

АДАПТИВНЕ УПРАВЛІННЯ ЦІЛІСНІСТЮ ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ ПАРАДИГМИ ІНДУСТРІЇ 4.0/5.0

С.Ю. Максимов¹, О.І. Звірко², О.С. Міленін¹, Л.І. Ниркова¹, І.І. Чудик³, В.Б. Запихляк³, В.В. Рудко⁴

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: asmilenin@ukr.net

²Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАНУ. 79060, м. Львів, вул. Наукова 5. E-mail: olha.zvirko@gmail.com

³Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.
E-mail: i.chudyk@nung.edu.ua

⁴АТ «Укртрансгаз». 01021, м. Київ, Кловський узвіз, 9/1.

У роботі розвинуто науково обґрунтовану концепцію адаптивного управління цілісністю газотранспортної системи України в умовах переходу до парадигми Індустрії 4.0/5.0 та ускладнення експлуатаційних факторів, включаючи воєнні впливи, декарбонізацію енергетичного сектору та перспективне транспортування газоводневих сумішей. Запропоновано системний підхід до аналізу життєвого циклу об'єктів газотранспортної системи, що інтегрує фізично обґрунтоване моделювання, імовірнісні методи оцінювання надійності та інноваційні технології відновлення технічного стану. Розглянуто багаторівневу архітектуру управління, яка охоплює системний рівень оптимізації режимів експлуатації, індивідуалізований аналіз дефектних ділянок на основі скінченно-елементного моделювання, методів Вейбулла та Монте-Карло, а також прогнозування деградаційних процесів як важливу частину предикативного обслуговування. Особливу увагу приділено адаптації ремонтних технологій до поточного технічного стану конструкцій із урахуванням корозійно-водневих механізмів руйнування та локальних напружено-деформованих станів. Бібліогр. 36, табл. 1, рис. 23.

Ключові слова: газотранспортна система, адаптивне управління цілісністю, Індустрія 4.0, Індустрія 5.0, предикативне обслуговування, скінченно-елементне моделювання, воднева деградація, корозійне розтріскування, ремонт

Вступ. Газотранспортна система (ГТС) України є одним із найбільших інфраструктурних комплексів Європи та виконує стратегічну функцію забезпечення енергетичної безпеки держави, підтримки стабільності енергетичних ринків і розвитку транскордонної енергетичної інтеграції. Водночас сучасні умови функціонування газотранспортної інфраструктури суттєво відрізняються від тих, для яких проектувалася переважна більшість магістральних газопроводів (МГ) та інших об'єктів. Зміна режимів транспортування природного газу, використання реверсних потоків, зростання ролі підземних сховищ газу як елементів балансування енергетичних систем, необхідність забезпечення стійкості до техногенних і воєнних впливів (рис. 1), а також перспективи транспортування сумішей природного газу та водню формують нові вимоги до надійності, довговічності та безпеки експлуатації об'єктів ГТС.

Традиційно забезпечення роботоздатності як МГ, так і ГТС у цілому базувалося на нормативно-регламентованій парадигмі управління технічним станом, що ґрунтується на детерміністичних проєктних припущеннях, стандартизованих коефіцієнтах запасу міцності, регламентованих ін-

тервалах технічного обслуговування та уніфікованих критеріях прийняття технічних рішень. Проте його фундаментальною особливістю є орієнтація на описання найнесприятливіших експлуатаційних сценаріїв і використання консервативних припущень для компенсації невизначеностей щодо фактичного технічного стану. Останніми роками стає дедалі очевиднішим, що можливості традиційної нормативної парадигми поступово вичерпуються. Старіння інфраструктури, зростання неоднорідності експлуатаційних умов, підвищення вимог до економічної ефективності та екологічної відповідальності, а також необхідність адаптації ГТС до нових вимог ставлять під сумнів доцільність використання виключно стандартизованих підходів до оцінювання технічного стану та технологічних заходів підтримки надійності. За таких умов головним обмеженням стає не відсутність нормативної бази, а недостатня здатність існуючих методів враховувати індивідуальні особливості деградації конкретних об'єктів і реальний рівень ризиків їхньої подальшої експлуатації.

Одночасно з цим відбувається суттєвий розвиток фундаментальних досліджень у галузях матеріалознавства, механіки руйнування, технологій діагностування та ремонту. Сучасні наукові результати демонструють, що процеси деградації трубних сталей визначаються складною вза-

© Максимов С.Ю., Звірко О.І., Міленін О.С., Ниркова Л.І., Чудик І.І., Запихляк В.Б., Рудко В.В., 2026.

Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



Рис. 1. Пошкоджені трубопроводи внаслідок воєнних дій

ємодією структурних, механічних, корозійних і водневих факторів, які розвиваються на різних масштабних рівнях – від мікроструктурного розвитку матеріалу до формування макроскопічних дефектів і зміни роботоздатності трубопровідної системи в цілому. Внаслідок цього управління цілісністю дедалі більше потребує інтеграції мультимасштабних уявлень про деградацію матеріалів із процесами прийняття інженерних рішень та управлінням життєвим циклом об'єктів критичної інфраструктури.

Додаткового значення ця проблема набуває в контексті енергетичного переходу та перспективного використання існуючих ГТС для транспортування сумішей природного газу та водню. На відміну від традиційних умов експлуатації, водень здатний суттєво впливати на механізми деформування та руйнування трубних сталей, змінювати характеристики тріщиностійкості, прискорювати розвиток пошкоджуваності та формувати нові джерела експлуатаційного ризику. За цих умов традиційні критерії оцінювання технічного стану, сформовані переважно для транспортування природного газу, потребують переосмислення на основі сучасних знань про фізичні механізми водневої деградації матеріалів.

Зазначені тенденції збігаються з глобальною трансформацією промислових систем у межах парадигм Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0. У контексті газотранспортної інфраструктури значення Індустрії 4.0 полягає не лише у впровадженні цифрових технологій, а, насамперед, у створенні можливостей для переходу від періодичного контролю до

безперервного моніторингу технічного стану, прогностичної аналітики та ризик-орієнтованих підходів до прийняття рішень. Водночас Індустрія 5.0 розширює цю концепцію шляхом інтеграції принципів людиноцентричності, стійкості та сталого розвитку. Для ГТС це означає перехід від управління окремими елементами до управління життєвим циклом інфраструктурних активів, від планово-переджувального до адаптивного обслуговування за фактичним станом, від капіталомісткої заміни елементів до науково обґрунтованого продовження строку їхньої безпечної експлуатації, інноваційного відновлення роботоздатності, а також від автоматизації процесів до науково-обґрунтованої підтримки прийняття інженерних рішень.

Наразі інтеграція парадигм Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0 у виробничі системи нафтогазової галузі залишається несистемною та фрагментарною. У науковій літературі показано, що впровадження технологій Індустрії 4.0 у транспортування газу забезпечує суттєве підвищення ефективності та безпеки експлуатації, одночасно формуючи основу для більш сталого управління активами через моніторинг у режимі реального часу, прогностичну аналітику, цифрові двійники та підходи прозорості на основі блокчейн-технологій [1–4]. Водночас у низці оглядових досліджень підкреслюється, що перехід до Індустрії 5.0 перебуває на ранній стадії розвитку, а практичні впровадження суттєво відстають від концептуальних і теоретичних розробок [5], особливо у контексті повномасштабних людиноцентричних моделей та моделей циркулярної економіки. Залишаються невирішеними

системні бар'єри, зокрема високі економічні втрати впровадження (особливо для операторів поза глобальними корпораціями), обмежена сумісність із застарілою інфраструктурою, недостатній рівень цифрових компетенцій персоналу, зростаючі ризики кібербезпеки внаслідок розширення IoT-екосистеми та фрагментованість управління, що призводить до реалізації ізольованих пілотних проєктів замість цілісних трансформаційних стратегій [6–7]. Водночас у сучасних дослідженнях дедалі більше підкреслюється, що ефективність цифрової трансформації визначається не лише технологічними факторами, але й узгодженням цифрових ініціатив із довгостроковими бізнес- і сталими цілями розвитку [8–9]. Отже, перехід від суто технологічно орієнтованої парадигми до збалансованого підходу, що поєднує продуктивність із суспільними та екологічними пріоритетами, залишається ключовою, але ще недостатньо реалізованою складовою концепції Індустрії 5.0.

Таким чином, сучасні виклики зумовлюють необхідність формування нової парадигми управління цілісністю ГТС, яка поєднує досягнення фундаментального матеріалознавства, мультимасштабне моделювання процесів деградації, ризик-орієнтовані методи оцінювання роботоздатності, цифрові технології Індустрії 4.0 і принципи людиноцентричності, стійкості та сталого розвитку Індустрії 5.0. На відміну від традиційної нормативно-орієнтованої моделі, така парадигма передбачає науково-обґрунтоване та адаптивне управління цілісністю, у межах якої кожен інфраструктурний об'єкт розглядається як унікальна система з індивідуальною історією деградації, експлуатації та залишкового ресурсу. У контексті повоєнного відновлення України особливого значення набуває формування нових науково обґрунтованих парадигм управління критичною інфраструктурою, орієнтованих не на просте відтворення довоєнного стану, а на якісну трансформацію принципів її проєктування, експлуатації й технічного обслуговування. Відновлення ГТС у таких умовах має розглядатися як можливість переходу до принципово нового рівня технологічної зрілості, що базується на інтеграції цифрових технологій, ризик-орієнтованого управління цілісністю та сучасного фундаментального матеріалознавства. Це передбачає відмову від відновлення інфраструктури за принципом «як було» на користь створення адаптивної, стійкої та інтелектуально керованої системи, здатної функціонувати в умовах підвищеної невизначеності, змінних режимів навантаження та нових енергетичних сценаріїв, включаючи транспортування водневмісних

сумішей. За такою логікою повоєнна реконструкція набуває характеру довгострокової науково-технологічної модернізації, де ключовим критерієм ефективності стає не лише відновлення пропускної здатності, а й підвищення рівня безпеки, ресурсу та екологічної стійкості інфраструктури на основі принципів Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0.

Метою роботи є узагальнення доробку авторського колективу та розвиток науково обґрунтованої концепції адаптивного управління цілісністю ГТС України в умовах переходу до парадигми Індустрії 4.0/5.0, що охоплює змінні експлуатаційні та екстремальні впливи (зокрема воєнного характеру), процеси декарбонізації енергетики та перспективне транспортування газодневних сумішей, на основі інтеграції фізично обґрунтованого моделювання, імовірнісних методів аналізу та інноваційних технологій ремонту.

Системне управління ГТС як основа науково обґрунтованого прийняття рішень і підвищення адаптивності. Одним із фундаментальних принципів парадигми Індустрії 4.0/5.0 є адаптивність складних технічних систем, яка передбачає їхню здатність безперервно змінювати режими функціонування відповідно до поточного технічного стану, зовнішніх впливів і прогнозованих сценаріїв розвитку. Для критичної енергетичної інфраструктури це означає перехід від жорстко регламентованих режимів експлуатації до науково обґрунтованого управління, заснованого на інтеграції фізичного моделювання, цифрових технологій, прогнозування технічного стану та ризик-орієнтованого аналізу. В умовах воєнних викликів саме адаптивність стає визначальною характеристикою ГТС України, забезпечуючи її здатність підтримувати роботоздатність за умов суттєвої зміни структури потоків газу, пошкодження окремих елементів інфраструктури, зміни режимів експлуатації.

Таким чином, інтенсивні воєнні дії стали каталізатором докорінної зміни принципів функціонування української ГТС. Припинення транзиту природного газу до країн Європейського Союзу, перехід до реверсних режимів транспортування, нерівномірне завантаження МГ, зміна режимів роботи компресорних станцій та суттєве зростання ролі підземних сховищ газу сформували нові вимоги до управління системою. За таких умов традиційний підхід, у межах якого окремі трубопроводи, компресорні станції чи підземні сховища розглядаються як незалежні об'єкти, вже не забезпечує необхідної ефективності та стійкості. ГТС доцільно розглядати як єдиний багаторівневий

технічний комплекс, що об'єднує МГ, компресорні станції, підземні сховища газу, свердловини, системи автоматизації та технічної діагностики в інтегровану мережу взаємопов'язаних елементів. Зміна режиму роботи будь-якої складової неминуче впливає на розподіл потоків газу, рівні тиску, циклічність навантаження обладнання, напружено-деформований стан (НДС) конструкцій та темпи накопичення експлуатаційної пошкодженості. Саме тому об'єктом оптимізації повинні бути не окремі споруди, а газотранспортна система загалом.

Науково обґрунтоване системне управління набуває особливої актуальності в умовах можливого пошкодження окремих елементів інфраструктури. Втрата окремих компресорних станцій, зміна режиму роботи підземних сховищ газу чи локальне пошкодження МГ повинні розглядатися не як ізолювані аварійні ситуації, а як один із можливих сценаріїв функціонування системи. Це потребує використання адаптивних алгоритмів управління, здатних у реальному часі прогнозувати наслідки зміни конфігурації мережі, визначати оптимальні режими транспортування газу та мінімізувати технічні й експлуатаційні ризики.

Так, пропускна здатність ГТС є важливим показником ефективності її роботи та визначається взаємодією лінійних ділянок і компресорних станцій як єдиної мережі послідовно та паралельно з'єднаних елементів. Вона залежить від параметрів кожної ділянки та режимів транспортування, причому навіть для простого однопоточного газопроводу її визначення є ітераційною задачею через залежність гідравлічного опору, температури та стисливості від витрати. Для складних багатокомпонентних систем задача суттєво ускладнюється необхідністю узгодження характеристик усіх елементів і визначення єдиної робочої точки системи. У системному підході це реалізується через суміщення характеристик лінійної частини та компресорних станцій із подальшим уточненням параметрів із урахуванням реальних режимів роботи. Для спрощення розрахунків багатопоточної системи часто зводяться до еквівалентного однопоточного газопроводу методом еквівалентного діаметра з подальшим ітераційним уточненням характеристик ГТС довільної конфігурації. Пропускна здатність еквівалентного газопроводу визначається на основі основного рівняння газопроводів, записаного для зони жорстких труб турбулентного режиму [10]:

$$Q = 1,64 \cdot 10^{-6} d_b^{2,6} \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2}{\Delta z T_{cp} L}}, \quad (1)$$

де P_H, P_K – тиск на початку та в кінці ділянки з довжиною L ; T_{cp}, z – середня температура та коефіцієнт стисливості, d_b – внутрішній діаметр газопроводу.

У подальшому здійснюється розподіл витрати газу між паралельними нитками системи з урахуванням їхніх діаметрів і коефіцієнтів гідравлічного опору, які для кожної нитки залежать від витрати. Ітераційний процес побудований на основі загального основного рівняння газопроводів і класичних залежностей параметрів:

$$Q = 0,326 \cdot 10^{-6} d_i^{2,5} \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2}{\lambda_i \Delta z T_{cp} L}} \\ \lambda_i = 0,067 \left(\frac{158}{Re_i} + \frac{2K_i}{d_i} \right)^{0,2} \\ Re_i = 1,81 \cdot 10^3 \frac{Q_{\Delta}}{d_i \eta} \quad (2)$$

де λ_i – коефіцієнт гідравлічного опору i -го газопроводу; Re – число Рейнольдса; η – коефіцієнт динамічної в'язкості.

У результаті характеристика лінійної ділянки складної ГТС на основі (2) може бути представлена рівнянням:

$$P_{H_j} - P_{K_j} = c_j Q^2 \quad (3)$$

де $c_j = \frac{\lambda_j \Delta z T_j L_j}{(0,326 \cdot 10^{-6} d_j^{2,5})^2}$; j – номер ділянки.

На основі характеристик компресорних станцій і лінійних ділянок складної ГТС розроблено математичну модель квазістаціонарного режиму, яка дозволяє визначати пропускну здатність системи та параметри її експлуатації. Показано, що регулювання продуктивності ГТС може здійснюватися шляхом виведення з роботи окремих компресорних станцій (КС), а також встановлено кількісний вплив їхніх параметрів на загальний режим функціонування системи. Запропонована модель може бути використана для прогнозування роботи ГТС у взаємодії з підземними сховищами газу.

