



НИРКОВА

Людмила Іванівна —
доктор технічних наук,
старший дослідник,
завідувач відділу зварювання
газонафтопровідних труб
Інституту електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Стенограма доповіді на засіданні
Президії НАН України 8 березня 2023 року

У доповіді наведено найважливіші науково-практичні результати в галузі хімічного опору матеріалів та захисту від корозії, отримані в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Зокрема, розглянуто розроблену методологію досліджень та прогнозування довговічності зварних конструкцій критичної інфраструктури. Актуальність цих робіт зумовлена необхідністю забезпечення надійної та безпечної експлуатації об'єктів критичної інфраструктури України, що є стратегічно важливим для безпеки держави, функціонування економіки, розвитку суспільства та зростання добробуту населення.

Шановні члени Президії НАН України!

Шановні присутні!

Мою доповідь присвячено розробленню методології досліджень та прогнозуванню довговічності зварних конструкцій критичної інфраструктури.

Об'єкти критичної інфраструктури — це підприємства та установи енергетики, хімічної промисловості, комунального господарства, транспорту, зокрема трубопровідного, та інших галузей. Ці об'єкти стратегічно важливі для функціонування економіки, гарантування безпеки держави, суспільства та населення. Забезпечення їх надійної та безпечної експлуатації є найважливішим завданням сьогодення, оскільки руйнування таких об'єктів може негативно вплинути на національну безпеку, навколишнє природне середовище, призвести до людських жертв і значних матеріальних та фінансових збитків.

Спочатку варто визначити термінологію, використану в цій доповіді.

Довговічність — це властивість конструкцій та їх покривів виконувати необхідні функції до моменту настання гранично-

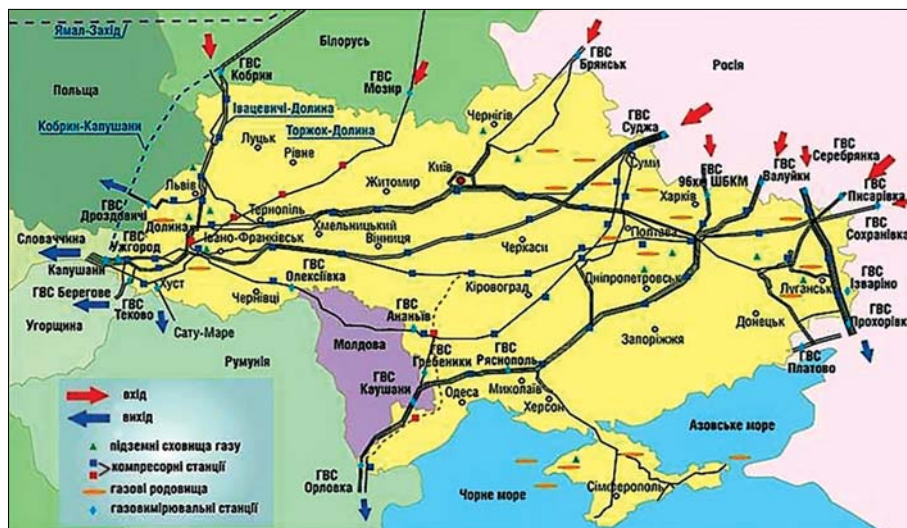


Рис. 1. Газотранспортна система України

го стану при встановленій системі обслуговування і ремонту (ДСТУ Б В.2.6-193:2013 «Захист металевих конструкцій від корозії. Вимоги до проектування»). Довговічність, зокрема, характеризується строком (терміном) служби.

Термін служби — календарна тривалість експлуатації об'єкта від початку чи її поновлення після ремонту до переходу в граничний стан (ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни та визначення»).

Ресурс; технічний ресурс — сумарний наробіток об'єкта від початку його експлуатації чи поновлення після ремонту до переходу в граничний стан (ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни та визначення»).

