

УДК 621.774:620.197

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.010721.7.777

ГЛАДКІ ТА НАРІЗНІ ТРУБИ НАФТОГАЗОВОГО СОРТАМЕНТУ ПІДВИЩЕНОЇ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ

БОЛЬШАКОВ В. І.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
 ДЕРГАЧ Т. О.^{2*}, *докт. техн. наук, провід. наук. співроб.*,
 СУХОМЛИН Д. А.³, *канд. хім. наук, доц.*

¹ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. + 38 (056) 745-23-72, e-mail: postmaster@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-2624-4666

^{2*} Лабораторія експериментальних наукових досліджень, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. + 38 (095) 256-67-41, e-mail: ta_dergach@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-0235-5342

³ Кафедра фізичної хімії, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (099) 248-99-01, e-mail: sukhomlyndmitrii@gmail.com

Анотація. *Постановка проблеми.* Корозія труб, які експлуатуються в нафтогазодобувній галузі, спричинює значні економічні збитки, тому підвищення корозійної стійкості та довговічності труб нафтогазового сортаменту – актуальне завдання. **Мета роботи:** узагальнення результатів розроблення технологій виготовлення і досліджень якісних характеристик нафтогазопровідних (гладких) і насосно-компресорних (нарізних) труб підвищеної та високої корозійної стійкості й надання рекомендацій з їх раціонального застосування в нафтогазодобувній галузі в середовищах різної корозійної активності. **Методика.** Мікроструктуру трубних сталей і захисних покриттів досліджували методами світлової металографії та електронної мікроскопії. Комплексні корозійні дослідження включали: лабораторні випробування зразків у модельних хлорид- і сірководень умісних середовищах та на стійкість проти сульфідного корозійного розтріскування під напруженням (СКРН) і проти водневого розтріскування (ВР) за методиками NACE TM 0177 і NACE TM 0284, відповідно, а також експлуатаційні випробування на нафтопромислах України. Механічні властивості труб випробували на розтяг і на ударний вигин зразків стандартними методами. **Результати досліджень.** Узагальнено результати розроблення технологій виробництва і досліджень якісних характеристик нафтогазопровідних і насосно-компресорних труб (НКТ) із низьколегованих і високолегованих сталей, а також НКТ із захисними покриттями, у середовищах, притаманних нафтогазодобувній галузі. Показано вплив хімічного складу сталей і захисного покриття, а також технологій виготовлення труб на їх мікроструктуру, корозійну стійкість і механічні властивості. **Наукова новизна.** Встановлено наявність спеціальних низькоенергетичних границь у фериті низьколегованих ферито-перлітних і високолегованих феритно-аустенітних сталей, оцінено їх кількість, енергетичний рівень і вплив на корозійну стійкість труб. Обґрунтовано високу експлуатаційну надійність нарізних труб із захисним покриттям. **Практична значимість.** Результати роботи і рекомендації з раціонального використання труб нафтогазового сортаменту підвищеної і високої корозійної стійкості можуть бути застосовані для підвищення економічної ефективності виробництва у нафтогазодобувній галузі.

Ключові слова: *труби нафтогазопровідні і насосно-компресорні; низьколеговані та високолеговані сталі; термодифузійне залізоцинкове та дуплексні покриття; мікроструктура; корозійна стійкість; механічні властивості*

SMOOTH AND REDUCED OIL AND GAS PIPES WITH INCREASED CORROSION RESISTANCE

BOLSHAKOV V.I.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
 DERHACH T.O.^{2*}, *Dr. Sc. (Tech.), Sen. Res.*,
 SUKHOMLYN D.A.³, *Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Materials Science, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. + 38 (056) 745-23-72, e-mail: postmaster@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-2624-4666

^{2*} Experimental Research Laboratory, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. + 38 (050) 867-30-97, e-mail: ta_dergach@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-0235-5342

³ Department of Physical Chemistry, State Higher Education Institution “Ukrainian State Chemical Engineering University”, 8, Haharina Ave., 49005, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (099) 248-99-01, e-mail: sukhomlyndmitrij@gmail.com

Abstract. Formulation of the problem. Corrosion of pipes used in the oil and gas industry leads to significant economic losses, therefore, increasing their corrosion resistance and durability is an urgent task. **Purpose:** generalization of results of developments of technologies of manufacturing and research of qualitative characteristics of oil and gas pipelines (smooth) and pump-compressor (threaded) pipes of the increased and high corrosion resistance and giving recommendations on their application in oil and gas industry in environments of various corrosion aggressiveness. **Methodology.** The microstructure of tubular steels and protective coatings was studied by light metallography and electron microscopy. Complex corrosion studies included laboratory tests of samples in model chloride and hydrogen sulfide-containing media, the resistance to sulfide corrosion cracking under stress (SCCS) and hydrogen cracking (HC) according to the methods of NACE TM 0177 and NACE TM 0284 as well as operational tests at the oil fields of Ukraine. Mechanical properties for stretching and impact bending of samples by standard methods. **Results.** The results of the development of production technologies and the study of the qualitative characteristics of oil and gas pipelines and tubing with increased and high corrosion resistance in aggressive oil and gas production environments are summarized. The influence of the chemical composition of steels and protective coatings, as well as pipe manufacturing technologies on their microstructure, corrosion resistance in various media, and mechanical properties is shown. **Scientific novelty.** For the first time, the presence of special low-energy boundaries in the ferrite of low-alloy ferrite-pearlite and high-alloy ferritic-austenitic steels was established, their number and energy level were estimated. The high operational reliability of threaded pipes with a protective coating is substantiated. **Practical value.** The results of the work and recommendations for the rational use of oil and gas pipes with increased corrosion resistance can be used to increase the economic efficiency of production in the oil and gas industry.

Keywords: oil and gas pipes and tubing; low-alloy and high-alloy steels; thermal diffusion iron-zinc and duplex coatings; microstructure; corrosion resistance; mechanical properties

Вступ

Одна з основних причин виходу з ладу труб та іншого обладнання, яке експлуатується в нафтогазодобувній галузі, – це корозія металу, зумовлена наявністю у пластових водах і продукції свердловин, які їх оточують, гетерогенної рідини і корозивно активних компонентів: хлоридів, вуглекислого газу, сірководню [1–10]. Корозія суттєво скорочує термін використання обладнання (у середовищах із підвищеною корозійною активністю труби й обладнання виходять із ладу, як правило, протягом одного року, а іноді – 2...3 місяців [8]), призводить до аварій на нафтогазопромислах, спричинює значні економічні збитки і забруднює довкілля [1–3; 9–13].

Найбільш схильні до корозії насосно-компресорні труби (НКТ), оскільки в процесі експлуатації перебувають у найскладніших умовах. Підсиленню корозії високоміцних НКТ, які експлуатуються у глибоких свердловинах, сприяє утворення в металі великих макро- і мікронапружень, при цьому переважна більшість руйнувань відбувається по різьбленнях [11–17].

