

ДІАГНОСТИЧНІ ОЗНАКИ РОЗШАРУВАННЯ В СТІНЦІ ВІДВІДНИХ ВІД КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ ТРУБ ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ

¹О. І. Звірко, ²С. Ф. Савула, ³О. Є. Кунта, ¹О. Т. Цирульник

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5;
e-mail: zvi@ipm.lviv.ua; tsyrulnyk@ipm.lviv.ua

² Управління магістральних газопроводів “Львівтрансгаз”, 79026, м. Львів, вул. І. Рубчака, 3;
e-mail: savula-sf@utg.ua

³ Національний університет “Львівська політехніка”, 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12;
e-mail: lida.kharchenko@gmail.com

Неруйнівним методом контролю проведено обстеження прямокутних колін відвідних від компресорної станції труб газотранспортної системи, які експлуатувалися впродовж 40 років, та виявлені обширні внутрішні розшарування всередині стінки їх розтягнутої частини. Причиною обстеження стала поява протяжної тріщини на коліні відводу. Показано, що розшарування може поширюватися до половини окружності труби без порушення її герметичності. На основі даних експертизи розшарувань у колінах відводів, їх гідроопресування та оцінювання механічних властивостей металу різних ділянок колін проаналізовано рушійні сили розвитку макродефектності, а також його небезпечність з огляду порушення цілісності трубопроводу. Пластичність металу розтягнутої та стиснутої ділянок коліна є нижчою порівняно з пластичністю матеріалу прямої ділянки труби, що свідчить про інтенсивнішу експлуатаційну деградацію металу коліна. Встановлено, що чинниками, які інтенсифікують наводнювання металу та, відповідно, процес розшарування, є попереднє пластичне деформування металу, його підвищена температура та пульсація тиску газу.

Встановлено діагностичні ознаки розшарування, якими слугують аномально низькі значення товщини стінки труби за показами ультразвукового товщиноміра та суттєві відмінності у пластичності металу, визначеної на повздовжніх та радіальних зразках. Показано обмеженість використання стандартизованих експериментів для визначення характеристик пластичності металу, що пов'язано з дефектністю металу в об'ємі стінки труби.

Ключові слова: дефект, декогезія, водень, розсіяна пошкодженість, експертне обстеження.

Неразрушающим методом контроля проведено обследование прямоугольных колен отводящих от компрессорной станции труб газотранспортной системы которые эксплуатировались 40 лет и выявлены обширные внутренние расслоения внутри стенки их растянутой части. Причиной обследования стало появление протяженной трещины на колене отвода. Показано, что расслоение может распространяться до половины окружности трубы без нарушения ее герметичности. По данным экспертизы расслоений в коленах отводов, их гидроопрессовки и оценки механических свойств металла разных участков колен проанализированы движущие силы развития макродефектности, а также опасность ввиду нарушения целостности трубопровода. Пластичность металла растянутого и сжатого участков колена является меньшей по сравнению с пластичностью материала прямого участка трубы, что свидетельствует о более интенсивной эксплуатационной деградации металла колена. Установлено, что факторами, которые интенсифицируют наводороживание металла и, соответственно, процесс расслоения, являются предварительное пластическое деформирование металла, его повышенная температура и пульсация давления газа.

Установлены диагностические признаки расслоения, которыми служат аномально низкие значения толщины стенки трубы по показаниям ультразвукового толщиномера и существенные различия в пластичности металла, определенной на продольных и радиальных образцах. Показано ограниченность использования стандартизованных экспериментов для определения характеристик пластичности металла, что связано с дефектностью металла в объеме стенки трубы.

Ключевые слова: дефект, декогезия, водород, рассеянная поврежденность, экспертное обследование.

