

Григорій НИКИФОРЧИН, Ольга ЗВІРКО, Олександр ЦИРУЛЬНИК, Наталія КРЕТ

ОСОБЛИВОСТІ ВОДНЕМ СПРИЧИНЕНОГО РОЗШАРУВАННЯ ТА РУЙНУВАННЯ ГАЗОПРОВОДУ

*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України
вул. Наукова 5, м. Львів, 79060, Україна. E-mail: nykyfor@ipm.lviv.ua*

Hryhoriy NYKYFORCHYN, Olha ZVIRKO, Oleksandr TSYRULNYK, Natalia KRET

PECULIARITIES OF HYDROGEN-INDUCED DELAMINATION AND FRACTURE OF GAS PIPELINE

*Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine
5, Naukova St., Lviv, 79060, Ukraine. E-mail: nykyfor@ipm.lviv.ua*

ABSTRACT

Delamination cracking in pipeline steels is commonly observed, it can be both of metallurgical and operational origin. In the first case, such damages are inherent to metallurgical products, while in the second one they are introduced in service under working stresses. Delamination is formed by plane with relatively weaker texture parallel to the rolling plane within the steel due to any aspect that leads to anisotropic microstructure, including texture, banding, carbide and inclusions particles, inclusion alignment on the rolling plane, intergranular fracture, and anisotropic plastic deformation. A common feature of delamination cracking in pipelines is that fracture propagates in the circumferential direction, which often results in pipeline fracture. Hydrogen induced cracking is typical for oil and gas pipelines, as pipe manufacturing technology involves rolling and consequently lengthening of nonmetallic inclusions and weakening cohesion with the matrix. Hydrogen charging of metal from inside the pipe due to electrochemical corrosion leads to molecular hydrogen accumulation in certain trapping sites, e.g. in the formed intergranular defects "inclusion – matrix", and creation of high pressures in them. Such circumstances promote the formation, evolution and accumulation of microdefects in pipeline steel (so-called accumulated damaging), deterioration of mechanical properties, especially, of plasticity and brittle fracture resistance. This leads to integrity violation of large areas of construction, often comparable with its characteristic dimensions. In this paper, the appearance and peculiarities of hydrogen induced delamination fracture of the gas pipeline, being long-term operated, have been considered.

KEY WORDS: *pipeline steel, operation, hydrogen degradation, delamination, mechanical properties.*

ВСТУП

З матеріалознавчого погляду головною причиною розшарування є понижена когезивна міцність витягнутих вздовж напряму вальцювання неметалевих включень з металевою матрицею. Саме на межі цих фаз на мікрорівні зароджується дефектність. Важлива роль у її розвитку належить атомарному водню, який дифундує до дефектів та накопичується у них, рекомбінуючи до молекулярного стану. Це створює надлишковий тиск у порожнині і, відповідно, напруження в її околі, які призводять до подальшого розшарування, змінюючи ступінь дефектності з мікро- на макрорівень. На стадії виготовлення труби це буде металургійний водень, а на стадії експлуатації – водень, що утворюється у результаті корозійної (біокорозійної) взаємодії металу поверхні труби з ґрунтовим середовищем [1] чи транспортованим продуктом [2]. І що вища наводнювальна здатність середовища, то більший ризик прояву руйнування такого характеру. Тому середовища, які містять сірководень, часто спричиняють розвиток експлуатаційних макророзшарувань. Напруження, які виникають у метали в результаті інтенсивного наводнювання, можуть бути співмірні з його характеристиками міцності, тому руйнування можливе навіть за відсутності зовнішнього навантаження [3].

