

Валерій МАКАРЕНКО,

д-р техн. наук, професор
ORCID: 0000-0001-6668-3957

Юрій ЦАПКО,

д-р техн. наук, професор
ORCID: 0000-0003-0625-0783

Оксана БЕРДНИК,

канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0001-5321-3518

Олексій ЦАПКО,

PhD, старший дослідник, доцент
ORCID: 0000-0003-2298-068X

Ольга ДУБИНА,

викладач
ORCID: 0009-0006-8516-0725

Алла МАЙСТРЕНКО,

канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0002-1152-995X

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

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

Уперше 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. Авторами даної статті розроблена схема випробувального стенду і відпрацьовані очікувані режими випробування зварюваних з'єднань при програмуванні тиску і температури середовища та режимів динамічної вібрації. Усі основні вузли установки – це гідро пульсатор, термічна камера, яка включала блоки трубопроводів з дослідними зварювальними з'єднаннями, нагрівальні пристрої, пневматичний щит управління, блок регулювання температури і тиску. Отримані експериментальні результати дали можливість підвести підсумки, зокрема: встановлено, що в початковий період (число циклів $N = 500$) швидкості росту тріщин на повітрі і в 5%-вому NaCl розчині близькі, а в заключному періоді випробувань вони різняться більш ніж на порядок. У зв'язку з більш інтенсивним впливом плоско деформованого стану в порівнянні з плоско напруженим тріщина розповсюджується вглиб і тільки після проростання на всю товщину зразка починається її подовження. Значне скорочення терміну випробувань у зв'язку з наведенням в зразку тріщини з високою концентрацією напружень у вершини тріщини, що дозволяє суттєво скоротити чи модифікувати початковий період. Можливість виявлення чутливості до розтріскування матеріалів, яка не виявляється при випробуванні зразків без концентратора (наприклад, для трубних сталей в морській воді). Разом з тим методу механіки руйнувань притаманний,

як і будь якому іншому методу, ряд специфічних обмежень по матеріалам, товщина, середовищам, пов'язаних з коректністю використання механіки руйнування.

Ключові слова: *труба, деформація, тріщина, пластична зона, тріщиностійкість.*

Вступ. Із літератури [1-7] і 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 (0–12м) при обмежених поперечних розмірах. Усі деталі підземного обладнання механічно взаємопов'язані між собою піддаються впливу на них експлуатаційних навантажень і корозійному руйнуванню від контакту з буровими рідинами і пластовими рідинами.

Для кріплення стінок свердловин застосовують вуглецеві і низьколеговані безшовні труби. Для їх випуску використовують сталі 45, 36Г2С, 20ХГ2Б і ін. Марка сталі Державними стандартами не вказується. Труби з'єднуються між собою в колону на без упорних кінчних різьбах трикутного профілю чи спеціальних, наприклад, типу ТТ. Причиною численних аварій, пов'язаних з руйнуванням трубних колон, є корозійне розтріскування, яке виникає при 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 забійної зони з ціллю інтенсифікації притока нафти і газу.

Абсолютна більшість поломок деталей внутрішньо свердловинного обладнання має ярко виражені сліди корозійно-втомного руйнування. Усі корозійно-втомлені злами 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 і довговічності підземного внутрішньо - свердловинного обладнання.

Мета досліджень. Експериментальні корозійно-механічні дослідження свердловинного обладнання нафтодобувної галузі під динамічним навантаженням.

Методика досліджень, обладнання і матеріали. 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, в яку поміщають електроди і яка володіє хімічною стійкістю в мінералізованих розчинах.

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, виготовлений 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.

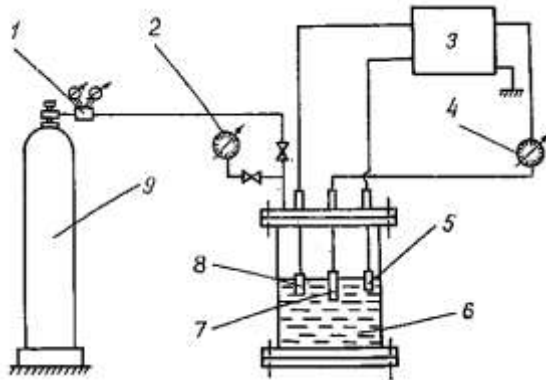


Рис. 1. Принципова схема установки для потенціостатичних замірів швидкості корозії при підвищених тисках: 1 – редуктор; 2 – манометр; 3 – потенціостат; 4 – міліамперметр; 5 – електрод порівняння; 6 – камера високого тиску; 7 – платиновий електрод; 8 – дослідний зразок; 9 – балон з тиснутим повітрям

