

ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТОВАНИХ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ НАФТОГАЗОПРОВОДІВ

Д.Ю.Петрина

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42342,
e-mail: public@nung.edu.ua

Робота присвячена встановленню впливу тривалої експлуатації сталей магістральних нафтогазопроводів на їх схильність до крихкого руйнування. Визначені характеристики статичної та циклічної тріщиностійкості трубних сталей для матеріалів експлуатованої та вихідної труб.

Ключові слова: нафтогазопроводи, експлуатована труба, вихідна труба, трубна сталь, статична тріщиностійкість, циклічна тріщиностійкість.

Робота посвящена установлению влияния длительной эксплуатации сталей магистральных нефтегазопроводов на их склонность к хрупкому разрушению. Определены характеристики статической и циклической трещиностойкости трубных сталей для материалов эксплуатируемой и исходной труб.

Ключевые слова: нефтегазопроводы, эксплуатируемая труба, исходная труба, трубная сталь, статическая трещиностойкость, циклическая трещиностойкость.

The work is devoted to the determination of effect of long-term service of oil-gas-trunk pipelines steels on its brittle fracture. The characteristics of static and cyclic fracture toughness of pipe steels have been determined for the materials of exploited and unexploited pipes.

Keywords: oil and gas pipelines, exploited pipe, unexploited pipe, pipe steel, static fracture toughness, cyclic fracture toughness.

Магістральні та місцеві газопроводи в Україні мають довжину понад 35 тис. км, нафтопроводи – понад 4,7 тис. км. Вони належать до об'єктів тривалої експлуатації, до надійної роботи яких висуваються високі вимоги, оскільки їх непрогнозовані руйнування призводять до значних економічних втрат і важких екологічних наслідків [1]. Проблема ускладнюється тим, що більшість нафтогазопроводів відпрацювала свій розрахунковий ресурс. Тривала взаємодія металу труби з транспортованим середовищем призводить не лише до інтенсифікації корозійних процесів, але й деградації фізико-механічних властивостей матеріалу стінки труби [2, 3]. Як наслідок, сталь різко окрихчується, в ній утворюються тріщиноподібні дефекти, які можуть спричинити руйнування труби. Тому оцінка зміни тріщиностійкості тривало експлуатованих трубних сталей є необхідною для прогнозування залишкового ресурсу роботи магістральних нафтогазопроводів.

Досліджували сталі 17Г1С і 17Г2С у вихідних станах і після 40 років експлуатації на магістральному газопроводі та 28 років експлуатації на магістральному нафтопроводі відповідно. Зразки з експлуатованих труб виготовляли із верхньої та нижньої ділянок. Напрямок вирізки був перпендикулярний до твірної труби. Параметри статичної та циклічної тріщиноотривкості визначали шляхом випробувань компактних зразків [3]. При випробуваннях на статичну тріщиностійкість на двокоординатному самописці ПДС-021 записували діаграму руйнування, дотримуючись рекомендацій [4]. Величину коефіцієнта інтенсивності напружень K_Q визначали за формулою [4]

$$K_Q = \frac{P_Q}{t\sqrt{b}} \cdot 13,74(1 - 3,38\lambda + 5,57\lambda)^2,$$

де: P_Q – зусилля, за якого починає рости тріщина;

t – товщина зразка;

b – відстань від осі прикладання сили до статичної частини зразка;

$\lambda = \ell / b$ – відносна довжина тріщини, де ℓ – довжина тріщини.

Характеристики статичної тріщиностійкості визначають умови переходу тріщини в нестійкий стан. За плоскодеформованого стану $K_{\max} = K_{1C}$.

Випробування на циклічну тріщиностійкість проводили за асиметричного циклічного розтягу зразків, дотримуючись рекомендацій [5]. За результатами експериментів будували кінематичні діаграми втомного руйнування (КДВР), які слугували базою для визначення нижнього порогового значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_{th} , верхнього критичного значення K_{fc} та швидкості поширення втомної тріщини в середній частині діаграми.