Залишковий ресурс — сумарний наробіток об'єкта від моменту контролю його технічного стану до переходу у граничний стан (ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни та визначення»).

Довговічність металоконструкцій багато в чому залежить від ефективності їх протикорозійного захисту, який визначається:

- вибором матеріалів, які відповідають умовам експлуатації;
- дотриманням технологій зварювання та з'єднання матеріалів, а також післязварювального оброблення;
- використанням сучасних протикорозійних покриттів і технологій їх нанесення;

- контролем під час будівництва, монтажу та експлуатації об'єктів відповідно до чинних нормативних документів;

- розробленням сучасних нормативних документів щодо захисту від корозії.

В Україні основні вимоги до захисту металоконструкцій від корозії викладено в нормативних документах. Зокрема, ДСТУ 4219-2003 зі Зміною № 1 «Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії» встановлює вимоги до захисних полімерних покриттів, електрохімічного захисту та методів контролю; ДСТУ-Н Б А.3.1:2015 «Магістральні трубопроводи. Нанесення захисних покриттів та улаштування теплової ізоляції» регламентує вимоги до виконання ізоляційних робіт для захисту зовнішньої та внутрішньої поверхонь магістральних нафто- і газопроводів, встановлює типи внутрішніх покриттів для захисту лінійної частини магістральних трубопроводів і зварних стиків; ДСТУ ISO 12944:2015 «Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems. Part 6: Laboratory performance test methods» встановлює методи випробувань з визначення орієнтовного строку служби покриттів.

Сім з цих нормативних документів, у тому числі державного рівня, у сфері захисту металоконструкцій від корозії, визначення технічного стану захисних покриттів та корозійного стану

поверхні труб підземних газонафтопроводів, визначення потенційно стрес-корозійно небезпечних ділянок магістральних газопроводів, моніторингу технічного стану захисного покриття та корозійного стану металу конструкцій арки нового безпечного конфайнменту «Укриття» на ЧАЕС розроблено в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

Методику прогнозування довговічності захисних покриттів запропоновано в ДСТУ ISO 12944. Проте для металів та сплавів у нормативних документах наведено лише методи випробування в різних середовищах та підходи до досліджень зі встановлення строку служби. Тривалість витримування в середовищах стандартами не нормується.

Дослідження та прогнозування довговічності зварних з'єднань і вузлів конструкцій ми проводили на багатьох об'єктах, найважливіші з яких:

- підземні магістральні трубопроводи в умовах комплексного протикорозійного захисту (метал та зварні з'єднання труб, захисні полімерні покриття);
- конструкції інженерного призначення, що експлуатуються в атмосферних умовах (залізничні мости, вагони, металеві фрагменти будівель без захисту лакофарбовими покриттями тощо);
- зварні конструкції з алюмінієвих сплавів для повітряного та морського транспорту (обшивка кораблів, морських суден, літаків; ємності для зберігання пального, води та інших рідин);
- металеві конструкції, що експлуатуються в замкнутих об'ємах (новий безпечний конфайнмент «Укриття»).

Для оцінювання стану діючих тривало експлуатованих магістральних трубопроводів в умовах комплексного протикорозійного захисту в Інституті розроблено методичний підхід.

Україна має найбільшу в Європі газотранспортну систему загальною довжиною приблизно 37,6 тис. км, яка складається з магістральних газопроводів — близько 22,07 тис. км труб діаметром від 1220 до 1420 мм з робочим тиском газу до 7,5 МПа, магістральних газопроводів-відводів — 13,123 тис. км, розподільних газопроводів — 2,469 тис. км, 73 компре-



Рис. 2. Випадок руйнування магістрального газопроводу тривалої експлуатації через корозійне розтріскування



Рис. 3. Відшарування стрічкового захисного покриття, яке сталося під час експлуатації труб магістрального газопроводу

сорних станцій сумарною потужністю близько 5,5 МВт, 1473 газорозподільних станцій, 13 підземних газосховищ з активною місткістю 32 млрд м³ (рис. 1).

