

## ОЦІНКА КОНСТРУКТИВНОЇ В'ЯЗКОСТІ МАТЕРІАЛІВ РЕЗЕРВУАРІВ НАФТИ ТА ТРУБОПРОВІДІВ НА ПІЗНІЙ СТАДІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Ю.Д. Петрина, Б.Р. Шуляр, Д.Ю. Петрина, В.М.Гоголь

ІФНТУНГ, 76019, м.Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727184,  
e-mail: public@nuing.edu.ua

*Досліджено залежність конструктивної в'язкості сталі 3сп резервуару для нафтопродуктів РВС-1000 №1б, виготовленого на ВАТ «Нафтохімік Прикарпаття» (м. Надвірна), від часу його експлуатації. Випробування зразків з неексплуатованої сталі проводять за кімнатної температури в області повністю в'язких руйнувань, а експлуатованої – за тих же умов в області крихко-в'язкого переходу. Встановлено характерні прикмети крихко-в'язкого переходу як для не експлуатованої, так і експлуатованої сталей.*

*Вплив деградації на конструктивну в'язкість трубної сталі Х52 вивчали на її другій стадії – розвитку пошкодженості, коли суттєво зростає вплив водню на процес деградації властивостей сталі. Попереднє електрохімічне наводнювання металу різко зменшує короткочасну тріщиностійкість  $K_C$  сталі Х52. Максимального пониження статична тріщиностійкість металу зазнає в результаті спільної дії попереднього пластичного деформування та електролітичного наводнення.*

*Проналізовано схильність трубної сталі Х52 до водневого розтріскування.*

*Визначено критичні значення густини струму катодної поляризації для сталі Х52, що спричиняє незворотні зміни в її структурі.*

*Ключові слова:* резервуар для нафтопродуктів, трубна сталь Х52, резервуарна сталь 3сп, деградація, водень.

*Исследована конструктивная вязкость стали 3сп резервуара для нефтепродуктов РВС-1000 №1б, изготовленного на ОАО «Нефтехимик Прикарпатья» (г. Надворная), в зависимости от времени его эксплуатации. Испытание образцов из неэксплуатированной стали при комнатной температуре происходит в области полностью вязких разрушений, а эксплуатированной – при тех же условиях в области хрупко-вязкого перехода. Установлены характерные приметы хрупко-вязкого перехода как для неэксплуатированной, так и эксплуатированной сталей.*

*Влияние деградации на конструктивную вязкость трубной стали Х52 изучали на ее второй стадии – развития поврежденности. На этой стадии существенно возрастает роль водорода в деградации свойств стали. Предварительное электрохимическое наводнение металла резко уменьшает кратковременную трещиностойкость  $K_C$  стали Х52. Максимально понижается статическая трещиностойкость металла в результате совместного действия предыдущего пластического деформирования и электролитического наводнения.*

*Проанализирована склонность трубной стали Х52 к водородному растрескиванию.*

*Определены критические значения плотности тока катодной поляризации для стали Х52, что вызывает необратимые изменения в структуре трубной стали.*

*Ключевые слова:* резервуар для нефтепродуктов, трубная сталь Х52, резервуарная сталь 3сп, деградация, водород.

*The structural toughness of the steel 3sp of the petroleum products reservoir RVS-1000 №1b manufactured by JSC “Nafkikhimik Prykarpattia” (Nadvirna) depending on the time of its operation was studied. Destruction of the idle steel samples at room testing temperature occurs as a fully ductile destruction, and destruction of the operating steel under the same conditions occurs as a brittle-ductile transition. The characteristic features of the brittle-ductile transition for idle and operating steels were established.*

*Influence of degradation on the structural toughness of the pipe steel Х52 was studied at its second stage - development of damage. At this stage the role of hydrogen in degradation of the steel properties increases. Preliminary electrochemical metal flooding dramatically reduces the short-term fracture toughness  $K_s$  of the steel Х52. Maximum static fracture toughness decrease of metal occurs as a result of joint action of the previous plastic deformation and electrolytic flooding.*

*The estimation of the propensity Х52 pipe steel to hydrogen-induced cracking was made.*

*The critical current density for cathodic polarization of steel Х52 that causes irreversible changes in the structure of tubular steel was found.*

*Keywords:* petroleum products reservoir, pipe steel Х52, reservoir steel 3sp, degradation, hydrogen.

**Вступ.** В'язкий матеріал повинен задовольняти двом вимогам: по-перше, бути пластичним; по-друге – міцним, щоб деформація здійснювалася при прикладанні великих навантажень. Тобто, в'язкість визначає здатність металу поглинати механічну енергію при неперервному збільшенні пластичної деформації, аж до руйнування [1]. Низьковуглецеві сталі є типовими представниками в'язких матеріалів:

вони мають хорошу пластичність, яка реалізується при дії великих навантажень.

На практиці про в'язкість сталі судять за результатами випробувань на ударний згин. Маятниковий копер, сконструйований Шарпі, запропоновані ним зразки та методика визначення ударної в'язкості практично не змінилися впродовж століття та широко застосовуються у світовій практиці.

Згідно з ГОСТ 9454-60 для визначення ударної в'язкості матеріалів передбачено п'ять типів зразків. Як основний застосовується зразок типу I з радіусом надрізу 1,00 мм та глибиною 2 мм (так званий зразок Менаже). Як додатковий стандарт передбачений зразок типу IV з надрізом радіусом 0,25 мм і тією ж глибиною 2 мм. Цей тип зразка прийнято називати зразком Шарпі.

