

УДК 539.4

## ОЦІНЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ ТРУБОПРОВІДНИХ СТАЛЕЙ ЗА УДАРНИМИ ВИПРОБУВАННЯМИ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗРАЗКІВ З КІЛЬЦЕВИМИ ТРІЩИНАМИ

Д. Ю. Петрина, Б. Р. Шуляр, Ю. Д. Петрина

Івано–Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
вул. Карпатська, 15, м. Івано–Франківськ, 76019, E-mail: [public@nung.edu.ua](mailto:public@nung.edu.ua)

Здійснено оцінювання експлуатаційної деградації трубопровідних сталей за ударними випробуваннями на розтяг циліндричних зразків з кільцевими осесиметричними тріщинами. Приведені результати механічних випробувань циліндричних зразків експлуатаційних труб з кільцевими тріщинами, які проводилися на універсальній машині розриву ІМ–5А та копрі МК–5 з допомогою спеціально сконструйованого пристрою при різних температурах. Співставлення експериментальних даних, отриманих за статичного та ударного випробувань на розтяг циліндричних зразків з кільцевою осесиметричною тріщиною і ударного згину призматичних зразків з нанесеними вторинними тріщинами, показали високу ефективність ударних випробувань на розтяг циліндричних зразків із кільцевою осесиметричною тріщиною для оцінювання схильності трубопровідних сталей до крихкого руйнування та експлуатаційної деградації. Висновки, отримані за результатами механічних випробувань, підтверджені електронно–фрактографічним аналізом зламів зразків.

Ключові слова: нафтогазопровід, тріщиностійкість, втомне навантаження, довговічність, ресурс.

Осуществлена оценка эксплуатационной деградации трубопроводных сталей за ударными испытаниями на растяжение цилиндрических образцов с кольцевыми осесимметричными трещинами. Приведены результаты механических испытаний цилиндрических образцов эксплуатационных труб с кольцевыми трещинами, которые проводились на универсальной машине разрыва ИМ–5А и копре МК–5 с помощью специально сконструированного устройства при различных температурах. Сопоставление экспериментальных данных, полученных при статической и ударной испытаний на растяжение цилиндрических образцов с кольцевой осесимметричной трещиной и ударного изгиба призматических образцов с нанесенными вторичными трещинами, показали высокую эффективность ударных испытаний на растяжение цилиндрических образцов с кольцевой осесимметричной трещиной для оценки склонности трубопроводных сталей к хрупкому разрушению и эксплуатационной деградации. Выводы, полученные по результатам механических испытаний, подтвержденных электронно–фрактографическим анализом изломов образцов.

Ключевые слова: нефтегазопроводы, трещиностойкость, усталостные нагрузки, долговечность, ресурс.

The purpose of this work is the evaluation of operational degradation of pipeline steels under shock tensile tests of cylindrical parts with axially symmetric ring cracks. Mechanical testing was performed on the universal tearing machine MI–5A and copra MK–5 with a specially constructed device to make measures at different temperatures. The comparison of experimental data obtained by static and shock tensile cylindrical parts with circular axis symmetrical crack and bending impact of prismatic parts coated with secondary cracks showed high efficiency impact tensile tests of cylindrical samples with circular axisymmetrical crack for evaluating susceptibility of pipeline steels to brittle fracture and operational degradation. The conclusions derived from the results of mechanical tests, confirmed by electron–fractures fractographycal analysis of samples.

Key words: oil and gas pipelines, crack resistance, fatigue loading, durability, operation time.

Основні фонди трубопровідного транспорту України постійно старіють. Деяка частина нафтогазопроводів (НГП) уже відпрацювала

повністю свій розрахунковий ресурс, а інша – 50 ... 70% нормативного ресурсу, що спричиняє їх деградацію [1]. Збільшення терміну безпечної

експлуатації таких трубопроводів – особливо актуальна науково-прикладна проблема, яка вирішується застосуванням методів технічного діагностування та розробленням методів оцінки працездатності експлуатованого матеріалу. В цьому плані важлива роль належить встановленню ступеня деградації різних властивостей трубопровідних сталей, адже для подальшої оцінки безпечної роботи НГП потрібно враховувати поточні характеристики експлуатованого матеріалу [2].

Основний наслідок експлуатаційної деградації трубопровідних сталей полягає в їх різному окрихченні, що приводить до утворення тріщиноподібних дефектів, які можуть спричинити катастрофічне руйнування трубопроводу. Тому останнім часом в інженерній практиці розрахунок НГП на міцність пов'язують з визначенням характеристик опору конструкційного матеріалу щодо поширення в ньому тріщини з урахуванням реальних умов його експлуатації (робочого середовища, характеру діючих навантажень, температури тощо) [3 ÷ 8].

Опір матеріалу поширенню в ньому тріщини оцінюють наступними параметрами руйнування: критичним значенням коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_c$  або  $K_{Ic}$  (за умов плоскої деградації) [3 ÷ 5, 7]; критичним розкриттям тріщини  $\delta_k$  в її вершині [3, 6]; ефективною поверхнею матеріалу  $\gamma$  [3], тобто роботою, необхідною для утворення одиниці нової поверхні; джей-інтегралом  $J$ , величина якого встановлюється відношенням приросту роботи внутрішніх сил до приросту поверхні тріщини [3, 8].

