



ЗВІРКО

Ольга Іванівна — доктор технічних наук, професор, завідувач відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту імені Г.В. Карпенка НАН України

ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ТРАНСПОРТУВАННЯ СУМІШІ ЗЕЛЕНОГО ВОДНЮ ТА ПРИРОДНОГО ГАЗУ В КОНТЕКСТІ РОЗВИТКУ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

За матеріалами доповіді на засіданні Президії
НАН України 1 листопада 2023 року

У доповіді наведено найважливіші результати фундаментальних та прикладних досліджень, проведених у Фізико-механічному інституті імені Г.В. Карпенка НАН України і спрямованих на вирішення проблеми безпечного транспортування енергоносіїв, зокрема сумішей водню з природним газом, з використанням наявної газотранспортної мережі України. Напрацьовано методологію оцінювання технічного стану сталей тривало експлуатованих газопроводів з урахуванням деструктивного впливу транспортованого ними водню; встановлено умови та критерії їх безпечної експлуатації.

Ключові слова: сталь, трубопровід, водень, воднева крихкість, міцність, механічні властивості, тріщиностійкість, діагностика, неруйнівний електронічний метод.

Останнім часом особливу увагу як науковців, так і суспільства загалом привертає розвиток водневої енергетики, яка є частиною політики зеленого енергетичного переходу, спрямованої на досягнення кліматичної нейтральності та посилення енергетичної безпеки. Зелений водень поряд із відновлюваними джерелами енергії є важливим чинником декарбонізації світової енергетики.

Ще в 2019 р. одним з основних стратегічних пріоритетів Євросоюзу було визначено Європейський зелений курс (European Green Deal). Однак після широкомасштабної воєнної агресії РФ проти України перед енергетичним ринком Європи постали серйозні виклики. Як відповідь на них у травні 2022 р. Європейська комісія представила план REPowerEU, який дозволив різко зменшити споживання нафти та природного газу, а також диверсифікувати постачання енергоносіїв та збільшити виробництво так званої чистої енергії.

Проблема розвитку водневої енергетики має різні аспекти. Один із них пов'язаний з транспортуванням водню. Загалом водневе паливо можна рентабельно транспортувати за допомогою наявних трубопровідних систем. На сьогодні у світі експлуатують тисячі кілометрів водневих трубопроводів (найбільше в Європі та Північній Америці), однак наразі немає достатньо розвинутих національних водневих мереж. Тому, зважаючи на зростаючий попит на водень, розглядають можливість його транспортування вже наявними мережами газопроводів.

Відповідно до Європейської водневої стратегії (European hydrogen backbone), майже 70 % водневої інфраструктури до 2030 р. ґрунтуватиметься на наявних газопроводах, а Україну визначено як пріоритетного партнера завдяки її потенціалу з виробництва «зеленого» водню та наявності інфраструктури, з'єднаної з інфраструктурою Європейського Союзу. З огляду на це уряд України розробляє перспективні плани щодо створення водневої екосистеми — від виробництва до зберігання і транспортування водню, виробленого з відновлюваних джерел енергії. Це питання увійшло до проекту Плану відновлення України, розробленого Національною радою з відновлення України від наслідків війни¹, а також проекту Постанови Верховної Ради України про розвиток водневої енергетики², який, зокрема, пропонує невідкладні заходи у сфері транспортування водню газовими мережами.

Велика частка магістральних газопроводів України має значний термін експлуатації, що може призводити до зниження їх роботоздатності. Тому важливо оцінити можливість безпечного транспортування водню чи його сумішей з природним газом трубопроводами з тер-

міном експлуатації понад 30 років. Головними чинниками, які ускладнюють вирішення цієї проблеми, є експлуатаційна деградація трубних сталей [1–8] та потенційно негативний вплив транспортованого водню на їх механічні властивості, посилення корозії та воднево-механічного руйнування [9–11].

Вчені Фізико-механічного інституту імені Г.В. Карпенка НАН України останнім часом широко проводять дослідження за цим напрямом. При цьому ми враховуємо отриманий раніше у співпраці з оператором ГТС України досвід досліджень експлуатаційної деградації сталей магістральних газопроводів та роль водню в цьому процесі, насамперед через його вплив на розвиток мікро- та макропошкоджених [2–8]. Саме пошкодженість є головною причиною зниження опору крихкому руйнуванню сталей, що є найнебезпечнішим наслідком їх експлуатаційної деградації і найчастіше спричиняє неконтрольоване руйнування магістральних трубопроводів. Запобігти цьому можна застосовуючи ефективні методи та засоби діагностування поточного технічного стану трубних сталей, а також методи оцінювання їх роботоздатності з урахуванням ступеня деградації та експлуатаційних умов.