В умовах неповного завантаження ГТС її фактична продуктивність може бути суттєво нижчою за пропускну здатність, що зумовлює задачу оптимального регулювання режимів роботи за критерієм мінімізації енерговитрат. Одним із механізмів такого регулювання є поетапне відключення окремих компресорних станцій. У разі відключення КС- j у стаціонарному режимі тиски на вході та виході станції вирівнюються. Це дозволяє визначати пропускну здатність системи при різних конфігураціях її роботи; при цьому відключення КС-1 фактично призводить до зупинки системи через недопустиме зниження тиску на вході КС-2 [11].

Як приклад виконано розрахунки для газопроводу «Союз» на ділянці в межах України за умови закриття міжниткових перемичок із трансукраїнською ГТС. Встановлено, що його пропускна здатність за максимальної гідравлічної ефективності та паспортних характеристик газоперекачувальних агрегатів (ГПА) на ділянці Новопсков–Хуст становить 92,219 млн м³/добу. Подальший аналіз відключення компресорних станцій (від КС-12 «Борова» до КС-22 «Хуст») показав нерівномірний вплив на зниження пропускної здатності: відключення КС «Борова» (№ 2) зменшує її на 14,2 %, КС «Першотравнева» (№ 3) – на 9,7 %, КС «Маківка» (№ 4) – на 7,2 %, тоді як для КС «Бар» (№ 10), «Гусятин», «Богородчани» та «Хуст» зниження становить 2,5...2,2 % (рис. 2). Це свідчить, що вплив відключення компресорних станцій зменшується зі збільшенням їхнього порядкового номера в системі, що підтверджує можливість керованого регулювання режимів роботи ГТС шляхом вибіркового виведення КС із експлуатації [11].

Додатково досліджено вплив зміни швидкості обертання роторів нагнітачів на КС-1 «Новопсков», КС-2 «Борова» і КС-3 «Першотравнева». Встановлено, що зниження відносної швидкості обертання в діапазоні 1,0...0,8 призводить до зменшення пропускної здатності системи на 7,2; 6,4 та 5,6 % відповідно (рис. 3). Отримані результати свідчать, що ефективність такого способу регулювання є вищою для КС, розташованих ближче до початку системи [11].

Зниження енерговитрат на транспортування природного газу може бути досягнуте шляхом раціонального використання підземних сховищ газу (ПСГ), які виконують функції як проміжних джерел, так і споживачів у ГТС.

Оптимізація режимів роботи МГ містить визначення пропускної здатності, розрахунок раціональних режимів при заданій продуктивності та формування стратегій розвитку системи. Вона

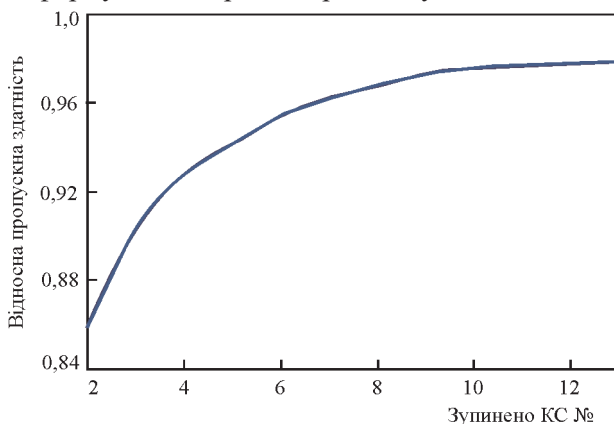


Рис. 2. Вплив відключення КС на пропускну здатність системи

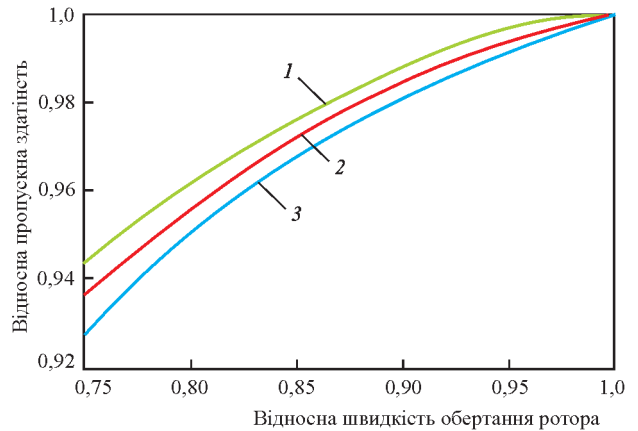


Рис. 3. Регулювання продуктивності системи шляхом зміни швидкості обертання ротора нагнітача: 1 – КС-3, 2 – КС-2, 3 – КС-1

базується на поєднанні проєктних даних, експлуатаційної статистики та прогнозних оцінок і реалізується через змішані математичні моделі, що поєднують методи динамічного програмування та теорії надійності. Це дає змогу визначати оптимальні режими роботи КС, склад газоперекачувальних агрегатів і розподіл навантаження з мінімізацією витрат на перекачування.

Математичне описання процесів транспортування газу ґрунтується на стаціонарних і нестаціонарних моделях. Стаціонарні моделі встановлюють зв'язки між параметрами елементів системи, тоді як нестаціонарні, засновані на диференціальних рівняннях у частинних похідних, описують динаміку зміни тисків і витрат у часі. Їхня побудова базується на рівняннях збереження маси, енергії та імпульсу з подальшою ідентифікацією параметрів за експериментальними даними.

Повна математична модель містить залежності для КС і лінійних ділянок:

– для КС

$$F_1(P_{Bi}, P_{Hi}, Q_i, R_i, n_i, N_i) = 0$$

– для лінійних ділянок

$$F_2(P_{Hi}, P_{Bi+1}, Q_i) = 0$$

де P_{Hi} , P_{Bi} – тиски на вході та виході i -ї КС, продуктивність якої Q_i ; R_i – кількість ГПА на i -й КС, працюючих з обертами ротора n_i , загальною потужністю N_i .

Критерієм оптимальності є мінімізація енерговитрат при забезпеченні заданого рівня надійності газопостачання. Задача оптимального керування формулюється як дискретне динамічне програмування з розбиттям добового циклу на інтервали, для кожного з яких визначається оптимальна конфігурація роботи ГПА. Мінімізація сумарних витрат здійснюється за принципом Беллмана з урахуванням витрат на переходи між станами системи. Побудована модель

інтегрує енергетичні витрати та втрати від ненадійності постачання, а її точність визначається якістю статистичних даних. Порівняння розрахункових і фактичних режимів експлуатації ГПА показує задовільну збіжність результатів, що підтверджує практичну придатність підходу для прогнозування та оптимізації режимів роботи ГТС [12].

Індивідуалізований аналіз технічного стану елементів ГТС на основі скінченно-елементного та ймовірного підходів. Перехід від системного управління ГТС до реалізації адаптивних стратегій її функціонування неминуче вимагає переходу до індивідуалізованого аналізу технічного стану її елементів. У цьому контексті важливо підкреслити, що індивідуалізація прийняття рішень є невід’ємною складовою парадигми Індустрії 5.0, яка доповнює принципи Індустрії 4.0 переходом від суто цифрової та автоматизованої оптимізації до людиноцентричного, контекстно-залежного та фізично обґрунтованого управління складними технічними системами. Для критичної інфраструктури це означає необхідність урахування унікальних умов кожного елемента системи, його фактичного технічного стану, історії навантаження та деградаційних процесів при формуванні управлінських рішень. На рівні ГТС це призводить до принципового висновку: глобальна адаптивність і стійкість ГТС визначається сукупністю локальних станів її конструктивних елементів. Саме в зонах геометричних аномалій, зварних з’єднань, корозійних уражень та експлуатаційної деградації формуються умови, які визначають граничний стан трубопроводів. Тому ефективне управління цілісністю системи можливе лише за умови індивідуалізованого аналізу кожного критичного елемента з урахуванням реальних умов його експлуатації.

У реальних інженерних умовах дефекти мають складну просторову геометрію, а їхній вплив на несучу здатність конструкцій є суттєво нелінійним та локалізованим. Додаткову складність створює стохастичний характер механічних властивостей матеріалів, зумовлений мікроструктурною неоднорідністю, технологічною спадковістю (зокрема монтажним зварюванням) та експлуатаційною деградацією, включаючи корозійно-водневі процеси. Це ускладнює адекватне оцінювання граничних станів у межах виключно детерміністичних або нормативно усереднених моделей. У зв’язку з цим формується необхідність інтегрованого підходу, у якому скінченно-елементне моделювання (СЕМ) використовується як базовий інструмент відтворення локального напружено-деформованого та пошкодженого станів у зонах дефектів складної ге-

ометрії, у тому числі, в околі монтажних чи ремонтних зварних з’єднань. СЕМ дозволяє врахувати реальні умови навантаження, просторову концентрацію напружень і взаємодію конструктивних елементів, що є важливим для коректного опису механіки руйнування в експлуатованих трубопроводах.

Першим етапом чисельного дослідження технічного стану трубопровідного елемента (ТЕ) є прогнозування розвитку температурного поля в процесі зварювального нагрівання. Розподіл температур у часі та просторі визначається процесами кондуктивного поширення, для яких зв’язок між моментом часу τ і полем температур $T = T(r, \beta, z)$ (рис. 4) описується тривимірним рівнянням теплопровідності. Джерелом тепла в розглянутому випадку є зварювальна дуга (або інше концентроване джерело теплової енергії) з потужністю q_f . Розподіл енергії в плямі нагрівання для характерних технологій зварювання може бути описаний за допомогою нормального закону розподілу. Стік тепла з поверхні розглянутої конструкції відбувається променистим теплообміном, відведенням тепла в навколишню атмосферу та оснащення. Відповідно потік енергії з поверхні виробу через випромінювання та конвекцію в атмосферу залежить від температури поверхні та навколишнього середовища та кількісно описується законами Стефана-Больцмана та Ньютона-Ріхмана відповідно [13].

Докритичне руйнування трубопроводів і посудин тиску з характерних сталей пов’язане з пластичним деформуванням металу конструкції, тому в якості критеріїв зародження руйнування доцільно розглядати деформаційні підходи. За відсутності гострих геометричних концентраторів напружень (зокрема для бездефектного стану ТЕ або в разі наявності локальних втрат металу) переважаючим механізмом порушення цілісності матеріалу є в’язке руйнування, яке полягає в зародженні рівномірно розподілених пор. Для прогнозування їхнього зародження при пластичному протіканні матеріалу в неізо-термічних випадках пропонується до використання модифікований критерій Джонсона-Кука, згідно з яким у деякому об’ємі металу з’являється початкова пористість із концентрацією f_0 при перевищенні інтегрального значення інтенсивності пластичної деформації певного граничного рівня [14].

Математичний розгляд об’єднаної задачі кінетики температурного поля, розвитку НДС і формування мікропор базується на скінченно-елементному описанні. Приріст тензора деформацій (з урахуванням наявності та рівномірного розподілу мікропор) може бути представлено у відповідності з наступним виразом [15]:

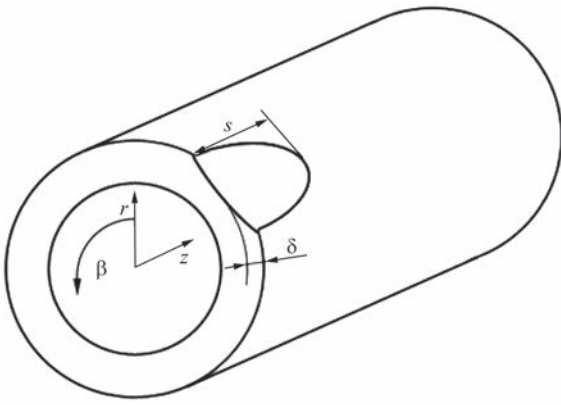


Рис. 4. Схема трубопроводного елемента з локальним дефектом втрати металу на зовнішній поверхні

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + \delta_{ij} (d\varepsilon_T + df/3), \quad (4)$$

де $d\varepsilon_{ij}^e$, $d\varepsilon_{ij}^p$, $\delta_{ij}d\varepsilon_T$, $\delta_{ij}df/3$ – компоненти приросту тензора деформацій, обумовлених пружним механізмом деформування, деформаціями миттєвої пластичності, кінетикою неоднорідного температурного поля та пористістю відповідно.

Тензори механічних напружень σ_{ij} і пружних деформацій $d\varepsilon_{ij}^e$ пов'язані між собою узагальненим законом Гука, тобто:

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G} + \delta_{ij}(K\sigma + \varphi), \quad (5)$$

де σ – середнє значення нормальних компонентів тензора напружень σ_{ij} , тобто $\sigma = (\sigma_{\beta\beta} + \sigma_{zz} + \sigma_{rr})/3$, $K = (1-2\nu)/E$ – модуль об'ємного стиску.

Приріст деформацій миттєвої пластичності $d\varepsilon_{ij}^p$ від напруженого стану в конкретному СЕ може бути обчислений за допомогою лінійної залежності скалярної функції Λ і девіаторної складової тензора напружень, а саме:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\Lambda(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma). \quad (6)$$

Конкретне значення функції Λ залежить від напруженого стану в розглянутій області конструкції, а також від форми поверхні плинності матеріалу Φ , яка вирізняється напруженням σ_s :

$$\begin{aligned} d\Lambda &= 0, \text{ якщо } \sigma_i < \sigma_s, \\ d\Lambda &> 0, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_s, \end{aligned} \quad (7)$$

стан $\sigma_i > \sigma_s$ недопустимий.

Виходячи зі сказаного вище, прирости тензора деформацій можуть бути представлені у вигляді суперпозиції приросту відповідних складових:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{ij} &= \Psi(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) + \delta_{ij}(K\sigma + \Delta\varepsilon_T + \Delta f/3) - \\ &- \frac{1}{2G}(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma)^* - (K\sigma)^*, \end{aligned} \quad (8)$$

де символ «*» відносить відповідну змінну до попереднього кроку простежування, Ψ – функція стану матеріалу, що визначає умову пластичного плину відповідно до критерію Мізеса з додатковим урахуванням зменшення несучого нетто-перерізу СЕ в результаті формування несущості в рамках ГТН-моделі [16]:

$$\Psi = \frac{1}{2G},$$

$$\text{якщо } \sigma_i < \sigma_s = \sigma_T \sqrt{1 + (q_3 f')^2 - 2q_1 f' \cosh\left(q_2 \frac{3\sigma}{2\sigma_T}\right)}, \quad (9)$$

$$\Psi > \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_s,$$

стан $\sigma_i > \sigma_s$ недопустимий.

Критерієм зародження макродфектності матеріалу ТЕ є формування умов пластичної нестійкості пористого матеріалу з урахуванням його обмеженої деформаційної здатності згідно з умовою Маккензі, що математично виражається в такий спосіб [17]:

$$\Psi > \frac{1}{2G} + \frac{\varepsilon_f - \varepsilon^p}{1,5\sigma_i(T, \varepsilon^p)(1 - 2f/3)}, \quad (10)$$

де ε_f – гранична деформація металу, яка, у загальному випадку, залежить від жорсткості напруженого стану.

Крім того, значний розвиток пористості матеріалу за в'язким механізмом викликає істотне збільшення істинних напружень у металі конструкції та, як результат, його руйнування. Тому з метою формулювання коректного та зручного для чисельного аналізу критерію руйнування конструкції до (10) може бути додана наступна умова:

$$\sigma_s \rightarrow 0. \quad (11)$$

З (9) можна оцінити величину критичної об'ємної концентрації пористості, яка еквівалентна граничному переходу (11) і обмежує використання запропонованих моделей умовою неприпустимої дефектності:

$$f' \rightarrow f'_d = \frac{q_1 \cosh\left(\frac{3q_2\sigma}{2\sigma_T}\right) - \sqrt{q_1^2 \cosh^2\left(\frac{3q_2\sigma}{2\sigma_T}\right) - q_3^2}}{q_3^2}. \quad (12)$$

У випадку невисокої жорсткості напруженого стану зростання локальних напружень може не супроводжуватися значним пластичним плином, і зародження макроскопічного руйнування буде відбуватися за крихким механізмом мікроріди. Тому додатковою умовою руйнування пористого матеріалу є перевищення інтенсивності істинних напружень величини напружень мікроріди S_K :

$$\frac{\sigma_1}{1 - 2f/3} \geq S_K. \quad (13)$$

Таким чином, умови (10), (12) і (13) формують комплексний критерій крихко-в'язкого руйнування матеріалу з урахуванням зміни його границі текучості в процесі пластичного деформування і докритичного пошкодження.