З ціллю 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 820ОС в маслі і відпускали при 520ОС протягом 2.5 год з наступним кінцевим охолодженням на повітрі. Структура сталі 40АФ (мікро модифікована (ванадієм), після відпуску –

троостито-образний перліт з твердістю 275-290 НВ. Іншу партію зразків зміцнювали поверхневим загартуванням струмом високої частоти (с.в.ч) на високочастотній установці потужністю 100 кВт і частотою 70 кГц.

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.

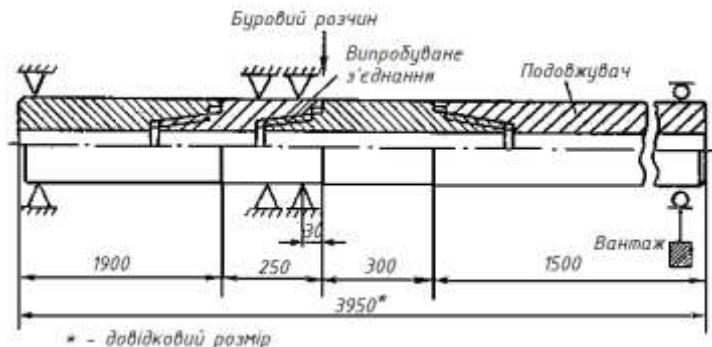


Рис. 2. Конструкція зразка для випробувань замкових різьб 3-121 на корозійну втомленість

В середину зразка заливали буровий розчин а ззовні подавали його на зразок струменевим способом. Дослідне з'єднання згвинчували обертаючим моментом 15000 Нм. 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.

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

З ціллю 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 дрібо-струменевою обробкою і захистом від корозії цинкуванням металізаційним покриттям.

Зразки з різьбою із сталі 35АФ загартували з 820ОС в маслі і відпускали при 550ОС на протязі 2.5 год з наступним охолодженням на повітрі. Структура сталі після відпуску – трооститообразний перліт (рис. 3), твердість 230-300 НВ. Іншу партію зразків зміцнювали поверхневим загартуванням, струмом високої частоти – с.в.ч. – 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 в печі при температурі 250ОС протягом 1.5 год. Твердість поверхні після термообробки досягала 50-55 HRC. Після загартування різьбову частину наклепували з використанням дрібної дрібї 3-

3.5 хв (для НВ 250- 300) і 5-6 хв (для HRC 50-55), а потім наносили цинкове покриття.

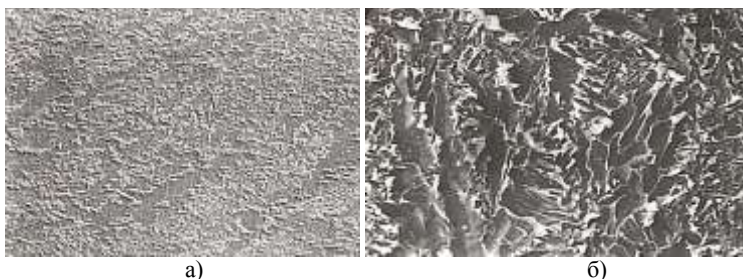


Рис. 3. Мікроструктура сталі 40ХН – сорбітоподібний перліт) (а)
і сталі 35АФ (трооститоподібний перліт) – (б)

Основна частина. 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 термін 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 потенційно-статичних кривих, ілюструється на рис. 4. Як і очікувалось, 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. Такі тенденції спостерігали дослідники Івано-Франківського національного університету нафти і газу. Причому підмічено, що методика наших експериментів, яка моделює стан аерованого розчину в свердловині, забезпечує постійну концентрацію в розчині в результаті надлишку стислого повітря. 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.