Розшарування спричинене воднем – типовий випадок для нафтогазопроводів, оскільки технологія виготовлення труб передбачає вальцювання металу і, відповідно, видовження неметалевих включень з ослабленням когезивного зв'язку з матрицею. З іншого боку, джерелом водню слугують транспортовані вуглеводні та корозійні процеси всередині труби, тому абсорбований внутрішньою поверхнею водень може проникати крізь товщину стінки труби газопроводу і виходити з неї крізь зовнішню поверхню [4]. Це також спричиняє акумулювання молекулярного водню в сформованих міжфазних дефектах “включення–матриця” та створення там високих тисків (рис. 1). Це сприяє розвитку розсіяної в об'ємі металу мікропошкодженості, погіршенню механічних властивостей, особливо пластичності та опору крихкому руйнуванню [5–7]. Характерним проявом особливо інтенсивної деградації трубних сталей уздовж волокон вальцювання є переорієнтація площини руйнування на 90° , паралельно волокнам, за випробування зразків на ударну в'язкість [8].

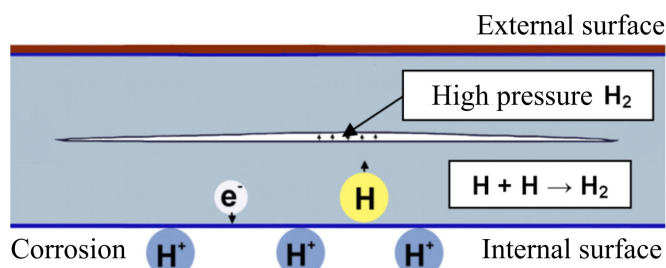


Рис. 1. Схема утворення розшарування у стінці труби спричиненого воднем.
Fig. 1. The scheme illustrated formation of hydrogen-induced delamination in a pipe wall.

Метою даної роботи є встановлення особливостей механічної поведінки трубної сталі, схильної до руйнування шляхом розшарування спричиненого воднем.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідили прямокутне коліно експлуатованої 40 років надземної труби, розміщеної за компресорною станцією магістрального газопроводу. Зовнішній діаметр і номінальна товщина стінки труби становили 219 і 18 mm, відповідно. Ультразвуковим контролем товщини стінки труби виявили макророзшарування. Коліно з виявленим макророзшаруванням вирізали та дослідили.

Матеріал труби – сталь 20. Порівняльному аналізу підлягали розтягнута та стиснена ділянки коліна, а також прямолінійна ділянка труби поблизу коліна. Послідовність вивчення: експертиза експлуатаційної макродефектності, експертиза усунутого з експлуатації коліна після його гідроопресування, оцінювання механічних властивостей металу коліна з вирізанням зразків з тих місць, в яких не було виявлено розшарування.

Експериментально визначали механічні властивості зразків, зокрема: границю міцності σ_{UTS} , границю плинності σ_y , відносне звуження ψ і переміщення активного тримача зразка Δ , а також ударну в'язкість KCV . Як базові використано повздовжні циліндричні (на розтяг) та балкові (на ударний згин) зразки, вирізані вздовж осі труби. У таких зразках площина руйнування пересікає волокна вальцювання, тому їх випробування може не характеризувати ослаблення когезії між волокнами. Тому сконструювали спеціальні вкорочені циліндричні зразки на розтяг, а також балкові на ударне навантаження (рис. 2) [9], вирізані поперек осі труби (радіальні), площина руйнування яких була паралельною площині розшарування. Особливість геометрії зразків на розтяг довжиною рівною товщині стінки труби (18 mm) полягала у відсутності протяжної робочої частини, в центрі зразка нанесли надріз радіусом 5 mm. Тому була можливість визначити не абсолютні, а відносні значення базових механічних властивостей.

Поперечні зразки на ударну в'язкість мають три частини (рис. 2). Центральна робоча частина виготовлена із стінки коліна, вона з боковим концентратором приблизно на рівні половини стінки труби і робочим нетто-перерізом 8×10 mm, як у стандартному зразку. Дві бокові частини такого комбінованого зразка призначені для його розміщення на опорах копра. Окрім того конструкція бокових частин зразка уможливує приварювання до них, на певній відстані від робочого перерізу, центральної частини зразка. Зварювання проводили аргонно-

дуговим методом, застосовуючи ощадний енергетичний режим, щоби мінімізувати температурний вплив на метал робочого перерізу зразка.