В рамках лінійної механіки руйнування, тобто при значній довжині тріщини та малій локальній пластичності наведені вище характеристики зв'язані між собою таким чином [3]:

$$2\gamma = \sigma_0 \delta_k = \frac{1-\mu^2}{E} K_{Ic}^2 = J_{Ic}, \quad (1)$$

де  $\sigma_0$  – границя крихкої міцності матеріалу;

$E_1 = \frac{E}{1-\mu^2}$  при плоскій деформації і  $E_1 = E$  при плоскому напруженому стані;  $E$  – модуль Юнга;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

У випадку, коли поширення тріщини в деформованому тілі спряжено з розвитком пластичних деформацій в її вершині, в області, яка співрозмірна з довжиною вихідної тріщини,

то величини  $K_{Ic}$ ,  $\delta_k$  і  $\gamma$  втрачають між собою зв'язок, який вказаний рівнянням (1). В даному разі слід користуватися характеристиками  $\delta_k$  і  $J$ -інтегралом, оскільки вони враховують пластичність матеріалу [6, 8].

Поряд з наведеними вище параметрами, які використовують для оцінки опору поширення тріщин за статичними випробуваннями, в інженерній практиці широко застосовують також характеристику питомої роботи руйнування зразка з тріщиною при динамічному руйнуванні  $a_c^0$  [3].

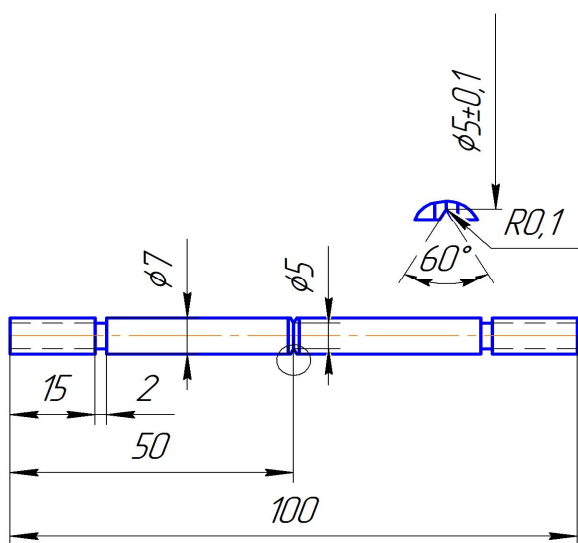
На даний час для експериментального визначення характеристик опору матеріалів до поширення тріщини використовуються різноманітні методи та типи зразків. В цьому питанні немає ще єдиного стандартного підходу. З поміж великої кількості зразків значний інтерес для дослідників представляє циліндричний зразок з кільцевою тріщиною. Такий зразок легко виготовити на сучасному металооброблювальному обладнанні та створити вихідний кільцевий концентратор необхідної гостроти та глибини. Ще одна його перевага полягає в тому, що силова схема навантаження розтягом реалізує ламальний стан плоскої деформації вздовж всього контуру тріщини, що відповідає розрахунковим моделям.

Циліндричними зразками з кільцевим надрізом постійно користувалися при вивченні впливу концентратора на механічні властивості конструкційних матеріалів. Але при визначенні опору матеріалу щодо поширення тріщини вказані зразки до останнього часу ще не мали широкого застосування. Очевидно, що основною причиною цього була відсутність надійних способів утворення та контролю глибини осесиметричної кільцевої вихідної втомної тріщини в матеріалі на дні кільцевого концентратора. Останнім часом уже створені деякі оригінальні способи нанесення кільцевої тріщини на циліндричних зразках [3, 9]. Тому тепер в експериментальних дослідженнях стає можливим широке використання зразків з кільцевими осесиметричними тріщинами для визначення опору конструкційного матеріалу поширенню тріщини як при статичному, так і при динамічному навантаженні.

Оскільки експлуатаційну деградацію трубних сталей ефективніше визначати за більш жорстких умов навантаження [2], то використання ударних випробувань циліндричних зразків з кільцевими осесиметричними тріщинами на розтяг приносить, очевидно, найбільший ефект.

Метою даної роботи є оцінювання експлуатаційної деградації трубопровідних сталей за ударними випробуваннями на розтяг циліндричних зразків з кільцевими осесиметричними тріщинами.

Ескіз зразка, призначеного для механічних випробувань (рис. 1), виготовлений з матеріалу Ст 20 нафтопроводу «Долина–Дрогобич», який експлуатувався протягом 42 років. Розміри труби – 273 x 9 мм. Вирізання здійснювали з нижньої частини труби паралельно і перпендикулярно до твірної труби.



**Рисунок 1 – Ескіз циліндричного зразка з кільцевим надрізом, призначеного для нанесення кільцевої осесиметричної тріщини та випробувань на ударний розтяг**

Втомне навантаження – це єдиний спосіб нанесення тріщин заданої довжини на зразки, призначених для оцінки опору поширення тріщини. Різну довжину втомної тріщини отримують шляхом зміни інтенсивності циклічного навантаження. З метою мінімізації затрат часу для нанесення втомних тріщин на зразках випробування проводять за високих амплітуд. Проте інтенсивне втомне навантаження приводить до спотворення істинних значень характеристик тріщиностійкості [3 ÷ 5]. Для одержання істинних значень опору поширення тріщини амплітуду втомних навантажень знижують для рівня, який не впливає на визначення ювенільної величини в'язкості руйнування. При цьому тривалість навантаження циліндричного зразка різко зростає. На циліндричних зразках з неексплуатованих труб отримували чіткі осесиметричні вихідні тріщини (рис. 2, а). Однак нанесення осесиметричних вихідних

тріщин за низьких амплітуд не забезпечує утворення в циліндричних зразках, вирізаних з експлуатованих труб, тріщин правильної круглої форми, так як має місце ексцентричність, овальність, або еліпсність (рис. 2, б).