За радіуса надрізу  $R=1,00$  мм робота на поширення тріщини є значно меншою за роботу, затрачену на зародження тріщин. З пониженням температури ця різниця зростає. Ударна в'язкість матеріалу дає уяву про роботу, яку слід затратити, щоб процес руйнування розпочався.

Для більш гострого надрізу робота на зародження тріщини різко знижується, в той час як робота на її поширення практично залишається без змін.

З механіки руйнування відомо, що опір матеріалів поширенню тріщини є найбільш вагомою характеристикою в'язкості, оскільки саме вона визначає здатність до переходу з в'язкого стану в крихкий. Тому для отримання більш повного уявлення про опір матеріалу поширенню тріщини, необхідно випробувати ударні зразки з можливо більш гострими надрізами.

Такий підхід був втілений при розробці нормативних документів для магістральних трубопроводів з дефектами [2, 3], в яких для ударних зразків використовуються у вершині надрізи радіусом 0,25 мм.

**Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій.** Залежно від напрямку прокатування зразки, вирізані з листового матеріалу, можуть бути поздовжніми та поперечними. Їх ударна в'язкість різна. Оскільки найнижчі значення ударної в'язкості отримують для поперечних зразків, то в нашій роботі випробувалися поперечні зразки.

Ретельні спостереження за конструкціями в період їх експлуатації, а також вивчення причин аварій довели, що тріщини зароджуються в сталі як в процесі її виготовлення, так і в початковий період експлуатації виготовлених з неї деталей. Їх надійність і працездатність забезпечується енергоємністю процесу розвитку тріщини, що і є конструктивною в'язкістю. Остання сприяє зменшенню концентрації напружень у вершині тріщини, викликаючи сповільнення або повне гальмування її розвитку [4–9].

Розвиток тріщини в металі завжди супроводжується пластичною деформацією. Абсолютної крихкості в природі не існує, оскільки завжди присутня певна в'язкість матеріалу. Саме опір крихкому руйнуванню і є проявом в'язкості.

Крихкість металу – це специфічний його стан, який має різний прояв і залежить від якості сталі, робочої температури, наявності концентраторів напружень, рівня напруженню, діють у вершині концентратора, корозійної дії робочого середовища тощо [5–8]. Не всі чинни-

ки, які викликають окрихчення металу, можуть бути враховані. Так, наприклад, важко попередньо установити, які концентратори напружень діятимуть у спроєктованій споруді. Нема підстав стверджувати, що концентратори, менші певного радіуса, будуть відсутні. Навіть для дуже ретельно підготовленої конструкції нескладної форми, якою є магістральний трубопровід, усунути або регламентувати розміри концентраторів напружень практично неможливо. Згідно з даними Американської газової асоціації [4], в місцях виникнення тріщин або розривів завжди присутній який-небудь дефект. Найбільш характерними для труб є дефекти зварних швів, механічні пошкодження типу вм'ятин і надрізів, тверді включення в металі (металургійні дефекти) і втомні тріщини, викликані знакозмінними напруженнями, що виникають під час транспортування труб із заводу на трасу.

Яким би за станом не було окрихчення матеріалу, воно призводить до зниження працездатності конструкції та підвищує ймовірність її руйнування. Аварії резервуарів і трубопроводів виникають досить часто, що вимагає значних затрат для ліквідації їх наслідків [5, 7, 8], тому вивчення конструктивної в'язкості матеріалів такого обладнання має високу наукову цінність для практичного застосування.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Для більш повного уявлення про опір матеріалу поширенню тріщини необхідно провести випробовування ударних зразків з якомога гострішим концентратором. З цієї точки зору, велику перспективу мають зразки з наведеними у вершині надрізу втомними тріщинами [1]. Це дає додаткову можливість проводити розподіл ударної в'язкості на складові: роботу зародження та роботу поширення тріщини. За останніми можна оцінити їх внесок у механізм руйнування матеріалу. Після додаткових випробовувань зразків їх складові можна ввести в стандарт.

Дуже важливу роль в окрихченні сталей трубопроводів відіграє їх наводнювання в процесі експлуатації [10–12], яке у поєднанні з переважанням, що спричиняють попередню пластичну деформацію, є особливо небезпечним. Однак ця проблема залишається не вивченою і потребує подальших досліджень.

Ударні дослідження відносяться до руйнівного методу діагностування трубопроводів, тому є досить високовартісними. Останнім часом робляться спроби оцінювання ударної в'язкості трубопровідних сталей за результатами інших неруйнівних досліджень. Особливу перспективу в цьому мають електрохімічні дослідження [13], однак це питання потребує розширеного вивчення.

**Формування мети дослідження.** Опіраючись на вищевикладені невирішені раніше частини загальної проблеми, метою роботи є оцінювання конструктивної в'язкості матеріалів резервуарів нафти та трубопроводів на пізній

стадії експлуатації. Отримані результати дають додаткову інформацію для прогнозування надійності тривало експлуатованих трубопроводів.