Разом із тим, детерміністичний результат СЕМ-аналізу не може бути достатнім для оцінювання фактичної надійності, оскільки процес руйнування має ймовірнісну природу. Тому наступним рівнем моделювання є застосування статистичних моделей, зокрема розподілу Вейбулла, який дозволяє описати розкид характеристик міцності, критичних деформацій і параметрів ініціювання руйнування. Це забезпечує фізично обґрунтоване врахування мікроструктурної невизначеності матеріалу та статистичного характеру зародження пошкодження. Рациональним є опис стану конструкцій на основі статистичної інтерпретації НДС, отриманого СЕМ. Для трубопроводів і посудин тиску за відсутності гострих концентраторів ймовірність руйнування може бути визначена через інтегрування поля головних напружень по характерній площі найбільш слабкого перерізу S і дозволяє оцінити інтегральну ймовірність руйнування конструкції [18]:

$$p = 1 - \exp \left[- \int_S \left(\frac{\sigma_1 - A_\sigma}{B_\sigma} \right)^{\eta_\sigma} \frac{dS}{S_0} \right], (\sigma_1 > A_\sigma) \quad (14)$$

де S_0 – константа матеріалу, що вирізняє просторовий масштаб переходу мікропошкодження в макродефект.

Точність ймовірнісної оцінки згідно з (14) визначається адекватністю параметрів розподілу Вейбулла для конкретної задачі. Для спрощення аналізу вводиться припущення, що ймовірнісний характер руйнування проявляється при напруженнях, які перевищують напруження пластичного плину σ_{flow} , що визначається як $\sigma_{flow} = (\sigma_B + \sigma_T)/2$. Параметр η_σ для конструкційних матеріалів у більшості випадків приймається в межах 3...4. Показано, що вплив геометрії ізольованих дефектів на коефіцієнти моделі є незначним у широкому діапазоні варіювання та переважно визначається особливостями скінченно-елементного розбиття. Внаслідок цього коефіцієнт B_σ може розглядатися як властивість матеріалу для заданого напруженого стану та масштабного рівня задачі.

Альтернативний підхід до оцінювання ймовірності руйнування зварних елементів і посудин тиску без гострих концентраторів у режимі інтенсивної пластичної деформації базується на інтегруванні поля інтенсивності пластичних деформацій, тобто [18]:

$$p = 1 - \exp \left[- \int_S \left(\frac{\varepsilon_i - A_\varepsilon}{B_\varepsilon} \right)^{\eta_\varepsilon} \frac{dS}{S_0} \right], \quad (15)$$

де A_ε , B_ε , η_ε – параметри Вейбулла.

Передбачається, що для конструкційних матеріалів ненульова ймовірність руйнування виникає на початку макроскопічного пластичного деформування, тобто $A_\varepsilon \approx 0,887\sigma_T/E$, що є незначним у порівнянні з інтенсивністю пластичної деформації при граничному стані. Параметр η_ε для описання схильності до руйнування приймається в межах 3...4, що відповідає $\eta_\sigma \approx 5$. Відповідно основною задачею аналізу полів деформацій у дефектній трубі під граничним тиском є визначення параметрів B_ε розподілу Вейбулла (15) з урахуванням властивостей матеріалу.

Практичний інтерес становить порівняння результатів чисельного моделювання з нормативними підходами оцінювання граничного стану кородованих трубопроводів. Зокрема стандарт DNV-RP-F101 (1999) встановлює критеріальні залежності між геометрією корозійно-ерозійних дефектів і граничним тиском, тоді як в Україні застосовується ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008, що базується на оцінюванні залишкового коефіцієнта запасу міцності з урахуванням паспортних і експлуатаційних даних.

Порівняльний аналіз для трубопроводу ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь Х65) з локальним корозійним дефектом ($2s \times 2u = 100 \times 50$ мм) показує, що крива $P_{0,002}$ (ймовірність руйнування $p = 0,002$) добре узгоджується з граничними залежностями DNV-RP-F101, тоді як крива P_{max} має суттєво іншу форму та рівні тиску (рис. 5). Водночас, згідно з ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008, крива $P_{0,002}$ адекватно описує стан трубопроводу при незначних дефектах стоншення. Для дефектів середньої та критичної категорії відповідні стани лежать у діапазоні між $P_{0,002}$ та P_{max} , що фактично відповідає різним рівням ймовірності руйнування та ступеню консервативності нормативних вимог. Виявлено суттєві розбіжності між чисельною методикою та ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008 при глибинах дефектів понад 0,5 від товщини стінки трубопроводу. Це пояснюється тим, що нормативні підходи враховують перехід від в'язкого до крихкого руйнування через критерії інтенсивності напружень, що призводить до підвищеної консервативності оцінок. Порівняння з DNV-RP-F101 показує, що вплив крихкого механізму в ряді випадків може бути переоціненим навіть при високій концентрації напружень. Таким чином, застосовність запропонованої чисельної методики доцільно обмежити дефектами з глибиною до 0,5 від товщини стінки

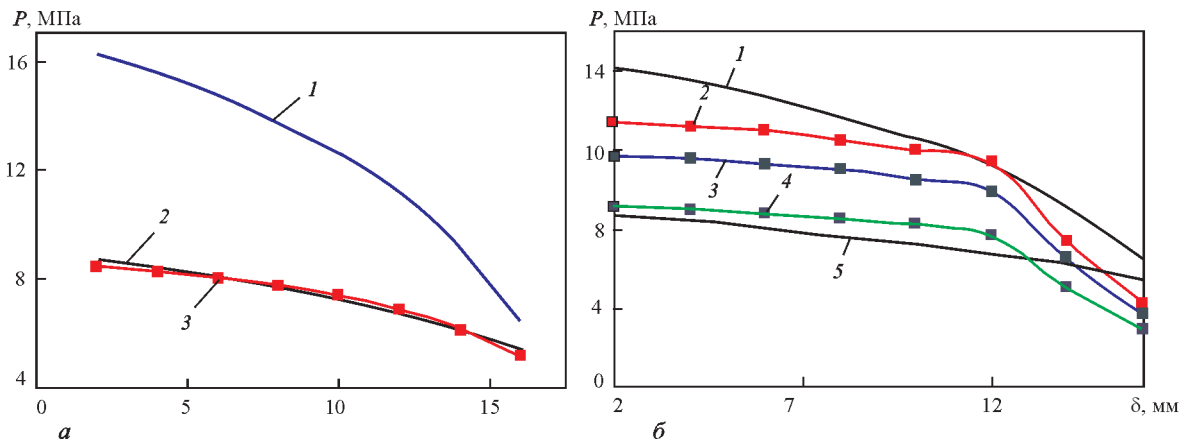


Рис. 5. Порівняння результатів імовірнісного аналізу стану елемента магістрального трубопроводу ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь Х65) з ізолюванням дефектом корозійної втрати металу різної глибини a ($2s \times 2u = 100 \times 50$ мм) з вимогами актуальних стандартів: а – DNV-RP-F101, 1 – $P_{\max}$, 2 – $P_{0,002}$, 3 – P_{DNV} ; б – ДСТУ-Н В.2.3-21: 2008, 1 – $P_{\max}$, 2 – критичний, 3 – значний, 4 – помірний, 5 – $P_{0,002}$

при довжині не менше ніж у п'ять разів більшій за глибину. На основі цього підходу можуть бути побудовані еквіімовірнісні діаграми залежності граничного тиску від геометрії корозійно-ерозійних дефектів (рис. 6).

Подальше узагальнення реалізується через метод Монте-Карло, який забезпечує відтворення множини можливих реалізацій властивостей матеріалу, геометрії дефектів та умов навантаження. У результаті визначається не одичинне значення граничного стану, а повний розподіл імовірності руйнування, що є основою для ризик-орієнтованого та індивідуалізованого прийняття рішень. Ймовірність руйнування p визначається як частота досягнення граничного стану в репрезентативній вибірці реалізацій. Поширеним підходом до врахування стохастичних властивостей матеріалів і навантажень є використання розподілу Вейбулла. Вибір значення випадкової величини X для СЕ на кожному кроці чисельного моделювання здійснюється відповідно до заданого закону розподілу (Вейбулла), що забезпечує формування статистич-

но узгоджених реалізацій параметрів системи в межах методу Монте-Карло:

$$X_{ijk} = \left[-\ln(1 - RND) \right]^{\frac{1}{\eta_X}} (B_X - A_X) + A_X, \quad (i, j, k = r, \beta, z), \quad (16)$$

де A_X, B_X, η_X – коефіцієнти Вейбулла для характеристики X ; RND – довільне число з діапазону $[0; 1]$.

Як приклад застосування розробленого чисельного підходу розглянуто сталевий ТЕ ($D = 1420$ мм, $t = 20$ мм) з ізолюванням дефектом локального стоншення напівеліптичної форми на зовнішній поверхні труби ($2s = 20$ мм, $2c = 20$ мм, $a = 20$ мм). Матеріал – сталь 17Г1С-У ($E = 206$ ГПа, $\nu = 0,3$, $\sigma_T = 365 \dots 490$ МПа, $S_K = 800 \dots 1000$ МПа). Як зазначалося вище, критерій зародження пор в'язкого руйнування базується на деформаційному підході, за яким ініціювання пошкодження відбувається при перевищенні інтегральною інтенсивністю пластичних деформацій критичного значення ϵ_c , що відповідає появі рівномірно розподіленої несучільності з початковою концентрацією $f_0 = 0,001 \dots 0,010$. У межах

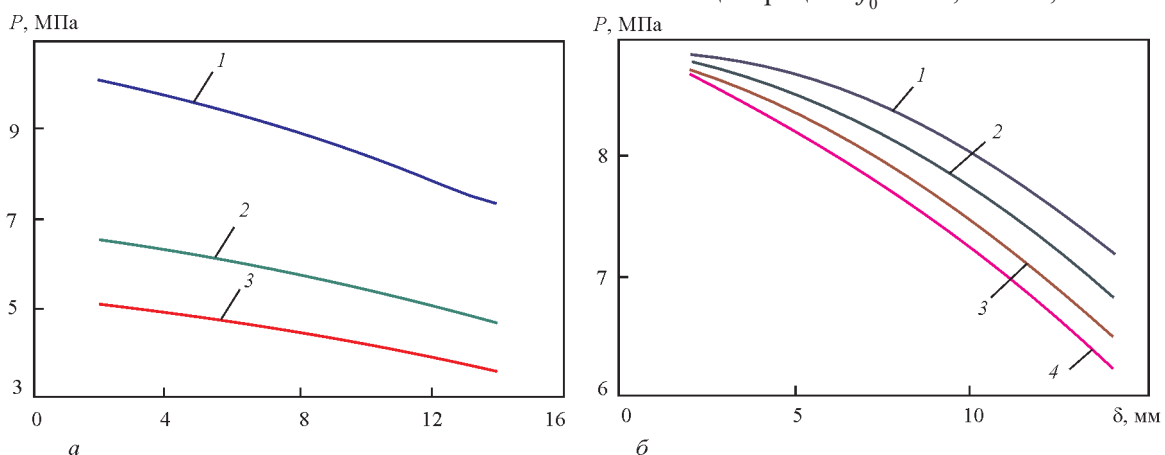


Рис. 6. Еквіімовірнісні криві допустимості дефекту локального стоншення стінки ТЕ ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь 17Г1С-У): а – у залежності від критичної величини ймовірності руйнування ($2s \times 2u = 100 \times 50$ мм), 1 – $p = 0,03$, 2 – $p = 0,01$, 3 – $p = 0,005$; б – у залежності від довжини дефекту стоншення ($p = 0,01$, $2u = 50$ мм), 1 – $2s = 25$ мм, 2 – $2s = 50$ мм, 3 – $2s = 75$ мм, 4 – $2s = 100$ мм

прийнятих діапазонів параметрів вхідні характеристики матеріалу описуються розподілом Вейбулла: для σ_T ($A_\sigma = 365$, $B_\sigma = 450$, $\eta_\sigma = 4$), для f_0 ($A_f = 0,001$, $B_f = 0,0052$, $\eta_f = 2$), для S_K ($A_S = 800$, $B_S = 937$, $\eta_S = 4$).

Порівняння детерміністичного та стохастичного підходів до оцінювання НДС показує, що максимальні значення напружень у дефекті є близькими, однак стохастична модель (Монте-Карло) формує значно вищі локальні градієнти напружень через просторову варіацію механічних властивостей, насамперед границі текучості (рис. 7). Оскільки в'язке руйнування має локалізований характер, урахування просторової невизначеності суттєво впливає на оцінку граничного тиску P_r , зменшуючи розбіжність між прогнозом і реальним станом конструкції. Таким чином, поєднання СЕМ, статистики Вейбулла та методу Монте-Карло забезпечує перехід від нормативно усереднених підходів до індивідуалізованого, фізично обґрунтованого та ризик-орієнтованого аналізу елементів газотранспортної системи. У межах парадигми Індустрії 5.0 саме така індивідуалізація прийняття рішень стає важливим принципом управління критичною інфраструктурою.

Часовий вимір управління цілісністю: предиктивне обслуговування та прогнозування стану ГТС. У рамках парадигми Індустрії 4.0/5.0, де адаптивність, дані в реальному часі та інтелектуальна підтримка рішень розглядаються як базові системоутворюючі принципи, часовий вимір управління цілісністю ГТС набуває визначального значення.

Сучасні підходи до предиктивного обслуговування ґрунтуються на інтеграції фізично обґрунтованих моделей деградації матеріалів, результатів неруйнівного контролю, даних експлуатаційного моніторингу. У контексті МГ це означає перехід до моделі безперервного оновлення оцінок залишкового ресурсу, де кожне нове вимірювання змінює картину розвитку пошкодженості. Водночас у логіці Індустрії 5.0 предиктивне обслуговування набуває додаткового виміру – індивідуалізації прийняття рішень. Це означає, що прогнозуван-

ня стану елементів ГТС не зводиться до усереднених моделей, а враховує унікальні особливості кожного об'єкта: історію експлуатації, локальні умови навантаження, просторову неоднорідність властивостей матеріалу, результати діагностики конкретних дефектів, а також критичність елемента в структурі системи. Таким чином, формується концепція персоналізованого інженерного об'єкта, для якого стратегія обслуговування визначається не загальними регламентами, а індивідуальною траєкторією деградації, для чого було розвинено відповідні аналітичні та інструментальні підходи.

Відомо, що під час тривалої експлуатації підземних МГ можливий розвиток різних видів пошкоджень з боку зовнішнього середовища, зокрема: відшарування захисних покривів, утворення дефектів у стінці труби, у тому числі корозійних. Найнебезпечнішим явищем, яке важко прогнозувати та попереджати, є корозійне розтріскування (КР). За результатами аналізу статистичних даних різних фахівців частка відмов магістральних трубопроводів, спричинених КР, є досить вагомою та становить 24...36 %. Враховуючи небезпеку та масштабність КР, розглянута проблема залишається актуальною, а вивчення механізму процесів, що спричиняють його розвиток, має наукове та практичне значення. Важливість детальнішого вивчення КР МГ обумовлює актуальність проведення фундаментальних досліджень і пошук нових підходів до визначення ймовірності його розвитку.

Для дослідження закономірностей процесу КР МГ розроблено та застосовано унікальний науковий підхід, який ґрунтується на моделюванні в лабораторних умовах, тотожних умовам експлуатації, чинників КР. Цей підхід базується на новій методології оцінювання схильності трубних сталей до КР в умовах моделювання комплексу зовнішніх і внутрішніх чинників, для чого запропоновано використовувати коефіцієнт K_S , який враховує зміну пластичних властивостей металу в корозивному середовищі у порівнянні з його властивостями у повітрі [19]:

$$K_S = \frac{\Psi_{II}}{\Psi_P} = \left(\frac{s_0 - s_1^{II}}{s_0} \right) / \left(\frac{s_0 - s_1^P}{s_0} \right) \quad (17)$$

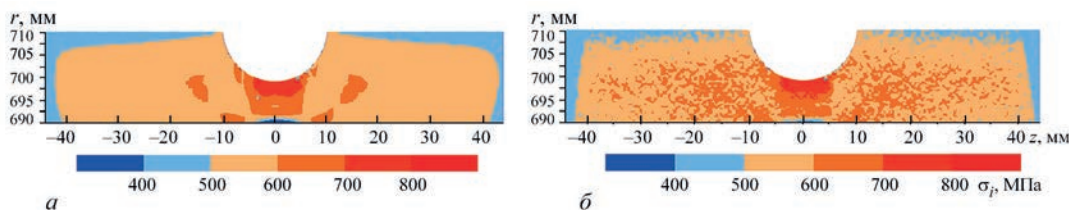


Рис. 7. Приклади розподілу еквівалентних напружень у трубопроводі ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь 17Г1С-У) із зовнішнім корозійним дефектом ($2s \times 2c \times a = 20 \times 20 \times 10$ мм) при граничному внутрішньому тиску 14,0 МПа: а – скінченно-елементний розрахунок, б – розрахунок згідно з алгоритмом Монте-Карло

де ψ_{Π} і ψ_p – відносне звуження зразків у повітрі та у розчині; S_0 – площа поперечного перерізу зразків до випробувань, мм²; S_1^{Π} та S_1^p – площа поперечного перерізу зразків у місті руйнування після випробувань у повітрі та у розчині, мм².