Аналіз літератури показує, що залежно від агресивності середовища у свердловині економічно доцільним постає використання труб підвищеної і високої корозійної стійкості, виготовлених із низьколегованих сталей, що містять до 2 % Cr, із нержавіючих високохромистих, хромонікелевих і хромонікельмолібденових сталей і сплавів [3–10], а також із захисними антикорозійними покриттями [11–19]. За наявними даними, добавка в сталь 1...2 % Cr підвищує корозійну стійкість і термін експлуатації труб у вуглекислотних середовищах в 2...4 рази [5–10].

На стійкість труб проти сульфідного корозійного розтріскування під напруженням (СКРН) у середовищах, що містять сірководень, позитивно впливає введення в сталь хрому, молібдену, титану, ніобію мікродобавок, які формують дисперсні карбіди, подрібнюють зерно і зменшують абсорбцію водню. Тому для підвищення стійкості проти СКРН у низці випадків доцільно використовувати труби з низьколегованих чистих за домішками сталей після відповідної термічної або термомеханічної обробки [8; 9]. У середовищах із підвищеним умістом

(до 4...6 %) хлоридів і парціальним тиском вуглекислого газу до 30 МПа за температури до 150 °С досить корозійностійкими виявились труби з високохромистих мартенситних сталей з 9...12 % Cr [5; 7].

Зі збільшенням вмісту в середовищі іонів хлору, особливо в умовах високих температур і тиску CO₂, у цих сталях починає активно розвиватися пітингова корозія. В таких умовах більш корозійностійкі труби з феритно-аустенітних (дуплексних) сталей, а на родовищах, які містять сірководень і вуглекислий газ за парціального тиску до 30 МПа кожного і температури до 200 °С, – НКТ з аустенітних Cr – Ni – Mo сплавів.

Один з ефективних шляхів підвищення експлуатаційної надійності труб із нарізними кінцями, зокрема, НКТ, – це застосування антикорозійних покриттів, здатних забезпечувати різьбленню і різьбовому з'єднанню високу корозійну та ерозійну стійкість, зносостійкість і герметичність у процесі експлуатації. Аналіз літератури показав перевагу термодифузійних залізоцинкових покриттів, отриманих у порошкових сумішах, оскільки вони мають підвищену стійкість проти корозійно-ерозійного впливу агресивного водного середовища завдяки відповідній структурі, підвищеній твердості та іншим особливим властивостям [3; 11–17].

Останнім часом розпочато розроблення покриттів нового покоління, які являють собою дуплексну систему, – комбінацію металевого покриття (з цинку, цинк-алюмінієвого або залізоцинкового сплаву) з нанесеним на нього органічним покриттям, що завдяки синергічній дії забезпечує оптимальні протикорозійні властивості сталевому виробу в агресивних середовищах [18; 19]. Отже, надійність і довговічність обладнання на родовищах нафти і газу визначається раціональним вибором конструкційних матеріалів і технологій їх виготовлення.

Мета роботи – узагальнення результатів розроблення технологій виготовлення і дослідження якісних характеристик

нафтогазопровідних (гладких) і насосно-компресорних (нарізних) труб підвищеної і високої корозійної стійкості та надання рекомендацій з їх раціонального застосування в нафтогазодобувній галузі в середовищах різної корозійної активності.

Матеріали і методи досліджень

Досліджували: нафтогазопровідні труби з низьколегованої сталі 06X1-Y хімічного складу (%): Cr 1,1...1,3; C ≤ 0,06; Mn ≤ 0,6; S ≤ 0,010; P ≤ 0,020; Nb 0,025 [20–22]; насосно-компресорні (нарізні) труби (НКТ) з високолегованих мартенситної (20X13), феритно-аустенітних (03X24H6AM3 і 02X22H5AM3) сталей та з аустенітного хромонікельмолібденового сплаву, а також із захисними антикорозійними покриттями – термодифузійним залізоцинковим і дуплексними (залізоцинкове + полімерне).

Мікроструктуру сталей і захисних покриттів досліджували методами світлової металографії та електронної мікроскопії. Спеціальні границі (СГ) зерен α-α, α-γ і γ-γ визначали за розробленими металографічними методиками [23]. Корозійні випробування труб проводили у розчинах: хлоридних, хлоридно-ацетатному, сірчаної кислоти і тіосечовини, у високомінералізованій пластовій воді нафтових і газових родовищ, а також на тривкість проти сульфідного корозійного розтріскування під напруженням (СКРН) і водневого розтріскування (ВР) за методиками NACE TM 0177 і NACE TM 0284, відповідно, – порівняно з нафтогазопровідними трубами зі сталі 20 за ГОСТ 8732 і насосно-компресорними трубами зі сталі 09Г2С без покриттів. Механічні властивості випробували на розтяг і на ударний вигин стандартними методами.

Результати досліджень

Нафтогазопровідні труби підвищеної корозійної стійкості зі сталі 06X1-Y. Технологія виготовлення нафтогазопровідних труб підвищеної корозійної стійкості з низьковуглецевої низьколего-

ваної сталі 06X1-У включала контрольовану прокатку із застосуванням концепції зернограничного конструювання (ЗГК) матеріалів і, за необхідності, термічну обробку (гартування і подвійний високий короткочасний відпуск за температур, наближених до температур початку фазового $\alpha \leftrightarrow \gamma$ перетворення [24; 25]).

Отримані за такою технологією труби мають дрібнозернисту феритно-перлітну структуру (рис. 1 а) з підвищеним умістом (до 23 %) спеціальних низькоенергетичних

границь зерен α - α у фериті і міжфазних границь α - γ між феритом і перлітними колоніями. Спеціальні границі (СГ) характеризуються особливими ознаками: наявністю фасеток, входженням у потрібні стики під кутом, близьким до 180° (показані стрілками на рис. 1 б, в) і у множинні стики, та мають пониженої питомої поверхневої енергії (поверхневе натягіння) $38 \dots 73 \text{ ерг/см}^2$, що додатково сприяє підвищенню корозійної стійкості труб [9; 10; 26].

