглянуто питання стійкості цинкового покриття на нелегованій Ст10, отриманого термохімічним дифузійним методом, у розчині NACE TM 0284-2016, насиченому сірководнем, що імітує корозійні процеси обладнання у нафтогазовидобувній промисловості. Зазначено, що нафтогазовидобувна промисловість є металоемною галуззю, що пов'язано із великою оборотністю металофонду, а отже вимагає певних рішень для його захисту від корозії. Традиційно основним видом корозійного руйнування в нафтогазовидобувній промисловості є вуглекислота корозія, яка протікає за впливу, головним чином, вуглекислого газу. Проте з кожним роком збільшується кількість свердловин, які забруднені мікроорганізмами, що додає до агресивних компонентів середовища ще й надзвичайно агресивний сірководень. Отже для зменшення витрат на обслуговування свердловин потрібні дієві способи захисту від корозії обладнання в умовах цього виробництва.

Широкий перелік методів захисту від корозії передбачає як перехід галузі на леговані сталі, так і інші методи, пов'язані з нанесенням покриттів на поверхню труб, що використовуються у нафтогазовидобувній промисловості. Проте, легований сортамент сталей має вищу вартість, що значно підвищує витрати на видобуток нафти та газу. Тому більш перспективним методом захисту від корозії є нанесення покриттів.

Показано, що серед великої кількості відомих методів захисту обладнання галузі цинкові покриття є одним із досить ефективних та менш високовартісних методів, що сприяє зменшенню витрат на заміну пошкодженого корозією металевого обладнання. Серед методів цинкування одним із перспективних є покриття, отримані хімотермічним способом в порошкових сумішах або термодифузійним методом, оскільки на відміну від інших вони мають найкращу адгезію до металевої поверхні в умовах високих швидкостей потоків рідин. Проаналізовано структуру та хімічний склад фаз, що складають структуру покриття, отриманого термодифузійним методом.

В роботі проведено оцінку стійкості металевих зразків Сталі 10 з цинковим термодифузійним покриттям до сірководневого окрихчення. Для випробувань зібрана установка, що дозволяє моделювати корозійні процеси в умовах нафтогазовидобувної промисловості із забрудненням сірководнем. Встановлено, що в розчині NACE TM 0284-2016 з насиченням сірководнем один із п'яти досліджених зразків сталі 10 без покриття після випробувань мав тріщину, що свідчить про високу вірогідність руйнування нелегованих сталей в умовах нафтогазовидобутку зі свердловин із сірководнем. Проте зразки з нанесеним термодифузійним методом цинкового покриття в цих умовах після 288 годин випробувань не мали ознак появи тріщин, що свідчить про підвищену стійкість цинкового покриття до сірководневого окрихчення. Дослідження металографічних шліфів зразків показали, що цинкове покриття протягом терміну прискорених випробувань в умовах сірководневого середовища схильне до хімічного розчинення зі зменшенням товщини покриття. Отримані дані свідчать про необхідність пошук шляхів підвищення стійкості цинкового шару шляхом отримання комбінованих покриттів.

Ключові слова: корозія, випробування, модельне середовище, цинкове термодифузійне покриття, сірководневе окрихчення.

Постановка проблеми. Під час видобування та транспортування нафти та газу використовуювані труби експлуатуються в основному в умовах впливу соляних розчинів, насичених вуглекислим газом та/або сірководнем, які при розчиненні утворюють відповідно вугільну та сірководневу кислоти. Тому металеві труби в таких агресивних умовах піддаються значному корозійному впливу, що впливає на термін їх експлуатації [1]. В Україні є позитивний досвід використання труб з термодифузійним цинковим покриттям в нафтогазовидобувній промисловості, який показав, що труби з таким цинковим покриттям досить успішно експлуатувалися протягом тривалого часу [2]. Причому зазначалося, що труби експлуатувалися в свердловинах, насичених переважно вуглекислим газом. Проте досвід експлуатації свердловин в інших країнах, де відбулося їх бактеріологічне забруднення, при якому продуктами життєдіяльності бактерій є сірководень, показав, що обладнання зазнає значних корозійних ушкоджень. Так, на Близькому Сході чимало родовищ нафти та природного газу багатих на сірководень, що класифікуються як «ультракислий газ», оскільки містить його понад 20%. Родовища кислого та ультракислого газу становлять понад 40% світових запасів природного газу і здебільшого зосереджені на Близькому Сході [3].