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 витривалості, %
	до поверхневого комбінованого 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 відпуск 560ОС; 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

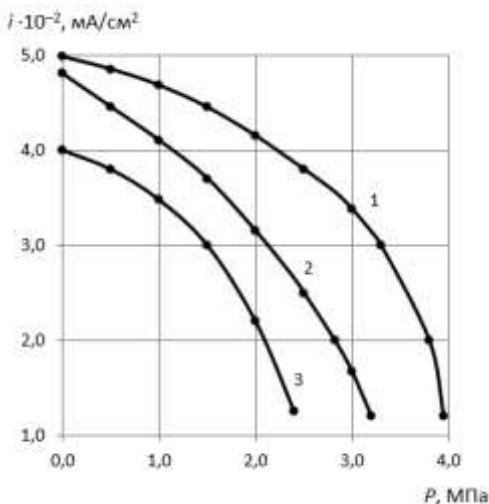


Рис. 4. Анодні поляризаційні криві сталі 40ХН (2); 20ГС (1) і 35АФ (3) в 3%-вому розчині NaCl в залежності від тиску солевмісного розчину

Як слідує із результатів випробувань, з підвищенням твердості поверхні сталі ефект від комбінованого зміцнювання помітно знижується (див. рис. 5). Це мабуть

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 $0.3 \dots 0.5 \cdot \sigma_T$, 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 неврівноваженої структури сталі.

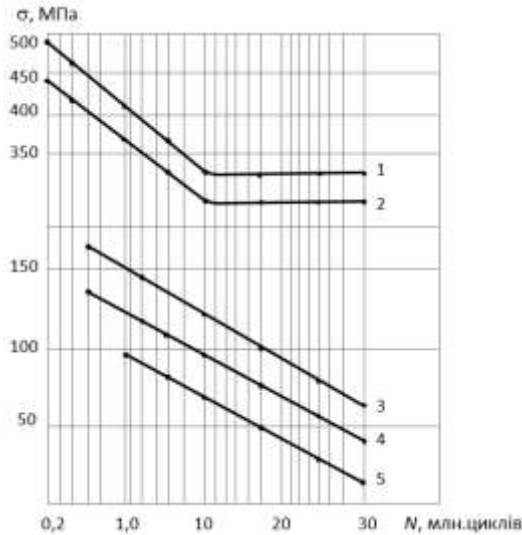


Рис. 5. Криві втомленості (1) і корозійно-тривалісності (2-5) гладких зразків із сталі 35АФ (1-4) і 40ХН (3): 1 – діаметр 5мм, $\sigma_m = 100$ МПа; 2 – зміцнювання діаметр 5мм, $\sigma_m = 100$ МПа; 3 – діаметр 75мм, $\sigma_m = 75$ МПа; 4 – діаметр 5 мм, $\sigma_m = 100$ МПа

Дослідженнями, проведеними в Україні (Івано-Франківський національний університет нафти і газу національний університет; Полтавська політехніка ім. Юрія Кондрачука; Інститут електрозварювання ім. С.О. Патона НАНУ і ін.) і за кордоном (Інститут Баттеля, США; Британська газова корпорація (БГА), Великобританія; Ніппон Стіл, Японія; Маннесман, ФРН) виявлено, що підвищення твердості сталі спричиняє помітне зростання спротиву замкової різби зношуванню при багатократному згвинчуванню 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 утруднення поверхневого загартування с.в.ч (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 HB300 – HB350. При цьому границя витривалості замкової різби, зміцненої комбінованим способом, помітно перевищує показники витривалості різб без поверхневого зміцнювання.

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

Висновки. 1. 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 різби; руйнування замкових різбових 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 і довговічності підземного внутрішньо - свердловинного обладнання.

2. Дослідженнями, проведеними в Україні (Івано-Франківський національний університет нафти і газу національний університет; Полтавська політехніка ім. Юрія Кондрачука; Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАНУ і ін.) і за кордоном (Інститут Баттеля, США; Британська газова корпорація (БГА), Великобританія; Ніппон Стіл, Японія; Маннесман, (ФРН) виявлено, що підвищення твердості сталі спричиняє помітне зростання спротиву замкової різби зношуванню при багатократному згинчуванню і розгинчуванню. 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 утруднення поверхневого загартування с.в.ч (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.

3. Як слідє із результатів випробувань з підвищенням твердості поверхні сталі, ефект від комбінованого зміцнювання помітно знижується. Це, мабуть, 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 [3-6], що оптимальні напруження затягування, які відповідають найвищій границі витривалості різбового з'єднання, досягають $0.3 \dots 0.5 \cdot \sigma_T$, де σ_T – межа текучості матеріалу. Отже, висока чутливість замкових різб до асиметрії циклу змінних напружень є причиною низької ефективності поверхневого зміцнювання для більш напруженої неврівноваженої структури сталі.