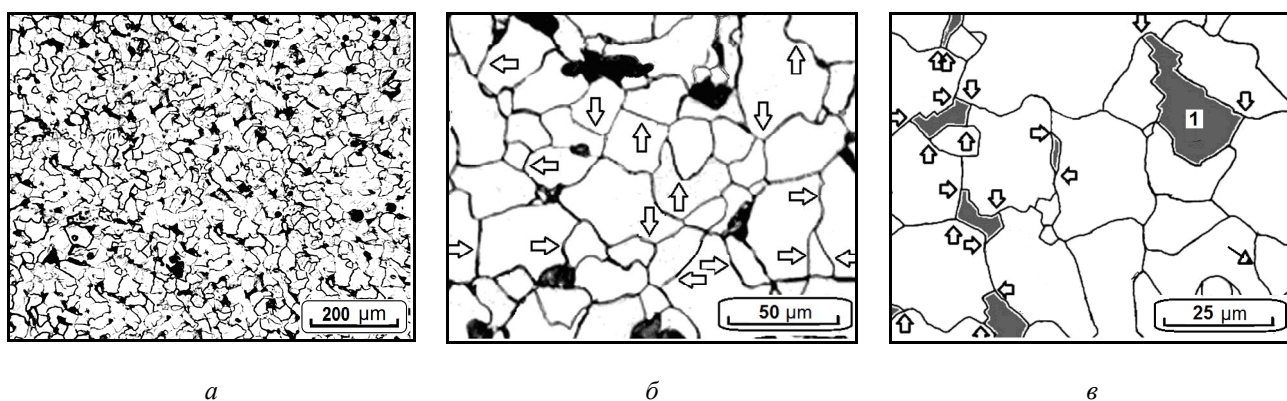


Рис. 1. Мікроструктура труб зі сталі 06X1-У: а – загальна; б – СГ α - α ; в – СГ α - γ ; СГ показані стрілками

Комплексними корозійними, корозійно-електрохімічними, корозійно-механічними і експлуатаційними дослідженнями доведено значну перевагу в корозійній стійкості труб зі сталі 06X1-У порівняно з трубами зі сталі 20 за ГОСТ 8732, які дотепер застосовуються у нафтогазодобувній галузі. Труби зі сталі 06X1-У мали у 40 разів нижчу швидкість корозії під час випробування зразків гравіметричним методом протягом 1 500 годин у модельному хлоридно-ацетатному розчині $0.1 \text{ N NaCl} + 0.5 \text{ г/л CH}_3\text{COOH}$ (табл. 1, випробування 1); показали значно нижчу схильність до наводнювання в процесі катодної поляризації зразків (електродні потенціали наведено відносно нормального водневого електрода) у розчині сірчаної кислоти і тіосечовини ($1 \text{ N H}_2\text{SO}_4 + 1.5 \text{ г/л CS(NH}_2)_2$), а саме, на 2 порядки величини нижчу щільність катодного струму на катодній поляризаційній кривій і у 5 разів нижчу щільність катодного струму ($\text{Lg } I_k$) за витримки протягом 4 годин при потенціалі $E = -1.2 \text{ В}$ (табл. 1, випробування 2); у

2.7 раза нижчу швидкість корозії під час випробування на водневе розтріскування (ВР) у насиченому сірководнем розчині за методикою NACE TM 0284 (табл. 1, випробування 3); характеризувалися зниженням майже у 250 разів струму розчинення ($\text{Lg } I_a$) на анодній поляризаційній кривій (АПК) у розчині 0.1 N NaCl після тривалої експлуатації на нафтовому родовищі НГВУ «Охтирканафтогаз» у високомінералізованій пластовій воді (табл. 1, випробування 4). Це свідчить про підвищення корозійної стійкості труб зі сталі 06X1-У в процесі експлуатації завдяки сприятливій дрібнозернистій структурі сталі з підвищеним умістом спеціальних низькоенергетичних границь та утворенню на їх поверхні захисної оксидної плівки з підвищеним умістом хрому [1; 9].

Механічні властивості труб зі сталі 06X1-У відповідають групі міцності X42-X46 за стандартом американського нафтового інституту (American Petroleum Institute) API 5L та характеризуються

високою пластичністю, в тому числі, ударною в'язкістю за від'ємних температур (табл. 2).

Мікролегування сталі 0,025 % Nb підвищило характеристики міцності труб на 20...25 % [27].

Термічна обробка труб за розробленим режимом (гартування + подвійний коротко-часний відпуск за температур 750 і 730 °С максимально наближених до температури $\alpha \leftrightarrow \gamma$ перетворення) сприяла виділенню у феритній основі сталі дрібнодисперсних карбідів хрому розмірами 60...80 нм (рис. 2); підвищила міцність труб до групи X 56 за API 5L (табл. 2), а також стійкість проти СКРН під час випробування за методикою

NACE TM 0177 (зразки не зруйнувалися за напружень $\sigma_{розт.} \geq 0,85...0,9 \sigma_{0,2}$) [9; 24; 25].

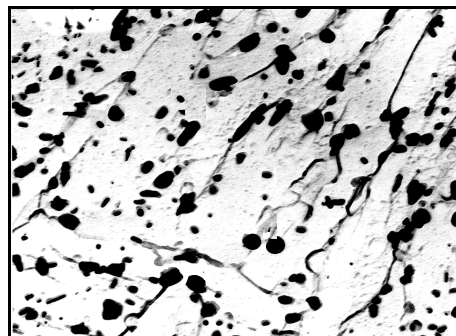


Рис. 2. Мікроструктура труб зі сталі 06X1-У після термічної обробки: електронна мікроскопія, екстракційна вуглецева репліка, $\times 22\ 000$

Таблиця 1

Результати порівняльних корозійних випробувань труб зі сталі 06X1-У і сталі 20

Трубна сталь	Випробування 1	Випробування 2	Випробування 3	Випробування 4
	$V_{кор.}$ (мм/рік), 0.1N NaCl + 0,5 г/л CH_3COOH	$Lg I_k$ (A/cm ²), 1N H_2SO_4 + 1,5 г/л $CS(NH_2)_2$; E=-1.2 В, 4 год.	$V_{кор.}$ (мм/рік), методика NACE TM 0284	$Lg I_a$ (A/cm ²), АПК; 0.1 N NaCl; за E = -0.1 В
06X1-У	0.03	0.3	0.3	2×10^{-4}
20	1.2	1.5	0.8	5×10^{-2}
перевага ст. 06X1У	у 40 разів	у 5 разів	у 2,7 раза	у 250 разів

Таблиця 2

Механічні властивості труб зі сталі 06X1-У після гарячої деформації (1) і термічної обробки (2)

Розміри труб, мм	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2} / \sigma_B$	δ_5 , %	KCV ⁻⁶⁰ Дж/см ²
(1) $\varnothing 76...114 \times 6...9$	430...460	320...345	0.71...0.75	32...34	280...350
(2) $\varnothing 114 \times 9$	520...540	390...410	0.74...0.76	30...33	250...295
Вимоги API 5L до груп міцності X42/X46/X56	$\geq 415 / 435 / 490$	$\geq 290 / 320 / 390$	≤ 0.93	$\geq 23 / 22 / 20$	≥ 147

Розроблення технологій виготовлення високоміцних НКТ із високолегованих сталей

Для родовищ із підвищеним вмістом вуглекислого газу розроблено технології виробництва високоміцних НКТ насосно-компресорних труб високої корозійної стійкості з мартенситної сталі 20X13 і з феритно-аустенітних (дуплексних) сталей 03X24H6AM3 і 02X22H5AM3, а для родовищ із підвищеним умістом вуглекислого газу і сірководню – НКТ з аустенітного хромонікельмолібденового сплаву типу 03X25H30M3Б.