Сірководень є одним із найбільш агресивних корозійних агентів у нафтогазовій галузі. Він викликає сульфідне корозійне розтріскування під напругою, а також призводить до водневого окрихчення металу, що робить його крихким і схильним до тріщин [3]. Однак досвіду використання та широких досліджень стійкості термодифузійного цинкового покриття в умовах підвищеного вмісту сірководню дуже мало. Тому важливим питанням є визначення рівня протикорозійної стійкості та механізму захисту сталі обсадних, насосно-компресорних труб тощо з термодифузійним цинковим покриттям в умовах видобутку нафти та газу із сірководнем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Термодифузійне цинкове покриття (ТДЦП), яке отримується в порошкових сумішах, тривалий проміжок часу є одним із найбільш ефективних та економічно вигідних методів підвищення корозійної стійкості обладнання у різних галузях промисловості, де метал експлуатується у високо агресивних умовах. До таких галузей відносять нафтогазовидобувну промисловість, яка є металомісткою і потребує використання стійких металів та сплавів [3]. Звичайні нелеговані сталі не

можуть витримати високо агресивні умови експлуатації. Леговані сталі є досить високовартісними, тому їх останнім часом використовують все менше. Більша увага науковців спрямована на випуск сталей з покриттями, що дозволяє підвищити їх ресурс використання та здешевлює їх виробництво.

Серед великого різноманіття покриттів, які можуть бути реалізовані шляхом нанесення на поверхню сталі, заслуговують на увагу перш за все термодифузійні покриття, оскільки більшість органічних та неорганічних покриттів, нанесених на поверхню сталі, не витримують умов високих швидкостей потоків технологічних рідин. При нанесенні термодифузійних металевих покриттів метали здатні впроваджуватися у поверхневі шари металу на глибину до 20–50 мкм, що забезпечує значний рівень адгезійної міцності.

Серед металевих термодифузійних покриттів найбільшого використання здобули цинкові покриття завдяки своїй відносно низькій вартості самого матеріалу цинку, а також температурному режиму його нанесення, який сягає не вище 430–450°C, що є енергетично більш вигідним, ніж наприклад хромові покриття, де температурні режими для їх отримання сягають 1000°C і вище.

Дифузійні цинкові покриття не схильні до старіння, вони мають високу твердість, зносостійкість, а дифузійний зв'язок забезпечує високий ступінь зчеплення з поверхнею виробу. Однією з ключових відмінностей термодифузійного цинкового покриття від інших методів є формування на межі розділу «сталь-цинк» інтерметалідних фаз заліза та цинку (Fe-Zn сплавів) [4]. Ці фази мають високу твердість і хорошу адгезію до основного металу, що забезпечує чудову зносостійкість і довговічність покриття. Перевагою таких термодифузійних покриттів є можливість нанесення їх як на внутрішню, так і зовнішню поверхню труб, які використовуються при видобуванні нафти та газу. Рівномірність покриття дозволяє наносити його на складні поверхні, в тому числі на різьбові з'єднання, муфтові частини тощо [2]. Високий ступінь адгезії дозволяє витримувати абразивне зношування та кавітаційні руйнування.

Анодний механізм захисту цинкових покриття дозволяє ефективно боротися з різними видами корозії, в тому числі вуглекислотною, піттинговою та мікробіологічною корозією. Тому навіть за наявності незначних пошкоджень у покритті, цинк може продовжувати захищати сталь. Оскільки у термодифузійних покриттях склад поверхневих

шарів на сталі відрізняється від чистого цинку, тому ці покриття в різних корозійних середовищах будуть мати іншу поведінку.