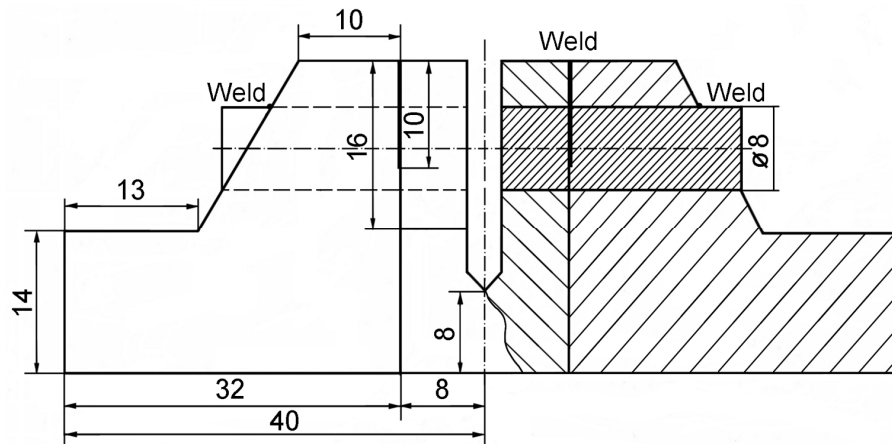


Рис. 2. Геометрія запропонованого радіального зразка для випробувань на ударну в'язкість (розміри у міліметрах).

Fig. 2. The geometry of the proposed specimen for impact strength tests, dimensions in millimeters.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Характеристики міцності і пластичності випробуваних зразків приведено в табл. 1, з яких важливіші показники пластичності. Встановлено, що і за показником переміщення Δ , і за характеристикою відносного звуження ψ найменша пластичність властива металу розтягнутої ділянки експлуатованого гину труби, а найвища – прямій ділянці. Разом з тим абсолютні значення показників Δ і ψ для радіальних зразків приблизно вдвічі менші. Це вказує на слабку адгезію між поздовжніми волокнами структури, спричинену саме тривалою експлуатацією, оскільки зазвичай для неексплуатованих низьковуглецевих та низьколегованих сталей різниця у характеристиках пластичності для повздовжніх і радіальних зразків не перевищує 20% [10].

Таблиця 1. Механічні властивості сталі 20 різних ділянок експлуатованої труби, визначені розтягом повздовжніх (в чисельнику) та радіальних (в знаменнику) зразків

Table 1. The mechanical properties of the steel 20 of different sections of operated gas pipeline determined by tension of longitudinal (in numerator) and short transverse (in denominator) specimens

Ділянка труби	σ_{UTS} , МПа	σ_Y , МПа	Δ , mm	ψ , %
Пряма	562/604	451/427	1,56/0,66	67,5/38,7
Розтягнута	590/587	434/393	1,20/0,40	59,7/30,0
Стиснута	568/557	416/386	1,31/0,58	63,5/34,8

Порівняльними оцінками ударної в'язкості (табл. 2) повздовжніх зразків металу різних ділянок експлуатованого гину виявлено, що найнижчий рівень опору крихкому руйнуванню властивий прямій ділянці труби (131 J/cm^2), тоді як для металу самого гину, як стиснутої, так і розтягнутої його ділянок, значення ударної в'язкості приблизно в півтора рази вище (відповідно, 202 та 188 J/cm^2). Ці результати повністю суперечать уявленню, що метал експлуатованого гину труби найбільш деградований, оскільки найнижчий рівень ударної в'язкості властивий прямій ділянці трубопроводу.