Результати експериментальних випробувань, одержані в ході визначення механічних характеристик сталі 17Г1С розтягом після експлуатації впродовж 40 років та контрольної труби, наведені в роботі [3].

Випробування розтягом зразків із сталі 17Г2С проводили у середовищі нафти. Результати цих досліджень наведені в таблиці 1.

Аналіз результатів досліджень свідчить, що величина границі міцності експлуатованої сталі знизилась на 10,5%, а величина відносно-

Таблиця 1 – Механічні характеристики сталі 17Г2С у нафті

Місце вирізання зразка	Час експлуатації, роки	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %
Контрольна труба	–	600	427	24,7	52,6
Верх	28	537	421	22,1	39,1
Низ	28	536	422	22,3	39,0

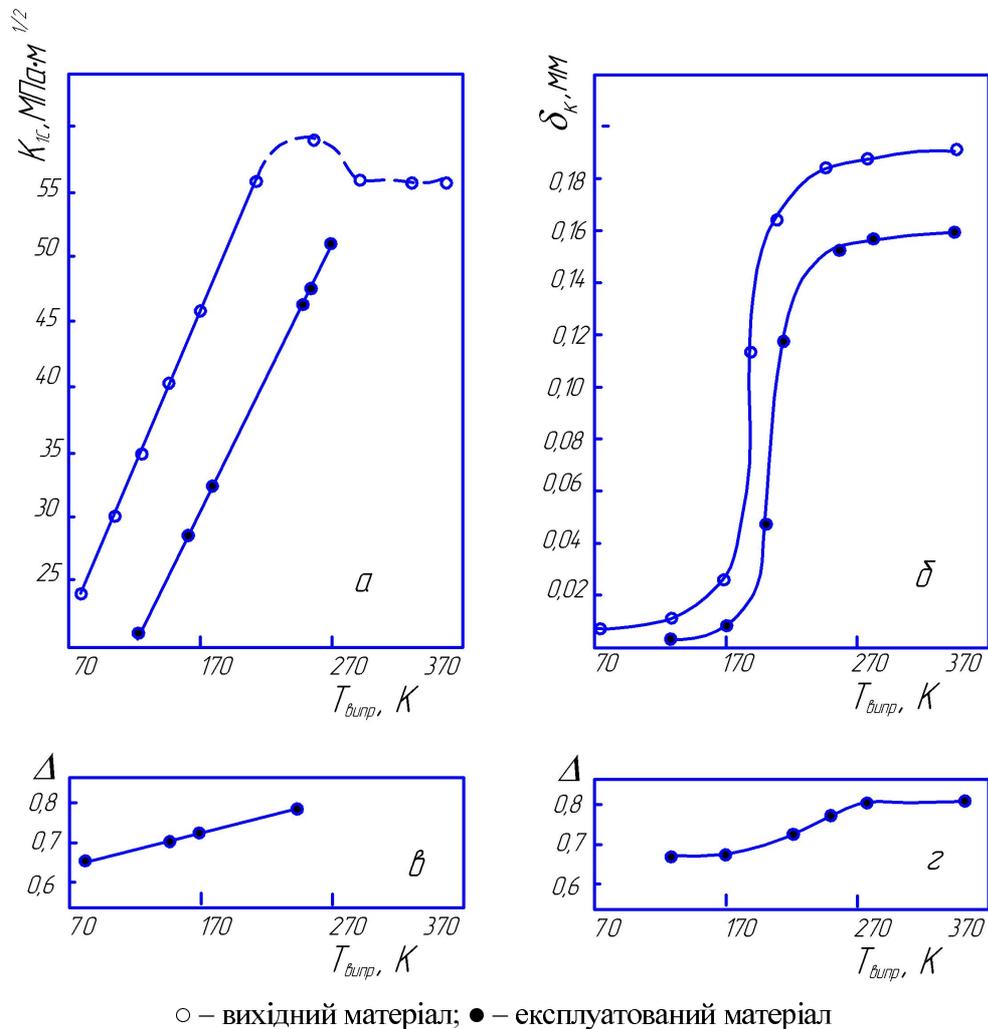


Рисунок 1 – Зміна характеристик в'язкості руйнування K_{IC} (а) та δ_k (б) сталі 17Г1С залежно від температури випробувань та показник відносних змін Δ характеристик K_{IC} (в) і δ_k (г) експлуатованої сталі, віднесених до їх початкового значення