Під час експлуатації підземних газопроводів в умовах комплексного протикорозійного (захисними полімерними покриттями) та електрохімічного (наведенням катодної поляризації) захисту можна знизити швидкість корозії сталі до технічно допустимого рівня, але повністю запобігти утворенню різних видів пошкоджень практично неможливо. Найнебезпечнішим з таких пошкоджень є корозійне розтріскування, ініціювання якого важко спрогнозувати, а розвитку складно запобігти (рис. 2).

Таке корозійне розтріскування відбувається на катодно захищених трубопроводах під стрічковим полімерним покритвом, що відша-

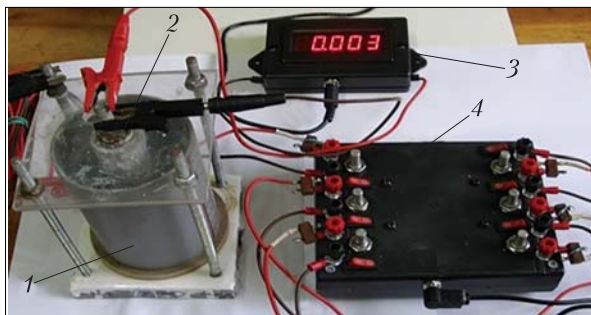


Рис. 4. Установа для дослідження захисних покриттів методом катодного відшарування: 1 – захисний покриття; 2 – електрохімічна комірка; 3 – мікроамперметр; 4 – багатоканальний потенціостат для регулювання потенціалу в комірці

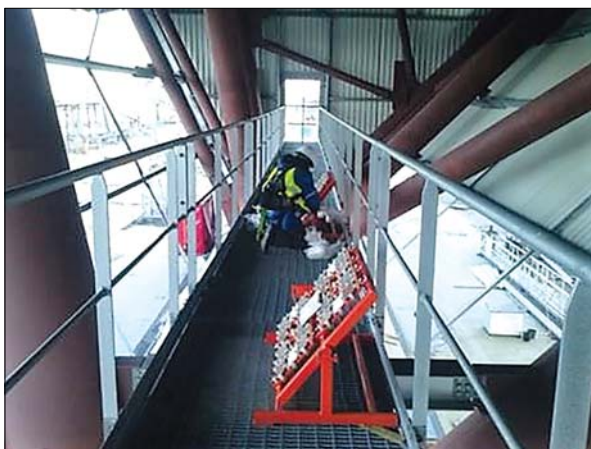


Рис. 5. Стенд зі зразками для експонування, встановлений у північній галереї нового безпечного конфайнменту на ЧАЕС

ровується внаслідок тривалої експлуатації в умовах катодного захисту (рис. 3).

Методологія оцінювання стану діючих трубопроводів, у тому числі тривало експлуатованих, має забезпечувати можливість виявлення службових властивостей, що характеризують працездатність матеріалу. Такий підхід до оцінювання на сьогодні є загальноприйнятим і передбачає проведення комплексу досліджень, що охоплюють:

- аналіз даних сертифікатів на труби;
- візуально-оптичний контроль поверхні, оцінювання стану поверхні, вимірювання діаметра, овальності, товщини стінки;

- визначення хімічного складу основного металу та металу зварних швів;
- визначення структурних особливостей і твердості основного металу та зварного з'єднання труб;
- визначення механічних показників основного металу та зварних з'єднань відповідно до вимог технічних умов;
- визначення температурної залежності ударної в'язкості основного металу і температури переходу в крихкий стан;
- визначення електрохімічних характеристик металу труб.

Цю методологію було використано для оцінювання стану тривало експлуатованих магістральних газопроводів «Уренгой–Помари–Ужгород», «Союз», «Долина–Ужгород–Держжордон», «Кременчук–Кривий Ріг», «Єлець–Курськ–Диканька», «Київ–Захід України-1», магістральних нафтопроводів «Дружба», «Одеса–Броди», тепломереж та інших трубопроводів.