Такий характер утворення та поширення втомної тріщини пов'язаний, очевидно, з деградацією металу за час його експлуатації, тобто з окрихченням, ростом пошкоджуваності та підвищенням чутливості до концентрації напружень.

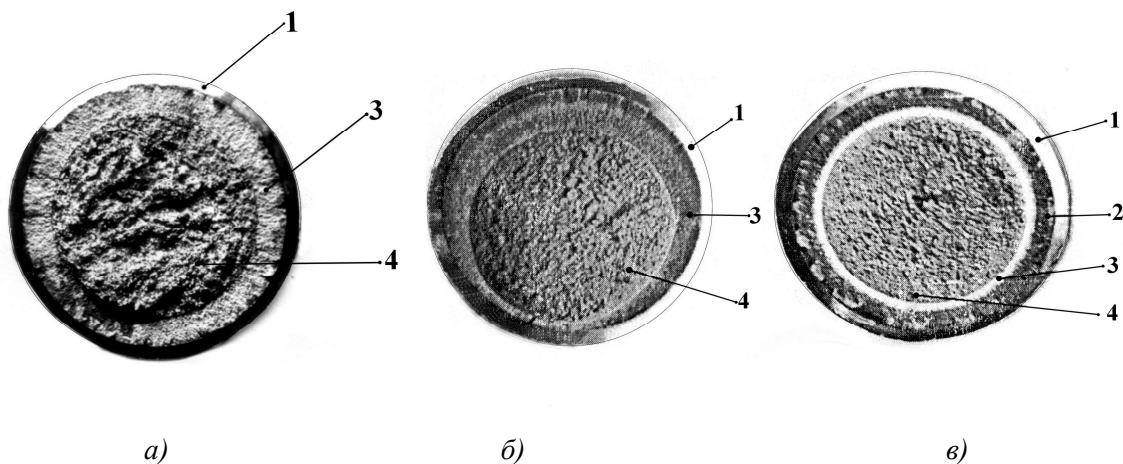
Після нанесеної вихідної втомної тріщини на циліндричному зразку проводять випробування на осьовий розтяг до його руйнування з реєстрацією діаграми «навантаження–зміщення», або на ударний розтяг. Вимірюють відстань  $s$  між центрами поперечного перерізу і доламу зразка, а також діаметри контуру втомної тріщини у двох взаємно перпендикулярних напрямках  $d_1, d_2$  і обчислюють їх середнє значення  $d$ . Якщо величина  $2s/d$  і (або)

$\sqrt{\frac{|d_1 - d_2|}{2}}$  перевищує 0,08, то зразок відбраковують.

Тому була поставлена задача вдосконалити спосіб нанесення осесиметричних вихідних тріщин на циліндричних зразках, призначених для вивчення характеристик тріщиностійкості шляхом проведення циклічного навантаження при підвищеному та пониженому навантаженні циклу в процесі нанесення осесиметричної вихідної втомної тріщини правильної круглої форми для усунення наклепування металу в зоні, яка прилягає до верхини нанесеної тріщини. Це дозволить забезпечити умови рівномірного розвитку тріщини в глибину із збереженням первісної правильної круглої форми тріщини, підвищити точність та скоротити тривалість механічних випробувань і за рахунок цього забезпечить отримання достовірних значень характеристик тріщиностійкості.

Поставлена задача вирішується тим, що у способі нанесення осесиметричних вихідних втомних тріщин на циліндричних зразках, призначених для визначення характеристик тріщиностійкості, що включає циклічне навантаження циліндричного зразка з кільцевим ініціюючим V- подібним надрізом круговим згином, циклічне навантаження циліндричного зразка здійснюють в 2 етапи.

На першому етапі до циліндричного зразка прикладають підвищене навантаження циклу, в результаті чого на дні кільцевого ініціюючого



а)–утвореними за існуючою методикою для зразків, що не були в експлуатації; б)–експлуатованих матеріалів; в)– запропонованим способом

1– зона конструктивного концентратора; 2– ділянка тріщини, отримана при підвищеному навантаженні циклу  $P_{f \max}$ ; 3– ділянка тріщини, отримана при пониженому навантаженні циклу  $P_{f \min}$ ; 4– зона доламу зразка після випробування на розтяг

Рисунок 2 – Злами зразків з тріщинами

$V$  – подібного надрізу по всьому периметру зароджується, а потім розповсюджується осесиметрична вихідна втомна тріщина правильної круглої форми, довжиною, що дорівнює  $2/3$  від її необхідної кінцевої величини за невеликий проміжок часу.