го звуження – на 25,7%. В той же час величина напружень плинності знизилась тільки на 1,2%, а відносного видовження – на 9,7%. Отже, найбільш чутливими характеристиками до деградації сталі 17Г2С є границя міцності σ_B і відносне звуження ψ . Зміна цих характеристик вказує на вичерпування запасу міцності та пластичності сталі 17Г2С за час її експлуатації. Досліджувані механічні характеристики практично не залежали від місця вирізки зразків з труб.

Сьогодні загальновідомо, що процеси старіння та деградації більшою мірою проявляються в зміні характеристик тріщиностійкості.

В роботі [6] було показано, що за температур випробувань більше 240К параметр K_{IC} стає недостовірним. При вищих температурах випробувань оцінку тріщиностійкості рекомендовано проводити за δ_k - критерієм. Тому були проведені температурні випробування сталі 17Г1С у вихідному стані та після 40 років експлуатації за двома критеріями в'язкості руйнування – K_{IC} і δ_k . Результати наведені на рис. 1. Пунктирна крива на рис. 1, а відповідає недостовірним значенням K_{IC} . Тому й виникає протиріччя, що тріщиностійкість, визначена за параметром K_{IC} в діапазоні температур ви-

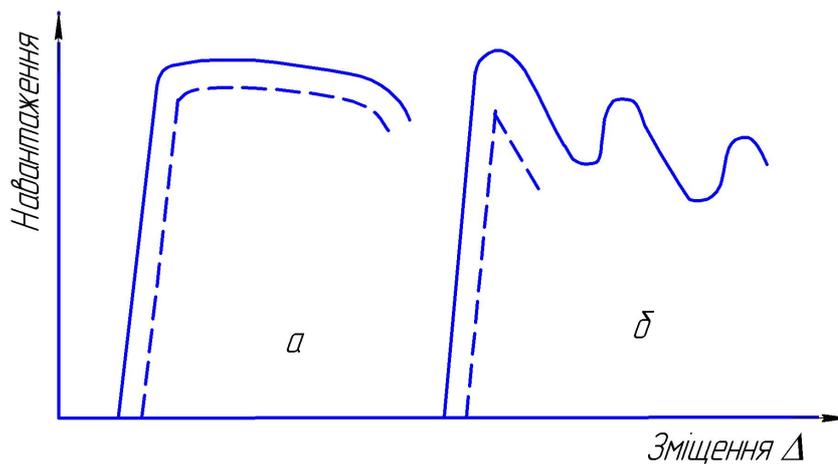


Рисунок 2 – Характерні діаграми руйнування балочних зразків, вирізаних з контрольних труб (а) і експлуатованих впродовж 40 років (б), з наведеними втомними тріщинами (поширення тріщини за наявності в її вершині дистильованої води показано штриховими лініями)

пробувань 240...370К, падає, а визначена за параметром δ_K – зростає (рис. 1, б). Насправді при оцінці K_{1C} не виконуються умови плоскої деформації.

Оцінку чутливості параметрів K_{1C} і δ_K матеріалу труб до експлуатаційної деградації здійснено через показник відносних змін Δ , що представляє характеристики в'язкості руйнування тривало експлуатованої сталі 17Г1С, віднесені до їх початкового значення (рис. 1 в, г). Наведені дані свідчать про високу чутливість параметрів K_{1C} і δ_K до експлуатаційної деградації сталі 17Г1С, причому вона різко зростає з пониженням температури випробування.