Водночас ударна в'язкість, визначена на радіальних зразках, майже на порядок нижча значень, отриманих з використанням стандартних повздовжніх зразків. Саме ці низькі значення і характеризують опір крихкому руйнуванню у площині, паралельній розшаруванню. Таким чином, можна вважати, що метод визначення величини ударної в'язкості з використанням розробленої конструкції радіального зразка слід розглядати як прямий метод оцінювання опору крихкому руйнуванню у площині, паралельній розшаруванню. При цьому отримали екстремально низькі значення ударної в'язкості, як для металу прямої ділянки труби (28 J/cm^2), так і для металу стиснутої ділянки гину (20 J/cm^2). Тобто, цьому діапазону

отриманих значень ударної в'язкості 20-28 J/cm² суперечать значення 131-202 J/cm², отримані з використанням стандартної методики.

Таблиця 2. Ударна в'язкість сталі 20 різних ділянок коліна експлуатованого газопроводу за випроб стандартних повздожніх і розробленої конструкції радіальних зразків
Table 2. Impact strength of the 20 steel of different sections of an operated gas pipeline at tests of standard longitudinal and developed short transverse specimens

Ділянка труби	Тип зразка	KCV, J/cm ²
Пряма	Повздожній	131
	Радіальний	28
Розтягнута	Повздожній	188
	Радіальний	20
Стиснута	Повздожній	202

Раніше було виділено дві стадії експлуатаційної деградації металу (рис. 3): стадія I деформаційного старіння та стадія II розвитку пошкодженості в об'ємі матеріалу (розсіяної пошкодженості). Перша стадія характеризує відому механічну поведінку металу при його деформаційному зміцненні, а саме, підвищення міцності та твердості за одночасного зниження пластичності та опору крихкому руйнуванню (для прикладу, ударної в'язкості та тріщиностійкості). Однак за інтенсивного розвитку в металі розсіяної пошкодженості може порушуватися ця тенденція зміни деяких механічних властивостей: міцність та твердість знижуються, а відносне видовження може зростати. Водночас ці нові тенденції супроводжуються подальшим зниженням відносного звуження та характеристик опору крихкому руйнуванню. Це і послужило підставою для окремого виділення стадії II експлуатаційної деградації металу.

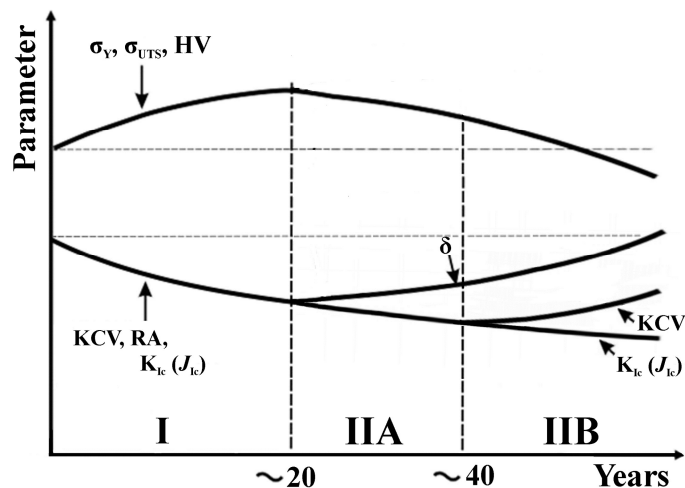


Рис. 3. Схема двостадійності деградації трубопровідних сталей: стадія I – деформаційного старіння та стадія II – розсіяної пошкодженості, яка включає два періоди. IIА – утворення дезорієнтованої експлуатаційної пошкодженості; IIВ – утворення пошкодженості, орієнтованої в напрямі вальцювання.

Fig. 3. The scheme of the two-stage degradation of pipeline steels: stage I – deformation ageing and stage II – dissipated damaging, which concludes two periods.

IIА – formation of disoriented operational damaging; IIВ – formation of damaging oriented in the rolling direction.