У зв'язку з низькою технологічною пластичністю високолегованих сталей при

прошиванні суцільних трубних заготовок, труби з них виготовляля методом гарячого пресування.

Результати досліджень показали таке.

Труби зі сталі 20X13 після пресування мали мартенситну структуру; за наступного відпуску в інтервалі температур 600...800 °С мартенсит розпадався на феритно-карбідну суміш.

Механічні властивості труб відповідали: $\sigma_B = (1\ 710...1\ 800)$ МПа, $\sigma_{0,2} = (1\ 450...1\ 650)$ МПа, $\delta_5 = (8,5...12,5)$ %, $\varphi = (35,5...40)$ %, KCV = (18...31) Дж/см². Відпуск, залежно від його режиму, зумовлював знеміцнювання й підвищення пластичності сталі до рівня, відповідного

групам міцності L80-P 110 за стандартом API 5CT (для нарізних труб).

Труби зі сталі 03X24H6AM3 і 02X22H5AM3 характеризувалися двофазною дрібнозернистою структурою, представленою витягнутою в напрямку деформації аустенітною фазою в феритній основі. Гартування труб від температур 1 050...1 100 °С сприяло помірному зростанню аустенітних і феритних зерен, коагуляції фаз і забезпечило їх співвідношення по 50 % кожної.

Розроблення новітньої технології виготовлення труб із дуплексних сталей, заснованої на принципі зернограничного конструювання матеріалів [9], забезпечило отримання структури цих сталей з підвищеним вмістом спеціальних низькоенергетичних границь зерен в аустенітній і феритній фазах (рис. 3).

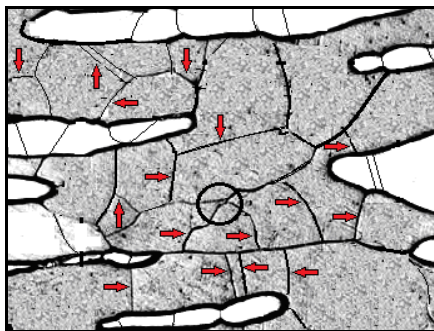


Рис. 3. Мікроструктура труб із дуплексної сталі, виготовлених за розробленою технологією ($\times 1\ 000$); СГ у фериті показані стрілками; множинний (четверний) стик обведено колом

В аустеніті (фаза білого кольору на рисунку 3) це границі типу $\Sigma 3^n$ (зокрема, двійники відпалу $\Sigma 3$), а у фериті (фаза сірого кольору на рисунку 3) – границі, які характеризуються особливими ознаками (див. вище описання до рисунку 1 б, в). Підвищений вміст СГ у дуплексних сталях сприяв підвищенню стійкості труб проти пітингової корозії і проти сульфідного корозійного розтріскування [9; 28–30], що актуально для труб, які експлуатуються в нафтогазодобувній галузі.

Механічні властивості гарячепресованих труб із дуплексних сталей відповідали групі N 80 за API 5CT: $\sigma_b = (760...765)$ МПа, $\sigma_{0,2} = (563...568)$ МПа, $\delta_5 = (35...38)$ %, $\varphi = (77...79)$ %, $KCV = (285...289)$ Дж/см² і практично не змінювалися після наступного гартування.

Мікроструктура труб зі сплаву 03X25H30M3Б була представлена рекристалізованими зернами аустеніту № 6–7 за ГОСТ 5639, рівень механічних властивостей відповідав групі L 80 за API 5CT та вимогам нормативної документації.

Наступна термічна обробка труб (гартування від 1 100 °С) сприяла росту аустенітних зерен і, відповідно, зниженню характеристик міцності. Отже, підвищення міцності таких труб можна досягти тільки їх наступною холодною деформацією.

Випробуваннями зразків труб зі сталі 03X24H6AM3 і сплаву 03X25H30M3Б на стійкість проти СКРН і проти загальної корозії у сірководеньвмісному середовищі за методикою NACE TM 0177 встановлено, що вони не схильні до розтріскування за розтягувальних напружень $\sigma_{розт.} \geq 0,9 \sigma_{0,2}$ і $\sigma_{розт.} = \sigma_{0,2}$, відповідно. Швидкість корозії труб із дуплексної сталі склала 0,005 мм/рік, а труб із Cr – Ni – Mo сплаву – 0,00048 мм/рік, що в 600 і 6 000 разів, відповідно, нижче, ніж труб із низьколегованої сталі 06X1-U та у 1 500 і 15 000 разів, відповідно, нижче, ніж труб зі сталі 20 за ГОСТ 8732.

Тому, незважаючи на високу вартість труб з високолегованих сталей, їх застосування у високоагресивних середовищах із підвищеним вмістом вуглекислого газу і сірководню бачиться економічно доцільним, бо з часом дає значний прибуток за рахунок економії на експлуатації свердловин.

Дослідження термодифузійних залізоцинкових покриттів підвищеної корозійної стійкості та зносостійкості

Проведені протягом багатьох років комплексні дослідження з розроблення технології отримання термодифузійних залізоцинкових покриттів на насосно-компресорних трубах із вуглецевих і низьколегованих сталей та з їх експериментальних і промислових випробувань показали унікальні властивості таких покриттів [4; 11-17; 31–34]. Вони

зумовлені структурою покриття та взаємопроникненням і рівномірною зміною концентрацій цинку й заліза по товщині покриття з максимальним його вмістом у зовнішніх шарах. Це забезпечує гарну пластичність, високу корозійну стійкість протекторного типу, ефект твердого змащення в нарізних з'єднаннях труб та високу герметичність під час багаторазових (до 20...30 і більше) операцій згвинчування – розгвинчування, необхідних у процесі експлуатації свердловин [12; 31–34].

Перевагами захисного термодифузійного залізоцинкового покриття є також його висока стійкість до механічних пошкоджень, відсутність осередків корозії у разі штучного порушення покриття, надійність ресурсу нарізних з'єднань.

Результати тривалих (протягом 5 років і 5 місяців) промислових випробувань партії дифузійно оцинкованих НКТ (з вихідною товщиною шару покриття на внутрішній і зовнішній поверхнях 35...65 мкм) на нафтових свердловинах Чижевського родовища НГВУ «Полтаванaftогаз» ВАТ «Укрнафта» з періодичними підніманнями трубних колон і обстеженнями труб показали, що в процесі експлуатації покриття залишилося на поверхні труб і зберегло свої захисні антикорозійні та антиерозійні властивості.

Розгвинчування труб із дифузійним цинковим покриттям, на відміну від труб без покриття, відбувалося без пошкоджень різьби, жодну з труб не було відбраковано. Промислове випробування продовжено і наразі воно триває понад 10 років із позитивними результатами.