Як приклад оцінювання згідно з цією методологією можна навести проведене дослідження стану зварних з'єднань труб магістрального газопроводу «Уренгой–Помари–Ужгород». Було встановлено, що для зварних з'єднань труб магістрального газопроводу після 20 років експлуатації ударна в'язкість, яка характеризує схильність труб до крихкого руйнування, значно перевищує нормовану, що свідчить про низьку пошкоджуваність металу та задовільний опір руйнуванню.

Методологію оцінювання було застосовано в ТОВ «Оператор газотранспортної системи України» під час дослідження причин аварій на тривало експлуатованих магістральних газопроводах, а також для забезпечення надійності їх подальшої експлуатації.

Для пасивного захисту від корозії підземних трубопроводів зазвичай застосовують захисні полімерні покриття. Їх комплексною характеристикою є стійкість проти катодного відшарування, яку оцінюють за таким показником, як радіус відшарування (нормується ДСТУ 4219). У відділі зварювання газонафтопровідних труб Інституту електрозварювання

ім. Є.О. Патона НАН України розроблено лабораторний стенд для дослідження катодного відшарування покриттів, до складу якого входить притискна електрохімічна комірка, багатоканальний потенціостатичний пристрій та вимірювальні прилади (рис. 4).

Упродовж останніх 10 років накопичено багатий експериментальний матеріал щодо ефективності захисних полімерних покриттів різних класів під дією експлуатаційних чинників. Встановлено, що захисні властивості покриттів залежать від рівня потенціалу катодної поляризації, корозивності середовища, температури, стану покриття (новий чи тривало експлуатований), властивостей сталі та тривалості експонування. Показано, що підтримування захисного потенціалу на рівні мінімального значення $-0,85$ В, що нормується ДСТУ 4219, сприяє збереженню захисних властивостей покриттів, оскільки за таких умов гальмується відновлення водню в дефекті покриття на оголеній поверхні сталі.

Для моделювання умов експлуатації та дослідження металоконструкцій і захисних покриттів в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України функціонує акредитована лабораторія, до складу якої входить група корозійних випробувань, оснащена унікальним обладнанням. За допомогою цього обладнання можна відтворювати умови атмосферної корозії в різних кліматичних районах, тобто моделювати умови експлуатації з підвищеними температурою та вологістю, низькими температурами, періодичним змочуванням, створювати атмосферу соляного туману, застосовувати ультрафіолетове опромінення тощо. Умови корозії у морській та прісній воді можна моделювати також у рухомому потоці рідини.

З використанням законів хімічної кінетики для опису прискорення корозійного процесу з підвищенням температури розроблено методологію встановлення строку служби та прогнозування довговічності зварних з'єднань і вузлів металоконструкцій.

Для оцінювання ефективності технології високочастотного механічного проковування для подовження циклічної витривалості звар-

них з'єднань зі сталі 15ХСНД вивчено вплив на них атмосфери помірного клімату. Встановлено, що 100 год випробувань прискореними методами за підвищених температури і вологості відповідають 1 року експлуатації. За результатами корозійних досліджень у динаміці та за допомогою оптичної мікроскопії показано, що руйнування зміцненого пластично zdeформованого шару на конструкційній сталі 15ХСНД в умовах, які імітують помірний клімат, починається після 1200 год експонування, що еквівалентно приблизно 12 рокам експлуатації в реальних умовах. Встановлено, що через 12 років експлуатації слід очікувати зменшення товщини зміцненого шару вдвічі.

Для дослідження зварних з'єднань алюмінієвих сплавів, які використовують у конструкціях повітряного, космічного та морського транспорту, розроблено методіку прискорених корозійних випробувань.

У тривалих корозійно-механічних випробуваннях було оцінено змінення механічних властивостей термооброблених за різними режимами зварних з'єднань зі сплаву Al-Mg-Si-Cu. Цей сплав зазвичай застосовують для виготовлення ємностей для зберігання рідин у літаках. Встановлено, що термообробка за режимом гартування та штучного старіння забезпечує збереження міцності зварного з'єднання на рівні основного металу.