У доповіді наведено напрацювання відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту імені Г.В. Карпенка НАН України, отримані під час реалізації відомчої тематики НАН України, а також у дослідженнях, виконаних у рамках програми НАТО «Наука заради миру та безпеки» (2016–2020 рр.), спільного українсько-індійського проекту (2019–2021 рр.), проекту департаменту освіти і науки Львівської обласної державної адміністрації (2023 р.) та ін.

Зазначимо, що стан металу на різних ділянках трубопроводу може сильно різнитися, тому наголос зроблено на найбільш небезпечних проявах деградації металу.

Ми показали, що під час транспортування природного газу метал труби може наводнюватися з боку внутрішньої поверхні на значних ділянках унаслідок корозійної взаємодії з конденсованою вологою [12]. Це прискорює экс-

¹ Проект Плану відновлення України. Національна рада з відновлення України від наслідків війни: матеріали робочої групи «Енергетична безпека». Липень 2022 р. <http://surl.li/dfwtr>

² Про розвиток водневої енергетики з метою забезпечення економічної та енергетичної безпеки України: проект Постанови Верховної Ради України від 02.12.2022 № 8258. <https://itd.rada.gov.ua/billInfo/Bills/Card/40968>

платуаційну деградацію металу через розвиток пошкодженості [4, 6, 7]. Як наслідок, деградованому металу властиві вища концентрація залишкового водню, нижчий опір крихкому руйнуванню (ударна в'язкість та тріщиностійкість), а також вищий ступінь пошкодженості. Транспортування водню чи газоводневих сумішей очікувано посилюватиме наводнювання металу стінки труби і, відповідно, підвищуватиме ризик руйнування.

На основі виявлених закономірностей зміни механічних властивостей трубних сталей під час тривалої експлуатації та враховуючи роль водню в їх деградації, було виокремлено дві основні її стадії [3, 4, 6]: 1) стадія деформаційного старіння; 2) стадія розвитку розсіяної пошкодженості. На першій стадії міцність і твердість збільшуються, а характеристики пластичності та опірності крихкому руйнуванню знижуються (рис. 1). На другій стадії через накопичення пошкодженості міцність і твердість металу зменшуються. Метал досягає свого критичного структурно-механічного стану і втрачає роботоздатність, зокрема характеристики опору крихкому руйнуванню — тріщиностійкість та ударна в'язкість — різко знижуються. Для коректного визначення пластичності металу рекомендовано враховувати його фактичний нетто-переріз, оскільки на показник відносного видовження істотно впливає розкриття множинних мікрodefektів (рис. 1). При цьому водень інтенсифікує обидві стадії деградації.

Відомо, що для реалізації деформаційного старіння необхідна пластична деформація металу як джерело генерування дислокацій. Такі умови можуть скластися як при будівництві, так і під час експлуатації трубопроводів. Ми висунули гіпотезу про можливість реалізації на мікрорівні деформаційного старіння і без зовнішнього механічного навантаження, якщо в процесі бере участь водень, оскільки він є джерелом виникнення внутрішніх напружень через утворення високих тисків водню на мікрорівні і, відповідно, генерування дислокацій. Гіпотезу було підтверджено експериментально на сталі 17Г1С у стані постачання та після 36 років

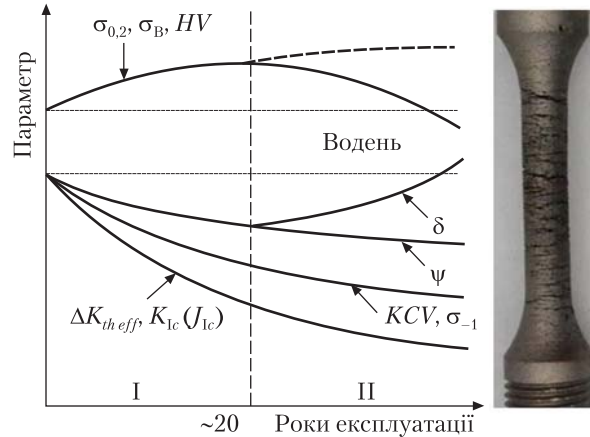


Рис. 1. Схема стадійності деградації феритно-перлітних сталей: I — стадія деформаційного старіння; II — стадія розвитку розсіяної пошкодженості