The non-destructive testing method was used to inspect the knee bends of the compressor station lateral pipelines of the gas transportation system that had been operated for 40 years and extensive lamination inside the wall of their extended sections were found. The emergence of an extended fracture on the pipe bend became the reason for inspection. It is shown that lamination can spread over the area of up to a half of the pipe circumference without its integrity violation. Based on the examination data of the laminations in the lateral pipeline bends, their hydrostatic pressure testing, and evaluation of mechanical properties of the different bend sections metal, there were analyzed the driving forces of macrodefect development and its dangerousness in view of the pipeline integrity violation. The metal plasticity of the extended and compressed bend sections is lower if compared to the material plasticity of the straight pipeline section, which is indicative of higher intensiveness of operational degradation of the pipeline bend metal. It was determined that the preliminary plastic metal deformation, its increased temperature, and gas pressure pulsation are the factors than intensify metal hydrogenation and, therefore, the lamination process in it.

The lamination diagnostic features, which include the abnormally low values of the pipe wall thickness measured with the help of the ultrasound thickness meter and significant differences in metal plasticity determined on the longitudinal and radial specimens, were established. The limited usage of standard experiments to determine metal plasticity characteristics related to the metal defectiveness of the pipe wall was shown.

Keywords: defect, decohesion, hydrogen, dissipated damage, expert examination.

Вступ

Розшарування трубопровідних сталей є актуальною проблемою. Причини їх виникнення можуть бути різними. Зокрема, розшаруванню сприяють наявність частинок карбідів та інших неметалевих включень, мікротріщини на міжфазних межах зерен, текстура, смугастість структури, анізотропія пластичної деформації тощо [1, 2]. Цей тип дефектності може бути пов'язаний як з металургійними особливостями отримання труб чи листового прокату, з якого виготовляють труби, так і умовами експлуатації трубопроводів. З точки зору матеріалознавства, головною причиною розшарування є понижена когезивна міцність неметалевих включень з металевою матрицею, що витягнені вздовж пряму вальцювання. 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 металургійний водень, а на стадії експлуатації – водень, що утворюється у результаті корозійної (біокорозійної) взаємодії металу поверхні труби з ґрунтовим середовищем [3] чи транспортним продуктом [4]. І що вище наводнювальна здатність середовища, то більший ризик прояву руйнування такого характеру. Зокрема, середовища, які містять сірководень, часто спричиняють розвиток експлуатаційних макророзшарувань. Напруження, які виникають у металі в результаті інтенсивного наводнювання, можуть бути сумірні з його характеристиками міцності [5], тому руйнування можливе навіть за відсутності зовнішнього навантаження [6].

Чинники, які сприяють декогезії на межі матриця – включення, посилюватимуть утворення у трубах розшарування. Зазначимо з цього погляду попереднє пластичне деформування, циклічне навантаження та підвищені температури експлуатації, які властиві колінам відвідних від компресорних станцій (КС) труб газотранспортної системи (рис. 1), експлуатаційні умови яких передбачають пульсацію тиску та підвищену температуру металу. Зазначені чинники інтенсифікують також наводнювання металу і в такий спосіб посилюють його роль у процесах розшарування.

Явище макророзшарування тривало експлуатованих трубопровідних сталей відводів газотранспортної системи досі не досліджувалось.

Мета роботи

Метою даної праці є проведення діагностичного аналізу двох випадків обширного розшарування у колінах відвідних від КС труб з урахуванням експлуатаційної деградації механічних властивостей металу у розвиток дослідження [7].



Рисунок 1 – Серія відвідних від КС труб газотранспортної системи

Об'єкт досліджень

На розтягненій частині низки 40 років експлуатованих прямокутних колін відвідних від КС труб газотранспортної системи виявлені обширні розшарування всередині стінки труби (рис. 2). З цієї причини вони були виведені з експлуатації та для двох типорозмірів труб проведено експертизу їх дефектності. Матеріал труб – сталь 20, зовнішній діаметр 219 мм (умовно труба А) та 426 мм (труба Б) з номінальною товщиною стінки відповідно 18 та 12 мм. Максимальний робочий тиск у трубі становив 70 атм, а температура металу гину могла сягати 80 °С. Зазначимо, що виявлені дефекти не порушили герметичності трубопроводу.