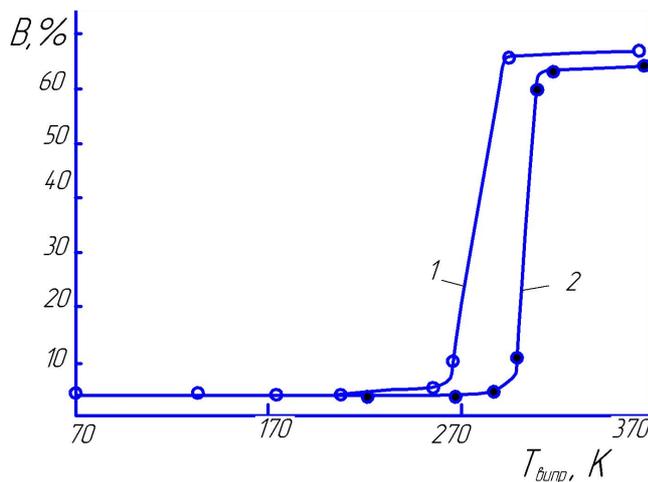
Тривала експлуатація сталей змінювала також характер діаграм руйнування балочних зразків з наведеними втомними тріщинами (рис. 2). Зразкам, вирізаним з контрольних труб, властивий плавний характер діаграм руйнування (рис. 2 а). При випробуваннях в середовищі дистильованої води величина критичного навантаження, за якою починається ріст тріщини, падає (рис. 2 а, штрихова лінія), а значення δ_K зменшується майже на 7%. У ході всіх випробувань спостерігали ріст тріщини тільки за в'язким механізмом. Перехід до випробувань зразків, вирізаних з експлуатованих протягом 40 років труб, призводить до суттєвої зміни, насамперед, характеру нижньої вітки діаграм руйнування. На ній зафіксовані численні “стрибки”, що свідчить про багаторазову зміну механізму руйнування (рис. 2 б). Спочатку навантаження зростає до максимальної величини, що призводить до початкового спонтанного поширення тріщини внаслідок деградації матеріалу, яка проявляє себе в його різкому окрихченні. Однак даний матеріал має ще досить високу в'язкість. Тому накопиченої енергії в системі машина-зразок недостатньо для поширення тріщини через весь переріз зразка. Початкове спонтанне поширення тріщини припиняється. Знову відбувається зростання величини навантаження, повільне поширення

тріщини за в'язким механізмом і додаткове розкриття попередньо видовженої тріщини. Досягнувши критичного значення δ_K у вершині, тріщина повторно поширюється за крихким механізмом. Такі цикли повторюються до повного руйнування зразка. Що стосується поширення тріщин в зразках, вирізаних з експлуатованих труб, за наявності в їх вершинах дистильованої води, то воно відбувалося за крихким механізмом (рис. 2 б, штрихова лінія).

Про перехід сповільненого поширення тріщини до спонтанного свідчать також зміни в мікроструктурі зламу. При аналізі макрозламів під лупою стрибкоподібний характер поширення тріщин відображається на них у вигляді поперечних смужок. Велику роль у характері поширення тріщини відіграють зрізові губки на бокових поверхнях зразка. Зараз загальноприйнято визначати характер руйнування зразків за часткою в'язкого зламу в його перерізі. Цю величину визначають за відношенням площі в'язкого зламу в плані зразка до всієї площі його зламу і позначають через B .