експлуатації з використанням попереднього електролітичного наводнювання [13]. Із застосуванням фрактографічного аналізу показано окрихчення металу в разі реалізації механізму деформаційного старіння, спричиненого виключно воднем, який істотно підвищив схильність сталі до водневого розтріскування.

Газопровідна мережа України використовує труби різної міцності, і їх воднева деградація під час транспортування водню залежатиме від цього чинника. Ми з'ясували особливості механізму водневої деградації сталей залежно від їх міцності. Загалом вважають, що високоміцні сталі чутливіші до дії водню через реалізацію декогезивного механізму. Він зумовлює розшарування певних структурних складових та мікророзтріскування. У низькоміцних сталях ми зафіксували утворення округлих пор (рис. 2), спричинене дією високого тиску водню у водневих пастках, що приводить до виникнення внутрішніх напружень, співмірних з міцністю металу [14].

Отже, широкий діапазон міцності сталей, чутливих до водневої деградації, ми пов'язуємо з реалізацією різних механізмів розвитку пошкодженості під дією водню: в низькоміцних сталях спочатку формуються воднево-деформаційні пори з трансформацією у мікроруйнування за декогезивним механізмом, тоді як

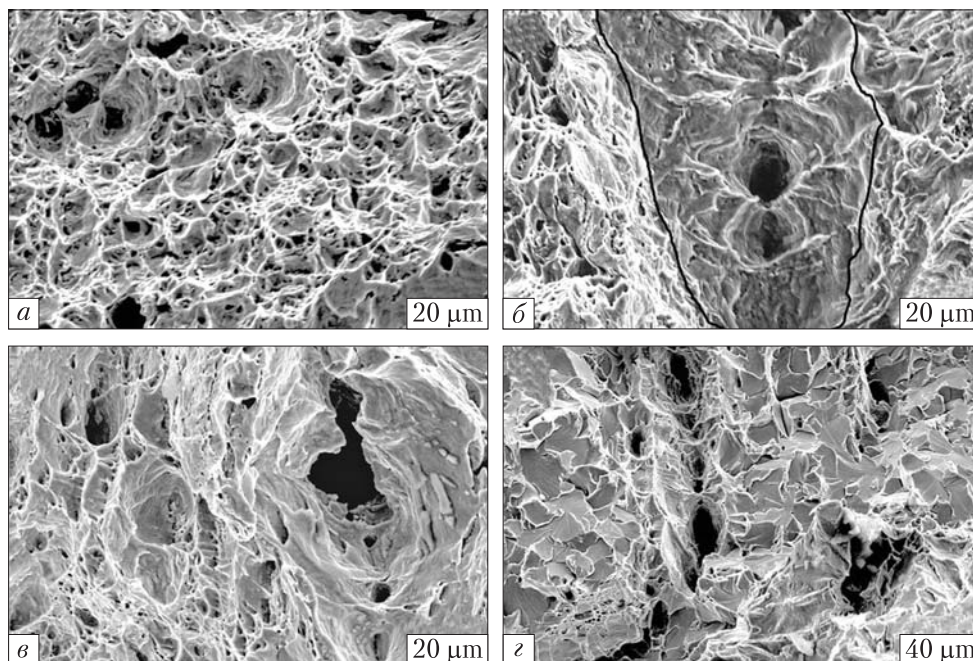


Рис. 2. Фрактограми зразків сталі 17Г1С, випробуваних на ударну в'язкість: *a* – у вихідному стані; *б* – після 29 років експлуатації; *в*, *з* – після 40 років експлуатації на магістральних газопроводах

у високоміцних сталях декогезивний механізм домінує на всіх стадіях.