Експертиза експлуатаційної дефектності колін

Обширні розшарування у колінах були виявлені ультразвуковим контролем товщини стінок труб t , який проводили товщиноміром з А/В сканом MVX (Dakota Ultrasonics). Отримано наступні покази t в районі розтягнутої частини труб, мм: труба А – 4,5; 3,7; 2,5; 4,2; 5,2; 5,6; 7,0; 6,4; 7,7; 6,5; 6,8; 6,9; 7,2; 7,6; 7,7; 8,0; 8,2; 16,2; 16,6; 17,3; 18,0; 16,8; 16,4; 17,6; 17,8; 16,5; 16,8; 17,2; 17,6; 17,0; 17,4; 17,0; 17,7; 18,1; труба Б – 3,2; 3,0; 3,6; 4,5; 4,3; 3,9; 5,2; 4,4; 5,7; 5,9; 6,1; 6,2; 6,3; 6,7; 6,8; 7,3; 7,9; 8,4; 8,5; 7,6; 10,3; 9,4; 11,3; 10,8; 10,5; 11,0; 12,1; 11,7; 10,9; 11,4; 11,5; 11,1; 11,4; 10,7; 10,6. Свідченням порушення суцільності стінки труби у місці заміру слугувало явно нереальна її товщина за показами товщиноміра. При цьому брали до уваги можливе стоншення труби в розтягнутій частині та через ерозійно-корозійне зношення внутрішньої поверхні. Звідси, якщо $t \geq 16,2$ мм для гину А і $t \geq 9,4$ мм для гину Б, то такі значення вважали реальними, а менші – реакцією товщиноміра на макродефекти всередині стінки труби.

На основі такого контролю товщини позначили зони розшарування на реальних колінах (див. рис. 2) та побудували розгортки дефектності та переріз труб приблизно посередині ділянки розшарування (рис. 3).

Розміри виявленого розшарування в обох випадках виходять далеко за допустимі норми [8], і цим аргументовано виведення колін з експлуатації. Водночас встановлено і деякі особ-



Рисунок 2 – Окреслене контуром розширення у стінці колін відвідних від КС труб А (а) та Б (б) газотранспортної системи