Захисні антикорозійні покриття нового покоління подвійної дії – дуплекс системи

Нові можливості підвищення корозійної стійкості й експлуатаційної надійності труб та інших металовиробів на нафтогазових родовищах із високою агресивністю продукції свердловин розкриваються за використання захисної дуплекс-системи, – покриття нового покоління, що складається із двох шарів – бар'єрного (полімерне покриття) і протекторного (дифузійне залізоцинкове покриття) [12; 18; 19].

На цей час створено лінійку покриттів для нафтогазової галузі з урахуванням особливостей різних родовищ і відмінностей складу продуктів, що видобуваються. На рисунку 4 а показано зовнішній вигляд захисного дуплексного покриття нового покоління Majorpack – MPAG96, а на рисунку 4 б – схему його одержання на насосно-компресорних трубах.

У таких покриттях поєднується електрохімічний захисний ефект цинкового покриття з гідроізолювальним захисним ефектом лакофарбового. Органічне покриття захищає цинкове від передчасного окиснення, а цинкове покриття запобігає утворенню іржі на сталі. Їх синергетичну дію можна визначити за емпіричною формулою:

$$Z_{\text{системи}} = 1,5 \div 2,3 (Z_{\text{Zn}} + Z_{\text{ЛК}}),$$

де $Z_{\text{системи}}$ – захисний період (стійкість, роки) комбінованого покриття (до появи іржі на 5 % сталевій поверхні, що захищається); Z_{Zn} – захисний період цинкового покриття; $Z_{\text{ЛК}}$ – захисний період лакофарбового покриття.

Результати досліджень і розрахунки показують, що в дуже агресивних середовищах синергетичний захисний показник становить приблизно 1.5, а в менш агресивних – 2,3.

Попередній аналіз показує, що виробництво нафтогазопровідних і насосно-компресорних труб підвищеної і високої корозійної стійкості може бути освоєне на трубних заводах України.

Для виготовлення дифузійно оцинкованих НКТ необхідне будівництво дільниці термодифузійного цинкування, наприклад, на трубному підприємстві ТОВ «Інтерпайп», яке виробляє труби нафтогазового сортаменту.

Для отримання НКТ із дуплексним покриттям нового покоління подвійної захисної антикорозійної дії необхідне проведення комплексних досліджень і розробок, які включають дослідження різних дуплекс-систем, наприклад, комбіноване термодифузійне цинкове покриття (ТДЦП) і полімерне покриття на

основі рідких лакофарбових матеріалів (ЛКМ); комбіноване ТДЦП і полімерне покриття на основі рідких ЛКМ

(як ґрунтовка) з наступним нанесенням порошкового полімерного покриття та ін.

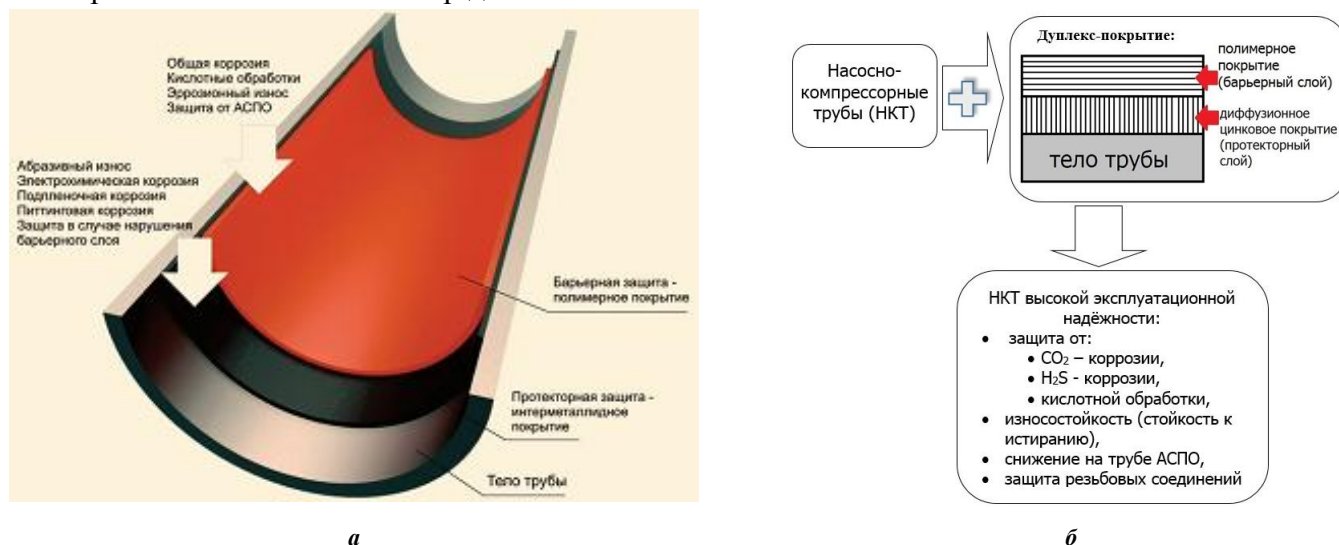


Рис. 4. Зовнішній вигляд захисного дуплексного покриття нового покоління високої корозійної стійкості та експлуатаційної надійності Majorpack – MPAG96 (а) і схема його одержання на НКТ (б) [18]

Вказані розробки, спрямовані на розвиток і підвищення ефективності виробництва у пріоритетній нафтогазодобувній галузі, можливі за умови їх бюджетного фінансування.

Висновки

Узагальнення результатів розроблення технологій виготовлення і дослідження якісних характеристик нафтогазопровідних і насосно-компресорних труб підвищеної та високої корозійної стійкості дозволяють зробити такі висновки:

– корозія труб й іншого обладнання, яке експлуатується у нафтогазодобувній галузі, спричинює значні економічні збитки та екологічні катастрофи, тому ця проблема потребує підвищеної уваги та вирішення;

– на родовищах, які містять у пластовій воді й продукції свердловин хлориди і незначну кількість вуглецевого газу і сірководню, економічно доцільним бачиться застосування труб із низьколегованих (у

першу чергу, хромом і молібденом) сталей та НКТ з термодифузійним залізоцинковим покриттям;

– на родовищах із підвищеним умістом вуглекислого газу, сірководню, абразивних компонентів – економічно доцільне застосування НКТ із мартенситних сталей типу 20X13, з феритно-аустенітних (дуплексних) сталей типу 03X24H6AM3 і 02X22H5AM3, з аустенітних хромонікельмолібденових сплавів, а також НКТ з антикорозійними захисними покриттями нового покоління подвійного захисту, – дуплекс-систем;

– раціональне застосування труб нафтогазового сортаменту підвищеної й високої корозійної стійкості дозволить підвищити надійність, технологічну та екологічну безпеку в процесі експлуатації свердловин і підвищить економічну ефективність виробництва в нафтогазодобувній галузі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Завьялов В. В. Проблемы эксплуатационной надежности трубопроводов на поздней стадии разработки месторождений. Москва, 2005. 331 с.
2. Кесельман Г. С. Экономическая эффективность предотвращения коррозии в нефтяной промышленности. Москва : Недра, 1988. 215 с.
3. Проскуркин Е. В., Дергач Т. А., Сюр Т. А. Пути повышения коррозионной стойкости и эксплуатационной надежности труб нефтяного сортамента. *Сталь*. 2003. № 2. С. 74–75.