На розвиток водневої пошкодженості трубних сталей істотно впливає анізотропія [6, 15]. Внаслідок накопичення водню на межі поділу неметалевого включення та матриці послаблюється когезія між ними і формуються дефекти, які є ефективними пастками водню. В результаті реалізується механізм водневого мікророзшарування у напрямі вальцювання сталей. Це посилює анізотропію властивостей експлуатованих трубних сталей, особливо це стосується опору крихкому руйнуванню. Зазначимо, що чинник анізотропії важливий не лише у зв'язку зі з'ясуванням механізму експлуатаційної пошкодженості, а й щодо вибору методик випробувань експериментальних зразків для коректного оцінювання механічних характеристик. Ми виявили, що експлуатація сталей посилює анізотропію їх опору водневій крихкості. За допомогою фрактографічного аналізу було зафіксовано ознаки водневого окрихчення сталі – колонії мікророзшарувань від неметалевих включень (осередків їх зародження) та руйнування перетинок між ними крихким кризьеренним відколом.

Наведу інший приклад прояву анізотропії властивостей при дослідженні впливу водню на тріщиностійкість сталі, яка є чи не найважливішою механічною характеристикою з огляду на ризик руйнування під дією водню. Ми виявили, що в наводненому радіальному зразку тріщиностійкість експлуатованої впродовж 44 років сталі у 60 разів менша, ніж у тангенціальному. Зазначимо, що для магістральних газопроводів створено певну нормативну базу, що регламентує механічні властивості трубних сталей. З огляду на їх експлуатаційну деградацію особливо важливими є характеристики опору крихкому руйнуванню, ударна в'язкість і рідше тріщиностійкість.

Розглянутий розвиток пошкодженості на мікрорівні за участі водню може перейти на макрорівень як спричинене воднем макророзшарування [6]. Останнім часом такі дефекти виявляють у трубах магістральних газопроводів здебільшого на надземних ділянках. Розміри цих дефектів значно перевищують допустимі регламентними документами норми, однак вони не порушують герметичності труб. Їхнє виникнення пов'язали з наводнюванням металу з боку внутрішньої поверхні внаслідок електро-

хімічної корозії під дією конденсованої вологи з утворенням високого тиску молекулярного водню у порожнині, що свідчить про інтенсивне наводнювання металу з боку внутрішньої поверхні. Цей вид руйнування газопроводів також необхідно враховувати в разі транспортування водню чи газоводневих сумішей.

Розроблено спеціальну методику [16, 17], яка дає можливість досліджувати поведінку газоподібного водню в корозивному середовищі стосовно корозії, наводнювання та пошкодженості сталей і моделювати вплив транспортованого водню на корозію в шарі конденсованої вологи на внутрішній поверхні труби у реальних умовах. Було виявлено, що присутність газоподібного водню посилює як корозію, так і наводнювання трубної сталі, особливо в експлуатованому стані [17]. На це слід зважати під час оцінювання ризику порушення цілісності діючих газопроводів у разі транспортування ними водню. Це також вказує на доцільність перегляду нормативних вимог щодо максимально допустимої вологості транспортованого газу в бік її зниження.

На сьогодні є достатньо розвинені неруйнівні методи виявлення макродефектів. Відомі також методи неруйнівного контролю, що дають змогу прогнозувати базові механічні характеристики сталей, насамперед характеристики міцності. Однак неруйнівні методи оцінювання опору металу крихкому чи корозійно-механічному руйнуванню розвинені недостатньо. Ми запропонували принципово новий підхід до прогнозування механічних характеристик тривало експлуатованих трубних сталей, передусім характеристик опору крихкому руйнуванню, із застосуванням електрохімічного інструментарію [18–22]. Наукова основа підходу полягає в тому, що тривала експлуатація змінює не тільки механічні властивості сталей, що важливо для експлуатаційників, а й електрохімічні властивості, які можна визначати на об'єкті в польових умовах. Наведені на рис. 3 дані свідчать про кореляцію між відносними змінами електрохімічних та механічних характеристик сталей, спричиненими їх експлуатаційною деградацією. Ця кореляційна