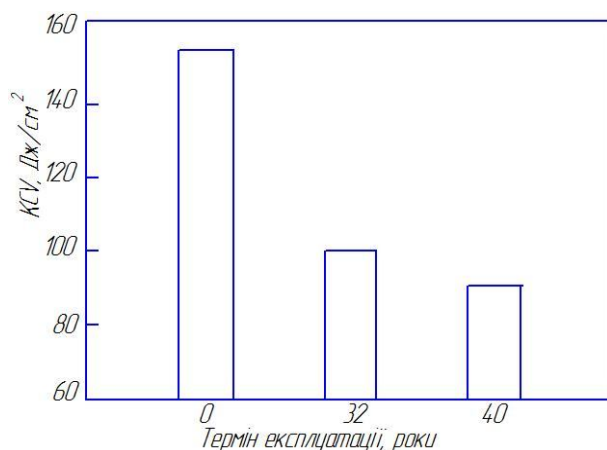
**Виклад основного матеріалу.** Спочатку розглянемо зміни конструктивної в'язкості сталі 3сп резервуара для нафтопродуктів РВС-1000 №1, встановленого на ВАТ «Нафтохімік Прикарпаття», в залежності від терміну його експлуатації.

Висота резервуара становила 8,840 м, діаметр – 12,370 м, об'єм – 1000 м<sup>3</sup>. Товщина листів дна становила 4 мм, покрівлі – 2,5 мм. Вага металу резервуару – 23,26 т. Резервуар призначений для зберігання сирої нафти.

Зразки для дослідження вирізали з дна резервуару, який контактував з підтоварною водою, а саме ближче до внутрішньої поверхні, що піддавалась найбільшій деградації.

На рис. 1 наведено результати випробувань на ударну в'язкість за методом Шарпі, резервуарної сталі 3сп. У порівнянні з результатами аналогічних досліджень для сталі 17Г1С, бачимо, що значення величини *KCV* для сталі 17Г1С були суттєво вищими порівняно зі сталлю 3сп, що пояснюється, на наш погляд, більшим вмістом неметалевих домішок у сталі 3сп.

З даних рис. 1 випливає, що після тридцятидворічної експлуатації величина *KCV* знизилась в 1,55 разів порівняно з неексплуатованою сталлю. Після сорока років експлуатації це значення становило уже 1,72 рази. Це ще раз підтверджує, що перехід до більш жорстких видів навантаження підвищує їх чутливість до оцінки деградації механічних властивостей сталі.



**Рисунок 1 – Вплив терміну експлуатації резервуара РВС–1000 №1 на ударну в'язкість сталі 3 сп**

Отже, деградація експлуатованих сталей проявляється, насамперед, у зниженні опору крихкому руйнуванню, який, у свою чергу, зумовлений спадом його енергоємності. Для підтвердження цього висновку було проведено електроннофрактографічний аналіз зламів зразків, які були піддані ударним випробуванням на в'язкість руйнування.

Дані досліджень наведені на рис. 2.

Як видно з рис. 2 *a*, для неексплуатованої сталі переважальним механізмом руйнування є зсувний. Поверхня зламу зразка орієнтувалася під певним кутом до напрямку нормальних напружень. Розміщені в центральній частині поверхні зламу експлуатованої сталі, мають перпендикулярний напрям орієнтації напрямку прикладання нормальних напружень (рис. 2 *b*, *d*). Руйнуванню характерний двоякий механізм: зсув і відрив. Поздовжні борозни, утворені на зруйнованих поверхнях, свідчать про проходження процесів розшарування матеріалу. Спостерігаються також пори видовженої форми. Їх розміри та кількість мають тенденцію до збільшення із збільшенням терміну експлуатації. Такий висновок можна зробити порівнявши рис. 2*e* і 2*d*.

Електроннофрактографічні обстеження зламів ударних зразків на макрорівні були проведені за збільшення у 1000 разів. Руйнування неексплуатованої сталі 3сп відбувалося за механізмом в'язкого руйнування. Це підтверджується утворенням у зламах димплової (ямкової) структури з чітко вираженими границями (рис. 2*b*). Зародження димплів сприяють неметалеві включення, які можуть мати різне металургійне походження.

Повністю димплове покриття має також поверхня зламу зразка з експлуатованої впродовж тридцяти двох років сталі (рис. 2*e*). Це свідчить про те, що і в даному випадку механізм руйнування матеріалу в'язкий. Однак спостерігається зменшення розмірів димплових утворень, що впливає з порівняння рисунків 2*b* і 2*e*. Це свідчить про те, що в експлуатованій сталі енергоємність руйнування зменшується.

На відміну від попередніх випадків, злами зразків експлуатованої протягом сорока років сталі 3сп мали певні відмінності. Це пов'язано з появою фасеток відколу з низькорельєфними річковими візерунками (рис. 2*e*). Такий характер руйнування властивий крихкому механізму, зокрема транскристалітному. Водночас на зруйнованих поверхнях спостерігали також мікрів'язкі утворення. Це були глибокі димпли розміром 20...50 мкм. Відзначимо, що перетинки, розміщені між відпальними фасетками, руйнуються за в'язким механізмом. Отже, експлуатована впродовж сорока років сталь 3сп руйнується за змішаним механізмом.

Довготривала практика експлуатації резервуарів і трубопроводів свідчить, що сталі з різними структурними станами мають вкрай не однакову схильність до крихкого руйнування. Відомо, що деградація металу обов'язково супроводжується його структурними змінами. Тому вивчали вплив температури випробувань на ударну в'язкість, роботу на зародження та поширення тріщини експлуатованої впродовж сорока років сталі 3сп (рис. 3).