Зміна механічних властивостей в умовах комплексного впливу чинників КР може бути оцінена за коефіцієнтами втрати властивостей F_x (відносного подовження при розриві F_{δ} , границі міцності F_{σ_b} та границі текучості F_{σ_T}) відносно аналогічних показників у повітрі:

$$F_x = \frac{F^{\Pi} - F^p}{F^{\Pi}} 100 \% \quad (18)$$

де F^p та F^{Π} – середні значення показників у розчині та у повітрі.

Для кількісної оцінки схильності трубних сталей до КР було проведено низку лабораторних досліджень, в умовах яких було виконано фізичне моделювання чинників КР, які можуть бути присутніми на ділянці МГ (корозивне середовище – модельний ґрунтовий електроліт, розчин NS4 (neutral soil solution), а саме: захисний потенціал, накопичені цикли змін напруження, концентратор напружень, періодичне змочування розчином, наявність полімерних покривів різних типів) [20]. Випробування зразків зі сталі Х70 методом деформації з малою швидкістю показали, що при зміщенні потенціалу в катодну область ($E_{\text{кор}} \rightarrow -1,0 \text{ В} \rightarrow -2,0 \text{ В}$) збільшується площа поперечного перерізу зразків після руйнування порівняно з повітрям (зразки 1, 2, 12), що свідчить про підвищення схильності сталі до крихкого руйнування.

Водночас за потенціалу $-1,0 \text{ В}$ можуть проявлятися деякі відмінності у схильності до корозійного розтріскування сталей Х70, які мають певні структурні особливості. Зокрема руйнування зразка з труби Б супроводжувалося пластичною деформацією (рис. 8, а, крива 3), його площа поперечно-

го перерізу менша (рис. 8, б, фото 3), ніж труби А, 4,35 мм² та 6,07 мм² відповідно, K_s дорівнюють 1,31 та 1,7. Тобто металу з меншою забрудненістю неметалевими включеннями та меншим розміром перлітної структурної складової властива нижча схильність до КР за інших однакових умов.

Згідно з ДСТУ 4219:2003 нормоване значення захисного поляризаційного потенціалу знаходиться в діапазоні $-0,85 \dots -1,15 \text{ В}$ (відносно мідносульфатного електрода порівняння, м.с.е.), що відповідає $-0,75 \dots -1,05 \text{ В}$. Корозійно-механічні властивості сталі Х70 дослідили за потенціалу, наближеного до максимального захисного ($-1,00 \text{ В}$) за різних комбінацій чинників КР. Руйнування зразків за потенціалу $-1,00 \text{ В}$ (рис. 8, а) при повному зануренні у розчин NS4 (крива 2), при періодичному змочуванні розчином (крива 6), після циклічних навантажень і при періодичному змочуванні розчином (крива 7), у присутності шару полімерної ґрунтовки та при періодичному змочуванні розчином (крива 9), після циклічних навантажень у присутності полімерної ґрунтовки та при періодичному змочуванні розчином (крива 10) відбувалося практично без пластичної деформації. Для всіх зразків властиве збільшення площі поперечного перерізу на 52...66 % порівняно з поперечним перерізом зразків у повітрі. Значення коефіцієнта K_s становили 1,7 (зразок 2) і 2,15 (зразки 6 і 7), 2,07 (зразок 8), 1,75 (зразок 10) та 1,7 (зразок 9).

На кривих руйнування зразків у розчині, після попередньої дії на зразок циклічних навантажень (крива 4), наявна коротка область в'язкого руйнування. Площа поперечного перерізу цих зразків порівняно із зразками у повітрі більша на 65 %, значення коефіцієнта $K_s = 1,65$. Криві руйнування зразків із концентратором напружень відрізняються від розглянутих вище значно меншим видовженням (рис. 8, а, криві 5, 8). Площа поперечного

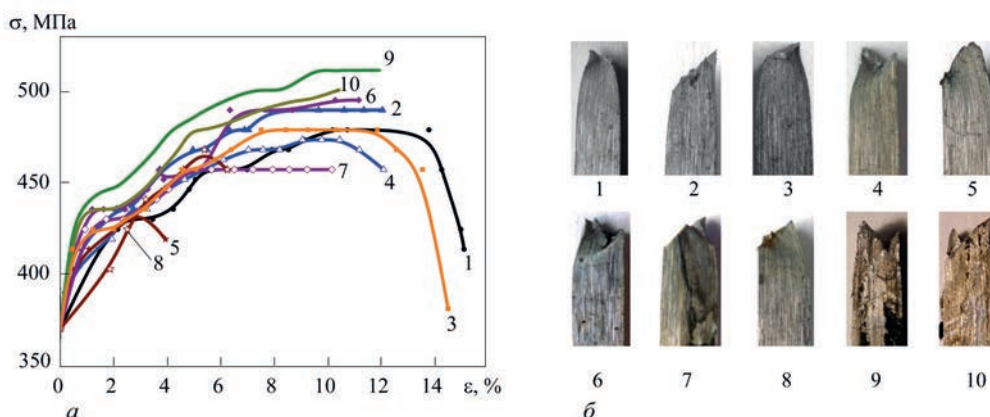


Рис. 8. Діаграми руйнування зразків трубної сталі Х70 у повітрі та у NS4 за потенціалу $-1,0 \text{ В}$ за впливу чинників КР (а), фото зламів зразків (б), швидкість деформації 10^{-6} с^{-1}

перерізу зразків після руйнування більша (зразки 5, 8), ніж для зразків 2, 6, 7, 9, 10, 40 мм², значення коефіцієнта схильності до КР K_s дорівнюють 1,87 і 2,07 відповідно. Слід підкреслити, що за потенціалу $-1,0$ В у зламах зразків (крім зразка 3) при різній комбінації чинників КР, є крихка складова (рис. 8, б, фото 2, 4–10), її частка більша, ніж за потенціалу корозії. Значення коефіцієнта K_s змінюються від 1,65 до 2,15. Найінтенсивніше на схильність до КР за цього потенціалу впливають наявність КН та періодичне змочування розчином.

Зразки з номерами 2–7 під час випробувань зазнавали пластичного деформування, внаслідок чого відбулося характерне утягування в області руйнування, при цьому злам мав в'язкий характер, а значення коефіцієнта K_s змінювалися від $\sim 1,04$ до $\sim 1,56$. Злами зразків 8–15 відрізняються від вищенаведених: візуально можна зазначити меншу частку пластичного деформування, і, як наслідок – збільшення коефіцієнта K_s до $\sim 1,6 \dots 3,5$. Під час проведення робіт із встановлення причин руйнування МГ розміром $1420 \times 15,7$ мм на прилеглій до корозійної тріщини ділянці руйнування залишкова товщина стінки труби становила близько $\sim 35 \dots 40$ % від номінальної, і характер зламу (рис. 9) за багатьма ознаками був схожий на той, що спостерігали у лабораторних умовах. Це відповідає значенню коефіцієнта $K_s = 1,6$.

Швидкість корозії сталі X70 у розчині після витримання в ньому покритті за температури 20°C впродовж 1 місяця зростає майже на 13 % (від $0,089$ мм/рік у вихідному розчині до $0,101$ мм/рік у розчині, що контактував з покриттям), а у розчині, що контактував з покриттям впродовж 2,5 місяців – зменшується на 76 % – до $0,021$ мм/рік (рис. 10). За температури 60°C закономірності зміни швидкості корозії сталі X70 подібні: збільшення до



Рис. 9. Злам труби зі сталі X70 біля осередку корозійної тріщини, що утворилася під час експлуатації МГ розміром $1420 \times 15,7$ мм

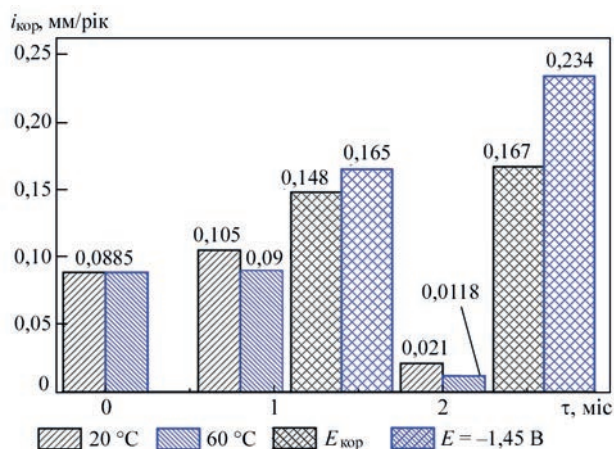


Рис. 10. Швидкість корозії сталі X70 у NS4 після витримання в ньому стрічкового покриття при 20 та 60°C і після випробувань методом катодного відшарування за потенціалу корозії та за потенціалу поляризації $-1,45$ В

$0,09$ мм/рік через 1 місяць з наступним зменшенням до $0,012$ мм/рік – через 2,5 місяці.

Для визначення впливу катодної поляризації на властивості покриття було проведено дослідження методом катодного відшарування на спеціалізованому лабораторному стенді (рис. 11). За потенціалу $-1,45$ В процес деградації перебігає інтенсивніше, ніж за потенціалу корозії, що підтверджено збільшенням радіуса відшарування покриття від основи (від $11,0$ мм при $E_{\text{кор}}$ до $17,0$ мм при $-1,45$ В). Під час відшарування покриття при катодній поляризації приблизно на 15 % зросло рН розчину (від $9,6$ при $E_{\text{кор}}$ до $11,0$ при потенціалі $-1,45$ В), втричі збільшилася його електропровідність (від $2,2 \cdot 10^{-3}$ до $6,6 \cdot 10^{-3}$ См/см відповідно), підвищилася корозивність відносно сталі X70 (швидкість корозії зросла від $0,167$ до $0,234$ мм/рік).

На основі комплексу проведених досліджень розроблено новітню концепцію, згідно з якою необхідними й достатніми умовами початку та розвитку КР МГ є наявність на ділянці, що обстежується, трьох основних чинників певної ін-

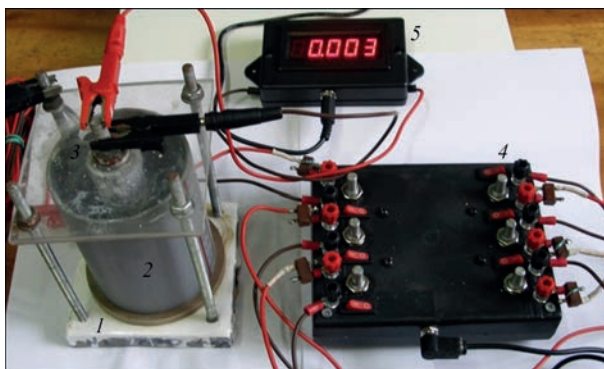


Рис. 11. Лабораторний стенд для дослідження катодного відшарування захисних покриттів: 1 – сталева пластина з покриттям, 2 – електрохімічна комірка, 3 – анод; 4 – потенціостатичний пристрій; 5 – мікроамперметр

тенсивності, які прийняті основними та умовно названі: «корозія» – C_i ; «захист від корозії» – Z_i ; «механічні напруження» – N_i . На кожний з основних чинників впливають додаткові. Інтенсивність впливу основного й додаткових чинників на ділянці МГ є різною, тому кожному чиннику поставлено у відповідність рекомендовані чисельні значення, які обрано з урахуванням схильності трубною сталі до корозійного розтріскування за впливу досліджених в цій роботі чинників. Мета обстеження полягає у виявленні наявних на ділянці МГ чинників і визначенні рівнів інтенсивності їхнього впливу. Згідно з методикою визначення потенційно корозійно-небезпечних ділянок МГ передбачає проведення таких заходів: аналіз проектної, виконавчої та експлуатаційної документації; виявлення зовнішніх і внутрішніх чинників заданими наземного технічного діагностування та лабораторних досліджень; аналіз результатів та оцінювання ймовірності КР ділянки МГ; ранжування потенційно корозійно-небезпечних ділянок МГ за ступенем схильності до КР; технічне обстеження МГ у шурфах; розроблення рекомендацій щодо ремонту ділянки МГ із тріщиноподібними дефектами. Під час проведення обстеження МГ виконують комплекс робіт із визначенням умов і чинників, що сприяють КР відповідно до вищевведених алгоритмів.

Запропоновано ймовірність корозійного розтріскування на i -й ділянці МГ обчислювати з урахуванням чисельних значень показників основних і додаткових чинників за формулою:

$$R_i = r_{C_i} r_{Z_i} r_{N_i} = \prod_{j=1}^n r_{ji} \left(1 - \sum_{k=1}^m G_{ki} \right), \quad (19)$$

де R_i – ймовірність корозійного розтріскування на i -й ділянці МГ; r_{C_i} , r_{Z_i} , r_{N_i} – чисельні значення показників основних незалежних чинників, r_{ji} – чисельне значення показника основного незалежного чинника; j – поточний номер одного з незалежних основних чинників; n – кількість основних незалежних чинників; G_{ki} – чисельні значення додаткових чинників, які впливають на відповідний основний чинник на i -й ділянці; k – поточний номер додаткового чинника; m – кількість додаткових чинників, що впливають на відповідний основний чинник.

Науково обґрунтований вибір технологій відновлення та ремонту МГ. У парадигмі Індустрії 4.0/5.0 технічне обслуговування розглядається як система індивідуалізованого прийняття рішень, що забезпечує одночасне досягнення критеріїв безпеки, надійності, економічної ефективності та екологічної сталості. Особливого значення набувають

технології ремонту без припинення транспортування газу, які усувають необхідність скидання природного газу в атмосферу, зменшують матеріалоємність і тривалість ремонту, скорочують обсяги робіт і ризики для персоналу. Таким чином, ремонт під тиском повністю відповідає принципам сталого розвитку та людиноцентричної концепції Індустрії 5.0. Ефективність таких технологій визначається не лише їхніми конструктивними особливостями, а й науково обґрунтованим вибором для конкретного дефекту. Прийняття рішення повинно базуватися на комплексному аналізі НДС, механізмів руйнування, деградації матеріалу, залишкового ресурсу та умов експлуатації. За цих умов СЕМ стає інструментом не тільки оцінювання роботоздатності, а й оптимізації технології ремонту, дозволяючи визначати ефективність різних способів відновлення, геометричні параметри підсилюючих конструкцій, режими багатопрохідного наплавлення та допустимі умови виконання робіт без зупинки трубопроводу.

Зокрема багатопрохідне наплавлення забезпечує компенсацію корозійної втрати металу без виведення МГ із експлуатації. Після попереднього підігрівання ризик холодного розтріскування практично усувається, а визначальним фактором технологічної міцності стає пластична нестійкість локально перегрітого металу під дією внутрішнього тиску. Водночас локальний нагрів може спричинити залишкові пластичні деформації та формування випину, що знижує несучу здатність конструкції. Тому оптимізація технології ремонтного наплавлення повинна забезпечувати одночасне виконання критеріїв технологічної міцності під час ремонту та допустимості залишкових деформацій відновленої конструкції.