На другому етапі циклічного тренування, з метою отримання істинних (достовірних) значень характеристик тріщиностійкості, нанесену на першому етапі осесиметричну вихідну втомну тріщину доводять до кінцевої довжини при пониженому навантаженні циклу, що не впливає в подальшому на визначення величини характеристик тріщиностійкості. Попередньо на декількох циліндричних зразках досліджували кінетику розповсюдження вихідної втомної тріщини. Кількість циклів тренування вибирали таким чином, щоб в кінцевому результаті на зразку отримати у вершині кільцевого ініціюючого  $V$ -подібного надрізу кільцеву осесиметричну вихідну втомну тріщину довжиною 1,0 мм при діаметрі живого перерізу зразка – 3 мм.

Незважаючи на зниження навантаження циклу, попередньо нанесена на першому етапі кільцева осесиметрична вихідна втомна тріщина росте рівномірно і на другому етапі, зберігаючи при цьому свою первісну правильну круглу форму. Підвищене та понижене навантаження

циклу визначається експериментальним або розрахунковим шляхом, при цьому їх співвідношення складає:

$$1,7 < \frac{P_{f \max}}{P_{f \min}} < 2, \quad (2)$$

де  $P_{f \max}$  – підвищене навантаження циклу при нанесенні осесиметричної вихідної втомної тріщини круговим згином на першому етапі;  $P_{f \min}$  – понижене навантаження циклу при нанесенні осесиметричної вихідної втомної тріщини круговим згином на другому етапі.

Після цього циліндричний зразок з нанесеною осесиметричною вихідною втомною тріщиною правильної круглої форми випробовували на осьовий розтяг з реєстрацією діаграми «навантаження – зміщення» на розривній машині УМ–5А, або на маятниковому копрі МК–5. Вигляд зламу циліндричного зразка з осесиметричною вихідною втомною тріщиною правильної круглої форми, нанесеною запропонованим способом, після випробувань на розтяг представлено на рис. 2, в.

Для реалізації ударного розтягу циліндричного зразка з кільцевою осесиметричною тріщиною використовували пристрій, конструкція якого наведена в роботі

[3]. Швидкість деформації при статичному розтягу складала 0,06 мм/с. Машина для механічних випробувань на розтяг була обладнана пристроями для температурних випробувань в широкому діапазоні. Випробування при температурах від 77 до 273 К проводили в холодній камері. Температура зразків 77 К забезпечувалась заливанням холодної камери рідким азотом, а більш високі температури – охолодженням зразків парами азоту. Випробування за температур вище кімнатних проводили в малоінерційній ніхронівій печі, яка дозволяла нагрівати зразки, встановлені між захватами машини до 773 К. Час нагріву та стабілізації необхідної температури не перевищував 5 хв.

При ударних випробуваннях нижче кімнатної температури зразки попередньо охолоджували у термостаті об'ємом 1,5 л. При випробуваннях в межах 173...273 К зразки охолоджували в суміші рідкого азоту з ацетоном. Температуру в термостаті контролювали спиртовим термометром з ціною поділки штала 1°C. Час витримки зразків в термостаті був біля 15 хвилин. Маніпуляції між початком виймання зразка з термостату до удару становили 5...7 с. За цей час температура зразка трохи підвищується. Для компенсації такої похибки зразки переохолоджували нижче температури випробувань приблизно на 5 К.

При ударних випробуваннях за температур вище кімнатної зразки нагрівались в термостаті типу СНОЛ-3,5. Час нагріву та стабілізації необхідної температури не перевищував 5 хв. Оскільки зразки з моменту виймання з

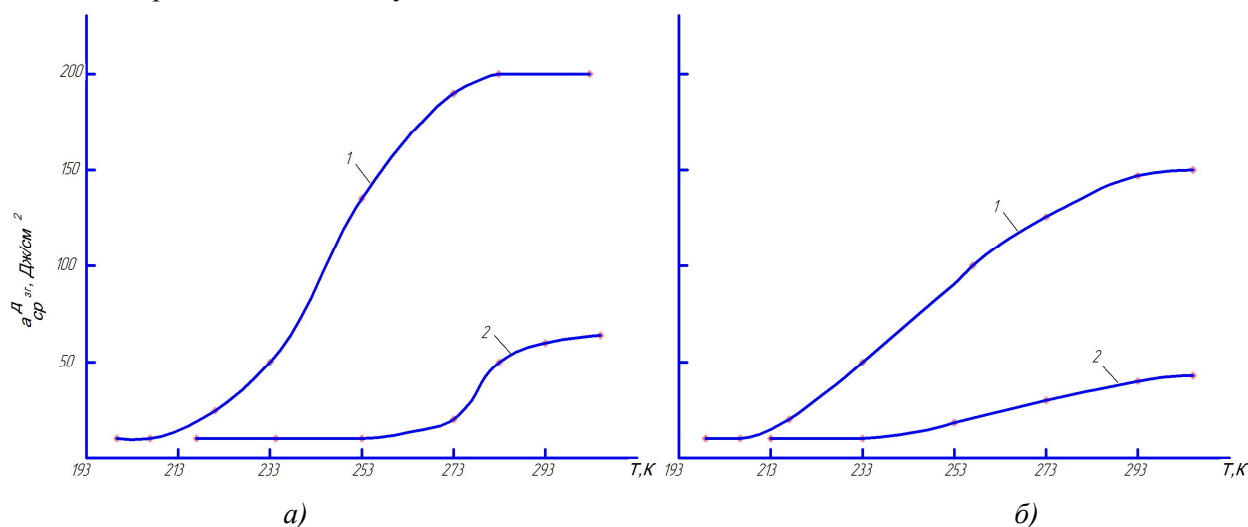
термостату до моменту удару дещо охолоджуються, то їх перегрівали в термостаті вище температури випробувань на 10...20 К. Вимірювання температури здійснювали за допомогою мідь-константової термопари, привареної до поверхні контрольного зразка.