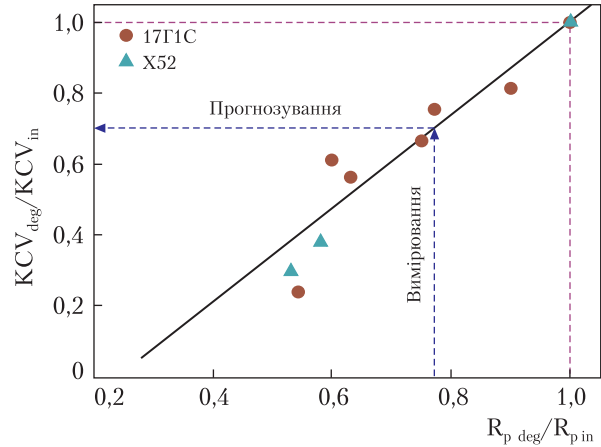


Рис. 3. Залежність між експлуатаційними змінами механічних (KCV_{deg}/KCV_{in}) та електрохімічних ($R_{p\ deg}/R_{p\ in}$) параметрів для низьколегованих феритно-перлітних трубних сталей

залежність дає змогу прогнозувати опір крихкому руйнуванню металу за допомогою польових електрохімічних вимірювань.

Розроблений електрохімічний підхід до діагностування деградації сталей було розвинуто для проведення технічних експертиз експлуатаційних руйнувань [21, 22]. Метод ґрунтується на використанні електрохімічних властивостей поверхонь зламів як інформативних параметрів поточного стану експлуатованого металу. Його наукова основа полягає в тому, що експлуатаційна пошкодженість структурно вибірково і формується за участі мікроструктурних складових з найнижчим опором руйнуванню за певних експлуатаційних умов, наприклад під дією водню, що й визначає опір крихкому руйнуванню. Кореляційна залежність між експлуатаційними змінами опору крихкому руйнуванню металу та електродного потенціалу його поверхні руйнування дає можливість прогнозувати ударну в'язкість металу.

З використанням неруйнівного електрохімічного методу можна також опосередковано оцінювати напружено-деформований стан металу виявлених макророзшарувань трубних сталей [24]. Для цього необхідно контролювати в польових умовах електрохімічний стан поверхні труби з виявленим макродефектом.

Ми запропонували критерій небезпеки виходу макродефекту на поверхню над розшаруванням за рівнем посилення напружено-деформованого стану на зовнішній поверхні труби.

У співпраці з ТОВ «Нафтогазбудінформатика» на газорозподільних мережах було досліджено [9, 10] можливість наводнювання трубних сталей від газоподібного водню у разі його транспортування за умов, близьких до експлуатаційних. Для цього зразки витримували впродовж 18 місяців у водні на полігоні під тиском 3 атм. Сталь після 50 років експлуатації та її зварні з'єднання мали особливо низький опір крихкому руйнуванню. Виявлено низку особливостей наводнювання сталей за тривалої витримки у водні на полігоні газорозподільних мереж, зокрема значне зростання концентрації водню в металі та зниження опору водневій крихкості, особливо для експлуатованого металу. Спостерігалось значне зниження тріщиностійкості для тривало експлуатованої сталі та її зварного з'єднання. Це вказує на важливість проведення подібних досліджень для оцінювання роботоздатності газопроводів.

Розроблено методологію оцінювання роботоздатності трубопроводів при транспортуванні водню/газоводневих сумішей, що ґрунтується на критеріях експлуатаційного зниження опору сталей крихкому руйнуванню під дією водню, зокрема тріщиностійкості за методом J -інтеграла. На основі виявлених закономірностей впливу водню як зовнішнього (транспортованого), так і внутрішнього (абсорбованого металом) на деградацію сталей запропоновано процедуру проведення технічної експертизи лінійної частини газотранспортної системи України для обґрунтування безпечного транспортування газоводневих сумішей. Вона передбачає вибіркові дослідження різних характерних ділянок трубопроводів за чутливими до водневої деградації сталей механічними показниками та відповідними критеріями роботоздатності сталей. Зокрема, найчутливішою характеристикою є тріщиностійкість. Ґрунтуючись на результатах проведених досліджень, попередньо встановлено критерій за

рівнем тріщиностійкості, за яким газові мережі можна вважати придатними до транспортування водню. Подібні критерії слід встановлювати і для інших показників стану металу, і вже тоді за комплексом таких показників приймати відповідні рішення.