На сьогодні вже відомі більш удосконалені процеси нанесення термодифузійного покриття, наприклад з рециркуляцією реактивної атмосфери, що є новим підходом у технологіях цинкування [5]. Ефективність нанесення підвищується за рахунок обертового руху реторти, в якій забезпечується постійний контакт поверхні оброблюваних виробів з активною порошковою сумішшю. Остання складається з цинкового порошку ZnO як наповнювача та NH_4Cl як активатора. Під час нагрівання порошкової суміші в реторті утворюються газоподібні продукти реакції, які рухаються до поверхонь, що покриваються [5]. Проте хімічні реакції, які при цьому відбуваються, принципово не змінні.

Опубліковані результати досліджень хімічного складу термодифузійних цинкових покриттів свідчать, що це покриття складається з декількох послідовно розташованих інтерметалідних фаз, які мають різний хімічний склад та фізико-механічні властивості [5–7]. Зростання шару розглядають як зростаючу зону дифузії бінарної дифузійної пари цинк/залізо, яка складається з усіх хімічних фаз, притаманних цій парі [5].

Зовнішній шар покриття складається в основному з чистого цинку, а саме η -фази. При тривалій витримці процесу нанесення покриття за умов високих температур, цей шар може бути дуже тонким або навіть відсутнім, оскільки весь цинк прагне дифундувати вглиб сталі. Оскільки це практично чистий цинк, то цей шар, як правило, є пластичним та має відносно низьку твердість в порівнянні з іншими інтерметалідними фазами, що утворюються в таких покриттях [5–7].

Під η -фазою формується ζ -фаза, хімічний склад якої відповідає $FeZn_{13}$. Ця інтерметалідна фаза досить багата на цинк. При знаходженні на поверхні забезпечує високий рівень корозійної стійкості [6].

Наступною фазою, яка розташовується під ζ -фазою, є $\delta 1$ -фаза ($FeZn_7 - FeZn_{12}$ або Fe_3Zn_{10}). Це одна з найбільш важливих фаз термодифузійних покриттів, оскільки характеризується високою твердістю, що забезпечує відмінну зносостійкість

та гарну адгезію до сталі. Містить значно більше заліза ніж ζ -фаза. Саме ця фаза багато в чому визначає захисні властивості термодифузійних покриттів. Може мати стовпчасту або стовпчасто-кристалічну структуру [5–7].

Ближче до металевої основи під час нанесення термодифузійного покриття формується $\Gamma 1$ -фаза (Fe_5Zn_{21} або $FeZn_3$), яка має високу твердість та містить ще більше заліза в порівнянні з δ -фазою. Зазвичай знаходиться між $\delta 1$ -фазою та Γ -фазою. Γ -фаза (Fe_3Zn_{10} або $Fe_{11}Zn_{40}$) – це найбагатша залізом інтерметалідна фаза, розташована безпосередньо на кордоні з металевою основою. Має максимальну твердість серед усіх фаз покриття та забезпечує дуже міцне зчеплення покриття з основою, запобігаючи відшаровуванню.

Завершує формування термодифузійного покриття α -фаза або твердий розчин цинку у залізі.

Постановка завдання. Метою статті є проведення тестування сталі обсадних труб без та з термодифузійним цинковим покриттям на стійкість до сірководневого окрихчення в імітованому середовищі сірководню.

Виклад основного матеріалу. Методика експериментальних досліджень. Для досліджень були підготовлені сталеві зразки розміром $100 \times 20 \times 10$ мм із сталі марки 10. Хімічний склад сталі 10 представлений в таблиці 1. Поверхню зразків піддавали піскоструминній обробці, після чого всі зразки знежирювалися при $80^\circ C$ в розчині 10% $NaOH$ протягом 30 хвилин та ретельно промивалися проточною водою.