Спочатку провели серіальні температурні ударні випробування не експлуатованої та експлуатованої впродовж 40 років сталі 3сп. Порівнюючи результати цих випробувань, встановлено, що деградація сталі зміщує нижній і верх-



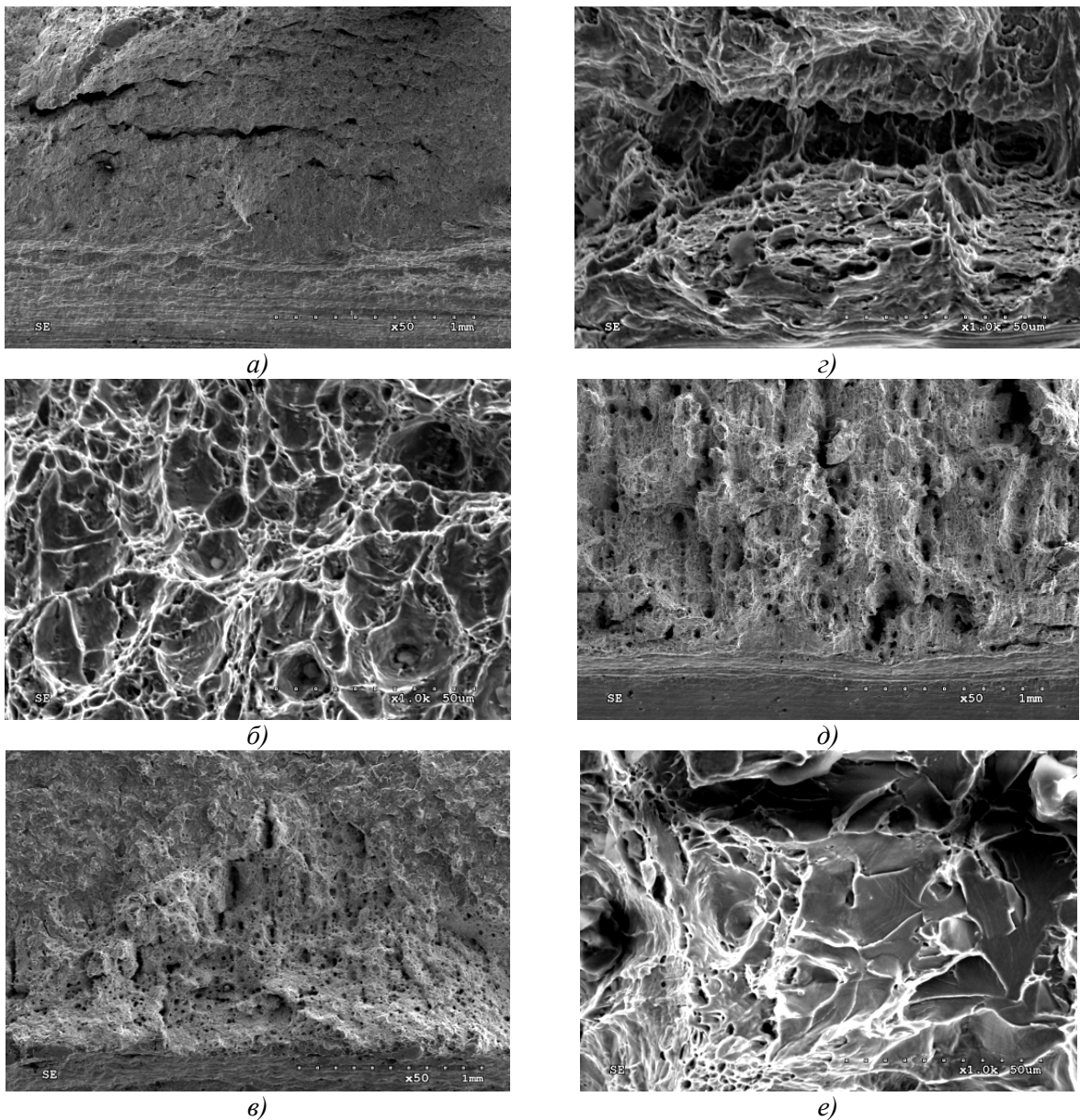


Рисунок 2 – Фрактограми зламів зразків сталі 3сп після ударних випробувань на в'язкість руйнування: неексплуатована труба (а, б); труби, експлуатовані впродовж 32 (в, г) і 40 (д, е) років. Масштаб: x75(а, в, д); x1000 (б, г, е)

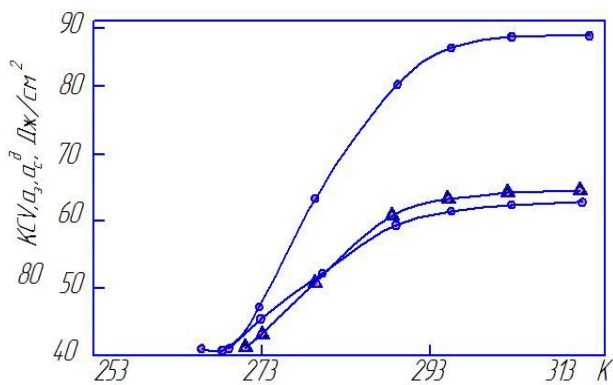


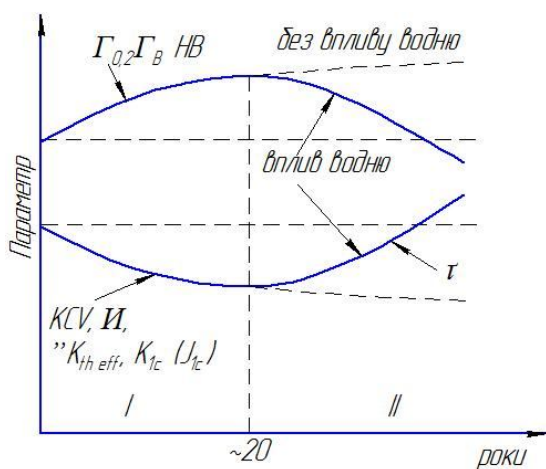
Рисунок 3 – Залежність ударної в'язкості (1) та роботи на зародження (2) і поширення (3) тріщини в експлуатованій впродовж сорока років сталі 3сп від температур випробувань