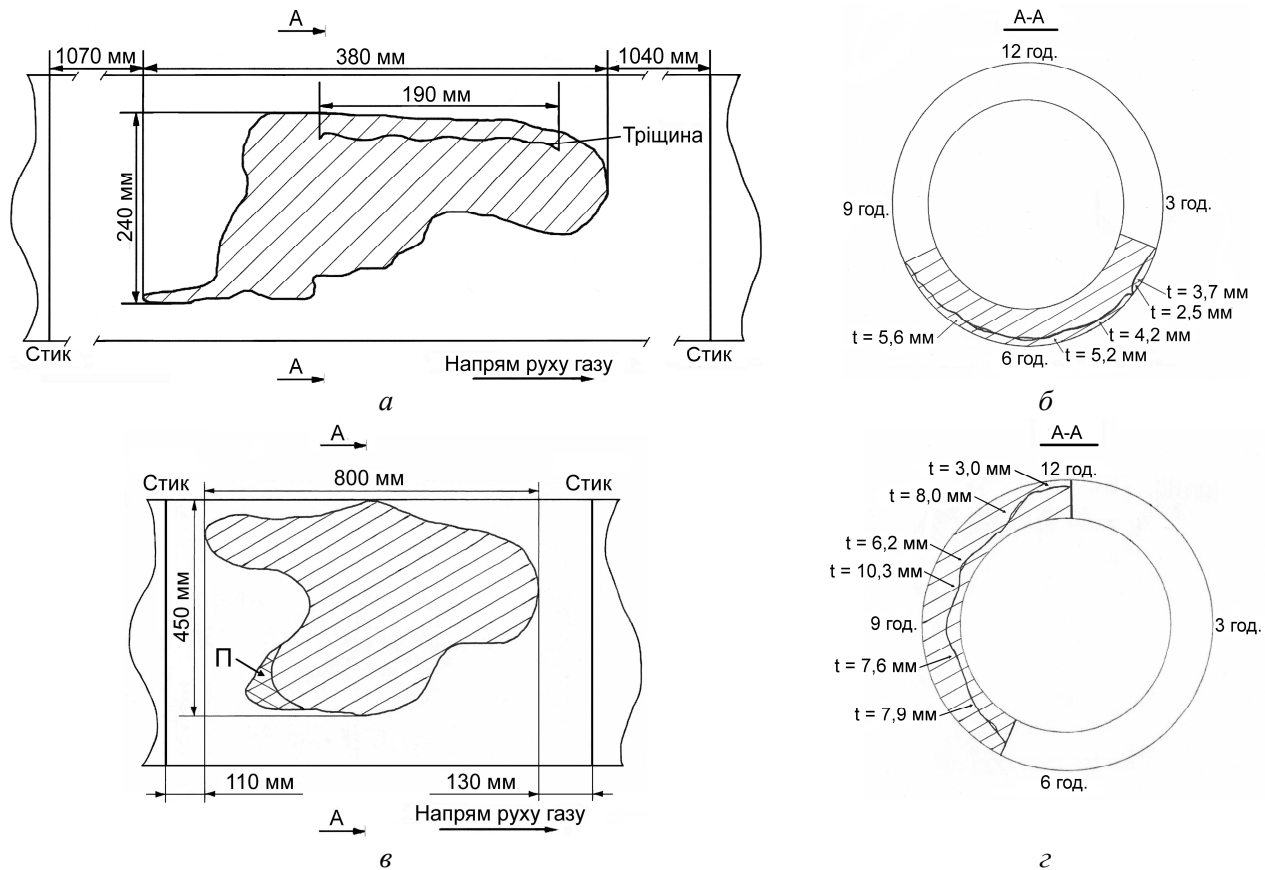


Рисунок 3 – Розгортка розширення у стінках колін труб А (а) та Б (в) газотранспортної системи та переріз труб А (б) та Б (2) з дефектом

ливості для кожного з випадків. Так, розширення у трубі А (розміром близько 380 мм в по-
 вздовжньому напрямі та близько 240 мм в ко-
 ловому напрямі, що склало третину окружності
 труби) охопило сегмент 4...8 год. Макродефект
 був розміщений ближче до зовнішньої поверхні
 (на глибині ~ 2...5,6 мм при номінальній тов-
 щині труби 18 мм). На поверхню труби в зоні
 розширення вийшла тріщина довжиною ~ 190
 мм, орієнтована у вздовжньому напрямі та
 розташована на віддалі ~ 60 мм від контуру
 розширення. Це важливий нюанс, оскільки
 поява такої тріщини на поверхні труби
 пов'язана не з переорієнтацією поширення
 розширення в радіальному напрямі, а розри-
 вом поверхні над порожниною. Логічно вважа-
 ти, що напруження, які спричинили цей розрив,
 зумовлені внутрішнім тиском газу в порожнині,

який, у свою чергу, створюється у результаті
 накопичення у ній молекулярного водню, що
 рекомбінує з атомарного. Таке пояснення при-
 чини розриву передбачає інтенсивне наводню-
 вання металу коліна з боку внутрішньої повер-
 хні, тобто транспортований товарний природ-
 ний газ є потужним джерелом наводнювання,
 принаймні на ділянці коліна газопроводу. По-
 легшувало руйнування і порівняно неглибоке
 залягання порожнини розширення в місці
 розриву – близько 2,5 мм.

На коліні труби Б розміри розширення,
 яке охопило сегмент 7...12 год., більші і стано-
 влять близько 800 x 450 мм, а розташовується
 воно в основному ближче до внутрішньої по-
 верхні труби. Однак на останніх стадіях розвитку
 розширення появилася тенденція до перемі-
 щення його контуру ближче до зовнішньої по-

верхні, де робочі напруження більші. І хоча виходу макророзшарування на поверхню труби до виводу дефектної ділянки з експлуатації ще не відбулося, тенденція до наближення контуру руйнування до зовнішньої поверхні вказує на потенційну можливість повторення ситуації, подібної до тієї, що і у випадку з коліном труби А. Зазначимо, що коліно труби Б було вилучене з експлуатації тільки після повторної експертизи, з перервою в 5,5 місяців, якою виявлено збільшення площі розшарування через його поширення на певній ділянці контуру (рис. 3в, площа П), саме у місці наближення до зовнішньої поверхні труби. Це вказувало на небезпеку подальшої експлуатації коліна.