4. Проскуркин Е. В., Дергач Т. А., Сухомлин Г. Д., Арустамов С. С., Евдокимов В. С. Повышение эксплуатационной надежности и долговечности труб нефтяного сортамента – главная задача сегодняшнего дня. *Производство проката*. 2003. № 10. С. 26–35.
5. General Information Seaculess Manesmann Steel Pipe. April, 1982. Edition.
6. Ikeda A., Ueda M., Mucai S. CO₂ – behavior of Carbon and Cr Steels Advances in CO₂-corrosion. *Symposium CO₂ Corros. Oil and Gas Ind. Anaheim*. Vol. 1. California, April 18–19, 1984.
7. Ikeda A., Mucai S., Ueda M. Corrosion behavior of 9 to 25 % Cr Steels in wet CO₂ environments. *Corrosion*. 1985. Vol. 41, № 4. Pp. 185–192.
8. Денисова Т. В. Разработка стали повышенной прочности и коррозионной стойкости для производства нефтегазопроводных труб : автореферат дисс. канд. техн. наук. Гольягги, 2013. 21 с.
9. Дергач Т. О. Теоретичні та технологічні основи підвищення корозійної стійкості труб з низьколегованих і високолегованих сталей : автореф. дис. докт. техн. наук : 05.02.01. Дніпро, 2018. 36 с.
10. Дергач Т. О., Сухомлин Г. Д. Методи підвищення корозійної тривкості труб для нафтогазовидобувної галузі. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2020. № 5. С. 99–104.
11. Proskurkin Ye.V., Dyachenko V.S., Petrov I.V., Bolshakov V.I., Dergach T.O. The ways of improvement of operational reliability and extension of service life of threaded joints in oil-country tubes. *Wire and Tube News*. March, № 24. 2014. URL : <https://www.wireandtubeneews.com>
12. Проскуркин Е. В., Геловани В. А., Сонк А. Н. Диффузионные цинковые покрытия : свойства, области применения [Текст] : справочник. Под ред. Е. В. Проскуркина, Д. А. Сухомлина. Москва : Наука, 2017. 311 с. ISBN 978-5-02-039978-5.
13. Проскуркин Е. В., Сухомлин Д. А. Эволюция цинковых покрытий : коррозионная стойкость, физико-химические характеристики, рациональные области применения. *Коррозия : материалы, защита*. 2014. № 7. С. 40–47.
14. Большаков В. И., Сотсков Н. И., Сухомлин Д. А., Проскуркин Е. В. Диффузионные цинковые покрытия в системе антикоррозионной защиты труб, крепёжных изделий строительных конструкций. *Стародубовские чтения-2016*. 2016. Вып. 90. С. 55–63.
15. Проскуркин Е. В., Сухомлин Д. А. Диффузионное цинкование: история развития процесса, использование в промышленности, строительстве и нефтегазовой отрасли. *Коррозия : материалы, защита*. 2015. № 1. С. 42–46.
16. Проскуркин Е. В., Поликарпов М. П., Петров И. В., Журавлёв А. Ю., Сухомлин Д. А. Диффузионные цинковые покрытия для защиты труб и других металлоизделий. *Сталь*. 2016. № 4. С. 31–34.
17. Проскурин 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.
18. Журавлев А. Ю. Технологии многофакторной защиты погружного оборудования MAJORPACK. *Инженерная практика*. 2014. № 2. С. 54–56.
19. Трофимов А. С. MAJORPACK – многофакторная защита погружного оборудования от осложняющих факторов на добывающем фонде. *Инженерная практика*. 2013. № 1. С. 22–26.
20. Сокурченко В. П., Вахрушева В. С., Дергач Т. О. та ін. Сталь підвищеної корозійної стійкості та труби, виготовлені з неї. Патент України на винахід № 82568 від 25.04.2008 р.
21. Watanabe T. Grain boundary engineering : historical perspective and future prospects *J. Mater Sci*. 2011. Vol. 46, № 12. Pp. 4095–4115.
22. Сухомлин Г. Д., Дергач Т. А. Применение зернограничного конструирования стали для получения труб с высоким комплексом свойств. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2008. № 6. С. 50–53.
23. Большаков В. И., Сухомлин Г. Д., Дергач Т. О. Методичні основи дослідження зернограничної структури в сталях з γ , α і $\alpha + \gamma$ фазовим станом. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2017. № 3 (229–230). С. 10–21.
24. Большаков В. И., Дергач Т. О., Сухомлин Г. Д. Патент № 88711, Україна, МПК С21D 9/08 (2006/01). Спосіб термічної обробки труб нафтового сортаменту з низьколегованих сталей. № u 2013 13046; заявл. 11.11.2013; опубл. 25.03. 2014, Бюл. № 6.
25. Большаков В. И., Дергач Т. О., Сухомлин Г. Д. Спосіб поліпшення структури і властивостей труб з низьколегованих сталей. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 1 (84). С. 13–17.
26. Дергач Т. А. Комплексные исследования нефтегазопроводных труб, изготовленных по энергосберегающей технологии. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2009. № 3. С. 100–103.
27. Дергач Т. А. Влияние микролегирования и температуры конца деформации при горячей прокатке на структуру и свойства нефтегазопроводных труб из стали 06X1. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2016. Вып. 90. С. 90–96.
28. Большаков В. И., Дергач Т. А., Сухомлин Г. Д., Панченко С. А. Применение зернограничного конструирования для повышения коррозионной стойкости труб из ферритно-аустенитных сталей. *Коррозия : материалы, защита*. 2014. № 7. С. 20–26.

29. Большаков В. И., Панченко С. А., Дергач Т. А. Научные и технологические методы повышения коррозионной стойкости труб из дуплексных сталей : монография. Днепропетровск : Литограф, 2016. 135 с.
30. Sun J. L., Chen B., Liu F. et al. Effect of heat treatment on microstructure and pitting corrosion resistance of austenitic stainless steel. *J. Heat Treat. Met.* 2019. № 44. P. 119.
31. Проскуркин Е. В., Большаков В. И., Дергач Т. А., Сухомлин Г. Д. Комплексные исследования физико-механических и коррозионных свойств диффузионно оцинкованных насосно-компрессорных труб. *Сталь*. 2014. № 8. С. 73–78.
32. Проскуркин Е. В., Сухомлин Д. А. Анализ цинковых покрытий на основе их структурных и электрохимических свойств. *Коррозия : материалы, защита*. 2013. № 10. С. 30–38.
33. Проскуркин Е. В., Петров И. В., Журавлев А. Ю., Поликарпов М. П., Большаков В. И., Дергач Т. А. Повышение эксплуатационной надежности и срока службы резьбовых соединений труб нефтяного сортамента. *Нефтяное хозяйство*. 2015, № 1. С. 102–104.
34. Проскуркин Е. В., Сухомлин Д. А. Исследование коррозионной стойкости насосно-компрессорных труб с диффузионным цинковым покрытием в осложнённых условиях газодобывающих скважин. *Коррозия : материалы, защита*. 2016. № 5. С. 40–45.