Дослідження особливостей стану ділянки МГ із виявленим зовнішнім дефектом локального корозійного стоншення стінки в процесі ремонтного наплавлення проводилося на характерному прикладі трубопроводу діаметром $D = 1420$ мм із товщиною стінки $t = 20$ мм зі сталі Х65 ($\sigma_T = 490$ МПа, $\sigma_B = 590$ МПа) з максимальним експлуатаційним тиском $P = 7,4$ МПа. Був розглянутий дефект втрати металу ($2s \times u \times \delta = 70 \times 70 \times 10$ мм) на зовнішній поверхні труби. З урахуванням етапу контрольованого шліфування його форма може бути прийнята напівеліптичною. Для усунення такого дефекту достатньо двох наплавлювальних шарів (за винятком контурного), схему розкладання валиків наведено на рис. 12. Передбачалося, що область ремонту попередньо підігрівали до температури $T_{np} = 100$ °С, щоб уникнути появи холодних

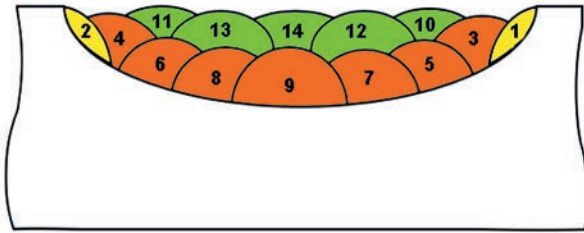


Рис. 12. Схема наплавлення дефекту стоншення на зовнішній поверхні трубопроводу

тріщин. Технологічні параметри дугового наплавлення згідно з рекомендованими існуючими стандартами вибрані наступними: зварювальний струм $I_{зв} = 80$ А, швидкість зварювання $v_{зв} = 2$ мм/с, тиск у трубопроводі при ремонті $P_r = 4$ МПа. Відповідно параметрами ремонту є зварювальний струм $I_{зв}$, внутрішній тиск у трубопроводі при напавленні P_r , а також час між напавленням кожного з валиків, що забезпечує підтримку максимальної температури металу не нижче за необхідну $T_{min} \geq T_{mi}$.

Розрахунок залишкового НДС конструкції після напавлення показав суттєво нелінійний розподіл залишкових напружень, що пояснюється поступовою формозміною конструкції у міру напавлення валиків в області дефекту, а також складними температурними циклами в металі, що вирізняються повторним нагріванням та охолодженням. У процесі заварювання дефекту на трубопровід під тиском спільна дія зовнішніх зусиль і локального нерівномірного термодформування (й інтенсивного пластичного плину металу) викликає формування локального поля пошкодження. Слід підкреслити, що в розглянутому випадку інтенсивність зростання зароджених мікропор в'язкого руйнування характерно невелика, що пояснюється невеликою жорсткістю напруженого стану в зоні локального нагрівання. Як результат, згідно із законом Райса-Трейсі, швидкість зростання зароджених пор невелика. При цьому збільшення внутрішнього ремонтного тиску P_r (або тепловкладення при напавленні) прогнозовано викличе зростання інтенсивності накопичення пластичних деформацій, відповідне зростання пор в'язкого руйнування та збільшення схильності конструкції до макроруйнування. Розроблена методика оцінки схильності металу зварних трубопроводів до в'язкого руйнування дозволяє дослідити вплив різних параметрів ремонту на технологічну міцність МГ та його роботоздатність. У залежності від ступеня прогрівання ТЕ в процесі ремонту та величини внутрішнього тиску в області усуненого дефекту локального стоншення формується дефект форми різного розміру. Припустимість такого дефекту визначає можливість подальшої експлуатації від-

ремонтованої ділянки МГ. Такі дані можуть бути представлені у вигляді двовимірних діаграм, зокрема у координатах «ремонтний тиск–зварювальний струм», приклад яких для розглянутого випадку наведений на рис. 13.

Криві на наведених діаграмах являють собою границю, що розділяє області допустимого й недопустимого станів трубопроводу при багатопрхідному напавленні дефекту та наступній експлуатації: область параметрів, розташована нижче кривих 1 відповідає виконанню вимог допустимості дефекту форми в області ремонту, тоді як область під кривою 2 відповідає параметрам, що гарантують виконання критеріїв опору матеріалу в'язкому руйнуванню згідно з результатами комплексу чисельних розрахунків кінетики стану МГ при напавленні [21]. Із цих даних можна зробити висновок про те, що при істотному тепловкладенні переважачим механізмом, що обмежує застосування напавлення, є ризик пластичної нестійкості, тоді як при відносно невеликих потужностях локального нагрівання та високих тисках небезпечним є надлишкове залишкове деформування конструкції.

Поряд із ремонтним зварюванням дедалі більшого поширення набувають технології встановлення підсилювальних конструкцій різного типу, композитних бандажів, металевих муфт і комбінованих ремонтних систем (рис. 14) [22]. Їхня ефективність визначається не лише міцністю самих елементів підсилення, але й характером перерозподілу навантаження між пошкодженою конструкцією та ремонтною системою. Тому оптимізація геометрії підсилення, властивостей матеріалів і параметрів монтажу також потребує використання чисельного моделювання та багатокритеріального аналізу. Крім того, необхідно забезпечити належну надійність зварних з'єднань, які часто є слабкими місцями в системі контактної пари «трубопровід–підсилювальна конструкція», гарантувавши роботоздатність і безпеку обслуговуючого персоналу.

На підставі проведених досліджень і випробувань для механізованого дугового зварювання в захисних газах рекомендовано застосування порошкових газозахисних дротів діаметром 1,2 мм і самозахисних дротів діаметром 1,6...2,0 мм. Зварювальні матеріали повинні забезпечувати механічні властивості зварних з'єднань, що відповідають вимогам до основного металу труб: тимчасовий опір розриву має бути не нижчим за нормативне значення для труби, ударна в'язкість металу шва при -20 °С – не менше ніж 34 Дж/см², кут статичного вигину – не менше ніж 120°, а твердість металу шва та зони термічного впливу – не більше за 300

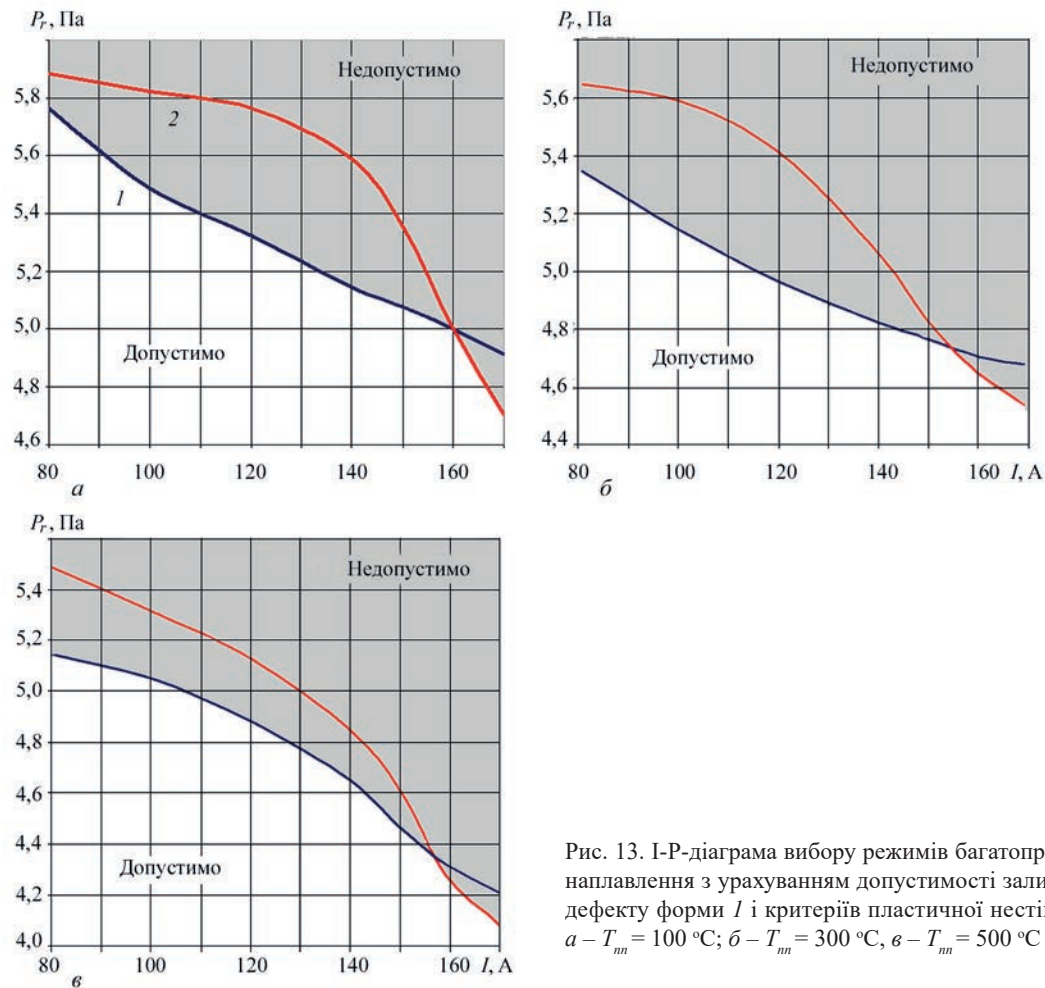


Рис. 13. I-P-діаграма вибору режимів багатопрохідного наплавлення з урахуванням допустимості залишкового дефекту форми 1 і критеріїв пластичної нестійкості 2: а – $T_{mn} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; б – $T_{mn} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$; в – $T_{mn} = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$

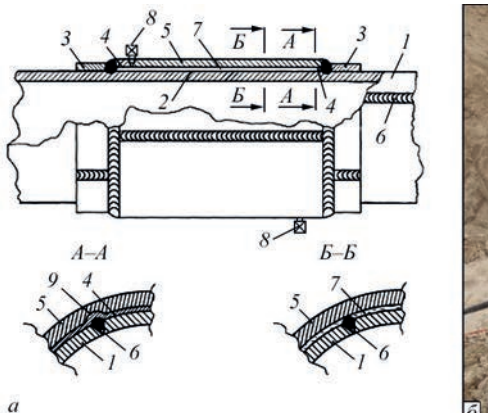


Рис. 14. Схема компаундної муфти для підсилення дефектних ділянок МГ (а) та приклад її встановлення (б)

HV_{10} для труб класу міцності до K55 включно і 325 HV_{10} для труб класів понад K55 до K60 включно.

Приклади стикових з'єднань при відпрацюванні техніки зварювання в різних просторових положеннях на імітаційних зразках розміром 350×100×16 і 250×151×2 мм наведені на рис. 15, 16. При розробці технології механізованого дугового зварювання в захисних газах підсилювальних конструктивних елементів основна увага була приділена відпрацюванню техніки зварювання стикових і нахльстково-стикових з'єднань у різ-

них просторових положеннях. При цьому намагалися визначити такі режими зварювання, які, з одного боку, забезпечували б якісне формування багатопрохідних зварних швів, а з іншого – не вимагали б суттєвого корегування зміни просторового положення.

Технологія виконання багатопрохідних кільцевих нахльстково-стикових з'єднань передбачає ведення процесу зварювання в напрямку знизу вгору по секторах. При ширині обробки крайок $l \geq 15$ мм усі шари треба виконувати методом

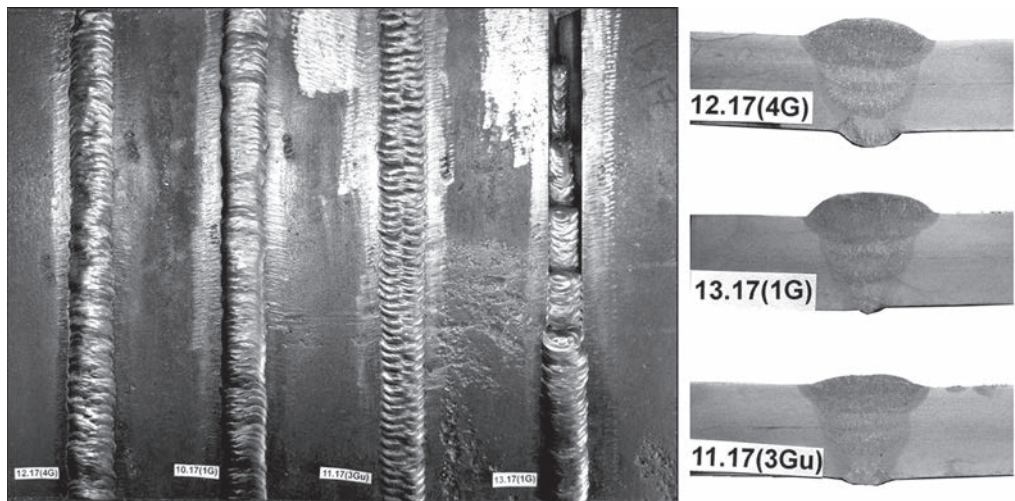


Рис. 15. Зразки стикових з’єднань, що зварені в стельовому (4G), нижньому (1G), вертикальному (3Gu) просторових положеннях із використанням дроту суцільного перерізу

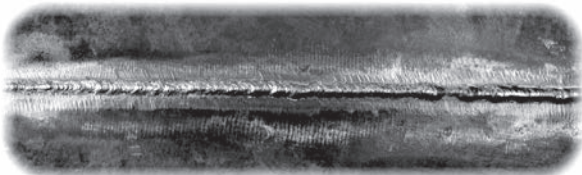


Рис. 16. Кореневий шов зі зворотного боку зварного стикового з’єднання, виконаного на вертикалі

«один шар за два проходи». Це дозволяє подрібнити структуру металу шва та додатково підвищити значення його ударної в’язкості. При ширині обробки крайок $l < 15$ мм перший шар виконують методом «один шар за один прохід», а починаючи з другого шару – методом «один шар за два проходи». Облицювальний шар нахльостково-стикового з’єднання слід виконувати методом «шар за прохід» або «шар за два проходи» залежно від величини l . Загальна кількість шарів у нахльостково-стикових з’єднаннях визначається товщиною стінки конструктивних підсилюючих елементів. Для гарантованого сплавлення крайок із трубопроводом зварювання в стельовому положенні слід виконувати в положенні електрода «кутом назад». Режими зварювання наведені у таблиці.

Особливої уваги вимагає міцність зварних з’єднань муфти з наповнювачем. Принцип використання ремонтної конструкції такого типу полягає в заповненні регулярної міжстінкової щілини між муфтою та трубопроводом рідким компаундом, що

дозволяє забезпечити відповідний рівень гідростатичного тиску та знизити рівень напружень у стінці дефектної труби. Але ремонт МГ за допомогою муфт із компаундним наповнювачем має свої обмеження, які пов’язані з особливостями монтажу підсилювальної конструкції на трубі, а саме, з геометрією зварного з’єднання. При наявності технологічного кільця, що забезпечує необхідну величину проміжку між стінками, у зоні примикання утворюється тріщиноподібна щілина, тобто таке зварне з’єднання відноситься до так званих «щілинних» з’єднань, розрахунок яких виконується на основі підходів механіки руйнування тіл із тріщинами. Граничний стан для такого типу зварних з’єднань формулюється з умови, що прилегла гостра порожнина перебуває в полі напруженого стану, при якому можливе її спонтанне зростання. Для оцінки граничного стану може бути використаний апробований метод R6, заснований на двопараметричному критерії крихко-в’язкого руйнування, який співвідносить параметр чисто крихкого руйнування у вершині тріщини $K_r = K_I/K_{IC}$ з параметром чисто в’язкого руйнування для даної тріщини $L_r = \sigma_{ref}/\sigma_T$. Розрахункове визначення величин K_I і σ_{ref} для зварних з’єднань щілинного типу зручно виконувати, попередньо розрахувавши згинальний момент M_L і перерізуючу силу Q_r , які діють у зоні зварного з’єднання на одиницю його довжини (по колу), використовуючи наступні залежності [23]:

Рекомендовані режими зварювання нахльостково-стикового з’єднання, звареного із застосуванням дротів DW-A55 та Св-08Г2С (захисний газ 82 % Ar + 18 % CO₂)

Параметр	Прохід при заповненні розробки	
	Заповнювальний	Облицювальний
Швидкість подачі дроту, м/хв	(8,0...9,1)/(4,0...4,1)	(7,4...8,0)/(3,7...3,8)
Зварювальний струм, А	(190...220)/(135...140)	(180...200)/(125...130)
Напруга на дузі, В	(26,5...27,0)/(19,5...20,5)	(26,0...26,5)/(18,0...18,5)
Виліт дроту, мм	(12...23)/(12...23)	(10...16)/(10...16)
<i>Примітка.</i> Чисельник – для дроту DW-A55, знаменник – для дроту Св-08Г2С		

$$K_I = \frac{0,5369}{\sqrt{h}} \left(Q_r \cos \varphi + \frac{8M_L}{h} \right);$$

$$\sigma_{ref} = \sqrt{\left(\frac{4M}{h^2} + \frac{Q_r \cos \varphi}{h} \right)^2 + 3 \left(\frac{Q_r \sin \varphi}{h} \right)^2} \quad (20)$$

де h – мінімальний розмір від вершини гострої порожнини у зварному шві до вільної поверхні (рис. 17); для розглянутого випадку їх два – h_1 і h_2 . Більш консервативним є розмір h_1 :

$$h_1 = t_M \cos \varphi = t_M (1 + \beta^2)^{-0,5}; \quad \beta = \frac{t_M + \Delta - \delta_M}{a_M}. \quad (21)$$

З викладеного випливає, що граничний стан крихко-в'язкого руйнування (спонтанне зростання «тріщини» – гострої порожнини, пов'язаної з кільцевим зварним швом) визначається згинальним моментом M_L і перерізуючою силою Q_r , обумовленими внутрішнім тиском у трубі P і в наповнювачі P_{fill} , геометричними розмірами перерізу, тобто величинами D , t , δ_{mk} , c_M , a_M , b_M , Δ , t_M , а також відповідними характеристиками матеріалу K_{IC} , σ_T , σ_B зварного з'єднання у перерізах h_1 і h_2 .