Експертиза досліджуваних колін вказує, що макророзшарування може залягати ближче як до внутрішньої, так і зовнішньої поверхонь труби, що, очевидно, відбиває конкурентність двох експлуатаційних чинників: робочих напружень і наводнювання металу. В трубі напруження максимальні на зовнішній поверхні, тоді як джерелом водню слугує транспортоване середовище і метал наводнюється з боку внутрішньої поверхні.

Експертиза усунутих з експлуатації колін після їх гідроопресування

Виявлене обширне розшарування не порушувало герметичності труби, і з цього погляду важливо проінспектувати, наскільки її дефектна ділянка може безпечно витримувати робочі навантаження. Для цього провели гідроопресування колін, попередньо заваривши з двох боків заглушками, вмонтувавши манометр тиску та підключивши до водяної помпи. Випробування провели за внутрішнього тиску, в півтора рази більшому за максимальний робочий, тобто при 8,25 МПа, що відповідало нормам на проведення опресування [9].

Подальша експертиза виявила збільшення площі розшарування тільки в коліні труби А (рис. 4). Це означає, що, з погляду на витримувальну здатність, це коліно непридатне до подальшої експлуатації, тоді як коліно труби Б можна було би продовжувати використовувати. Порівняння стану досліджуваних колін за цим критерієм також показує, що підповерхневе розташування макророзшарування у коліні є небезпечніше, ніж у випадку його розташування посередині стінки труби.

Зазначимо обмеженість критерію витримування надлишкового тиску для прогнозування безпечної експлуатації труби, оскільки він стосується тільки механічної міцності металу. Такий підхід справедливий для вихідного стану металу, нечутливого до воднем спричиненого руйнування. В нашому випадку така чутливість чітко проявляється, і саме вона призвела до обширного розшарування. Це довела експертиза за стану коліна труби Б: незважаючи на те, що він витримав без розвитку дефектності надлишковий (у півтора рази більший за робочий) тиск, в ньому за час між двома експертизами істотно збільшилася площа розшарування (див. рис. 3в), зумовлена саме високою чутливістю до

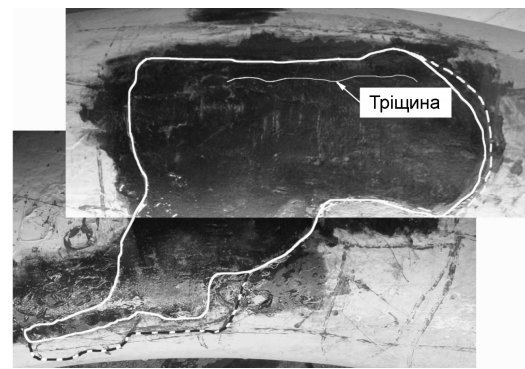


Рисунок 4 – Маркування виявленого неруйнівним контролем експлуатаційного розшарування у коліні труби А (суцільна лінія) та його поширення у результаті гідроопресування (пунктирна лінія)

ініційованого воднем руйнування. Отже, цей критерій слід брати до уваги, насамперед при обґрунтуванні безпечної експлуатації трубопроводів з ризиком розвитку макророзшарування.

Оцінювання експлуатаційної деградації металу коліна труби А

Висока чутливість досліджуваних колін до розшарування свідчить про кардинальне зниження у тривалоексплуатованій сталі когезивної міцності на границі фаз “матриця – включення”. Це передбачає істотний спад механічних властивостей, насамперед характеристик пластичності. Їх визначали для коліна труби А, товщина стінки якої (18 мм) була більшою, ніж труби Б, що полегшувало вирізання з труби зразків.