Показано, що корозійно-механічна тривкість у ракетному паливі (амілі) зварних з'єднань зі сплаву Al-Cu, який використовують для виготовлення паливних баків ракет-носіїв, не залежить від напрямку прокату, термічного циклу зварювання та режиму термообробки. Працездатність таких зварних виробів насамперед визначається раціональним вибором режиму зварювання.

Результати цих робіт впроваджено на ДП «Антонов» при виготовленні ємності для води та в КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля при виготовленні паливного бака ракети-носія «Циклон-4М».

Згідно із запропонованою методикою впродовж 180 діб відбувалося дослідження корозійно-механічної тривкості у модельних умовах

морського клімату зварних з'єднань зі сплаву АМг5М, який використовують для обшивок суден та кораблів. Досліджувані зразки були зварені в різних просторових положеннях відносно горизонтальної площини — під кутами 0°, 30° та 90°. Встановлено зниження їх міцнісних та пластичних властивостей, а також корозійної тривкості, що найбільш інтенсивно проявилось для зразків у напруженому стані. Запропоновано використовувати ці з'єднання за умови вибору такого просторового положення при зварюванні, яке забезпечить найбільш придатні показники механічних властивостей.

Дослідження довговічності фрагментів алюмінієвих конструкцій навісних вентиляованих фасадів будівель та лакофарбових покривів проведено для різних модельованих атмосферних умов, наприклад у разі впливу соляного туману, сірчистого газу (моделює міську атмосферу), періодичного змочування. Оцінено корозію від надрізу покриву та зміну механічних властивостей болтового з'єднання в динаміці. У результаті було встановлено, що механічні властивості досліджених зразків болтового з'єднання після витримування упродовж 180 діб в умовах періодичного змочування, яке моделювали періодичним зануренням у розчин 3 % NaCl, за визначеними показниками не погіршуються порівняно з показниками у ви-

хідному стані. Відповідно до розробленої методології визначено строк служби: 25 років — для покривів і 50 років — для болтових з'єднань.

Розроблено методику корозійного моніторингу конструкцій арки нового безпечного конфайнменту на Чорнобильській АЕС на період будівництва (впродовж 2 років) та експлуатації (протягом 100 років). Спільно з компанією «Новарка» фахівці Інституту провели оцінювання технічного стану захисного покриву та корозійного стану конструкцій арки впродовж 18 місяців у період будівництва (рис. 5). Встановлено, що технічний стан захисного покриву не змінився, корозійний стан зразків-свідків відповідає вимогам методики SIP-N-TE-22-B2143-TEN-001-01 для категорії низької корозивності атмосфери С2 згідно з ISO 12944-2.

Отже, результати проведених в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України фундаментальних та прикладних досліджень дозволяють прогнозувати довговічність конструкцій критичної інфраструктури, зокрема металоконструкцій різного призначення, трубопроводів, захисних покривів тощо.

Дякую за увагу!

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик

Lyudmila I. Nyrkova

Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3917-9063>

RESEARCH METHODOLOGY AND DURABILITY PREDICTION OF WELDED STRUCTURES OF CRITICAL INFRASTRUCTURE

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, March 8, 2023

The report presents the most important scientific and practical results in the field of chemical resistance of materials and protection against corrosion, obtained at the Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. In particular, the developed methodology for research and durability prediction of welded structures of critical infrastructure is considered. The relevance of these works is due to the need to ensure the reliable and safe operation of Ukraine's critical infrastructure objects, which is strategically important for state security, the functioning of the economy, the development of society and increasing the population's well-being.

Cite this article: Nyrkova L.I. Research methodology and durability prediction of welded structures of critical infrastructure. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2023. (6): 19–24. <https://doi.org/10.15407/visn2023.06.019>