Методику ударного розтягу циліндричних зразків з кільцевими осесиметричними тріщинами застосували для оцінки схильності до холодноламкості трубної Ст.20 в стані поставки. Дослідження проведені на зразках, вирізаних в поздовжньому та поперечному напрямках.

В подальшому питому роботу руйнування зразка з тріщиною при ударному розтягу позначимо через  $a_{c p}^{\circ}$ , а при ударному згині – через  $a_{c z}^{\circ}$ .

На рис. 3 наведені результати таких досліджень, які показують, що пониження температури випробувань усуває переваги сталі з перпендикулярним до прокатки напрямом поширення тріщин.

Зразки з перпендикулярною орієнтацією осі зразків щодо твірної труби мали більш пологі криві холодноламкості, ніж зразки з відповідною паралельною орієнтацією. Тобто, різниця робіт між повністю в'язким і повністю крихким руйнуванням спадала, розширювався діапазон між верхньою та нижньою критичними температурами холодноламкості. Особливо це було характерним для зразків, виготовлених з експлуатованого матеріалу.



а – при паралельній і б – перпендикулярній орієнтації осі зразків щодо твірної труби; 1 – матеріал, що не був в експлуатації; 2 – експлуатований матеріал

**Рисунок 3 – Залежність динамічної тріщиностійкості сталі 20 від температури випробувань**

Для оцінки чутливості параметра  $a_{c,p}^{\delta}$  матеріалу труб до експлуатаційної деградації доцільно використати показник змін  $\Delta$ , що представляє собою відношення показника  $a_{c,p}^{\delta}$  тривалоексплуатованої Ст. 20 до цього ж показника неексплуатованої сталі.

За кімнатної температури випробувань для зразків з паралельною орієнтацією осі зразків щодо твірної труби показник відносних змін становив 0,31: а для зразків з перпендикулярною орієнтацією осі зразків – 0,28. Отже чутливість до експлуатаційної деградації зразків паралельної орієнтації тріщини по відношенню до прокату дещо вища, ніж перпендикулярної орієнтації. Однак слід відзначити, що в обох випадках чутливість до деградації Ст. 20, визначена за показником  $a_{c,p}^{\delta}$ , дуже висока і в ніяких попередніх випадках таких значень не досягала.

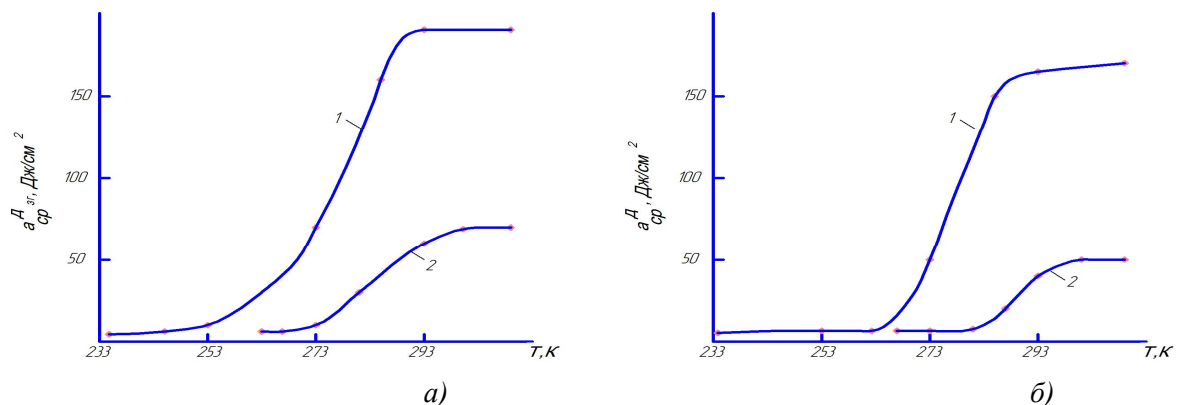
В останніх наших дослідженнях [2] показано, що випробування на ударну в'язкість призматичних зразків з нанесеними втомними тріщинами (ударний згин) представляє собою один з найефективніших способів оцінки експлуатаційної деградації трубопровідних сталей. Враховуючи, що розтяг є більш жорстким видом випробувань, ніж згин, то з метою виконання порівняльної оцінки чутливості до деградації проведено випробування на ударний згин і ударний розтяг зразків з неексплуатованої та експлуатованої впродовж 40 років Ст. 17Г1С (рис. 4).