Для отримання відповідних кількісних результатів була використана чисельна методика скінченно-елементного прогнозування НДС, викладена раніше. Момент M_L і перерізуюча сила Q_r у вершині гострої порожнини обчислювали-

ся за нормальними напруженнями σ_{zz} у перерізі, що відповідає вершині гострої порожнини, для її зростання по h_1 або h_2 . Величина моменту M_L має вигляд різниці $M_L = M_1 - M_2$, де:

– для випадку поширення тріщини по променю h_1

$$M_1 = \int_{-t_M/2}^{t_M/2} \sigma_{zz} \xi d\xi, \quad M_2 = \int_{\frac{t+\Delta}{2}}^{\frac{t+\Delta}{2}} \sigma_{zz} \xi d\xi; \quad (22)$$

– для випадку поширення тріщини по променю h_2

$$M_1 = \int_{\frac{t_M+\Delta}{2}}^{\frac{t_M+\Delta}{2}} \sigma_{zz} \xi d\xi, \quad M_2 = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{zz} \xi d\xi. \quad (23)$$

Відповідні результати розрахунку для трубопроводу зі сталі X70 при $D = 1420$ мм, $t = 20$ мм і робочому тиску $P = 7,5$ МПа наведені нижче для муфти завдовжки 1400 мм і завтовшки $t_M = 14$ мм і $\delta = 20$ мм при ремонтному тиску $P_r = 7,5$ МПа, і $t_M = 14$ мм при $P_r = 0,7P = 5,25$ МПа. Розміри технологічних кілець – δ_{mk} і c_M приймалися наступними: $\delta_{mk} = t_M$, $c_M = 140$ мм. Величина зазору Δ регулювалася додатковими кільцями розмірами по ширині $b_M = 30$ мм.

На основі значень M_L і Q_r розраховано K_I , σ_{ref} а потім при $K_{IC} = 1500$ МПа·мм^{1/2}, $\sigma_T = 440$ МПа і 360 МПа – коефіцієнт запасу міцності n . З наведених даних видно, що зміна границі текучості від 440 до 360 МПа (сталі X70 і X60) при $P_r = P = 7,5$ МПа і $P_r = 0,7P$ не виявляє помітного впливу на припустимий тиск у наповнювачі $[P_{fill}]$ при коефіцієнтах безпеки $n \approx 2,0$. Помітний вплив виявляє величина щілини Δ : зі збільшенням Δ від 3 до 12 мм $[P_{fill}]$ знижується від 4,3 до 2,3 МПа при $P_r = P$ і від 3,5 до 1,7 МПа при $P_r = 5,25$ МПа. Підвищення тиску P_{fill} вище зазначеного, що допускається $[P_{fill}]$, небажане, тому що при цьому помітно знижується величина коефіцієнта запасу міцності (рис. 18).

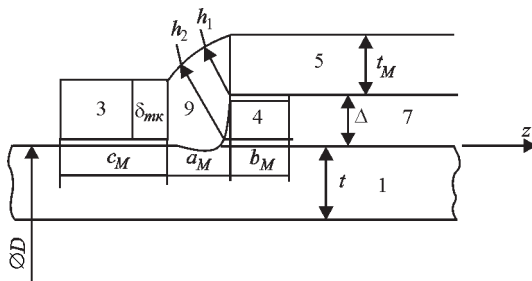


Рис. 17. Схема перерізу кільцевого з'єднання монтажного вузла кріплення герметичної муфти з компаундним наповнювачем до трубопроводу

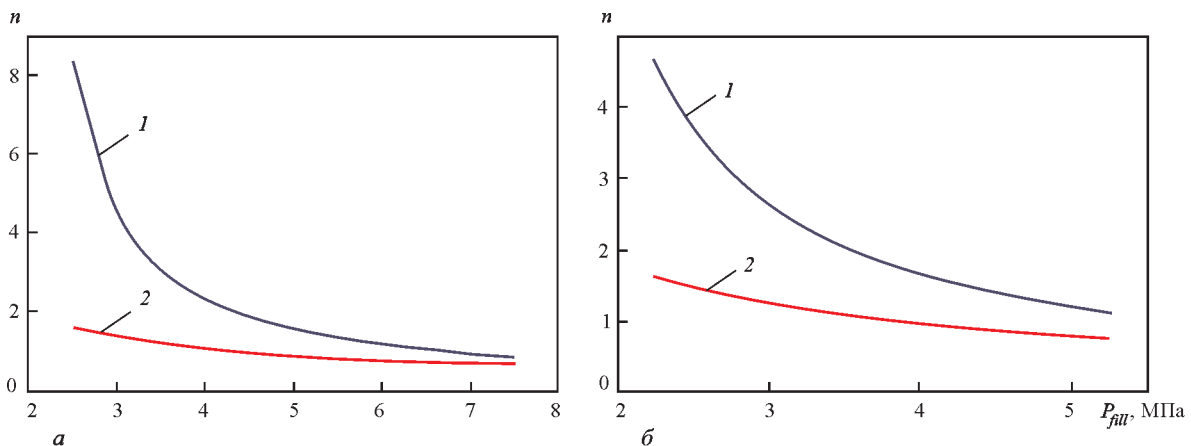


Рис. 18. Залежність коефіцієнта запасу міцності n зварного з'єднання герметичної муфти та трубопровідного елемента ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, $\sigma_T = 440$ МПа) по променю h_1 залежно від тиску рідкого наповнювача P_{fill} : а – внутрішній тиск у трубопроводі $P = 7,5$ МПа; б – $P = 5,25$ МПа; 1 – $\Delta = 3$ мм, 2 – $\Delta = 12$ мм

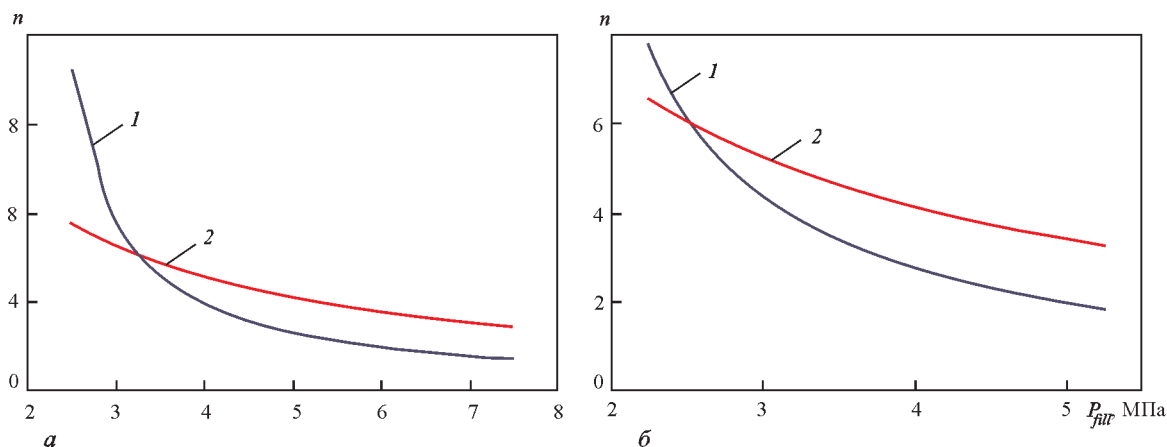


Рис. 19. Залежність коефіцієнта запасу міцності n зварного з'єднання герметичної муфти та трубопровідного елемента ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, $\sigma_r = 440$ МПа) по променю h_2 залежно від тиску рідкого наповнювача P_{fill} : а – внутрішній тиск у трубопроводі $P = 7,5$ МПа; б – $P = 5,25$ МПа, 1 – $\Delta = 3$ мм, 2 – $\Delta = 12$ мм

Стосовно випадку руйнування по променю h_2 , результати розрахунку підтверджують висловлене вище припущення про більш консервативний варіант руйнування по променю h_1 (рис. 19). Для розглянутого варіанта вхідних даних із отриманих результатів чисельних досліджень випливає, що при нормативних розмірах герметичної муфти й умовах заповнення міжстінкового проміжку можна рекомендувати тиск наповнювача з умови збереження цілісності кільцевих зварних швів на рівні $[P_{fill}] = 4,3 \dots 4,5$ МПа при $P_r = 5,25 \dots 7,5$ МПа і $\Delta = 3$ мм. Збільшення Δ до 12 мм різко знижує припустимий тиск у наповнювачі до 1,7...2,3 МПа. Оскільки для багатьох практично реалізованих випадків величина проміжку Δ перебуває в межах 3 мм, створюваний тиск P_{fill} не перевищує 4 МПа, то розглянута конструкція ремонтної муфти стосовно елементів МГ $D \times t = 1420 \times 20$ мм зі сталі X60–X70 може забезпечити достатнє розвантаження дефектної зони в стінці трубопроводу за умови, що заданий тиск рідкого наповнювача збережеться, деякою мірою, і після його полімеризації.

Таким чином, технології відновлення в сучасній газотранспортній системі слід розглядати як невід'ємний елемент адаптивного управління цілісністю, що інтегрує результати діагностики, чисельного моделювання, прогнозування деградації та ризик-орієнтованого аналізу. Перехід від нормативного вибору ремонтних рішень до їхньої цифрової, фізично обґрунтованої та індивідуалізованої оптимізації є одним із ключових проявів парадигми Індустрії 4.0/5.0 і створює методологічне підґрунтя для забезпечення довготривалої надійності ГТС України.

Управління цілісністю МГ в умовах транспортування зеленого водню. Декарбонізація енергетичного сектору та формування нової архітектури енергетичних ринків Європи зумовлюють

поступовий перехід до транспортування сумішей природного газу та зеленого водню. У межах парадигми Індустрії 4.0/5.0 цей перехід слід розглядати не як просту зміну робочого середовища ГТС, а як фундаментальну трансформацію умов її функціонування, що безпосередньо впливає на всі рівні управління цілісністю – від матеріалознавчого до системного. У цьому контексті важливими стають два взаємопов'язані науково-технологічні аспекти. Перший полягає у необхідності глибокого фундаментального розуміння механізмів водневої деградації конструкційних сталей, які суттєво відрізняються від класичних корозійно-механічних процесів, характерних для транспортування природного газу. Водень виступає не лише як дифузійно активний елемент, але й як каталізатор локалізації пластичної деформації, декогезійного послаблення міжфазних і міжзеренних зв'язків, а також прискорення зародження та зростання мікро- і макротріщин. Другий аспект безпосередньо пов'язаний із практикою індивідуалізованої експертизи та ремонтно-відновлювальних робіт як елемент адаптивного управління цілісністю.

Так, результати наукових досліджень дозволили встановити, що важливу роль у корозійно-водневій деградації відіграє абсорбований водень, який формується внаслідок електрохімічної корозії як на внутрішніх, так і на зовнішніх поверхнях труб [24]. Його накопичення інтенсифікує дифузійні процеси, сприяє утворенню вакансій, мікропор і розвитку розсіяної пошкодженості, що знижує міцність і підвищує схильність до корозійно-водневого розтріскування [25]. Додатково встановлено кореляцію між зниженням ударної в'язкості та вмістом водню в експлуатованому металі, причому найінтенсивніша деградація спостерігається на ділянках труб, які контактують із водним конденса-

сатом, що підтверджує визначальну роль наводнювання в процесах втрати роботоздатності [26].

Водень, незалежно від джерела його надходження у метал, інтенсифікує розвиток тріщин на мікро- та макрорівні, прискорюючи як зародження, так і зростання дефектів. Для кількісної оцінки його впливу на зростання макротріщин розроблено науково-обґрунтований метод визначення опору водневому окрихченню [27], що базується на електролітичному наводнюванні частини зразка з подальшою дифузією водню до вершини тріщини. Додатково запропоновано технологічний підхід до гальмування росту втомних тріщин шляхом використання спеціального середовища [28].

Важливою з точки зору перспективи використання вітчизняної ГТС для потреб водневої енергетики експериментально підтвердженою закономірністю є те, що експлуатовані трубні сталі набувають схильності до корозійного та водневого розтріскування [29], тоді як у вихідному стані така чутливість відсутня. Зокрема гладкі зразки сталі API X52 не демонструють схильності до корозійного розтріскування в модельному середовищі водного конденсату газопроводу (рис. 20, а). Водночас зразки з тріщинами проявляють виражену чутливість (рис. 20, б), причому накладення катодної поляризації додатково знижує порогове значення J_{sc} відносно J_i у повітрі.

Для цього розроблено метод прискореної воднево-індукованої деградації, який моделює довготривалі процеси за рахунок інтенсифікації мікропошкодженої та дозволяє прогнозувати зміну механічних властивостей у масштабі десятків років за декілька діб [26]. Показано, що тривала експлуатація змінює механізми руйнування трубних сталей та підвищує їхню чутливість до корозійного розтріскування [25]. Важливим для фундаментального розуміння довготривалої надійності МГ є факт, що деградація трубних сталей відбувається

за двома взаємопов'язаними механізмами: зміною мікроструктури та розвитком розсіяної пошкодженої. Мікроструктурні зміни полегшують накопичення пошкоджень, що на макрорівні проявляється у зниженні опору крихкому руйнуванню (ударної в'язкості, роботи зародження тріщини, тріщиностійкості тощо). При цьому експлуатаційне окрихчення ферито-перлітних трубних сталей пов'язане зі збагаченням границь зерен і внутрішньозеренних дефектів сполуками вуглецю, що підтверджено електрохімічною діагностикою фасеток крізьзеренного відколу [30].

Розвиток розсіяної пошкодженої визначається особливостями мікроструктури, насамперед витягнутими вздовж напрямку вальцювання неметалевими включеннями. На границі включення—матриця утворюються нанопори, які є ефективними пастками водню. Накопичення рекомбінованого водню в цих дефектах знижує адгезію між включеннями та матрицею, спричиняє розшарування й пластичне деформування металу під дією внутрішнього тиску. Таким чином, розвиток мікропошкодженої відбувається за поєднання деформаційного та декогезивного механізмів, унаслідок чого навіть низькоміцні сталі з високим рівнем пошкодженої набувають низького опору крихкому руйнуванню [31].

