

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
СВЕРДЛОВИННОГО ОБЛАДНАННЯ НАФТОДОБУВНОЇ ГАЛУЗІ ПІД
ДИНАМІЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ В АГРЕСИВНОМУ
СЕРЕДОВИЩІ**

**EXPERIMENTAL CORROSION-MECHANICAL STUDIES OF WELL-
DRYING EQUIPMENT IN THE OIL PRODUCTION INDUSTRY UNDER
DYNAMIC LOAD IN AN AGGRESSIVE ENVIRONMENT**

Макаренко В.Д., д.т.н. професор (0000-0001-6668-3957), **Цапко Ю.В.**, д.т.н. професор (0000-0003-0625-0783), **Цапко О.Ю.**, Ph.D., старший дослідник (0000-0003-2298-068X), **Бердник О.Ю.**, к.т.н. доцент (0000-0001-5321-3518), **Майстренко А.А.**, к.т.н. доцент (0000-0002-1152-995X)

Makarenko V.D., PhD Professor (0000-0001-6668-3957), **Tsapko Y.V.**, PhD Professor (0000-0003-0625-0783), **Tsapko O.Yu.**, PhD Associate Professor (0000-0003-2298-068X), **Berdnyk O.Yu.**, PhD Associate Professor (0000-0001-5321-3518), **Maystrenko A.A.**, PhD Associate Professor (0000-0002-1152-995X)

У перше проведені комплексні експериментальні дослідження натурних зварних вузлів і сталевих конструкцій під динамічним навантаженням в присутності корозійного середовища, зокрема, 5% соляного розчину і NACE – середовища згідно вимог Міжнародної асоціації корозійників.

In the first, comprehensive experimental studies of full-scale welded joints and steel structures under dynamic loading in the presence of a corrosive environment, in particular 5% saline solution and NACE - an environment according to the requirements of the International Association of Corrosion Engineers. The authors of this article developed a test bench scheme and worked out the expected modes of testing welded joints when programming the pressure and temperature of the environment and dynamic vibration modes. The test rig was manufactured jointly with specialists from the E.O. Paton Institute of Electric Welding of the National Academy of Sciences of Ukraine. All the main units of the rig are a hydropulsator, a thermal chamber, which included pipeline blocks with experimental welded joints, heating devices, a pneumatic control panel, a temperature and pressure control unit. The obtained experimental results made it possible to summarize, in particular: it was established that in the initial period (number of cycles $N = 500$) the crack growth rates in air and in 5% NaCl solution are close, and in the final period of testing they differ by more than an order of magnitude. Due to the more intense influence of the plane deformed state compared to the

plane stressed state, the crack propagates in depth and only after germination over the entire thickness of the sample does its elongation begin. A significant reduction in the test period due to the introduction of a crack in the sample with a high stress concentration at the crack tip, which allows you to significantly reduce or modify the initial period. The possibility of detecting the sensitivity of materials to cracking, which is not detected when testing samples without a concentrator (for example, for pipe steels in seawater). However, the fracture mechanics method, like any other method, has a number of specific limitations on materials, thickness, and environments related to the correct use of fracture mechanics.

Ключові слова. Труба, деформація, тріщина, пластична зона, тріщиностійкість.
Pipe, deformation, crack, plastic zone, crack resistance.

Вступ. Згідно багаторічних спостережень відомо, що головною специфічною особливістю розробки конструкцій бурового обладнання є забезпечення його достатньої міцності. Так як із збільшенням глибини буріння свердловин зростають навантаження від власної ваги обладнання та динамічних зусиль, а збільшення перерізу деталей (діаметрів) обмежується діаметром свердловин, то складність конструювання обладнання обумовлено також необхідністю підводу до забою великої гідравлічної потужності і передачею чи сприйняттям буровою колоною значних крутних моментів. Загальною конструктивною особливістю більшості бурового підземного обладнання є їх довгомірність (0 – 12 м) при обмежених поперечних розмірах. Усі деталі підземного обладнання механічно взаємопов'язані між собою піддаються впливу на них експлуатаційних навантажень та корозійному руйнуванню від контакту з буровими розчинами і пластовими рідинами.