REFERENCES

- Zavyalov V.V. *Problemyi ekspluatatsionnoy nadezhnosti truboprovodov na pozdney stadii razrabotki mestorozhdeniy* [Problems of the operational reliability of pipelines at a late stage of field development]. Moscow, 2005, 331 p. (in Russian).
- Keselman G.S. *Ekonomicheskaya effektivnost predotvrashcheniya korrozii v neftyanoy promyshlennosti* [Cost Effectiveness of Corrosion Prevention in the Oil Industry]. Moscow : Nedra Publ., 1988, 215 p. (in Russian).
- Proskurkin Ye.V., Dergach T.A. and Syur T.A. *Puti povysheniya korrozionnoy stoykosti i ekspluatatsionnoy nadYozhnosti trub neftyanogo sortamenta* [Ways to Improve Corrosion Resistance and Serviceability of Oil Country Tubes]. *Stal* [Steel]. 2003, no. 2, pp. 74–75.
- Dergach T.A., Suhomlin G.D., Arustamov S.S. and Yevdokimov V.S. *Povyishenie ekspluatatsionnoy nadezhnosti i dolgovechnosti trub neftyanogo sortamenta – glavnaya zadacha segodnyashnego dnya* [Improving the operational reliability and durability of oil country tubular goods is a major challenge today]. *Proizvodstvo prokata* [Production of Rolled Products]. 2003, no. 10, pp. 26–35. (in Russian).
- General Information Seaculess Manesmann Steel Pipe. April, 1982, Edition.
- Ikeda A., Ueda M. and Mucai S. CO₂ – behavior of Carbon and Cr Steels Advances in CO₂-corrosion. Symposium CO₂ Corros.Oil and Gas Ind. Anaheim. Vol. 1, California, April 18–19, 1984.
- Ikeda S. Mucai and Ueda M. Corrosion behavior of 9 to 25 % Cr Steels in wet CO₂ environments. *Corrosion*. 1985, vol. 41, no. 4, pp. 185–192.
- Denisova T.V. *Razrabotka stali povyshennoy prochnosti i korrozionnoy stoykosti dlya proizvodstva neftegazoprovodnykh trub : avtoreferat diss. kand. tehn. nauk* [Development of steel with increased strength and corrosion resistance for the production of oil and gas pipes : abstract of thesis Cand. Tech. Sc.]. Tolyatti, 2013, 21 p. (in Russian).
- Dergach T.O. *Teoretichni ta tehnologichni osnovi pldvischennya korozlynoyi stlykostI trub z nizkolegovanih I visokolegovanih staley : avtoref. dis. dokt. tehn. nauk : 05.02.01* [Theoretical and technological bases of increase of corrosion resistance of pipes from low-alloy and high-alloy steels : author's ref. dis. Dr. Tech. Sc.]. Dnipro, 2018, 36 p. (in Ukrainian).
- Dergach T.O. and Suhomlin G.D. *Metodi pldvischennya korozlynoyi trivkostI trub dlya naftogazovidobuvnoyi galuzI* [Methods for increasing the corrosion resistance of pipes for the oil and gas industry]. *Flziko-hImIchna mehanIka materIalIv* [Physico-Chemical Mechanics of Materials]. LvIv, 2020, no. 5, pp. 99–104. (in Ukrainian).
- Proskurkin Ye.V., Dyachenko V.S., Petrov I.V., Bolshakov V.I. and Dergach T.O. The ways of improvement of operational reliability and extension of service life of threaded joints in oil-country tubes. *Wire and Tube News*. March, no. 24, 2014. URL : <http://www.wireandtubeneews.com>
- Proskurkin Ye.V., Gelovani V.A. and Sonk A.N.; edited by Proskurkina Ye.V. and Suhomlin D.A. *Diffuzionnyie tsinkovyye pokryitiya : svoystva, oblasti primeneniya : spravochnik* [Diffusion zinc coatings : properties, fields of application : reference book]. Moscow : Nauka Publ., 2017, 311 p. ISBN 978-5-02-039978-5. (in Russian).
- Proskurkin E.V. and Suhomlin D.A. *Evolyutsiya tsinkovih pokryitii : korrozionnaya stoykost, fiziko-himicheskie karakteristiki, ratsionalnyie oblasti primeneniya* [Evolution of zinc coatings: corrosion resistance, physical and chemical characteristics, rational applications]. *Korroziya : materialyi, zaschita* [Corrosion : Materials, Protection]. 2014, no. 7, pp. 40–47. (in Russian).
- Bolshakov V.I., Sotskov N.I., Suhomlin D.A. and Proskurkin Ye.V. *Diffuzionnyie tsinkovyye pokryitiya v sisteme antikorrozionnoy zaschityi trub, krepYozhnykh izdeliy stroitelnykh konstruksiy* [Diffusion zinc coatings in the system of anticorrosive protection of pipes, fasteners of building structures]. *Starodubovskie chteniya-2016* [Starodubov's Readings-2016]. 2016, vol. 90, pp. 55–63. (in Russian).