ній пороги холодноламкості у бік вищих температур випробувань. Нижній поріг холодноламкості показав себе більш чутливою характеристикою. Тому перехідний діапазон температур крихко-в'язкого руйнування звужується, а перепад робіт повністю в'язкого та повністю крихкого руйнувань зменшується. Руйнування зразків з неексплуатованої сталі за кімнатної температури випробувань відбувається в області повністю в'язких руйнувань, а експлуатованої за тих же умов – в області крихко-в'язкого переходу. Перехід до випробувань зразків з нанесеною втмною тріщиною призводить до ще більшого зміщення нижньої температури холодноламкості в бік вищих значень. Подальшого звуження зазнає діапазон перехідних температур. Для експлуатованої та неексплуатованої сталей робота зародження тріщини практично не відрізняється із зміною температур випробу-

вань. В той же час величина роботи на поширення тріщини експлуатованої сталі спадає за кімнатної температури випробувань приблизно в 1,5 рази порівняно з неексплуатованою сталлю.

Відзначимо, що аналогічні висновки були зроблені нами за результатами досліджень трубної сталі 17Г1С після експлуатації впродовж 28...40 років [5 – 8]. Це свідчить про однотипність і подібність механізмів деградації обох сталей.

Аналіз закономірностей деградації різних властивостей (механічних, електрохімічних, корозійно-механічних) сталей трубопроводів дав можливість авторам роботи [8] виділити в даному процесі дві стадії: I – деформаційного старіння та II – розвиток пошкодженості (рис. 4).



**Рисунок 4 – Схематичне зображення двох стадій деградації механічних і корозійно-механічних властивостей трубопровідних сталей [8]**

На стадії деформаційного старіння характеристики міцності та твердості поступово зростають, а ударна в'язкість, пластичність, статична та циклічна тріщиностійкість спадають. Згідно з проведеними нами дослідженнями [5–8] тривалість першої стадії становить щонайменше двадцять років.

Збільшення часу експлуатації трубопроводів призводить до зростання ролі водню в деградації властивостей їх сталей.

Розпочинається друга стадія деградації, яка відрізняється від першої проявом аномалії в поведінці механічних характеристик експлуатованого металу. Так, з одного боку, відбувається зниження міцності та твердості, а, з другого, – одночасний спад в'язкості руйнування, статичної та циклічної тріщиностійкості. Суперечний характер мають показники пластичності: зменшення відносно звуження ( $\psi$ ) відбувається з одночасним зростанням відносно видовження ( $\delta$ ). Такий стан деградованої трубної сталі суттєво знижує надійність подальшої експлуатації магістральних трубопроводів.

Тому слід враховувати, що під час транспортування трубопроводами агресивного робочого середовища метал може наводнюватися,

що погіршить характеристики трубопровідних сталей.

Як підтвердження цього проведемо нескладний експеримент з визначення короткочасної тріщиностійкості трубної сталі X52. Методика його проведення описана в роботі [9].

У вихідному стані величина короткочасної тріщиностійкості становила  $K_C = 67 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ . Якщо зразок був наводнений після попереднього пластичного деформування, то спад в'язкості руйнування став ще більш відчутним: величина  $K_C$  становила  $40 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ . Отже, короткочасна тріщиностійкість сталі X52 після попереднього пластичного деформування та наводнення зменшилась більш ніж утричі. Конструктивна міцність наводненого металу ще більше зменшується в місцях концентрації напружень, попередньо підданих пластичному деформуванню, і робить її дуже чутливою до водневого розтріскування.

Щоб дослідити водневе окрихчення (ВО) трубної сталі X52, використовували циліндричні зразки після їхнього ПЕН за густини струму  $10 \text{ мА/см}^2$  протягом однієї години. Як інгібітор корозії та стимулятор наводнювання при цьому використовували водний розчин  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (рН) з  $2 \text{ г/л}$  міосечовини. Схильність металу до ВО оцінювали за зміною відносного звуження  $\psi''$ .

Послідовність наводнювання та навантаження зразків виконували за двома режимами: режим I – ПЕН і навантаження розтягом на повітрі до руйнування впродовж  $5 \dots 10 \text{ хв.}$ ; режим II – навантаження розтягом на повітрі до певного рівня напружень у пружній та пластичній областях деформації, ПЕН за цих напружень і подальше навантаження на повітрі до руйнування.