З порівняння залежностей  $a_{c,32}^{\delta}(T_{випр})$  і  $a_{c,p}^{\delta}(T_{випр})$  легко відслідковується більш пологий характер кривих залежності роботи поширення

тріщин при ударному згині від температури випробувань порівняно з кривими температурної залежності динамічної тріщиностійкості, отриманими при ударному розтягу циліндричних зразків з кільцевими осесиметричними тріщинами. При цьому робота повністю в'язкого руйнування за ударного розтягу неексплуатованої сталі падає з 178 до 169 Дж/см<sup>2</sup> порівняно з аналогічними випробуваннями за ударного згину. Для зразків з експлуатованої сталі такий спад становить 17 Дж/см<sup>2</sup> (з 70 до 53 Дж/см<sup>2</sup>). Ударні випробування на розтяг суттєво звужують перехідний діапазон між нижньою та верхньою температурами холодостійкості.

Якщо за кімнатної температури показник відносних змін  $\Delta$  за випробувань на ударний згин дорівнює 0,39, то за випробувань на ударний розтяг він становить 0,31, що свідчить про високу чутливість останнього до деградації трубних сталей.

З метою отримання більш повних даних про досліджувані сталі вивчали також вплив тривалої експлуатації на мікроструктуру сталі 17Г1С магістрального газопроводу (рис. 5). Мікроструктура неексплуатованого матеріалу має вигляд стовпчастих кристалітів. Останні морфологічно наслідують колишні зерна аустеніту. Вздовж їх меж розміщені феритні облямівки. Переважною для зерен колишнього аустеніту є структура голкового фериту. Експлуатований метал зберігає стовпчасту форму зерен вихідного аустеніту, проте феритна облямівка на їх межах уже відсутня, а всередині та на межах феритних зерен з'явилися карбіди різних розмірів.



а– при ударному згині та ударному розтягу; б– для зразків, що не були в експлуатації (1) та експлуатованої (2) Ст. 17Г1С від температури випробувань

Рисунок 4 – Залежності роботи поширення тріщини

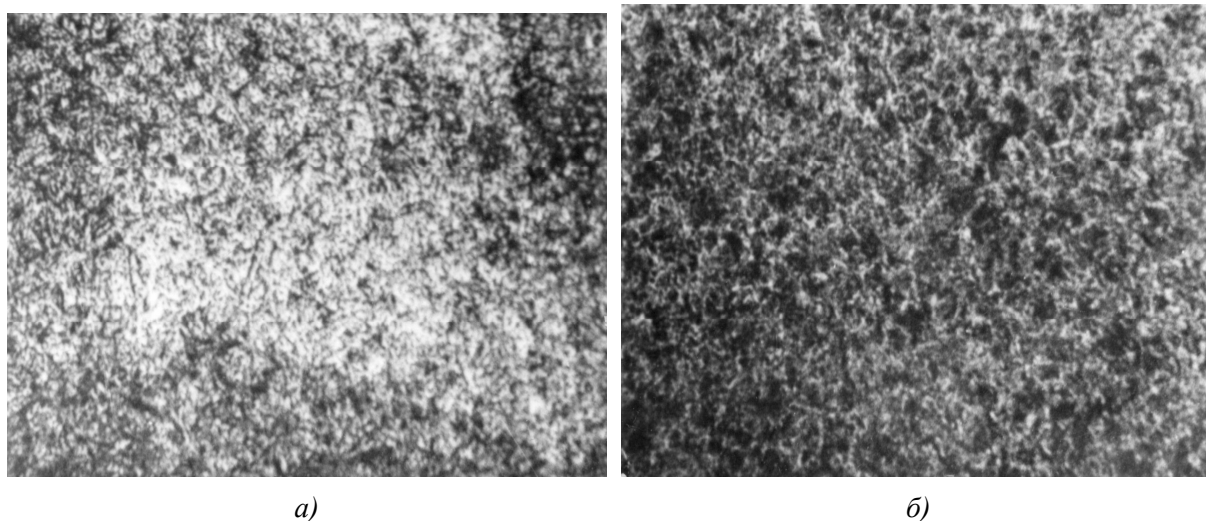


Рисунок 5 – Мікроструктура неексплуатованої (а) та експлуатованої (б) сталі 17Г1С (x200)

Висновки за результатами механічних випробувань на ударний згин і ударний розтяг неексплуатованої та експлуатованої сталі 17Г1С (рис. 4) підтверджуються електронно-фрактографічним аналізом зламів зразків.

Раніше в роботі [10] було показано, що величини ямок зламів зразків, виготовлених з контрольних труб, набагато більші, ніж в таких же зламах зразків з експлуатованих труб за однакових умов випробувань. Отже, перший випадок свідчить про більш високо енергоємне руйнування зразків, ніж у другому. Тому для вивчення впливу ударного згину балкових зразків з тріщинами та ударного розтягу циліндричних зразків з кільцевими осесиметричними тріщинами на мікрофрактографічні особливості поширення тріщин в зламах дослідження проводили на зразках з труб запасу. Температура випробувань становила 293 К і забезпечувала в'язке руйнування.

З порівняння рис. 6, а і рис. 6, в видно, що за ударного розтягу циліндричних зразків розміри ямок у зламах набагато менші, ніж за випробувань на ударний згин. Це свідчить про те, що при переході до більш жорсткого виду випробувань зростає кількість центрів коалесценції мікропустот. Це приводить до того, що кількість ямок у зламі зразка зростає, а їх розміри зменшуються і, як наслідок, енергоємність руйнування спадає.