Порівнювали властивості металу на прямій ділянці трубопроводу поблизу коліна та окремо – стиснутої і розтягнутої зон. Вирізали циліндричні зразки двох геометрій (рис. 5) для визначення розтягуванням їх характеристик міцності і пластичності: уздовж осі труби стандартизовані L_N -зразки з робочою частиною довжиною 25 мм та діаметром 5 мм; укорочені радіальні R_S - та повздовжні L_S -зразки 5 мм у діаметрі з радіусом закруглення 5 мм. Використання укорочених зразків пояснюється обмеженою їх загальною довжиною, рівною товщині стінки труби.

Результати випробувань подано у таблиці. Незалежно від типу зразків та напрямку їх вирізання характеристики міцності металу гину порівняно з прямою ділянкою були для всіх випадків більшими для розтягнутої його частини і нижчими для стисненої (брали до уваги стандартизовані L_N -зразки). Це, очевидно, відбиває різний ступінь експлуатаційного деформаційного зміцнення металу, який залежить від робочих напружень, створюваних тиском у трубі: більші і менші напруження відповідно в розтягнутій і стисненій частинах коліна проти напруженого стану прямої частини труби, враховуючи різну товщину стінки труби у різних ділянках коліна. Зазначимо, що пульсація тиску газу на виході з КС та підвищена температура металу – чинники, які сприяють його деформаційному зміцненню.

Таблиця – Механічні властивості металу коліна труби А

Ділянка труби	Тип зразка	$\sigma_{0,2}$	σ_B	$\psi, \%$	$\frac{\psi_R}{\psi_L}$	$\delta, \% / \Delta, \text{мм}$
		МПа				
Пряма	L_N	293	482	64,0	–	17,6 / –
	L_S	451	562	67,5	–	– / 1,56
	R_S	427	604	38,7	0,57	– / 0,66
Розтягнута	L_N	324	507	68,5	–	20,2 / –
	L_S	434	590	59,7	–	– / 1,20
	R_S	393	587	30,0	0,50	– / 0,4
Стиснена	L_N	283	468	62,2	–	18,8 / –
	L_S	416	568	63,5	–	– / 1,31
	R_S	386	557	34,8	0,55	– / 0,58

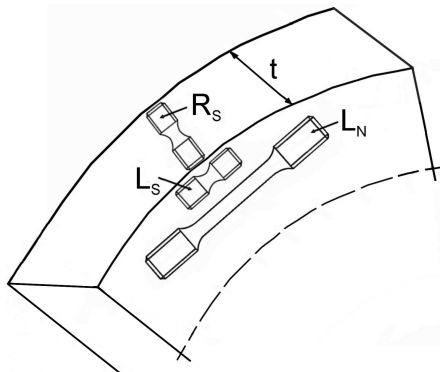


Рисунок 5 – Схема вирізання зразків з коліна труби А

Зазвичай деформаційне зміцнення металу супроводжується спадом характеристик пластичності, тобто очікувалося, що найменша пластичність буде властива розтягненій зоні коліна, а найвища – стиснена. Однак, у нашому випадку не отримано такої чіткої тенденції як стосовно відносного видовження δ , так і відносного звуження ψ . Найменше значення δ властиве металу прямої ділянки труби, максимальне – розтягнутої зони коліна. Очевидно, тут проявилася діагностична ознака експлуатаційної деградації конструкційних сталей [10], у тому числі магістральних газопроводів [11], яка полягає у підвищенні δ , якщо деградація супроводжується розвитком розсіяної пошкодженості в об'ємі металу. В цьому випадку параметр δ відтворює не тільки здатність металу пластично деформуватись, але і розкриття у ньому множинних дефектів.