Відомо, що низькоміцна сталь, яка є слабо чутливою до водневої крихкості у стані постачання, набуває її під час експлуатації, що посилює ризик порушення цілісності МГ при транспортуванні газоводневих сумішей. На полегшений розвиток у низькоміцних сталях розсіяної пошкодженої за механізмом деформування матеріалу під впливом високого тиску водню, рекомбінованого у дефектах [31], впливають складові мікроструктури, зокрема неметалеві включення, орієнтовані у напрямку вальцювання. На їхніх межах із матрицею утворюються нанорозмірні пори, які є ефективні-

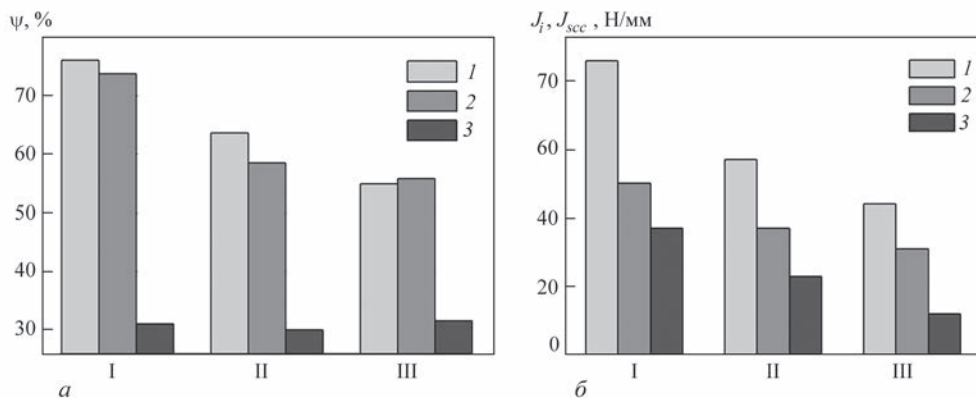


Рис. 20. Відносне звуження (а) та тріщиностійкість (б) сталі X52 у вихідному стані (I) та після 30 років експлуатації: X52-12 (II) та X52-10 (III) у повітрі (1), у модельному середовищі водного конденсату за потенціалу корозії (2) та катодної поляризації $0,1 \text{ A/m}^2$ (3)

ми пастками водню. Водень знижує силу адгезії між включеннями та матрицею (рис. 21, *а*) та накопичується у порах та інших дефектах. Як наслідок, формується розшарування між складовими мікроструктури й метал під тиском рекомбінованого водню деформується, що зумовлює розвиток дефекту (рис. 21, *б*). Об'єм порожнини між контуром дефекту та включенням є незначними (рис. 21, *в*), що полегшує створення в ньому воднем високого тиску. Отже, розвиток мікропошкодженості низькоміцних сталей, полегшений воднем, супроводжується поєднанням деформаційного механізму з декогезивним. Як наслідок, навіть низькоміцна сталь із високою мірою мікропошкодженості має низький опір крихкому руйнуванню.

Реалізація механізмів пошкодження трубних сталей під дією водню залежить від їхньої міцності. Для низькоміцних сталей домінує накопичення молекулярного водню в порах із подальшим деформаційним ростом і злиттям пор, тоді як для високоміцних визначальним стає водневе розтріскування внаслідок зниження когезивної й адгезивної міцності. Обидва механізми можуть реалізовуватися одночасно та посилювати корозійно-механічне руйнування [24]. Трубні сталі мають виражену текстуру, сформовану в процесі вальцювання: феритні смуги чергуються з тонкими прошарками перліту, а неметалеві включення витягуються вздовж напрямку прокатки. У процесі тривалої експлуатації послаблюється адгезія між включеннями та матрицею, а також між феритом і перлітом, що спричиняє розшарування та знижує опір крихкому руйнуванню в площині вальцювання [24].

Можна виокремити дві основні стадії експлуатаційної деградації феритно-перлітних трубних сталей: деформаційне старіння (I) та розвиток розсіяної пошкодженості (II) [24]. На першій стадії зростають границя текучості, міцність і твердість, тоді як пластичність, ударна в'язкість і тріщиностійкість знижуються. На другій стадії через накопичення пошкодженості зменшуються також міцність і твердість, а матеріал досягає критично-

го стану. Стадію розвитку розсіяної пошкодженості поділено на два періоди: утворення хаотично орієнтованих дефектів (IIa) і дефектів, орієнтованих уздовж напрямку вальцювання (IIб) [32]. У періоді IIa знижуються міцність, твердість, відносне звуження та характеристики опору крихкому руйнуванню, тоді як відносне видовження може навіть зростати внаслідок розкриття множинних дефектів. Тому показник δ втрачає інформативність для оцінювання пластичності. На стадії IIб розвиваються розшарування, орієнтовані вздовж волокон вальцювання, які можуть поширюватися всередині стінки труби без виходу на поверхню. При випробуваннях стандартних осьових зразків такі розшарування штучно підвищують виміряну ударну в'язкість, тому вона перестає адекватно характеризувати реальний опір крихкому руйнуванню. Для усунення цього ефекту рекомендовано використовувати спеціальні радіальні зразки, що забезпечують руйнування в площині, паралельній потенційному розшаруванню.

Як було вказано вище, наявність підвищеної концентрації дифузійного водню в металі труб, якими транспортуються газоводневі суміші, вимагає певного перегляду технологічних заходів підтримки їхньої цілісності. Характерним прикладом є забезпечення цілісності при ремонтному зварюванні, а саме, уникнення холодного розтріскування. Відомо, що підвищення концентрації дифузійного водню в металі посилює його схильність до зародження такого типу дефектності. Складність фізичних явищ, що впливають на схильність металу зварного шва до утворення холодних тріщин, створює значні проблеми у визначенні точного кількісного критерію руйнування. У цьому контексті ймовірнісний критерій, заснований на принципах статистичної механіки Вейбулла, вважається найбільш прийнятним для чисельної оцінки. Імовірність виникнення холодної тріщини як функцію вмісту дифузійного водню V_H (мл/100 г) і механічних напружень у матеріалі можна кількісно оцінити за допомогою наступного виразу [33]:

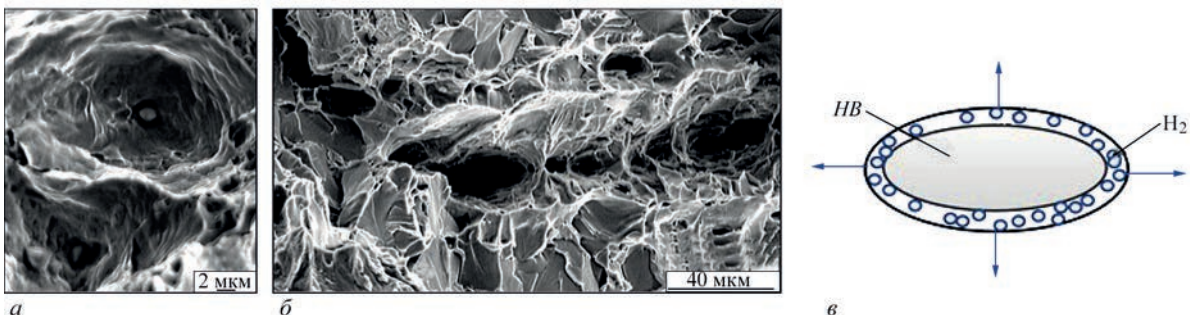


Рис. 21. Фрактограми (*а*, *б*) та схема (*в*), що ілюструють відшарування неметалевих включень від матриці (*а*), дефекти воднево-деформаційної природи (*б*) та їхнє формування (*в*): HB – неметалеве включення; H₂ – молізований водень

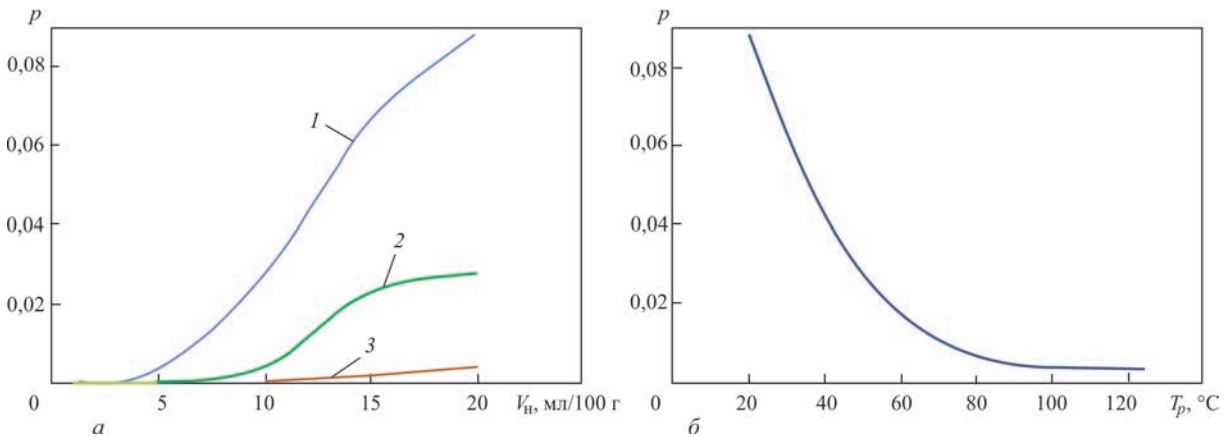


Рис. 22. Розрахункові залежності ймовірності p зародження холодної тріщини в металі трубопроводу від початкового вмісту дифузійного водню V_H (а) і температури попереднього підігріву ділянки ремонту T_p (б), 1 – $T_p = 20^\circ\text{C}$, 2 – $T_p = 50^\circ\text{C}$, 3 – $T_p = 100^\circ\text{C}$

$$p(V_H) = 1 - \exp \left[- \sum \left(\frac{\sigma - A(V_H)}{B} \right)^{\eta_p} \Delta V_H \right], \quad (24)$$

$$\sigma > A(V_H)$$

Коефіцієнти A , B , η_p для трипараметричного розподілу визначаються експериментально. Проведено дослідження впливу технологічних параметрів ремонтного зварювання МГ на холодне розтріскування металу труб із урахуванням впливу концентрації дифузійного водню V_H в умовах транспортування газоводневої суміші [34]. Досліджувалася пряма ділянка МГ діаметром 1420 мм і товщиною стінки 20 мм зі сталі Х65, робочий тиск 7,5 МПа, внутрішній тиск під час ремонту 4,0 МПа. Експлуатаційним дефектом, який розглядався, було локальне стоншення стінки розмірами 150 мм у довжину, 100 мм у ширину і 10 мм у глибину. Використаними параметрами зварювання були швидкість зварювання 5 мм/с і сила зварювального струму 100 А. Зона ремонту була попередньо нагріта до певної температури T_p , а час між послідовними проходами зварювання контролювався, щоб запобігти охолодженню металу нижче від температури попереднього нагріву.

Скінченно-елементний аналіз кінетики температурного поля, фазових перетворень, розподілу водню та НДС, виконаний для умов ремонтного зварювання МГ, показав суттєву просторову неоднорідність відповідних фізичних полів у зоні ремонту [35]. Це обґрунтовує доцільність застосування інтегрального ймовірнісного критерію холодно розтріскування, який дозволяє враховувати як фізичну складність процесу, так і технологічні особливості ремонту, підвищуючи точність оцінювання ризику тріщиноутворення. Аналіз критерію (24) підтвердив його ефективність для оцінки ймовірності зародження холодних тріщин [36]. Початковий вміст дифузійного водню є ви-

значальним фактором підвищення ризику зародження холодних тріщин: його зростання може збільшувати ймовірність тріщиноутворення в декілька разів (рис. 22, а). Водночас попереднє підігрівання зони ремонту до $\sim 100^\circ\text{C}$ суттєво знижує ризик, забезпечуючи значення ймовірності не вище за $5 \cdot 10^{-3}$ у широкому діапазоні концентрацій водню, що узгоджується з чинними нормативними вимогами. Додатково залежність ймовірності холодно розтріскування від температури попереднього нагріву при концентрації дифузійного водню $V_H = 20$ мл/100 г демонструє найбільшу ефективність підігрівання до $\sim 80^\circ\text{C}$ (рис. 22, б). Це підкреслює важливу роль оптимізації температурних режимів ремонту для забезпечення надійності зварних з'єднань.

Для практичного застосування результати доцільно подавати у вигляді діаграм залежності ризику холодно розтріскування від вмісту дифузійного водню та температури попереднього підігрівання зони ремонту. Такі діаграми дозволяють визначати умови досягнення заданого рівня ймовірності холодно розтріскування ($10^{-5} \dots 10^{-4}$) (рис. 23). Отримані результати свідчать, що вико-

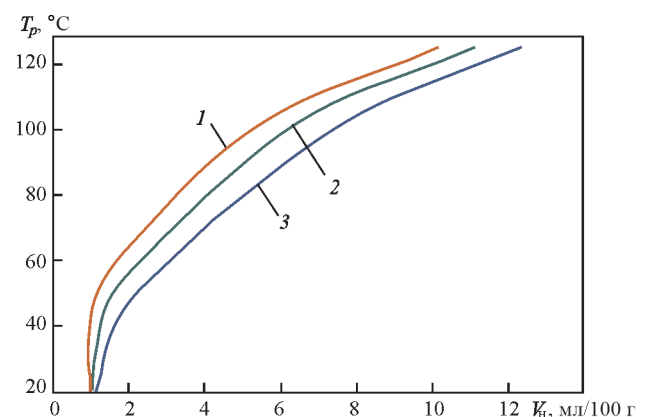


Рис. 23. Розрахункові залежності між температурою попереднього підігрівання T_p зони ремонту та вмістом дифузійного водню V_H у трубі для різних допустимих ймовірностей холодно розтріскування: 1 – $1 \cdot 10^{-4}$, 2 – $5 \cdot 10^{-5}$, 3 – $1 \cdot 10^{-5}$

ристання ГТС для транспортування газоводневих сумішей потребує перегляду нормативних підходів до ремонтних технологій і критеріїв забезпечення цілісності конструкцій.

Перспективи розвитку цифрово-інтелектуального управління цілісністю ГТС України. Подальший розвиток тематики науково-обґрунтованого та адаптивного управління цілісністю ГТС України в умовах декарбонізації та переходу до парадигми Індустрії 4.0/5.0 неможливо розглядати без переходу до повністю цифрової інтегрованої, сенсоронасиченої та автономнокерованої інфраструктури. У межах цієї еволюції ГТС трансформується з об'єкта періодичного інженерного контролю у безперервно діючу кіберфізичну систему, де рішення формуються на основі потоків даних у реальному часі, багаторівневого моделювання та інтелектуальної аналітики.

Ключовим технологічним драйвером такої трансформації є широкомасштабне впровадження систем автоматизованого моніторингу технічного стану об'єктів ГТС, включаючи розподілені сенсорні мережі, акустичні та волоконно-оптичні системи контролю, датчики корозійного потенціалу, деформацій, температури та водневого насичення. Інтеграція цих даних у єдину цифрову платформу забезпечує формування безперервного інформаційного поля про стан трубопровідної системи, компресорних станцій і підземних сховищ газу, що є базою для реалізації концепції цифрових двійників критичної інфраструктури.

Цифрові двійники у даному контексті розглядаються не як статична модель, а як динамічна багаторівнева система, яка синхронізується з реальним об'єктом через потоки сенсорних даних і дозволяє в режимі прогнозного моделювання оцінювати розвиток деградаційних процесів, включаючи корозійно-водневі механізми, накопичення пошкодженої, втому та зміну напружено-деформованого стану. Це створює основу для переходу до предиктивного та проактивного управління цілісністю.

Важливою складовою такої системи є роботизація ремонтно-відновлювальних операцій на діючих трубопроводах із мінімальним залученням персоналу до небезпечних зон. Застосування дистанційно керованих зварювальних комплексів, роботизованих платформ для наплавлення та систем автоматичного контролю якості зварних з'єднань дозволяє реалізувати концепцію «zero-human-exposure maintenance», що безпосередньо відповідає принципам людиноцентричної Індустрії 5.0.

Інтернет речей (IoT) виступає технологічним каркасом такої архітектури, забезпечуючи зв'язок

між польовими пристроями, аналітичними центрами та системами прийняття рішень. У поєднанні з методами машинного навчання та фізично обґрунтованого моделювання це створює можливість формування адаптивних стратегій експлуатації, де параметри режимів роботи ГТС, інтервали технічного обслуговування та вибір ремонтних технологій корегуються в реальному часі залежно від фактичного та прогнозного стану системи.

Таким чином, подальший розвиток досліджуваної проблематики полягає у формуванні єдиної кіберфізичної екосистеми управління цілісністю ГТС, в якій автоматизований моніторинг, цифрові двійники, IoT-інфраструктура та роботизовані технології ремонту інтегруються в єдину логіку життєвого циклу об'єкта. Це забезпечує перехід від реактивного обслуговування до інтелектуально керованої та безпекоорієнтованої експлуатації критичної енергетичної інфраструктури.

Висновки

1. Сформовано цілісну наукову концепцію забезпечення стійкості, живучості та функціональної надійності ГТС України як багаторівневої інтегрованої інфраструктури, що об'єднує МГ, компресорні станції та підземні сховища газу в єдину взаємопов'язану систему. На відміну від традиційних підходів, орієнтованих на аналіз окремих елементів у стаціонарних умовах, запропонована концепція враховує системну взаємодію технологічних, енергетичних і надійнісних факторів в умовах реверсних режимів, неповного завантаження, циклічних змін експлуатації та аномальних впливів, зумовлених воєнними та енергетичними викликами. Це формує наукове підґрунтя адаптивного управління ГТС у логіці Індустрії 4.0/5.0, де цифровізація та інтелектуалізація є базовими механізмами забезпечення стійкості критичної інфраструктури.