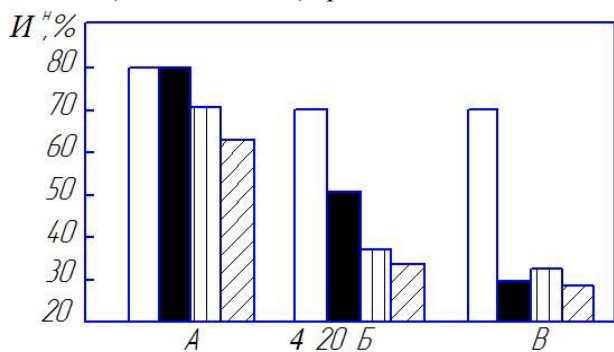
Послідовність операцій наводнювання та навантаження зразків має великий вплив на відносне звуження  $\psi''$  сталі X52. Проведені випробування зразків за режимом I показали, що відносне звуження неексплуатованої сталі практично не зазнало змін (рис. 5). Проведення ПЕН зразків, навантажених відповідно з режимом II у пружній області, призводить до їх відчутного окрихчення.

Проведення ПЕН в області пластичних деформацій ще більш підсилює ефект ВО порівняно з областю пружних деформацій. Отже, вплив абсорбованого водню на ненапружений (режим I) і напружений (режим II) метал має різний характер.

Водночас, на відміну від неексплуатованої сталі, ПЕН ненавантажених зразків (режим I) із експлуатованої впродовж 30 років сталі показало їх сильне окрихчення. Параметр  $\psi''$  зменшився з 70% до 50% (спад порівняно з вихідним значенням становив 28,6%). ПЕН навантаженого за  $\sigma'' = 250 \text{ МПа}$  зразка (за режимом II) спричиняє подальше окрихчення експлуатованого металу. Відносне звуження зменшилась аж до 35%, тобто стала удвічі меншою від її вихідного значення. Найбільшою інтенсивність



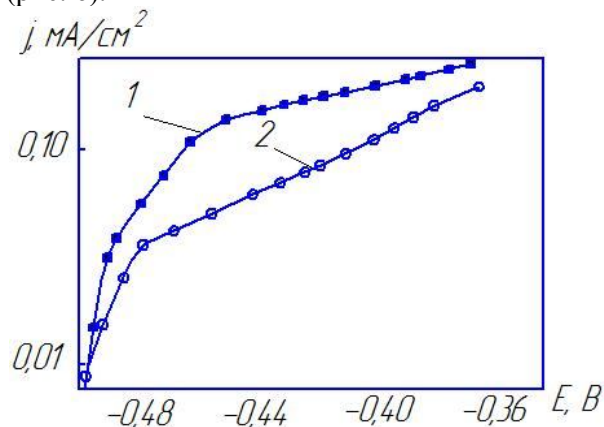
водневого окрихчення була зафіксована під час проведення ПЕН навантаженого в пластичній області ( $\sigma^H = 400$  МПа) зразка.



1, 2 – ненаводнені та наводнені зразки відповідно за  $\sigma^H = 0$ ; 3, 4 – зразки, які зазнали ПЕН за  $\sigma^H = 250$  МПа і  $\sigma^H = 400$  МПа відповідно

**Рисунок 5 – Вплив напруження  $\sigma^H$ , за якого виконували ПЕН, на відносне звуження зразків сталі X52, вирізаних із резервної труби (А) та труби після 30 (Б) років експлуатації**

Відразу після ПЕН були проведені потенціодинамічні вимірювання за потенціалу – 1,4 В протягом 5 хв. (швидкість розгортки становили 20 м В/с). На анодних кривих виявити піки струму окиснення десорбованого водню (рис. 6).



$E$  – електричний потенціал корозії;  
 $j$  – струм окиснення десорбованого водню

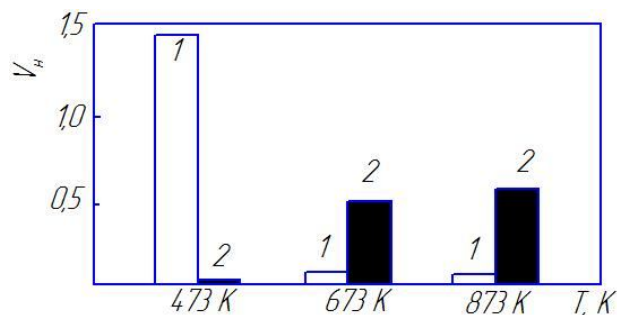
**Рисунок 6 – Анодні поляризаційні криві наводненої сталі X52 запасної труби (1) і труби після 30 років експлуатації (2)**

З рис. 6 видно, що неексплуатованій сталі властиві максимальні струми. Тому порівняно з експлуатованими сталями вона має інтенсивнішу десорбцію водню [10]. За однакових умов наводнювання метал адсорбує однакову кількість водню, причому з експлуатованих сталей воднем десорбується повільніше порівняно з неексплуатованими сталями. Це явище зумовлене більшою дефектністю структури експлуатованих сталей, тобто наявністю більшої кількості пасток. Для прогнозування зниження конструктивної міцності різного обладнання під впливом водню визначають величину його

концентрації в матеріалі та коефіцієнт дифузії, оскільки його рухливість і кількість визначають ймовірність накопичення у зоні передруйнування [11]. З розвитком теорії пошкодженості останнім часом для вивчення поведінки водню в матеріалах розроблено нові методи досліджень. Вони базуються на уявленні, що водень міститься в дефектах матеріалу, які прийнято називати водневими пастками [12]. Методики, які використовували в подальших експериментах даної роботи, описані в [13].