Зношенню і руйнуванню піддаються різні елементи бурової колони, які в принципі визначають працездатність і довговічність всієї колони. Для кріплення стінок свердловин застосовують вуглецеві і низьколеговані безшовні труби. Для їх випуску використовують сталі 45, 36Г2С, 20ХГ2Б і ін. Труби з'єднуються між собою в колону на без упорних конічних різьбах трикутного профілю чи спеціальних, наприклад, типу ТТ. Причиною численних аварій, пов'язаних з руйнуванням трубних колон, є корозійне розтріскування, яке виникає за наявності сірководню чи розчинів кислот. Корозійному розтріскуванню піддаються, перш за все, високоміцні труби і труби, у яких підвищена міцність досягнута шляхом загартування сталі. Сірководень в свердловину поступає з продуктивних пластів, а кислоту періодично закачують для кислотної обробки при забійній зоні з ціллю інтенсифікації притока нафти і газу [1].

Абсолютна більшість поломок деталей внутрішньо свердловинного обладнання має ярко виражені сліди корозійно-втомного руйнування. Усі корозійно-втомлені зломи можна розділити на три основні групи: руйнування труб у висадженій частині по дрібній різьбі; руйнування замкових різбових з'єднань і полумки по гладкій частині труб. А тому, дослідження процесів корозійно-втомного руйнування сталей і замкових з'єднань натурних деталей дозволить розробити технічні заходи, які будуть сприяти нейтралізації впливу корозії та підвищенню надійності і довговічності підземного внутрішньо- свердловинного обладнання.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження тривалості міцності конструкцій трубопроводів, їх властивостей в роботах В. Макаренко, Р. Палія та ін.

Постановка мети і задач досліджень. Метою роботи є експериментальні корозійно-механічні дослідження свердловинного обладнання нафтодобувної галузі під динамічним навантаженням в агресивному середовищі.

Методика досліджень. Відомо, що судити про корозійну активність робочого середовища можна тільки проводячи потенціостатичні експериментальні дослідження швидкості корозії металу під тиском. Потенціостатичні методи дозволяють за короткий проміжок часу отримати надійну інформацію про вплив складу і властивостей середовища на корозію сталей. Найбільш важливою корозійною характеристикою металу, яка дозволяє оцінити його корозійну стійкість в агресивних середовищах є залежність швидкості розчинення металу від його потенціалу. Особливістю потенціостатичних вимірів під тиском є специфіка створення електрохімічної комірки – спеціальної камери високого тиску, до якої поміщають електроди і яка володіє хімічною стійкістю в мінералізованих розчинах [2].

Принципова схема установки для дослідження швидкості корозії металів в агресивних середовищах під тиском представлена на рис. 1. Установка складається із потенціостату 3, спеціальної камери високого тиску 6, виготовленій із неіржавіючої сталі і повітряного балону 9, зв'язаного з камерою, редуктором 1. В камеру 6 герметично вставляються дослідний зразок 8, платиновий електрод 7 і електрод порівняння 5. Тиск повітря в камері регулюється редуктором 1, контролюється зразковим манометром 2 і підтримується в процесі одного експерименту постійним. Конструкція камери передбачає герметичне кріплення електродоутримувачі, надійно ізолює їх від контакту з матеріалом камери і корозійного середовища. Виготовлений із сталі 40ХН дослідний електрод (зразок) має циліндричну форму з нарізкою на одному торці внутрішньої різьби для кріплення до електродоутримувача. На циліндричну поверхню електрода напресовувалася фторопластикова втулка, яка оберігала контакт бокової поверхні із середовищем. При випробуваннях в камері високого тиску, коли ватерлінія

може знаходитися вище електрода, верхній торець (з боку утримувача) дослідного електрода покривали епоксидною смолою.