Для нанесення термодифузійного цинкового покриття використовували суміш, яка складалася з високочистого дрібнодисперсного порошку цинку (80%), піску (19%) та амоній хлориду (1%). Амоній хлорид в суміші виконує роль активатора термодифузійного процесу, оскільки дозволяє руйнувати оксидні плівки на поверхні як цинку, так і сталі, що полегшує вивільнення атомів цинку та процес їх дифузійного проникнення в поверхневі шари сталі.

Після закриття ємності зі зразками та цинковою сумішшю протягом години через спеціальний вхідний отвір ємності пропускали інертний газ (азот 99,96%) для витіснення кисню з внутрішнього об'єму. Заповнену реакційною сумішшю

Таблиця 1

Хімічний склад сталі 10

Хімічний елемент	Концентрація, %										
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	Ti
	0,15	0,52	0,31	0,016	0,026	0,07	0,10	0,08	0,054	0,01	0,008

ємність зі зразками поміщали в муфельну піч з можливістю періодичного перевертання ємності для запобігання злипанню зразків і забезпечення рівномірного нанесення покриття на поверхню кожного зразка. Процес нанесення покриття проводили при температурі 430°C впродовж 4 годин.

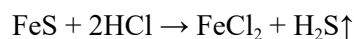
Для оцінки захисних властивостей ТДЦП на стійкість до корозійного розтріскування в присутності сірководню була зібрана установка відповідно до вимог стандарту NACE TM 0284-2016. Схема установки представлена на рис. 1.

Зразки без покриття (зразки-свідки) та зразки з ТДЦП розміщували у випробувальну ємність (ексикатор).

Відповідно до вимог стандарту NACE TM 0284-2016 для випробувань використовували розчин на основі дистильованої води, що містив 5% натрій хлориду та 0,5% оцтової кислоти. Об'єм експериментального розчину розраховували згідно з NACE TM 0284-2016, яким передбачено співвідношення не менше ніж 30 мл розчину на 1 см² поверхні зразків, що тестуються. Для видалення повітря з тестувального розчину попередньо його барботували інертним газом (азотом) впродовж однієї години. Після розташування зразків за допомогою трубок подачі газу готовий розчин заливали в герметичний ексикатор. Для видалення залишків кисню розчин зі зразками повторно барботували інертним газом впродовж години.

Початок експерименту передбачав барботаж розчину сірководнем. Для отримання сірководню в лабораторних умовах використовували апарат

Кіппа об'ємом 1 л. У верхню сферичну частину заливали рідкий реагент, який являв собою розчин 20% хлоридної кислоти. У середню сферичну або конусоподібну частину (робочу камеру) завантажували сульфід заліза FeS в кількості 200 грам. Після потрапляння розчину кислоти в камеру з сульфідом розпочиналася хімічна реакція з виділенням сірководню:



Після початку цієї хімічної реакції газовий потік сірководню спрямовували через розчин. За допомогою регулювального крана встановлювали стаціонарну швидкість потоку сірководню через розчин, що становила мінімально 8–10 бульбашок на хвилину. Такий потік газоподібного сірководню забезпечував насиченість розчину впродовж випробувань та запобігав потраплянню кисню в розчин. Забруднення розчину киснем в умовах експерименту не допускали, оскільки це сприяє різкому збільшенню швидкості корозії, що змінює механізм процесу за рахунок зменшення кількості виділеного газоподібного водню.

За вимогами NACE TM 0284-2016 термін випробувань зразків в розчині повинен становити не менше ніж 96 годин. Термін експозиції експериментальних зразків складав 96, 192 та 288 годин. Протягом періоду випробувань температуру розчину тестування підтримували в інтервалі 25±3°C.