Кількість водню у сталі X52 визначали методом вакуумної екстракції. Виконували поетапно ступінчасте підвищення температур з певним її часовим витриманням на кожному етапі. За нижчих температур метал залишає частину водню, який знаходиться у низькоенергоємних пастках. Враховуючи взаємодію водню з дефектами, його називають «низькоенергоємним». Типовим представником таких дефектів є дислокації. Пори, неметалеві включення чи мікротріщини відносяться до більш «глибоких» пасток. У них міститься «високоенергоємний» водень, який здатний покинути сталь тільки за підвищених температур.

Зразки вирізали з труб запасу нижньої внутрішньої частини експлуатованої труби. Вживалися заходи, щоб уникнути десорбції водню з металу, що може виникнути за підвищених температур в процесі різання. Поверхні зразків очищалися від продуктів корозії. Зразки нагрівали до 473 К, 673 К і 873 К. На кожній ступені температури нагріву витримували впродовж трьох годин. Значення кількості водню показані на рис. 7.



1 – сталь труби запасу;  
2 – експлуатована впродовж 30 років сталь  
**Рисунок 7 – Вплив ступінчастого підвищення температури на кількість десорбованого водню**

Для неексплуатованої сталі температура екстракції 473К було достатньою, щоб десорбувати більшість водню. Водень знаходиться тут на дислокаціях, а енергія його зв'язування у пастках була незначною. Зворотне явище спостерігається в сталях після довготривалої експлуатації: більша кількість водню десорбувалася за підвищених температур. Це свідчить про сильніший зв'язок водню з матрицею металу в експлуатованих сталях. Тому впродовж подальшої експлуатації трубопроводів в їхніх сталях відбувається накопичення водню і утворення його нових пасток.

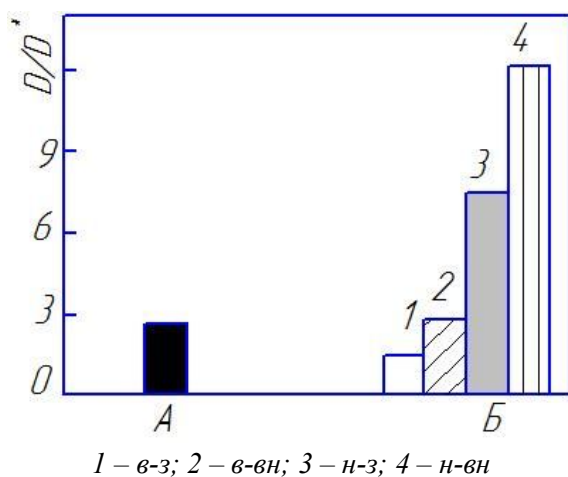
Визначимо фізичний  $D$  та ефективний  $D^*$  коефіцієнти дифузії водню в трубній сталі X52. Суть цих коефіцієнтів полягає в тому, що параметр  $D$  характеризує швидкість перенесення водню в кристалічній ґратці металу, а  $D^*$  – затримку водню на пастках. Величини отриманих коефіцієнтів дифузії зведені до табл. 1. Дані результати отримані у співавторстві [14]. Відзначимо, що з експлуатованих труб зразки вирізалися з їхньої верхньої (в-з – верх-зовнішня поверхня; в-вн – верх-внутрішня поверхня) та нижньої (н-з – низ-зовнішня поверхня; н-вн – низ-внутрішня поверхня) частин.

**Таблиця 1 – Значення фізичного та ефективного коефіцієнтів дифузії водню [14]**

Сталь	Місце вирізки	$D$ , $\text{см}^2/\text{с}$	$D^*$ , $\text{см}^2/\text{с}$
X52		$3,2 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-5}$
X52 Експлуатована	в-з	$7,7 \times 10^{-6}$	$4,8 \times 10^{-6}$
	в-вн	$1,6 \times 10^{-5}$	$8,4 \times 10^{-6}$
	н-з	$7,9 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-6}$
	н-вн	$8,8 \times 10^{-6}$	$7,0 \times 10^{-7}$

Наведені в табл. 1 результати свідчать, що експлуатована сталь має нижчі коефіцієнти дифузії водню порівняно з сталлю труби запасу, а значення коефіцієнтів для зразків з верхніх частин труб є більші, ніж з нижніх.

Відношення  $D/D^*$  (рис. 8) прийнято вважати мірою ефективності захоплення водню пастками в матеріалі. Інтенсифікація пасткування може слугувати показником інтенсивності деградації нафтогазопроводів.



**Рисунок 8 – Відношення фізичного коефіцієнта дифузії до ефективного для неексплуатованої (А) та експлуатованої впродовж 30 років (Б) сталі X52**

Для оцінювання схильності трубної сталі X52 до водневого розтріскування використовували метод [13], що дає можливість зафіксувати такий стан металу, який вказує на пасткування водню новоутвореними дефектами, тобто на спричинений наводнюванням розвиток пошкодження. Цій ситуації відповідає струм катодного наводнювання, який називають критичним

( $i_c^*$ ). Чим він вищий, тим нижча схильність до водневого розтріскування сталі.

Критичні значення густини струму катодної поляризації для сталей X52 наведені в табл. 2. Досягнення цих критичних значень спричиняє негативні незворотні зміни у структурі трубної сталі.