З метою підвищення зносостійкості і циклічної міцності замкових різьб, працюючих в умовах значних розтягувальних зусиль, була проведена експериментальна перевірка можливості поєднання термообробки (об'ємної чи поверхневої) з наступним зміцнюванням металу дробеструменевою обробкою і захистом від корозії металізаційним (цинковим) покриттям.

Зразки з різьбою 3-42 із сталі 40БФ загартовували з 820°C в маслі і відпускали при 520°C на протязі 2.5 год з наступним кінцевим охолодженням на повітрі. Структура сталі 40АФ (мікрomodифікована (ванадієм), після відпуску – перліт з твердістю 275-290 НВ. Іншу партію зразків зміцнювали поверхневим загартовуванням струмом високої частоти на високочастотній установці потужністю 100 кВт і частотою 70 кГц.

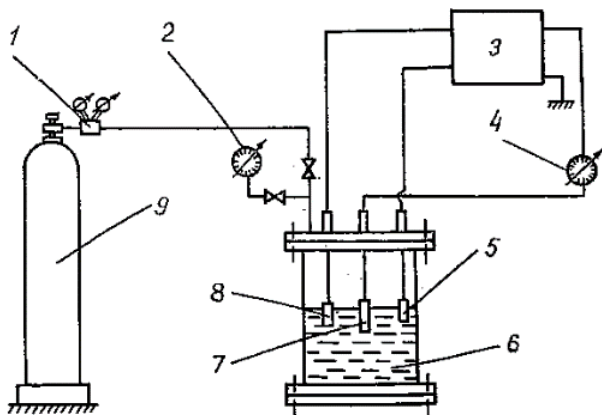


Рис. 1. Принципова схема установки для потенціостатичних замірів швидкості корозії при підвищених тисках. Позначення: 1 – редуктор; 2 – манометр; 3 – потенціостат; 4 – міліамперметр; 5 – електрод порівняння; 6 – камера високого тиску; 7 – платиновий електрод; 8 – дослідний зразок; 9 – балон з тиснутим повітрям

Для оцінки ефективності зміцнення різьбових з'єднань УБТ були проведені випробування натурних зразків діаметром 140 мм з різьбою 3-121 із сталі групи міцності Д. Конструкція зразка і схема його закріплення на лабораторному стенді показана на рис. 2.

В середину зразка заливали буровий розчин, а ззовні подавали його на зразок струменевим способом. Дослідне з'єднання згвинчували обертаючим моментом 15000 Н·м. Досліди показали, що довговічність роботи з'єднання при дії знакозмінного згинаючого напруження 70 МПа, після зміцнювання різьби ніпеля на оптимальних режимах, підвищується більш, чим в 5-6 раз [3].

Проведені дослідження дозволяють зробити висновок, що термін наклепу з використанням дробі на протязі 3-5 хв. є оптимальним для зміцнювання замкових різьб УБТ. Оптимальна товщина цинкового покриття складає 60-70 мкм. Для додаткового підвищення опору зношуванню замкових різьб необхідно досягати більш високих показників твердості поверхневого шару.

З метою підвищення зносостійкості і циклічної міцності замкових різьб, працюючих в умовах значних розтягуючи зусиль, була проведена експериментальна перевірка можливості поєднання термообробки (об'ємної і поверхневої) з наступним зміцнюванням металу дрібно-струменевою обробкою і захистом від корозії цинкуванням металізаційним покриттям.