15. Proskurkin Ye.V. and Suhomlin D.A. *Diffuzionnoe tsinkovanie: istoriya razvitiya protsessa, ispolzovanie v promyshlennosti, stroitelstve i neftegazovoy otrasli* [Diffusion zinc plating: the history of the development of the process, use in industry, construction and the oil and gas industry]. *Korroziya : materialy, zaschita* [Corrosion : Materials, Protection]. 2015, no 1, pp. 42–46. (in Russian).
16. Proskurkin Ye.V., Polikarpov M.P., Petrov I.V., Zhuravlyov A.Yu. and Suhomlin D.A. *Diffuzionnyie tsinkovyyie pokryitiya dlya zaschity trub i drugih metallozdeliy* [Diffusion zinc coatings for the protection of pipes and other metal products]. *Stal* [Steel]. 2016, no. 4, pp. 31–34. (in Russian).
17. Proskurkin Ye.V., Petrov I.V., Zhuravlev A.Yu., Ivanov O.V., Polikarpov M.P. and Suhomlin D.A. *Diffuzionnyie tsinkovyyie pokryitiya novogo pokoleniya «Delta 5» dlya zaschity ot korrozii trub neftyanogo sortamenta* [Delta 5+ new generation diffusion zinc coatings for corrosion protection of oil country tubular goods]. *Neftyanoe hozyaystvo* [Oil Industry]. 2013, no. 2, pp. 56–58. (in Russian).
18. Zhuravlev A.Yu. *Tehnologii mnogofaktornoy zaschity pogruzhnogo oborudovaniya MAJORPACK* [Multi-factor protection technologies for submersible equipment MAJORPACK]. *Inzhenernaya praktika* [Engineering Practice]. 2014, no. 2, pp. 54–56. (in Russian).
19. Trofimov A.S. *MAJORPACK – mnogofaktornaya zaschita pogruzhnogo oborudovaniya ot oslozhnyayuschih faktorov na dobyvayuschem fonde* [MAJORPACK is a multifactorial protection of submersible equipment from complicating factors in the production fund]. *Inzhenernaya praktika* [Engineering Practice]. 2013, no. 1, pp. 22–26. (in Russian).
20. Sokurenko V.P., Vahrusheva V.S., Dergach T.O. and oth. In: *Stal pIdvischenoYi korozIynoYi stIlykostI ta trubi, vigotovlenI z neYi. Patent UkraYini na vinahId № 82568 vid 25.04.2008* [Steel of the increased corrosion resistance and the pipes made of it. Patent of Ukraine for the Invention no. 82568 dated 25.04.2008]. (in Ukrainian).
21. Watanabe T. Grain boundary engineering : historical perspective and future prospects. *J. Mater Sci.* 2011, vol. 46, no. 12, pp. 4095–4115.
22. Sukhomlin G.D., Dergach T.A. *Primenenie zernogranichnogo konstruirovaniya stali dlya polucheniya trub s vysokim kompleksom svoystv* [Application of grain boundary design of steel to obtain pipes with a high complex of properties]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2008, no. 6, pp. 50–53. (in Russian).
23. Bolshakov V.I., Sukhomlin G.D. and Dergach T.O. *Metodichni osnovi doslidzhennya zernogranichnoyi strukturi v stalyah z γ , α i $\alpha + \gamma$ fazovim stanom* [Methodical bases of advance grain boundary structure in steels with γ , α and $\alpha + \gamma$ phase mill]. *Visnik Pridniprovskoi derzhavnoi akademii budivnictva ta arhitekturi* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2017, no. 3 (229–230), pp. 10–21. (in Ukrainian).
24. Bolshakov V.I., Dergach T.O. and Sukhomlin G.D. *Sposib termichnoi obrobki trub naftovogo sortamentu z niz'kolegovanih stalej. Patent № 88711, Ukraïna, MPK S21D 9/08 (2006/01)* [Method of thermal treatment of pipes for naphtha assortment from low-alloyed steels. Patent No. 88711, Ukraine, IPC C21D 9/08 (2006/01)]. No. u 2013 13046; app. 11.11.2013; publ. 03.25. 2014, Bul. no. 6. (in Ukrainian).
25. Bolshakov V.I., Dergach T.O. and Sukhomlin G.D. *Sposib polipshennya strukturi i vlastivostej trub z niz'kolegovanih stalej* [Method of polishing the structure and power of pipes from low-alloyed steels]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2019, no. 1. (84), pp. 13–17. (in Ukrainian).
26. Dergach T.A. *Kompleksnyie issledovaniya neftegazoprovodnyh trub, izgotovlennyh po `energoberegayuschej tehnologii* [Comprehensive studies of oil and gas pipes manufactured using energy-saving technology]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2009, no. 3, pp. 100–103. (in Russian).
27. Dergach T.A. *Vliyanie mikrolegirovaniya i temperatury konca deformacii pri goryachej prokatke na strukturu i svoystva neftegazoprovodnyh trub iz stali 06H1* [Influence of microalloying and temperature of the end of deformation during hot rolling on the structure and properties of oil and gas pipes made of steel 06H1]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2016, iss. 90, pp. 90–96. (in Russian).
28. Bolshakov V.I., Dergach T.A., Sukhomlin G.D. and Panchenko S.A. *Primenenie zernogranichnogo konstruirovaniya dlya povysheniya korrozionnoj stojkosti trub iz ferritno-austenitnyh stalej* [Application of grain boundary design to improve the corrosion resistance of pipes made of ferritic-austenitic steels]. *Korroziya : materialy, zaschita* [Corrosion : Materials, Protection]. 2014, no. 7, pp. 20–26. (in Russian).
29. Bolshakov V.I., Panchenko S.A. and Dergach T.A. *Nauchnyie i tehnologicheskie metody povysheniya korrozionnoj stojkosti trub iz dupleksnyh stalej : monografiya* [Scientific and technological methods of increasing the corrosion resistance of pipes made of duplex steels : monograph]. Dnipropetrovsk : Lithographer, 2016, 135 p. (in Russian).
30. Sun J.L., Chen B., Liu F. et al. Effect of heat treatment on microstructure and pitting corrosion resistance of austenitic stainless steel. *J. Heat Treat. Met.* 2019, no. 44, p. 119.
31. Proskurkin Ye.V., Bolshakov V.I., Dergach T.A. and Sukhomlin G.D. *Kompleksnyie issledovaniya fiziko-mekhanicheskikh i korrozionnyh svoystv diffuzionno ocinkovannyh nasosno-kompressornyh trub* [Complex studies of

physical, mechanical and corrosion properties of diffusion galvanized tubing]. *Stal* [Steel]. 2014, no. 8, pp. 73–78. (in Russian).

32. Proskurkin Ye.V. and Sukhomlin D.A. *Analiz cinkovyh pokrytij na osnove ih strukturnyh i `elektrohimicheskikh svoystv* [Analysis of zinc coatings based on their structural and electrochemical properties]. *Korroziya : materialy, zaschita* [Corrosion : Materials, Protection]. 2013, no. 10, pp. 30–38. (in Russian).

33. Proskurkin Ye.V., Petrov I.V., Zhuravlev A.Yu., Polikarpov M.P., Bolshakov V.I. and Dergach T.A. *Povyshenie `ekspluacionnoj nadezhnosti i sroka sluzhby rez'bovyh soedinenij trub neftyanogo sortamenta* [Improving the operational reliability and service life of threaded oil country tubular connections]. *Neftyanoe hozyajstvo* [Oil industry]. 2015, no. 1, pp. 102–104. (in Russian).

34. Proskurkin Ye.V. and Sukhomlin D.A. *Issledovanie korrozionnoj stojkosti nasosno-kompressornyh trub s diffuzionnym cinkovym pokrytiem v oslozhnennyh usloviyah gazodobyvayuschih skvazhin* [Investigation of corrosion resistance of tubing with diffusion zinc coating in complicated conditions of gas production wells]. *Korroziya : materialy, zaschita* [Corrosion : Materials, Protection]. 2016, no. 5, pp. 40–45. (in Russian).

Надійшла до редакції: 04.06.2021.