**Таблиця 2 – Критичні значення густини струму катодної поляризації для сталей X52**

Характеристика	Сталь				
	X52	Експлуатована X52			
		в-з	в-вн	н-з	н-вн
$i_c^*$	40	20	20	12	6

З табл. 2 видно, що неексплуатована сталь витримує максимальну густину струму катодної поляризації ( $i_c^* = 40 \text{ мкА}/\text{см}^2$ ). Експлуатована сталь зазнає незворотного пошкодження, коли  $i_c^*$  має набагато нижчі значення. Проявляється чітка різниця у властивостях металу з різних фрагментів труб. Наведені в табл. 2 результати дають можливість виконувати порівняльну оцінку трубних сталей за їх схильністю до водневого розтріскування. Таку схильність мають експлуатовані протягом тривалого часу сталі. Особливо це стосується металу з нижніх фрагментів труб, в першу чергу біля внутрішньої поверхні.

### Висновки

Досліджено конструктивну в'язкість сталі 3сп резервуара для нафтопродуктів РВС-1000 №1, встановленого на ВАТ «Нафтохімік Прикарпаття» (м. Надвірна), в залежності від часу його експлуатації. Руйнування зразків з неексплуатованої сталі за кімнатної температури випробувань відбувається в області повністю в'язких руйнувань, а експлуатованої за тих же умов – в області крихко-в'язкого переходу. Для експлуатованої та неексплуатованої сталей робота зародження тріщини практично не відрізняється із зміною температури випробувань. В той же час величина роботи поширення тріщини експлуатованої сталі спадає за кімнатної температури випробувань приблизно в 1,5 рази порівняно з неексплуатованою сталлю.

Вивчено вплив деградації на конструктивну в'язкість трубної сталі X52 на її другій стадії – розвитку пошкодження. Показано різке зростання ролі водню в деградації властивостей сталі на цій стадії. ПЕН металу різко знижує короткочасну тріщиностійкість сталі X52. Максимального пониження величина  $K_C$  зазнає в результаті спільної дії попереднього пластичного деформування та наводнення.

Встановлено, що в експлуатованому матеріалі знаходиться більша кількість водню порівняно з вихідним і перебуває він у більш зв'язаному стані. Тому експлуатація трубних сталей супроводжується накопиченням водню і утворенням його нових пасток.

Показано, що інтенсифікація пасткування може слугувати показником інтенсивності деградації трубопроводів.

Встановлено, що експлуатовані сталі володіють підвищеною схильністю до водневого розтріскування.

В подальшому планується провести дослідження з перспективи використання роботи поширення тріщин в стандартах.

### **Література**

1 Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: В 4 т.; Под общей ред. В.В. Панасюка. – Киев: Наук. думка, 1988. – Т. 1: Основы механики разрушения материалов / В. В. Панасюк, А. Е. Андрейкив, В. З. Партон. – 1988. – 488 с.

2 Відомчі будівельні норми України: ВБН В.2.3-00018201.04-2000. Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами. – К.: Держнафтогазпром, 2000. – 57 с.

3 ДСТУ НБВ.2.3.21:2008. Настанова визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами. – К.: Мінрегіонбуд України, 2008. – 68 с.

4 Eider R. Line pipe retains yield strength after long service / R. Eider // Oil and Gas Journal. – 1980. – №13. – P. 151–154.

5 Петрина Д. Ю. Експериментальна оцінка механічних властивостей сталі 17Г1С тривало експлуатованих магістральних газопроводів / Д. Ю. Петрина // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2010. – № 1 (23). – С. 84–91.

6 Петрина Д. Ю. Оцінювання експлуатаційної деградації сталей магістральних нафто- і газопроводів / Д. Ю. Петрина, О. І. Звірко, М. І. Греділь // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2008. – № 4 (29). – С. 76–79.

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

8 Вплив експлуатаційної розсіяної пошкодженості на закономірності деградації властивостей конструкційних сталей / [Г. Никифорчин, Е. Лунарьська, Д. Петрина та ін.] // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2009. – Т. 14. – № 4. – С.38–45.

9 ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во. стандартов, 1985. – 62 с.

10 Крапивный Н. Г. Кинетические особенности абсорбции водорода подложкой при электроосаждении металлов / Н. Г. Крапивный, В. И. Соборницкий, Г. В. Радковская // Физ.-хим. механика материалов. – 1988. – № 5. – С. 58–63.

11 Devanathan M.A.V. The Mechanism of Hydrogen Evolution on Iron in Acid Solutions by Determining of Permeation Rate / M.A.V. Devanathan, Z. Stachurski // Electrochemical Society. – 1964. – 121. – P. 619–623.

12 Lunarska E. Application of hydrogen permeation technique for estimation of gradual hydrogen induced degradation of steel / E. Lunarska // Proc. Intern. conf. Environmental degradation of engineering materials EDEM. – 1999. – Gdansk: Gdanskie Towarzystwo Naukowe, 1999. – P. 32–37.

13 Оцінювання експлуатаційної деградації сталей магістральних нафтогазопроводів методами електрохімічних досліджень / Д.Ю. Петрина, Ю.Д. Петрина, Б.Р. Шуляр [та ін.] // Методи та прилади контролю якості. – 2012. – № 2 (29). – С. 138–145.

14 In-service degradation of gas trunk pipeline X52 steel / G. Gabetta, H.M. Nykyforchyn, E. Lunarska et al // Physicochemical Mechanics of Materials. – 2008. – № 1 (44). – С. 88–99.0

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
12.09.14*

*Рекомендована до друку  
професором Грудзом В.Я.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
д-ром техн. наук Никифорчиним Г.В.  
(відділ корозійно-водневої деградації та захисту  
матеріалів Фізико-Механічного інституту  
ім. Г.В.Карпенка НАН України, м. Львів)*