Кожен зразок з термодифузійним покриттям до та після експозиції в розчині на основі натрій хлориду та оцтової кислоти, насиченому сірковод-

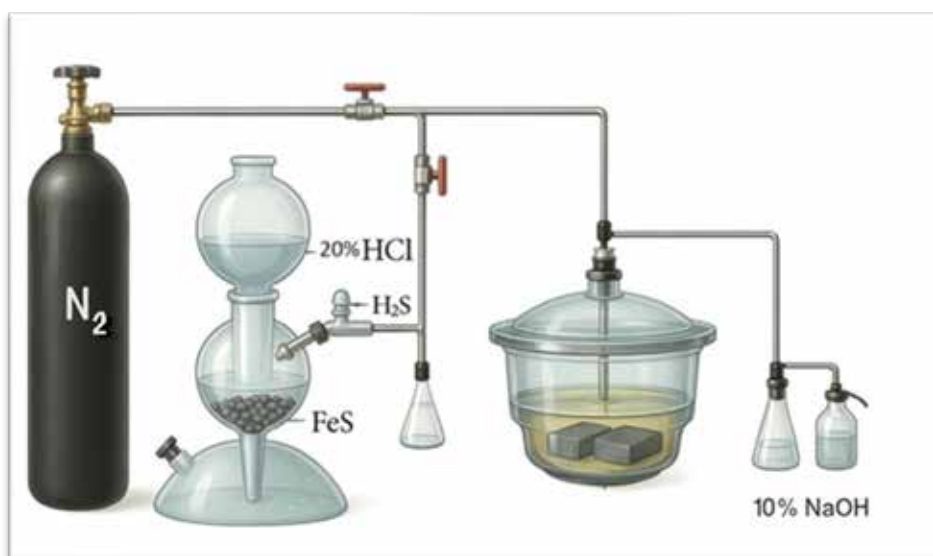


Рис. 1. Схема установки для випробувань на сірководнєве окрихнення

нем, був порізаний на фрагменти. Таким чином досліджувався поперековий зріз сталі із ТДЦП.

Після розрізання зразків на декілька частин, бокові поверхні сталевих зразків піддавали шліфуванню за традиційними методиками та проводили оцінку товщини термодифузійного шару цинкового покриття. Мікроструктуру зразків досліджували до та після травлення в 5% розчині нітратної кислоти. Фотографії поперекового зрізу зразків отримані на мікроскопі Nikon Eclipse MA100 з модуль-камерою.

Результати досліджень та їх аналіз. В перші години експерименту відмічали появу помутніння, рН розчину при цьому становив 3,8, що свідчить про утворення нерозчинних сполук цинка, які осіли після доби випробувань у вигляді осаду. рН розчину за цей час змінився і досягнув значення 4 одиниць. Зі збільшенням часу випробувань рН розчину збільшувався і після 96 годин випробувань становив 5 одиниць, що перевищувало рекомендоване стандартом NACE TM 0284-2016 значення 4.0. Зростання рН, ймовірно, пов'язано з декількома причинами. По-перше, обидві реакції катодного відновлення O_2 та H_2O призводять до утворення іонів OH^- . По-друге, підвищенню рН розчину сприятиме також гідроліз продуктів корозії із сірководнем, а саме ZnS та Zn^{2+} з подальшим утворенням гідроксиду цинку.

Вивчення поверхонь досліджених зразків показало, що тільки у одного зразка-свідка з п'яти паралельних, який не мав захисного покриття, виявлено тріщину водневого розтріскування (фото зразка з тріщиною показано на рис. 2).

Аналіз фото поверхні зразка показав, що внаслідок прискорених випробувань на сталі утвори-

лася одна велика тріщина довжиною 1006,5 мкм та декілька тріщин меншого розміру від 45,1 до 133,8 мкм. Ці тріщини утворилися внаслідок створення внутрішніх напружень за рахунок насичення металу воднем, що виділяється під час процесу корозії з водневою деполяризацією. Наявний в розчині сірководень є додатковим деполяризатором, що сприяє прискоренню виділення водню.