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 потенціоностабільних кривих. Як і слідувало чекати, 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.

Список літератури:

1. Радкевич О.І., П'ясецький О.С., Василенко І.І. Корозійно-механічна тривкість трубної сталі в сірководневому середовищі. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, 2000. 3. С. 93-97.
2. Чапля О., Радкевич О., П'ясецький О., Спектор Я. Порівняльний аналіз корозійно-механічних властивостей вітчизняної сталі 20ЮЧ з іноземними аналогами. *Машинознавство*, 1999. 8. С. 52-56.
3. Василенко И. И., Мелехов Р. К. Коррозионное растрескивание сталей. Київ: Наукова думка, 1974. 265 с.
4. Makarenko V. D., Shatilo S. P., Astafev V. I. Methods of increasing the corrosion resistance of oil pipelines. *Welding International*, 1998. 12(12) 988-991.
5. Makarenko V. D., Shatilo S. P. Increasing desulphurisation of the metal of welded joints in oil pipelines. *Welding International*, 1999. 13(12). 991-995.
6. Самойленко М.І. Функціональна надійність трубопроводів них транспортних систем. Харків: ХНАМП. 2009. 184с.
7. 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 2020)*. Vol. 907. 012036. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/907/1/012036/pdf>.

References:

1. Radkevich, O.I., P'yasetsky, O.S., & Vasilenko, I.I. (2000). Corrosion-mechanical corrosion of pipe steel in a hot-water medium. *Phys.-chem. Mechanics of Materials*, 3, 93-97.
2. Chaplya, O., Radkevich, O., Pyasetsky, O., & Spektor, Y. (1999). Rival analysis of corrosion-mechanical properties of 20YuCh laminated steel with foreign analogues. *Mashinostroyeniye*, 8, 52-56.
3. Vasilenko, I.I., & Melekhov, R.K. (1974). *Corrosion cracking of steels*. Kyiv: Naukova Dumka.
4. Makarenko, V.D., Shatilo, S.P., Astafev, V.I. (1998). Methods of increasing the corrosion resistance of oil pipelines. *Welding International*, 12(12). 988-991. <https://doi.org/10.1080/09507119809448548>
5. Makarenko, V.D., Shatilo, S.P. (1999) Increasing desulphurization of the metal of welded joints in oil pipelines. *Welding International*, 13(12). 991-995. <https://doi.org/10.1080/09507119909452086>

6. Samoylenko, M.I. (2009). Funktional reliability of pipelines of transport systems. Harkiv: HNAMP.

7. Berdnyk, O Yu, Lastivka, O V, Maystrenko, A A, & Amelina, N O. (2020). 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 2020)*. Vol. 907. 012036. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/907/1/012036/pdf>

Valeriy MAKARENKO, Yurii TSAPKO, Oksana BERDNYK, Oleksii TSAPKO, Olga DUBYNA, Alla MAISTRENKO

Experimental corrosion-mechanical studies of downhole equipment in the oil industry under dynamic loading in an aggressive environment

For the first time, comprehensive experimental studies of full-scale welded assemblies and steel structures under dynamic loading in the presence of a corrosive medium, in particular, 5% salt solution and NACE, an environment in accordance with the requirements of the International Association of Corrosion Engineers, were conducted. The authors of this article have developed a test bench scheme and worked out the expected test modes for welded joints when programming the pressure and temperature of the medium and dynamic vibration modes. All the main components of the installation are a hydraulic pulsator, a thermal chamber, which included pipeline blocks with test welded joints, heating devices, a pneumatic control panel, and a temperature and pressure control unit. The experimental results obtained made it possible to summarize the results, in particular: it was found that in the initial period (number of cycles $N = 500$), the crack growth rates in air and in 5% NaCl solutions are similar, 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-strained state compared to the plane-stressed state, the crack propagates in depth and only after germination to the full thickness of the sample does its elongation begin. Significant reduction of the test period due to inducing a crack in the specimen with a high stress concentration at the crack tip, which allows for a significant reduction or modification of the initial period. The ability to detect the sensitivity of materials to cracking, which is not detected when testing samples without a concentrator (for example, for pipe steels in seawater). At the same time, 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.

Keywords: pipe, deformation, crack, plastic zone, crack resistance.