2. Розвинено наукові засади корозійно-механічної надійності МГ в умовах катодного захисту та тривалої експлуатації, що забезпечило перехід від емпіричних і нормативно-орієнтованих критеріїв до фізично обґрунтованого опису деградаційних процесів. Запропонований підхід поєднує електрохімічну діагностику, експрес-моделювання деградації та критерії граничного стану матеріалу, що дозволяє підвищити точність прогнозування механічних властивостей і ризиків розвитку дефектів у межах експлуатаційного життєвого циклу.

3. Розвинено фундаментальні положення континуальної механіки суцільного середовища в частині поєднання механіки в'язкого руйнування та

термодеформування, сформульовано новий клас методів експертного оцінювання технічного стану та ризику руйнування трубопровідних систем. На відміну від класичних підходів, заснованих на спрощених критеріях міцності, запропонована методологія враховує багатofакторну взаємодію термомеханічних, пошкоджувальних і технологічних процесів, включаючи вплив монтажного та ремонтного зварювання, пластичної нестійкості та мікромеханізмів втрати суцільності, що суттєво розширює можливості інженерної експертизи складних дефектних станів, дозволяє індивідуалізувати прийняття рішень щодо надійності та порядку обслуговування МГ.

4. Реалізовано комплекс технологій відновлення МГ без виведення їх із експлуатації, включаючи підсилення зварними муфтами, багатопрхідне наплавлення. Це розширює експлуатаційні можливості експлуатації ГТС у складних умовах і зменшує потребу в капітальній заміні елементів інфраструктури. Отримані результати формують технологічну основу ремонтно-відновлювальних рішень нового покоління, що відповідають принципам Індустрії 4.0/5.0, зокрема підвищенню ефективності, безпеки та екологічності.

5. Сформовано новий науковий напрям фізико-хімічної механіки деградації та руйнування конструкційних матеріалів МГ, у межах якого реалізовано комплексний аналіз взаємопов'язаних корозійно-водневих, деформаційних і структурно-механічних процесів у тривало експлуатованих сталях. Це створює науково-методологічну основу для переходу до фізично обґрунтованого, ризикорієнтованого та адаптивного прогнозування ресурсу та безпеки трубопровідних систем, включаючи перспективні сценарії транспортування газоводневих сумішей.

Список літератури/References

1. Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., Wang, L. (2021) Industry 4.0 and Industry 5.0 – Inception, conception and perception. *J. of Manufacturing Systems*, **61**, 530–535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>
2. Elijah, O., Ling, P., Rahim, S. et al. (2021) A survey on Industry 4.0 for the oil and gas industry: Upstream sector. *IEEE Access*, **9**, 144438–144468. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3121302>
3. Khan, F., Yarveisy, R., Abbassi, R. (2021) Risk-based pipeline integrity management: A road map for the resilient pipelines. *J. of Pipeline Sci. and Engineering*, **1**(1), 74–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2021.02.001>
4. Wanasinghe, T.R., Wroblewski, L., Petersen, B.K. et al. (2020) Digital twin for the oil and gas industry: Overview, research trends, opportunities, and challenges. *IEEE Access*, **8**, 104175–104197. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2998723>
5. Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Fathi, M. et al. (2025) Beyond Industry 4.0: A systematic review of Industry 5.0 technologies and implications for social, environmental and economic sustainability. *Asia-Pacific J. of Business Administration*, **17**(4), 889–914. DOI: <https://doi.org/10.1108/APJBA-08-2023-0384>
6. Okirie, A., Frank, L.E., Ozuru, O.N. (2025) Leveraging Industry 5.0 technologies for building resilience and sustainability in the oil and gas industry. *American J. of IR 4.0 and Beyond*, **4**(1), 17–28. DOI: <https://doi.org/10.54536/ajirb.v4i1.3718>
7. Majstorovic, V. (2022) Application of Industry 4.0 model in oil and gas companies. *J. of Engineering Management and Competitiveness*, **12**(1), 77–84. DOI: <https://doi.org/10.5937/jemc2201077m>
8. Wang, T., Feng, K., Ling, J. et al. (2024) Pipeline condition monitoring towards digital twin system: A case study. *J. of Manufacturing Systems*, **73**, 256–274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.02.006>
9. Okirie, A., Lawson, E.F., Ozuru, N.O. (2026) Integrating Industry 4.0 and 5.0 technologies for sustainable, resilient oil and gas production operations. *Advanced Manufacturing Research*, **4**(1), 1–24. DOI: <https://doi.org/10.21595/amr.2026.25525>
10. Ковалко М.П., Грудз В.Я. та ін. (2002) *Трубопровідний транспорт газу*. Київ, АренаЕКО.
11. Ковалко, М.П., Грудз, В.Я. et al. (2002) *Pipeline gas transport*. Kyiv, ArenaEKO [in Ukrainian].
12. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Тимків Д.Ф., Запукхляк В.Б. (2019) Оптимізація режимів роботи складних газотранспортних систем в умовах їх неповного завантаження. *Нафтогазова галузь України*, **1**, 26–31. https://www.naftogaz.com/ckeditor_assets/Галузевий%20журнал/Journal-Naftogazova-galuz-01-2019.pdf
13. Грудз, В.Я., Грудз, Я.В., Тимків, Д.Ф., Запукхляк, В.Б. (2019) Optimization of the operating modes of complex gas transportation systems under the conditions of their incomplete loading. *Oil and Gas Industry of Ukraine*, **1**, 26–31 [in Ukrainian]. https://www.naftogaz.com/ckeditor_assets/Галузевий%20журнал/Journal-Naftogazova-galuz-01-2019.pdf
14. Grudz, V., Zapukhliak, V., Hryhoriyskiy, S. et al. (2024) Probability optimization for ensuring the reliability of natural gas distribution systems. *Procedia Structural Integrity*, **59**, 757–762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.108>
15. Lindgren, L.-E. (2007) *Computational welding mechanics. Thermomechanical and microstructural simulations*. Woodhead Publishing Limited.
16. Lemaitre, J., Desmorat, R. (2005) *Engineering damage mechanics. Ductile, creep, fatigue and brittle failures*. Berlin, Springer-Verlag.
17. Milenin, O., Velikoivanenko, E., Rozyinka, G., Pivtorak, N. (2023) Novel approach for numerical evaluation of limiting state and reliability of corroded pipelines under in-service repair welding. *Welding in the World*, **67**(10), 373–379. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01543-1>
18. Milenin, O., Velikoivanenko, E., Rozyinka, G., Pivtorak, N. (2019) Residual strength and reliability of corroded pipelines—monte-carlo approach for consideration of spatially nonuniform material properties. In: *Proc. of the Second Intern. Conf. on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics*. Ed by E. Gdoutos. ICTAEM 2019. Springer, Cham. *Structural Integrity*, **8**, 321–326. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-21894-2_59
19. Milenin, O. (2017) Numerical prediction of the current and limiting states of pipelines with detected flaws of corrosion wall thinning. *J. of Hydrocarbon Power Engineering*, **4**(1), 26–37. <http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/6387/1/5884p.pdf>
20. Milenin, A., Velikoivanenko, E., Rozyinka, G., Pivtorak, N. (2019) Probabilistic procedure for numerical assessment of corroded pipeline strength and operability. *Intern. J. of Pressure Vessels and Piping*, **171C**, 60–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.003>
21. Ниркова Л.І., Осадчук С.О. (2023) *Корозійне розтріскування сталей магістральних газопроводів: Оцінювання та запобігання*. Київ, Наукова думка.
22. Nyrkova, L.I., Osadchuk, S.O. (2023) *Stress corrosion cracking of main gas pipeline steels: Assessment and prevention*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
23. Nyrkova, L.I. (2020) The influence of external and internal factors on stress corrosion cracking of low-alloyed pipe steel.

- J. of Hydrocarbon Power Engineering*, 7(1), 8–15. DOI: [https://doi.org/10.31471/2311-1399-2020-1\(13\)-8-15](https://doi.org/10.31471/2311-1399-2020-1(13)-8-15)
21. Velikoivanenko, E., Rozyinka, G., Milenin, A., Pivtorak, N. (2015) Evaluation of operability of the main pipeline with local wall thinning at repair by arc surfacing. *The Paton Welding J.*, 1, 18–23. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.01.03>
22. ГБН В.3.1-00013741-12:2011. *Магістральні газопроводи. Ремонт дуговим зварюванням в умовах експлуатації*. GBN V.3.1-00013741-12:2011. *Main gas pipelines. Arc welding repair under operating conditions* [in Ukrainian].
23. Makhnenko, V.I., Velikoivanenko, E.A., Milenin, A.S. et al. (2011) Admissible pressure for filler of sealed sleeves used to repair main pipelines. *The Paton Welding J.*, 8, 22–26. <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2011/pdfarticles/08/8.pdf>
24. Demianchuk, D.O., Tsyurulnyk, O.T., Solovei P.R. et al. (2025) The influence of operation and notch orientation on the impact toughness of API 5L X67 steel. *Mater. Sci.*, 61(2), 249–255. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-025-00986-9>
25. Zvirko, O.I., Savula, S.F., Tsependa, V.M. et al. (2016) Stress corrosion cracking of gas pipeline steels of different strength. *Procedia Structural Integrity*, 2, 509–516. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.066>
26. Tsyurulnyk, O.T., Kret, N.V., Voloshyn, V.A., Zvirko, O.I. (2018) A procedure of laboratory degradation of structural steels. *Mater. Sci.*, 53(5), 674–683. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0123-1>
27. Греділь М.І., Никифорчін Г.М., Цирульник О.Т., Штойко І.П. (2018) *Спосіб визначення опору металевих конструкційних матеріалів водневому окрихченню*. Патент на корисну модель №127310. № U 2018 01845. Заявл. 23.02.2018. Опубл. 25.07.2018. Бюл. № 14.
- Hredil, M.I., Nykyforchyn, H.M., Tsyurulnyk, O.T., Shtoiiko, I.P. (2018) *Method for determining the resistance of metallic structural materials to hydrogen embrittlement*. Utility model patent 127310, U201801845, fill. 23.02.2018, publ. 25.07.2018 [in Ukrainian].
28. Никифорчін Г.М., Пустовий В.М., Слободян З.В. та ін. (2018) *Спосіб гальмування росту втомної тріщини*. Патент на корисну модель № 128514. № U 2018 02248. Заявл. 05.03.2018. Опубл. 25.09.2018. Бюл. № 18.
- Nykyforchyn, H.M., Pustovyi, V.M., Slobodian, Z.V. et al. (2018) *Method for retarding fatigue crack growth*. Utility model patent 128514, U201802248, fill. 05.03.2018, publ. 25.09.2018 [in Ukrainian].
29. Zvirko, O., Mytsyk, B., Nykyforchyn, H. Et al. (2023) Application of the various methods for assessment of in-service degradation of pipeline steel. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 30(24), 5058–5067. DOI: <https://doi.org/10.1080/15376494.2022.2111732>
30. Nykyforchyn, H., Tsyurulnyk, O., Zvirko, O., Krechkovska, H. (2019) Non-destructive evaluation of brittle fracture resistance of operated gas pipeline steel using electrochemical fracture surface analysis. *Engineering Failure Analysis*, 104, 617–625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.06.037>
31. Nykyforchyn, H., Tsyurulnyk, O., Zvirko, O., Hredil, M. (2020) Role of hydrogen in operational degradation of pipeline steel. *Procedia Structural Integrity*, 28, 896–902. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.060>
32. Nykyforchyn, H., Zvirko, O., Dzioba, I. et al. (2021) Assessment of operational degradation of pipeline steels. *Materials*, 14(12), 3247. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14123247>
33. Milenin, O., Velykoivanenko, O., Rozyinka, G., Pivtorak, N. (2025) Numerical assessment of cold crack susceptibility of X65 pipe steel during in-service repair welding of pipeline in transportation of gas-hydrogen blends. *Procedia Structural Integrity*, 68, 1010–1016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.06.163>
34. Milenin, O., Velykoivanenko, O., Rozyinka, G., Pivtorak, N. (2023) Numerical analysis of brittle strength of welded pipelines with corrosion metal loss in transportation of blends of natural gas with hydrogen. *Welding in the World*, 67(12), 2803–2809. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01612-5>
35. Міленін О.С., Великоіваненко О.А., Розинка Г.П., Півторак Н.І. (2024) Чисельний аналіз закономірностей впливу деградації трубної сталі на надійність кородованих магістральних газопроводів при транспортуванні газоводневих сумішей. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 1, 8–13. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.01.02>
- Milenin, O.S., Velykoivanenko, O.A., Rozyinka, G.P., Pivtorak, N.I. (2024) Numerical analysis of the regularities of the influence of pipe steel degradation on the reliability of corroded main gas pipelines used for transportation of gas-hydrogen mixtures. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, 1, 8–13. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.01.02>
36. Міленін О.С., Великоіваненко О.А., Розинка Г.П., Півторак Н.І. (2023) Чисельна оцінка крихкої міцності монтажних зварних швів магістральних газопроводів при транспортуванні газоводневих сумішей. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 1, 22–27. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.01.03>
- Milenin, O.S., Velykoivanenko, O.A., Rozyinka, G.P., Pivtorak, N.I. (2023) Numerical assessment of brittle strength of field welds of the main gas pipelines at transportation of gas-hydrogen mixtures. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, 1, 22–27. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.01.03>

ADAPTIVE INTEGRITY MANAGEMENT OF THE UKRAINIAN GAS TRANSMISSION SYSTEM IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0/5.0 PARADIGM

S.Yu. Maksymov¹, O.I. Zvirko², O.S. Milenin¹, L.I. Nyrkova¹, I.I. Chudyk³, V.B. Zapukhliak³, V.V. Rudko⁴

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: asmilenin@ukr.net

²G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine. 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: olha.zvirko@gmail.com

³Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. 15 Karpatska str., 76019, Ivano-Frankivsk, Ukraine.

E-mail: i.chudyk@nung.edu.ua

⁴JSC «Ukrtransgaz». 9/1 Klovskiy Uzviz, 01021, Kyiv, Ukraine.

This work advances a scientifically substantiated concept of adaptive integrity management for the Ukrainian gas transmission system under the transition to the Industry 4.0/5.0 paradigm and increasingly complex operating conditions, including wartime impacts, decarbonization of the energy sector, and the prospective transportation of hydrogen–natural gas blends. A systematic life-cycle assessment framework for gas transmission system assets is proposed, integrating physics-based modelling, probabilistic reliability assessment methods, and innovative technologies for restoring the technical condition. A multi-level integrity management architecture is presented, encompassing system-level optimization of operating regimes, individualized assessment of defective pipeline sections based on finite element modelling, Weibull analysis, and Monte Carlo simulation, as well as prediction of degradation processes as a key component of predictive maintenance. Particular attention is devoted to the adaptation of repair technologies to the current technical condition of structures, taking into account corrosion–hydrogen degradation mechanisms and localized stress–strain states. 36 Ref., 1 Tabl., 23 Fig.

Keywords: gas transmission system, adaptive integrity management, Industry 4.0, Industry 5.0, predictive maintenance, finite element modelling, hydrogen degradation, corrosion cracking, repair

ORCID

Максимов С.Ю. – <https://orcid.org/0000-0002-5788-0753>, Звірко О.І. – <https://orcid.org/0000-0002-6973-6804>,
Міленін О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>, Ниркова Л.І. – <https://orcid.org/0003-3917-9063>,
Чудик І.І. – <https://orcid.org/0000-0002-7402-6962>, Запущляк В.Б. – <https://orcid.org/0000-0002-2502-3896>,
Рудко В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-0856-2898>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

О.С. Міленін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: asmilenin@ukr.net

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

С.Ю. Максимов, О.І. Звірко, О.С. Міленін, Л.І. Ниркова, І.І. Чудик, В.Б. Запущляк, В.В. Рудко (2026) Адаптивне управління цілісністю газотранспортної системи України в контексті парадигми Індустрії 4.0/5.0. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **03**, 3–27. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.03.01>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk>

Отримано 07.07.2026

Отримано у переглянутому вигляді 10.08.2026

Підписано до друку 06.09.2026

Оприлюднено 22.09.2026