Аналіз зразків, на поверхню яких було нанесено цинкове термодифузійне покриття, показав, що на жодному з них тріщини були відсутні.

Мікроструктура дослідженого зразка з термодифузійним покриттям до випробувань представлена на рис. 3.

Аналіз фото свідчить, що найбільша загальна товщина покриття досягає 156 мкм. Цинкове покриття складається з трьох шарів. Зовнішній шар покриття відповідає ймовірно ζ -фазі, яка максимально збагачена цинком. Всередині покриття сформований більш тонкий за товщиною шар з іншою більш щільною структурою, що чітко видно на фото. Вірогідно це δ -фаза, яка відіграє важливу роль у покритті як фаза з підвищеною твердістю. З отриманого фото неможливо виділити окремо δ 1-фазу. Останній шар, що найбільш наближений до поверхні сталі, є Γ -фазою з товщиною не менше 40 мкм.

Дослідження стану цинкового термодифузійного покриття, нанесеного на сталеві зразки Ст10 після випробувань у розчині NACE TM 0284-2016, насиченому сірководнем, показало наступні результати. Як видно з наведених фото зразків після випробувань протягом 96, 192 та 288 годин (рис. 3, а-г), зі збільшенням часу знаходження зразків у випробувальному середовищі спостерігається зменшення загальної товщини покриття з 156 мкм до 37 мкм. Це свідчить про те, що верхні шари цинкового покриття, що містили ζ - та δ -фази, майже повністю розчинилися в досліджуваному сірководневому водному середовищі.

Отримані результати, свідчать, що в умовах середовища, насиченому сірководнем, термодифузійні покриття мають недостатню стійкість за рахунок високої швидкості розчинення поверхневої ζ -фази, насиченої цинком. В таких умовах атоми цинку досить швидко розчиняються. Зовнішній вигляд зразків свідчить про виразковий характер корозії. Тому для підвищення стійкості цинкового термодифузійного покриття в умовах високонасичених сірководнем середовищах необхідна розробка нових більш складних комбінованих покриттів.

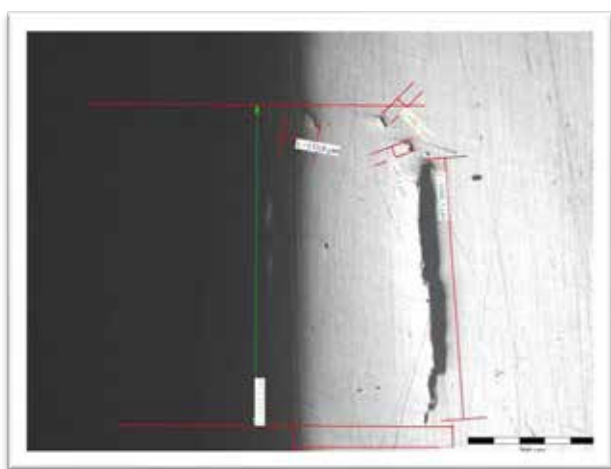


Рис. 2. Фото поверхні зразка Ст10 з тріщиною водневого розтріскування після випробувань у розчині NACE, насиченому сірководнем (x500)