Отже, тривала експлуатація газопроводів може спричинити високу чутливість трубних сталей до дії транспортованого водню, що зумовлено їх деградацією та розвитком пошкодженості. Різним ділянкам газопровідної мережі властивий різний технічний стан. Тому для визначення потенціалу використання діючої газотранспортної системи України для транспортування водню/газоводневих сумішей та обґрунтування умов її безпечної експлуатації необхідно провести комплекс досліджень, який передбачає:

- аналіз поточного технічного стану характерних ділянок газотранспортної системи на основі даних неруйнівного контролю, базових механічних властивостей та тріщиностійкості;
- оцінювання впливу водню/газоводневих сумішей на механічну, корозійну та корозійно-механічну поведінку трубних сталей різної міцності з урахуванням їх деградації;
- оцінювання роботоздатності трубних сталей при транспортуванні водню/газоводневих сумішей на основі критеріїв досягнення металом критичного структурно-механічного стану;
- визначення залишкового ресурсу газотранспортної мережі з урахуванням деградації трубних сталей та ступеня наводнювання при транспортуванні водню/газоводневих сумішей.

Зокрема, на розроблення методології оцінювання роботоздатності трубних сталей при транспортуванні водню спрямовано проект Національного фонду досліджень України 2022.01/0099 «Розроблення методології оцінювання роботоздатності існуючих газопроводів для підвищення стійкості функціонування енергетичної системи України при транспортуванні зеленого водню», який науковці відділу діагностики корозійно-водневої деградації Фізико-механічного інституту імені Г.В. Карпенка НАН України почали нещодавно виконувати.

REFERENCES

- Zvirko O.I. In-service degradation of structural steels (a survey). *Materials Science*. 2021. **57**(3): 319. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00547-w>
- Zvirko O., Mytsyk B., Nykyforchyn H., Tsyrunyk O., Kost' Ya. Application of the various methods for assessment of in-service degradation of pipeline steel. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2023. **30**(24): 5058. <https://doi.org/10.1080/15376494.2022.2111732>
- Zvirko O., Venhryniuk O., Nykyforchyn H. The effect of long-term operation on fatigue and corrosion fatigue crack growth in structural steels. *Procedia Structural Integrity*. 2023. **51**: 24. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.10.062>
- Nykyforchyn H., Zvirko O., Dzioba I., Krechkovska H., Hredil M., Tsyrunyk O., Student O., Lipiec S., Pala R. Assessment of operational degradation of pipeline steels. *Materials*. 2021. **14**(12): 3247. <https://doi.org/10.3390/ma14123247>
- Bolzon G., Rivolta B., Nykyforchyn H., Zvirko O. Mechanical analysis at different scales of gas pipelines. *Engineering Failure Analysis*. 2018. **90**: 434. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.04.008>
- Nykyforchyn H., Zvirko O., Tsyrunyk O., Kret N. Analysis and mechanical properties characterization of operated gas main elbow with hydrogen assisted large-scale delamination. *Engineering Failure Analysis*. 2017. **82**: 364. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.07.015>
- Nykyforchyn H., Tsyrunyk O., Zvirko O., Hredil M. Role of hydrogen in operational degradation of pipeline steel. *Procedia Structural Integrity*. 2020. **28**: 896. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.060>
- Zvirko O.I., Savula S.F., Tsependa V.M., Gabetta G., Nykyforchyn H.M. Stress corrosion cracking of gas pipeline steels of different strength. *Procedia Structural Integrity*. 2016. **2**: 509. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.066>
- Nykyforchyn H., Unigovskyi L., Zvirko O., Tsyrunyk O., Krechkovska H. Pipeline durability and integrity issues at hydrogen transport via natural gas distribution network. *Procedia Structural Integrity*. 2021. **33**: 646. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.071>
- Nykyforchyn H., Zvirko O., Hredil M., Krechkovska H., Tsyrunyk O., Student O., Unigovskyi L. Methodology of hydrogen embrittlement study of long-term operated natural gas distribution pipeline steels caused by hydrogen transport. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2022. **16**(59): 396. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.59.26>
- Nykyforchyn H., Unigovskyi L., Zvirko O., Hredil M., Krechkovska H., Student O., Tsyrunyk O. Susceptibility of carbon pipeline steels operated in natural gas distribution network to hydrogen-induced cracking. *Procedia Structural Integrity*. 2022. **36**: 306. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.039>
- Tsyrunyk O.T., Slobodyan Z.V., Zvirko O.I., Hredil' M.I., Nykyforchyn H.M., Gabetta G. Influence of operation of Kh52 steel on corrosion processes in a model solution of gas condensate. *Materials Science*. 2008. **44**(5): 619. <https://doi.org/10.1007/s11003-009-9138-y>
- Zvirko O., Nykyforchyn H., Tsyrunyk O., Hredil M., Venhryniuk O., Krechkovska H., Student O. Role of hydrogen in strain aging of ferritic/pearlitic low alloy steel under long-term operation. In: *HighMatTech-2023: Proc. 8th Int. Sci. Conf.* (October 2–6, 2023, Kyiv, Ukraine).
- Zvirko O.I., Hredil M.I., Tsyrunyk O.T., Student O.Z., Nykyforchyn H.M. Mechanism of development of damages of low-strength pipe steel due to hydrogenation under operation. *Physicochemical Mechanics of Materials*. 2023. **59**(3): 54–59.
- Zvirko O. Anisotropy of hydrogen embrittlement in ferrite-pearlitic steel considering operational degradation. *Procedia Structural Integrity*. 2022. **42**: 522. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.12.066>
- Patent of Ukraine No. 153951. Zvirko O.I., Hredil M.I., Solovei P.R., Vengryniuk O.I., Tsyrunyk O.T. Electrochemical method of investigating the effect of gaseous hydrogen on electrode reactions and hydrogen charging of a steel in an aqueous environment. Publ. 20.09.2023.
- Zvirko O.I., Hredil M.I., Tsyrunyk O.T., Venhryniuk O.I., Nykyforchyn H.M. A method for assessing the influence of gaseous hydrogen on corrosion and hydrogenation of steels. *Physicochemical Mechanics of Materials*. 2023. **59**(5): 10–17.
- Patent of Ukraine No. 127309. Zvirko O.I., Nykyforchyn H.M., Tsyrunyk O.T., Krechkovska H.V., Hredil M.I. The electrochemical method of diagnostics of operational degradation of mechanical properties of structural steels. Publ. 25.07.2018.
- Zvirko O., Nykyforchyn H., Tsyrunyk O. Evaluation of impact toughness of gas pipeline steels under operation using electrochemical method. *Procedia Structural Integrity*. 2019. **22**: 299. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.01.038>
- Nykyforchyn H., Tsyrunyk O., Zvirko O., Krechkovska H. Non-destructive evaluation of brittle fracture resistance of operated gas pipeline steel using electrochemical fracture surface analysis. *Engineering Failure Analysis*. 2019. **104**: 617. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.06.037>