Укорочені L_S -зразки з концентратором великого радіусу мають той недолік, що не дають можливості безпосередньо визначати характеристику δ , однак деформація у них локалізується практично в одному перерізі. Звідси мінімізується розкриття тріщин розсіяної пошкодженості в інших перерізах зразка, тобто визначені в експерименті переміщення активного тримача Δ повинні коректніше відбивати здатність металу різних ділянок труби до пластичного деформування. Зокрема, за порівняльними оцінками Δ найнижчу пластичність має сталь розтягнутої, а найвищу – прямої ділянок труби. Ця закономірність є протилежною отриманій для показника δ , а згідно оцінок Δ метал гине разом з його стисненою частиною поступається за пластичністю

сталі прямої ділянки. А виявлені відмінності у відносних оцінках δ і Δ слугують діагностичною ознакою розвитку експлуатаційної розсіяної пошкодженості.

Оцінки характеристики ψ різних ділянок труби, одержані для звичайних L_N -зразків, теж виявили неузгодженість з їх міцністю. Так, металу розтягнутої ділянки коліна властиві максимальні і міцність, і ψ , а стисненої – навпаки, мінімальні їх значення. Можливо, пояснення таким ефектам слід шукати саме у прояві впливу розшарування на руйнування циліндричних повздовжніх зразків і з протяжною робочою частиною. Підставою для такого припущення слугують результати випробувань вкорочених L_S -зразків з визначенням відносного звуження ψ_L . Одержані значення ψ_L корелюють з порівняльними оцінками показника Δ : найвища пластичність властива сталі прямої ділянки труби, а найнижча – розтягнутої ділянки коліна. Таким чином, за випробувань укорочених L_S -зразків протиріччя у показниках пластичності відсутні.

Порівняння результатів випробувань укорочених зразків, вирізаних у різних напрямках стосовно осі труби, дали можливість оцінити вплив текстури на механічні властивості металу, що принципово важливо, враховуючи роль структури у процесах розшарування. Встановлено, що незалежно від ділянки, з якої вирізали зразки, звуження ψ_R R_S -зразків практично вдвічі нижче за рівень ψ_L L_S -зразків (діапазон відношення ψ_R/ψ_L склав 0,50...0,57). Це вказує на слабку адгезію між повздовжніми волокнами структури, спричинену саме тривалою експлуатацією, оскільки зазвичай для неексплуатованих низьковуглецевих та низьколегованих сталей різниця у пластичності для повздовжніх і радіальних зразків не перевищує 20% [12]. Така інтенсивна експлуатаційна деградація металу спричинена, очевидно, сумісною дією робочих напружень і водню, який проник у метал з боку внутрішньої поверхні труби.

Здатність до пластичного деформування у радіальному напрямі відрізнялася для різних ділянок гину: $\psi_R = 38,7; 30,0$ і $34,8\%$ для прямої, розтягнутої та стисненої ділянок відповідно. Це означає, що за цією характеристикою метал не тільки розтягнутої, але і стисненої ділянок деградував під час експлуатації інтенсивніше, ніж прямої ділянки труби. Тут міг про-

явитися чинник підвищеної агресивності водню у пластично деформованому матеріалі [13], а також сильніша пульсація напружень в зоні коліна та підвищена температура металу. А факт розвитку експлуатаційного макророзшарування у розтягненій, а не стисненій ділянці коліна можна пояснити несприятливою комбінацією максимальних робочих напружень і мінімальної пластичності. Її рівень ($\psi_R = 30\%$) можна вважати граничним, причому не тільки для реалізації спричиненого воднем розшарування, але і виходу підповерхневого макродефекту на зовнішню поверхню.

Висновки

1. Обширні розшарування на колінах 40 років експлуатованих відвідних від КС труб виявлені на їх розтягнених ділянках, де робочі напруження максимальні, і можуть охоплювати до половини периметру труби без порушення її герметичності. Вихід на зовнішню поверхню макродефекту не через переорієнтацію фронту тріщини, а розрив поверхні закритої порожнини слугує доказом створення у ній високого тиску від накопичення та рекомбінації атомарного водню в молекулярний, а також вимагає розгляду транспортованого газу, як потужного джерела водню. Попереднє пластичне деформування металу, його підвищена температура та пульсація тиску газу є чинниками, які інтенсифікують наводнювання металу та процес розшарування. Макродефект може залягати ближче як до зовнішньої, так і внутрішньої поверхні труби що, очевидно, відбиває конкурентність двох експлуатаційних чинників: робочих напружень і наводнювання металу.