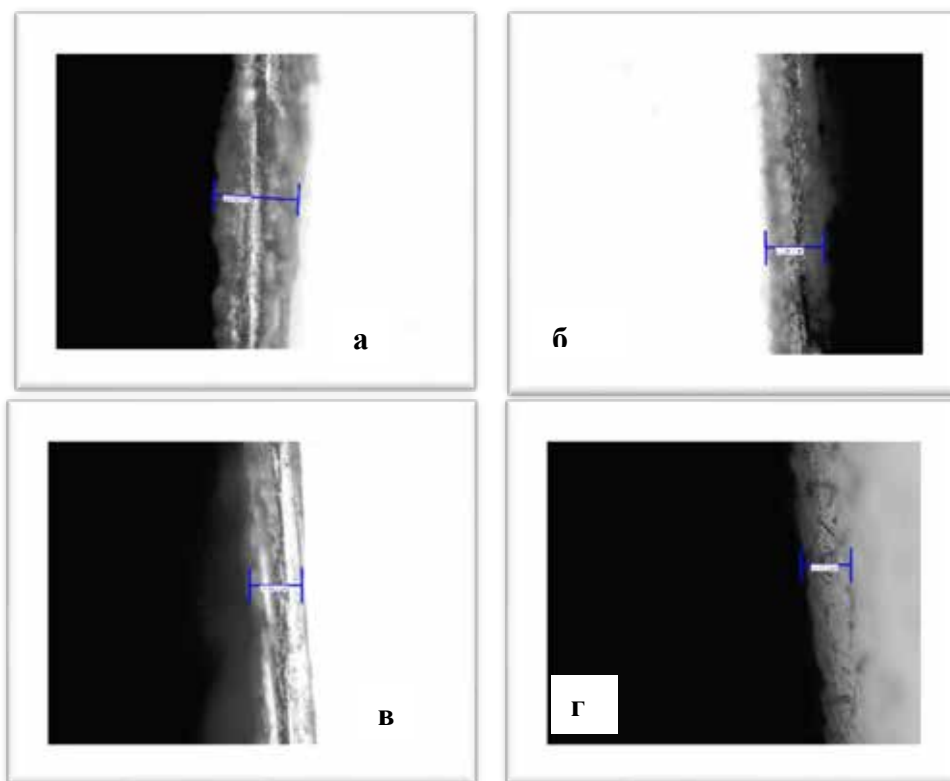


Рис. 3. Товщина ТДЦП на сталі 10 до випробувань (а) та після 96 (б), 192 (в) і 288 (г) годин експозиції в середовищі NACE, насиченому сірководнем (x500)

Висновки. На підставі отриманих даних можна стверджувати, що термодифузійні цинкові покриття, отримані в порошкових сумішах, зменшують ризик появи тріщин водневого окрихчення на низьковуглецевих сталях. В умовах випробувань у середовищі NACE TM 0284-2016, насиченому сірководнем, термодифузійні цинкові покриття, нанесені на сталь 10, піддавалися досить швидкому розчиненню. Металографічний аналіз залишків цинкового шару після проведення

випробувань показав, що з часом експозиції в розчині істотно зменшується товщина поверхневого шару ζ -фази. Після випробувань протягом 96, 192 та 288 годин загальна товщина шару термодифузійного покриття знизилась зі 156 мкм до 37 мкм після 288 годин експозиції.

Для підвищення стійкості термодифузійного цинкового покриття в умовах середовищ, насичених сірководнем, рекомендовано використання комбінованих цинкових покриттів.

Список літератури:

1. Zhao W., Zhang T., Wang Y., Qiao J., Wang Z. Corrosion failure mechanism of associated gas transmission pipeline. *Materials*. 2018. Vol. 11, No. 10. Art. 1935. DOI: 10.3390/ma11101935.
2. Pinchuk S., Galchenko G., Simonov A., Masakovskaya L., Roslyk I. Complex corrosion protection of tubing in gas wells. *Chem. Chem. Technol.* 2018. Vol. 12, No. 4. P. 529–532. DOI: 10.23939/chcht12.04.529.
3. Madan A. Al., Hussein A., Akhtar S. S. A review on internal corrosion of pipelines in the oil and gas industry due to hydrogen sulfide and the role of coatings as a solution. *Corros Rev.* 2025. Vol. 43, No. 2. P. 189–208. DOI: 10.1515/correv-2024-0114.
4. Pistofidis N., Vourlias G., Chaliampalias D., Chrysafis K., Stergioudis G., Polychroniadis E.K. On the mechanism of formation of zinc pack coatings. *Journal of Alloys and Compounds*. 2006. Vol. 407, No. 1-2. P. 221–225. DOI: 10.1016/j.jallcom.2005.06.039.
5. Kania H., Sipa J. Microstructure Characterization and Corrosion Resistance of Zinc Coating Obtained on High-Strength Grade 10.9 Bolts Using a New Thermal Diffusion Process. *Materials*. 2019. Vol. 12, No. 9. Art. 1400. DOI: 10.3390/ma12091400.
6. Natrup F., Graf W. Sherardizing: corrosion protection of steels by zinc diffusion coatings. In: *Thermochemical Surface Engineering of Steels: Improving Materials Performance* / Eric J. Mittemeijer, Marcel A.J. Somers. 2015. P. 737–750. DOI: 10.1533/9780857096524.5.737.