21. Zvirko O., Tsyurulnyk O. Non-destructive electrochemical evaluation of pipeline degradation. In: *Assessment and Failure Prevention of Pipeline Systems*. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 102. Springer, Cham, 2021. P. 31–44. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58073-5_3
22. Zvirko O., Tsyurulnyk O., Nykyforchyn H. Non-destructive evaluation of operated pipeline steels state taking into account their degradation stage. *Procedia Structural Integrity*. 2020. **26**: 219–224. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.06.025>
23. Zvirko O.I., Mytsyk A.B., Tsyurulnyk O.T., Gabetta G., Nykyforchyn H.M. Corrosion degradation of steel of an elbow of gas pipeline with large-scale delamination after long-term operation. *Materials Science*. 2017, **52**(6): 861. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0032-8>

Olha I. Zvirko

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6973-6804>

PROBLEMS AND PROSPECTS OF TRANSPORTING A MIXTURE
OF GREEN HYDROGEN AND NATURAL GAS IN THE CONTEXT
OF THE DEVELOPMENT OF HYDROGEN ENERGY IN UKRAINE

According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, November 1, 2023

The report presents the most important results of fundamental and applied research conducted at the Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine and aimed at solving the problem of safe transportation of energy carriers, in particular mixtures of hydrogen with natural gas, using the existing gas transportation network of Ukraine. A methodology has been developed for assessing the technical condition of steels in long-term operated gas pipelines, accounting for the destructive effect of the hydrogen transported by them; the conditions and criteria for their safe operation have been established.

Keywords: steel, pipeline, hydrogen, hydrogen embrittlement, strength, mechanical properties, crack resistance, diagnostics, non-destructive electrochemical method.

Cite this article: Zvirko O.I. Problems and prospects of transporting a mixture of green hydrogen and natural gas in the context of the development of hydrogen energy in Ukraine. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2024. (1): 41–48. <https://doi.org/10.15407/visn2024.01.041>