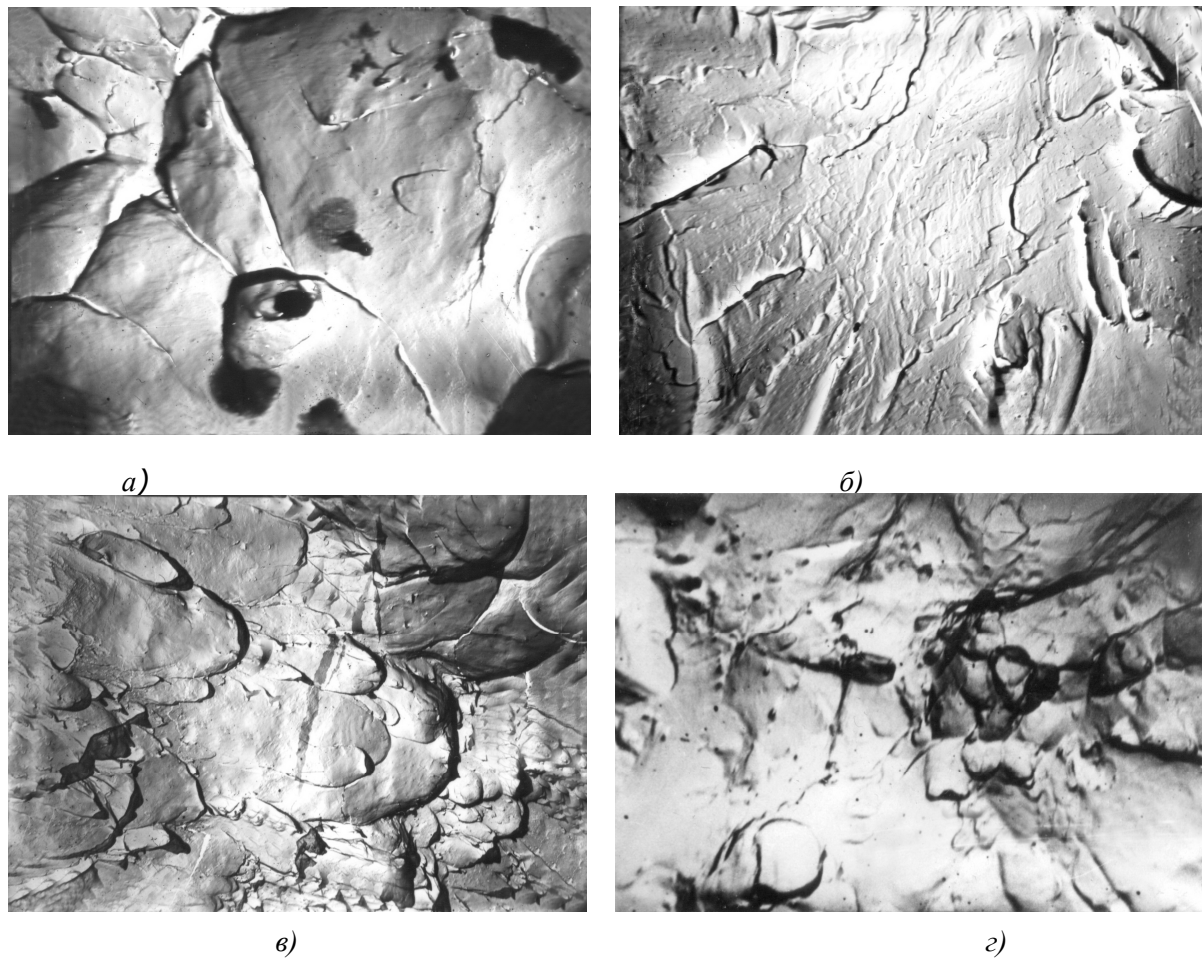
За температур, які забезпечували крихке руйнування зразків з неексплуатованої та експлуатованої сталі 17Г1С як за ударного згину, так і за ударного розтягу, мікрофрактографія зламів зразків мала споріднений характер – в усіх випадках переважали відкольні фасетки, що є типовим

для крихкого руйнування.

Як приклад, на рис. 6, б наведена фрактограма крихкого зламу, отриманого за ударного розтягу циліндричного зразка, виготовленого з експлуатованої сталі 17Г1С. Зафіксована відповідність розмірів відколу величинам феритних зерен. В перліті поширення тріщини дещо затруднене, що пов'язано з наявністю низки перепон, які утворюють пластини цементиту.

В той же час при випробуванні зразків з цієї сталі та аналогічній температурі ( $T_{\text{випр}}=273$  К) на ударний згин спостерігали крихко-в'язке руйнування. З рис. 4, а видно, що робота поширення тріщини в цьому випадку знаходиться в інтервалі температур крихко-в'язкого переходу. Це також підтверджується електроннофрактографічним аналізом. З рис. 6, г видно, що на основному фоні крихких мікрофрактографічних утворень проглядається невелика ділянка з ямками, що є ознакою в'язкого руйнування.

Приведемо тепер порівняння чутливості до експлуатаційної деградації трубопровідних сталей за результатами випробувань на статичну тріщиностійкість та ударний розтяг циліндричних зразків з кільцевими осесиметричними тріщинами. В роботах [2, 10] встановлено, що параметри короткочасної тріщиностійкості трубних сталей є чутливіші до їх спаду за умов експлуатаційної деградації. Даний спад визначаємо відношенням характеристики тріщиностійкості експлуатованої сталі до відповідної характеристики неексплуатованої сталі. В табл. 1 подані підраховані результати.