7. Gao H., Li X., Feng W., Peng D. Numerical Modeling of Zinc Diffusion During Sherardizing Process. *J. Phase Equilib. Diffus.* 2018. Vol. 39, No. 2. P. 237–245. DOI: 10.1007/s11669-018-0626-3.

Chyhyrynets O.E., Mamrenko O.S. CORROSION OF THERMODIFFUSION ZINC COATING IN A SIMULATED HYDROGEN SULFIDE ENVIRONMENT

The article considers the stability of zinc coating on unalloyed St10, obtained by thermochemical diffusion method, in NACE TM 0284-2016 solution saturated with hydrogen sulfide, which simulates corrosion processes of equipment in the oil and gas industry. It is noted that the oil and gas industry is a metal-intensive industry, which is associated with a high turnover of metal stock, and therefore requires certain solutions for its protection against corrosion. Traditionally, the main type of corrosion destruction in the oil and gas industry is carbon dioxide corrosion, which occurs under the influence, mainly, of carbon dioxide. However, the number of wells contaminated with microorganisms is increasing every year, which adds to the aggressive components of the environment also extremely aggressive hydrogen sulfide. Therefore, to reduce the costs of well maintenance, effective methods of protecting equipment from corrosion in the conditions of this production are needed.

A wide range of corrosion protection methods involves both the transition of the industry to alloyed steels and other methods related to the application of coatings to the surface of pipes used in the oil and gas industry. However, the alloyed range of steels has a higher cost, which significantly increases the costs of oil and gas production. Therefore, the most widely used method of corrosion protection is coating.

It is shown that among the large number of known methods of protecting industry equipment, zinc coatings are one of the most effective and less expensive methods, which helps reduce the cost of replacing metal equipment damaged by corrosion. Among the galvanizing methods, one of the most promising are coatings obtained by the chemical-thermal method in powder mixtures or by the thermal diffusion method, since, unlike others, they have the best adhesion to the metal surface under conditions of high fluid flow rates. The structure and chemical composition of the phases that make up the structure of the coating obtained by the thermal diffusion method have been analyzed.

The work assessed the resistance of metal samples of Steel 10 with zinc thermal diffusion coating to hydrogen sulfide embrittlement. A setup was assembled for testing that allows modeling corrosion processes in the conditions of the oil and gas industry with hydrogen sulfide contamination. It was found that in the NACE TM 0284-2016 solution saturated with hydrogen sulfide, one of the five tested samples of Steel 10 without coating had a crack after testing, which indicates a high probability of unalloyed steels destruction of in the conditions of oil and gas production from wells with hydrogen sulfide. However, samples with zinc coating applied by the thermal diffusion method under these conditions after 288 hours of testing did not have signs of cracks, which indicates an increased resistance of the zinc coating to hydrogen sulfide embrittlement. Studies of metallographic sections of samples showed that the zinc coating during the accelerated tests in hydrogen sulfide environments is prone to chemical dissolution with a decrease in the thickness of the coating. The obtained data indicates the need to find ways to increase the stability of the zinc layer by obtaining combined coatings.

Key words: corrosion, testing, model environment, zinc thermal diffusion coating, hydrogen sulfide embrittlement.

Дата надходження статті: 28.07.2025

Дата прийняття статті: 02.09.2025

Опубліковано: 27.10.2025