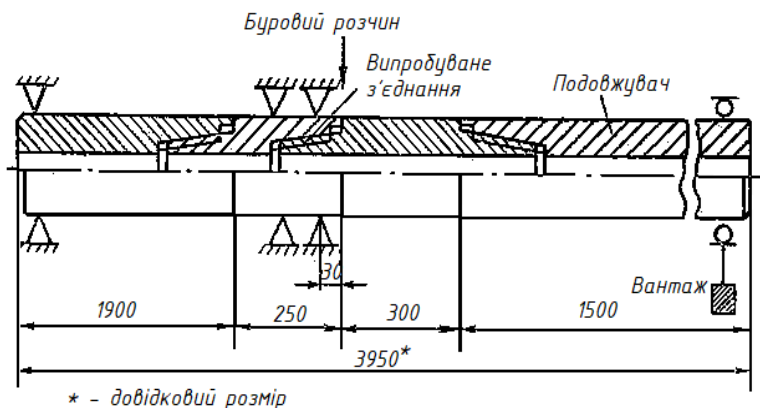
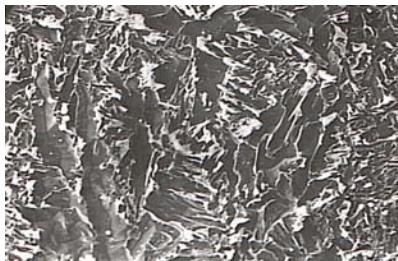


Рис. 2. Конструкція зразка для випробувань замкових різьб 3-121 на корозійну втомленість

Зразки з різьбою із сталі 35АФ загартовували з 820°C в маслі і відпускали при 550°C на протязі 2.5 год з наступним охолодженням на повітрі. Структура сталі після відпуску – трооститоподібний перліт (рис. 3), твердість 230-300 НВ. Іншу партію зразків зміцнювали поверхневим загартуванням, струмом високої частоти – на високочастотній установці потужністю 120 кВт з частотою 70 кГц. Термін нагріву витків різьбового з'єднання в спіральному індукторі 15-20 с, далі охолодження в маслі. Відпуск проводили у печі за температури 250°C на протязі 1.5 год. Твердість поверхні після термообробки досягала 50-55 HRC. Після загартування різьбову частину наклепували з використанням дрібної дробі 3-3.5 хв. (для НВ 250- 300) і 5-6 хв. (для HRC 50-55), а потім наносили цинкове покриття.



а)



б)

Рис. 3. Мікроструктура сталі 40ХН - а) сорбітоподібний перліт);
б) сталі 35АФ (трооститоподібний перліт)

Для побудови анодних поляризаційних кривих для зразків 40ХН, 20ГС і 35АФ проводили заміри на потенціостаті П-5827М. Після встановлення дослідного зразка в камері (електрохімічній комірці) і її герметизації електроди підключали до потенціостату.

Одночасно включали подачу стислого повітря в камеру. За період витримки, необхідний для встановлення стаціонарного електродного потенціалу, забезпечується розчинність кисню у водному середовищі і його дифузія до електродів. Результати вимірів анодних поляризаційних даних, відображених у вигляді кривих, наведені на рис. 4. Швидкість корозії сталевих зразків в мінералізованому солевмісному середовищі визначали при вмісті в розчині 3%-NaCl і надлишковому тиску повітря над розчином в електрохімічній комірці 0–4 МПа. Залежність щільності анодного струму розчину сталі (пропорційного швидкості корозії) від надлишкового тиску повітря над розчином для різних сталевих зразків побудована за результатами 25 потенціностатичних кривих, ілюструється на рис. 4.

Як наслідок, найбільша швидкість корозії сталі зафіксована при атмосферному тиску в 3%-вому водному розчині NaCl. Звертає увагу те, що при збільшенні тиску для усіх дослідних сталей відбувається стійка анодна пасивація. Ретельне обстеження зразків показало, що поверхня їх покривалася суцільною плівкою і що характерно – із збільшенням вмісту кисню частина поверхні зразків оголялася, що свідчить про значну електропровідність розчину.