2. Витримування надлишкового у півтора рази від робочого тиску при гідроопресуванні тривало експлуатованого коліна ще не може забезпечувати можливості його подальшої експлуатації, оскільки цілісність труби буде визначатися вже не її витримувальною здатністю, а схильністю до субкритичного росту тріщини за сумісної дії робочих напружень і водню.

3. Стандартизовані зразки на розтяг можуть не забезпечувати коректного визначення здатності тривало експлуатованого металу до його пластичного деформування через наявність у об'ємі стінки труби множинної пошкодженості. Запропоновано використовувати для цього циліндричні зразки з радіусом значного діаметру, що локалізує деформацію металу практично в одному перерізі. Порівнянням пластичності таких зразків, вирізаних у повздовжньому і радіальному напрямках, показано практично вдвічі нижчі їх значення за випробувань радіальних зразків, що вказує на особливо слабку адгезію між повздовжніми волокнами структури, спричинену тривалою експлуатацією, та може слугувати діагностичною ознакою чутливості металу до макророзшарування. Крім того, пластичність і розтягненої, і стисненої ділянки коліна нижча за пластичність прямої ділянки, що свідчить про інтенсивнішу експлуатаційну деградацію металу коліна.

Література

1 Baldi G. and Buzzichell G. Critical stress for delamination fracture in HSLA steels // Metal Science. – 1978. – Vol. 12. – P. 459–472.

2 Bourell D. L. and Sherby O. D. Texture induced cleavage delamination of warm-rolled low carbon steels // Met. Trans. A. – 1983. 14A, No 12. – P. 2563–2566.

3 Крыжановский Е., Никифорчин Г., Полутренко М. Коррозионно-водородная деградация газотранспортных систем и способы ее предупреждения / Сб. докл. Межд. научно-техн. конф. “Надёжность и эффективность газотранспортных систем”. – Яремче, 2013. – С. 117–128.

4 Вплив експлуатації сталі X52 на корозійні процеси у модельному розчині газового конденсату / О.Т. Цирульник, З.В. Слободян, О.І. Звірко [та ін.] // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – 44, № 5. – С. 29–37.

5 Андрейків О. Є. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах / О.Є. Андрейків, О.В. Гембара. – К.: Наукова думка, 2008. – 345 с.

6 Turnbull A. Modeling of environment assisted cracking // Corrosion Science. – 1993. – Vol. 34, №6. – P. 921–960.

7 Харченко Л.Є. Діагностика водневого макророзшарування в стінці гину труби системи магістральних газопроводів / Л.Є. Харченко, О.Є. Кунта, О.І. Звірко [та ін.]. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – 51, №4. – С. 84–90.

8 Specification for line pipe steel API5L, API, 2007.

9 СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы.

10 Никифорчин Г. М. Феномен прояву високотемпературної деградації зварного шва ошаднолегованої сталі / Г.М. Никифорчин, О.З.Студент, А.Д.Марков // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – 43, №1. – С. 73–79.

11 Деградація властивостей сталей магістральних газопроводів упродовж їх сорокарічної експлуатації / Г. М. Никифорчин, О. Т. Цирульник, Д. Ю. Петрина, М. І. Греділь // Проблемы прочности. – 2009. – №5 (401). – С. 66–72.

12 Студент О. З. Анізотропія механічних властивостей деградованої сталі 15X1M1Ф після її експлуатації на парогонях ТЕС/ О.З.Студент, Г.В. Гречковська // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – 47, №5. – С. 19–26.

13 Крижанівський Є. І. Вплив наводнювання та попереднього пластичного деформування сталі на її тріщиностійкість / Є.І. Крижанівський, О.Т. Цирульник, Д.Ю. Петрина // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1999. – №5. – С. 67–70.

Стаття надійшла до редакційної колегії
12.05.16

Рекомендована до друку
професором **Карпашем О.М.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором **Никифорчиним Г.М.**
(Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка
НАН України, м. Львів)