Отримані в цьому дослідженні незвично високі значення KCV при випробуванні повздожніх зразків зумовлені не відповідним опором матеріалу крихкому руйнуванню у фізичному сенсі, а підвищенням енергоємності руйнування через необхідність перетину площин розшарувань. Тому саме наявність поперечних до площини руйнування тріщин розшарування є причиною отримання високих значень ударної в'язкості KCV. Таким чином, на стадії II експлуатаційної деградації трубних сталей можна виділити дві підстадії: стадію IIА – дезорієнтованої розсіяної пошкодженості та стадію IIВ – орієнтованої в напрямі вальцювання пошкодженості. Кожна з цих підстадій загалом характеризує підвищення міри експлуатаційної деградації металу, однак проявляється незвичними тенденціями зміни певних механічних

властивостей. Тому їх формальний аналіз, наприклад, відносного видовження чи ударної в'язкості, може обумовити отримання помилкових висновків щодо незмінності чи навіть покращення під час експлуатації таких характеристик, які є важливими для оцінювання безпеки крихкого руйнування металу.

ВИСНОВКИ

1. Схильність експлуатованих трубопровідних сталей до розшарування уздовж волокон структури може обумовити отримання некоректних результатів за випробувань повздовжніх зразків на ударну в'язкість, у яких площина руйнування пересікає поверхні розшарування. На рівень опору крихкому руйнуванню впливають два суперечливі чинники: загальне окрихчення металу, яке його знижує, та збільшення енергоємності руйнування при перетині площини руйнування поверхонь розшарування, яке його підвищує.

2. Відому стадію експлуатаційної деградації сталей, а саме, розвитку розсіяної пошкодженості, розділено для ферито-перлітних трубних сталей на два періоди: ПА – утворення хаотично орієнтованих дефектів та ПВ – утворення тріщин розшарування, орієнтованих у напрямі вальцювання, внаслідок експлуатаційного зниження когезії між волокнами вальцьованого прокату. Слід враховувати, що за використання осьових зразків для визначення механічних характеристик можливе некоректне визначення відносного видовження у періоді ПА, а також і ударної в'язкості – у періоді ПВ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Крижанівський Є. І., Никифорчин Г. М. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: наук.-техн. пос. у 3-х т. Івано-Франківськ: Івано-Франківський нац. техн. ун-т нафти і газу: Т. 3: Деградація газопроводів та її запобігання. – 2012. – 432 с.
2. Вплив експлуатації сталі X52 на корозійні процеси у модельному розчині газового конденсату / О. Т. Цирульник, З. В. Слободян, О. І. Звірко, М. І. Греділь, Г. М. Никифорчин, Д. Габетта // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – № 5. – С. 29–37.
3. Turnbull A. Modeling of environment assisted cracking // Corrosion Science. – 1993. – № 6. – P. 921–960.
4. Механіка руйнування та міцність матеріалів: довідн. пос. у 12-и т.: кол. моногр. Львів: Сполом, 2009. Т. 11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів. 504 с.
5. Toribio J. Evaluation and modelling of hydrogen induced fracture in structural steel // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1996. – № 3. – С. 113–126.
6. Panasyuk V. V., Andreykiv O. Y., Gembara O. V. Hydrogen degradation of materials under long-term operation of technological equipment // Int. J. of Hydrogen Energy. – 2000. – № 25/1. – P. 67–74.
7. Ohaeri E., Eduok U., Szpunar J.A. Hydrogen related degradation in pipeline steel: A review // Int. J. Hydrogen Energy. – 2018. – № 43(31). – P. 14584–14617.
8. Окрихчення сталі магістрального нафтопроводу / О. Т. Цирульник, Г. М. Никифорчин, О. І. Звірко, Д. Ю. Петрина // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – № 2. – С. 125-126.
9. Патент на корисну модель № 122223. Спосіб випробування на ударну в'язкість металу труб з надрізом. Никифорчин Г. М., Цирульник О. Т., Звірко О. І., Крет Н. В., Греділь М. І., Кречковська Г. В. Заявл. 17.07.2017. Публ. 26.12.2017 р. Заявка № U 2017 07491, Бюл. № 24. 4 с.
10. Студент О. З., Кречковська Г. В. Анізотропія механічних властивостей деградованої сталі 15X1M1Ф після її експлуатації на парогонах ТЕС // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – № 5. – С. 19–26.