Із збільшенням вмісту солей омичний спротив середовища знижується, що інтенсифікує струм обміну і корозійний процес руйнування металу. Коли навіть частина розчиненого у воді кисню витрачається на утворення слаботорозчинених окислів заліза, його нестачу в розчині поповнює повітря, а тому процес пітингової корозії в такому випадку може виявитися стабільним і спричинити руйнування сталевих конструкцій. В місцях пітингоутворення відбувається концентрація напружень, що спричиняє зародження втомних тріщин, провісників корозійно-втомленого руйнування деталей підземного обладнання [4].

В табл. 1 наведені умовні границі корозійно-втомленої міцності замкових різьб, віднесених до бази випробувань, рівної 10 млн. циклів.

Таблиця 1.

Границі витривалості замкових різьбових з'єднань 3-42 після зміцнювання.

Стан зразків, структура і твердість сталі	Границя витривалості зразків				Приріст границі витрива- лості, %
	до поверхневого комбінованог о зміцнювання		після поверхневого комбінованого зміцнювання		
	Н·м	МПа	Н·м	МПа	
Стан поставки; Структура феритно- перлітна НВ 220...230	1150	70	2220	130	90
Загартування вілпуск 560°С; Структура – троостито-образний перліт НВ 270...300	870	50	1550	82	75
Поверхнєве загартування струмом високої частоти (с.в.ч). Структура поверхневого шару – мартенсит – ферито- перліт, HRC 50...55	820	48	820	48	0

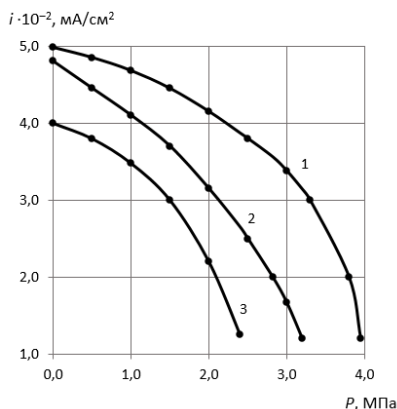


Рис. 4. Анодні поляризаційні криві сталі 40ХН (2); 20ГС (1) і 35АФ (3) в 3%-вому розчині NaCl в залежності від тиску солевмісного розчину

Результати досліджень. Згідно результатів випробувань, з підвищенням твердості поверхні сталі ефект від комбінованого зміцнювання помітно знижується (рис. 5). Це пов'язано з більшою чутливістю більше напруженої структури, утвореній в результаті термообробки до впливу концентрації напружень і корозійного середовища при асиметричних змінних згинальних напруженнях. Відомо, що замкові різби в затягнутому стані працюють в різко асиметричному циклі змінних напружень. Встановлено, що оптимальні напруження затягування, які відповідають найвищій границі витривалості різбового з'єднання, досягають $0.3...0.5 \cdot \sigma_T$, де σ_T – межа текучості матеріалу (рис. 5). Отже, висока чутливість замкових різб до асиметрії циклу змінних напружень є причиною низької ефективності поверхневого зміцнювання для більш напруженої невірноваженої структури сталі.

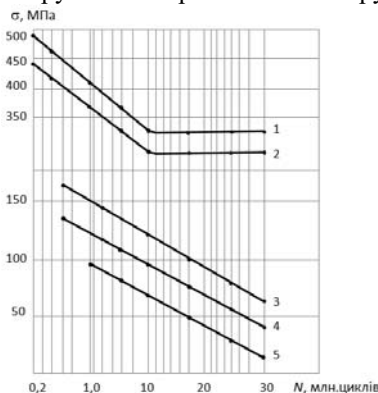


Рис. 5. Криві втомленості (1) і корозійно-тривалої міцності (2-5) гладких зразків із сталі 35АФ (1-4) і 40ХН (3): 1 – діаметр 5 мм, $\sigma_m = 100$ МПа; 2 – зміцнювання діаметр 5 мм, $\sigma_m = 100$ МПа; 3 – діаметр 75 мм, $\sigma_m = 75$ МПа; 4 – діаметр 5 мм, $\sigma_m = 100$ МПа