а, в – сталь, що не була в експлуатації; б, г – експлуатована сталь; а, в –  $T_{випр}=293\text{ K}$ ; б, г –  $T_{випр}=273\text{ K}$  ( $\times 4700$ )

Рисунок 6 – Електронні фрактографії зламів зразків, отриманих при ударному згині балкових зразків з тріщинами (а, г) та ударному розтягу циліндричних зразків з кільцевими осесиметричними тріщинами (б, в)

Таблиця 1 – Спад параметрів статичної тріщиностійкості та роботи поширення тріщини за ударного розтягу циліндричних зразків експлуатованої сталі 17Г1С

Параметр	$J_{1C}^{\delta} / J_{1C}$	$J_{0,2}^{\delta} / J_{0,2}$	$\delta_K^{\delta} / \delta_K$	$a_{cr.}^{\delta\delta} / a_{cr.}^{\delta}$
Зовнішня поверхня	0,6	0,8	0,81	0,52
Внутрішня поверхня	0,35	0,57	0,63	0,29

Метал, розміщений ближче до внутрішньої поверхні стінки труби, показав найнижчі значення параметрів тріщиностійкості. Очевидно, що найінтенсивнішу деградацію зазнають внутрішні шари стінки труби. Це пов'язано, на наш погляд, з транспортуванням середовища, яке інтенсифікує наводнювання металу зсередини труб.

Як видно з наведених в табл. 1 даних,

найчутливішим до деградації трубної сталі 17Г1С виявився показник роботи поширення тріщини за ударного розтягу циліндричних зразків з кільцевою осесиметричною тріщиною.

### ВИСНОВКИ

Співставлення експериментальних даних, отриманих за ударного розтягу циліндричних зразків з кільцевими тріщинами, з результатами



випробувань на статичний розтяг показало, що при більших швидкостях деформації та низьких температурах випробувань значення критичної температури холодноламкості для досліджуваних сталей значно вище.

Отже, ударний розтяг циліндричних зразків з кільцевими осесиметричними тріщинами показав, що цей метод за наявності ефективного способу створення кільцевих осесиметричних втомних тріщин є простим і надійним засобом для оцінки схильності до крихкого руйнування конструкційних матеріалів та їх чутливості до експлуатаційної деградації і може бути рекомендований для широкого використання.

В подальшому планується вивчення придатності до оцінювання експлуатаційної деградації трубних сталей інших методів, в першу чергу неруйнівних.

1. Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т.11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів / Г. М. Никифорчин, С. Г. Поляков, В. А. Черватюк [та ін.] / Під ред. Г. М. Никифорчина. – Львів: Сколом, 2009. – 504 с. 2. Петрина Д. Ю. Вплив експлуатаційної деградації матеріалів і зварних з'єднань магістральних нафтогазопроводів на їх працездатність: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.15.13 «Трубопровідний транспорт, нафтогазо-сховища» / Д. Ю. Петрина. – Івано-Франківськ, 2011. – 36с. 3. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие в 4т. / Под общ. ред. Панасюка В. В. – Т 3: Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения / С. Е. Ковчин, Е. М. Морозов. – К.: Наукова думка, 1988. – 436 с. 4. Відомчі будівельні норми України: ВБН В.2.3–

00018.201.04–2000. Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами. – К.: Держнафтогазпром, 2000. – 57 с. 5. ДСТУ–НБВ.2.3.21:2008. Настанова визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами. – К.: Мінрегіонбуд України, 2008. – 68с. 6. Крижанівський Є. І. Оцінка тріщиностійкості магістральних трубопроводів з позиції  $\delta_K$ -моделі / Є. І. Крижанівський, В. П. Рудко, О. О. Онищук, Д. Ю. Петрина // Науковий вісник ІФНТУН, 2002. – № 2(3). – С. 66–73. 7. Крижанівський Є.І. Оцінка тріщиностійкості магістральних трубопроводів за критичними коефіцієнтами інтенсивності напружень / В. П. Рудко, Є. І. Крижанівський, О. О. Онищук, Д. Ю. Петрина // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ, 2003. – № 1(6). – С. 6–11. 8. Gabetta G. In-service degradation of gas trunk pipeline X52 steel /G. Gabetta, H. M. Nykyforchyn, D. Yu. Petryna [та інші] / Фіз. – хім. механіка матеріалів. – 2008. – № 1. – С. 88–99. 9. Пат. 85519 Україна, МПК G01N3/20 (2006.01). Спосіб нанесення осесиметричних вихідних втомних тріщин на циліндричних зразках / Петрина Д. Ю., Роп'як Л. Я.; патентовласник ІФНТУНГ. – № а2007 05249; заявл. 14.05.2007; опубл. 26.01.2009, Бюл. № 2. 10. Петрина Д. Ю. Тріщиностійкість тривало експлуатованих трубних сталей нафтогазопроводів / Д. Ю. Петрина // Науковий вісник ІФНТУНГ, 2010. – № 2(24). – С. 64–72.

Поступила в редакцію 15.03.2012 р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук., проф. Лютак І. З.