За проведеними дослідженнями виявлено, що підвищення твердості сталі спричиняє помітне зростання спротиву замкової різби зношуванню при багатократному згинчуванню і розгвинчуванню. Однак, враховуючи зниження межі витривалості різб із зростанням твердості сталі, необхідно обґрунтувати оптимальну твердість поверхні після термообробки, яка забезпечувала б достатню зносостійкість різби і не приводила б до значного зниження границі витривалості різбового з'єднання, враховуючи деякі технологічні ускладнення поверхневого загартовування (поводи різби, крихкість витків при ударних навантаженнях), недостатньо високі механічні характеристики, а також декілька менший ефект зміцнювання в порівнянні з об'ємною термообробкою, слід все ж віддати перевагу останній.

При об'ємній термічній обробці найбільша твердість, яку можна технологічно вільно обробити різцями, складає НВ300 - НВ350. При цьому границя витривалості замкової різби, зміцненої комбінованим способом,

помітно перевищує показники витривалості різьб без поверхневого зміцнювання.

Отже, виходячи з вище викладеного, оптимальним зміцнюванням замкової різьби слід вважати об'ємне загартування з наступним високим відпуском на твердість HB300–350, поверхневий наклеп дробом і захисне металізаційне цинкування.

Висновки та рекомендації. Встановлено, що абсолютна більшість поломок деталей внутрішньо свердловинного обладнання має ярко виражені сліди корозійно-втомного руйнування. Усі корозійно-втомлені зломи можна розділити на три основні групи: руйнування труб у висадженій частині по дрібній різьбі; руйнування замкових різьбових з'єднань і поломки по гладкій частині труб. А тому дослідження процесів корозійно-втомного руйнування сталей і замкових з'єднань натурних деталей дозволить розробити технічні заходи, які будуть сприяти нейтралізації впливу корозії і підвищенню надійності та довговічності підземного внутрішньо-свердловинного обладнання.

Швидкість корозії сталевих зразків в мінералізованому солевмісному середовищі визначали при вмісті в розчині 3%-NaCl і надлишковому тиску повітря над розчином в електрохімічній комірці 0–4 МПа. Залежність щільності анодного струму розчину сталі (пропорційного швидкості корозії) від надлишкового тиску повітря над розчином для різних сталевих зразків побудована за результатами 25 потенційно-статичних кривих. Як наслідок, найбільша швидкість корозії сталі зафіксована при атмосферному тиску в 3%-вому водному розчині NaCl. Звертає увагу те, що при збільшенні тиску для усіх дослідних сталей відбувається стійка анодна пасивація. Ретельне обстеження зразків показало, що поверхня їх покривалася суцільною плівкою і що характерно – із збільшенням вмісту кисню частина поверхні зразків оголялася, що свідчить про значну електропровідність розчину. Із збільшенням вмісту солей омичний спротив середовища знижується, що інтенсифікує струм обміну і корозійний процес руйнування металу.

1. P.Chindaprasrt, T.Cao Setting, segregation and bleeding of alkali-activated cement, mortar and concrete binders / Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes, WP, 2015, p.p.113-131.

2. Макаренко В.Д., Гоц В.І., Савенко В.І., Владимиров О.В., Макаренко Ю.В. Експериментальні дослідження кінетики росту тріщин та несучої здатності трубних сталей підземних систем водовідведення//Опір матеріалів і теорія споруд: Вип. №110.- 2023, С.469-482.

3. ДСТУБВ.2.7-185:2009 "Цементи. Методи визначення нормальної густоти, строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму".DSTU В V.2.7-185:2009 "Tsementy. Metody vyznachennia normalnoi hustoty, strokiv tuzhavlennia ta rivnomirnosti zminy ob'iemu.

4. Berdnyk O Yu, Lastivka O V, Maystrenko A A, Amelina N O. Processes of structure formation and neoformation of basalt fiber in an alkaline environment. – IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 020). – Vol. 907. – 012036. (Scopus) <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/907/1/012036/pdf>.