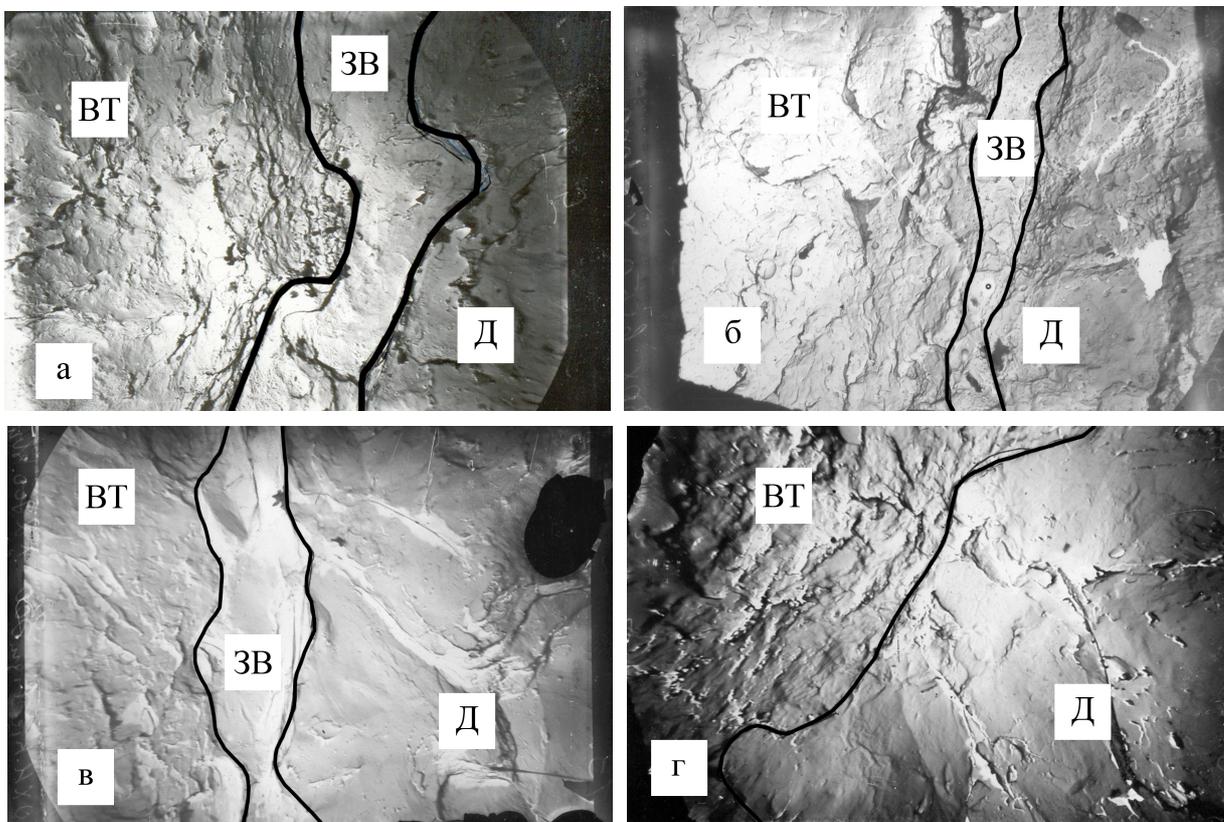
Дані відношення представлені на рис. 3 залежно від температур випробувань зразків, вирізаних з контрольних (1) і експлуатованих (2) труб. Вони відтворюють крихко-в'язкий перехід для зразків з наведеними тріщинами при випробуваннях на згин. З рисунка видно, що діапазон перехідних температур для зразків з експлуатованої сталі звужується порівняно з таким для контрольного металу. При цьому, більш чутливою характеристикою є нижня температура холодноламкості, яка зсувається для експлуатованої сталі вправо (тобто в бік більш високих температур) на 30...40 градусів порівняно з контрольною сталлю. Такий же зсув верхнього порога холодноламкості становить лише ~ 10 градусів.

Тому достовірні значення K_{1C} для деградованої сталі можна отримувати за температури не вище 270...280 К, а для контрольної сталі – за ~ 240 К.



○ – вихідний матеріал; ● – експлуатований матеріал

Рисунок 3 – Залежність частки в'язкого зламу від температури випробувань сталі 17Г1С

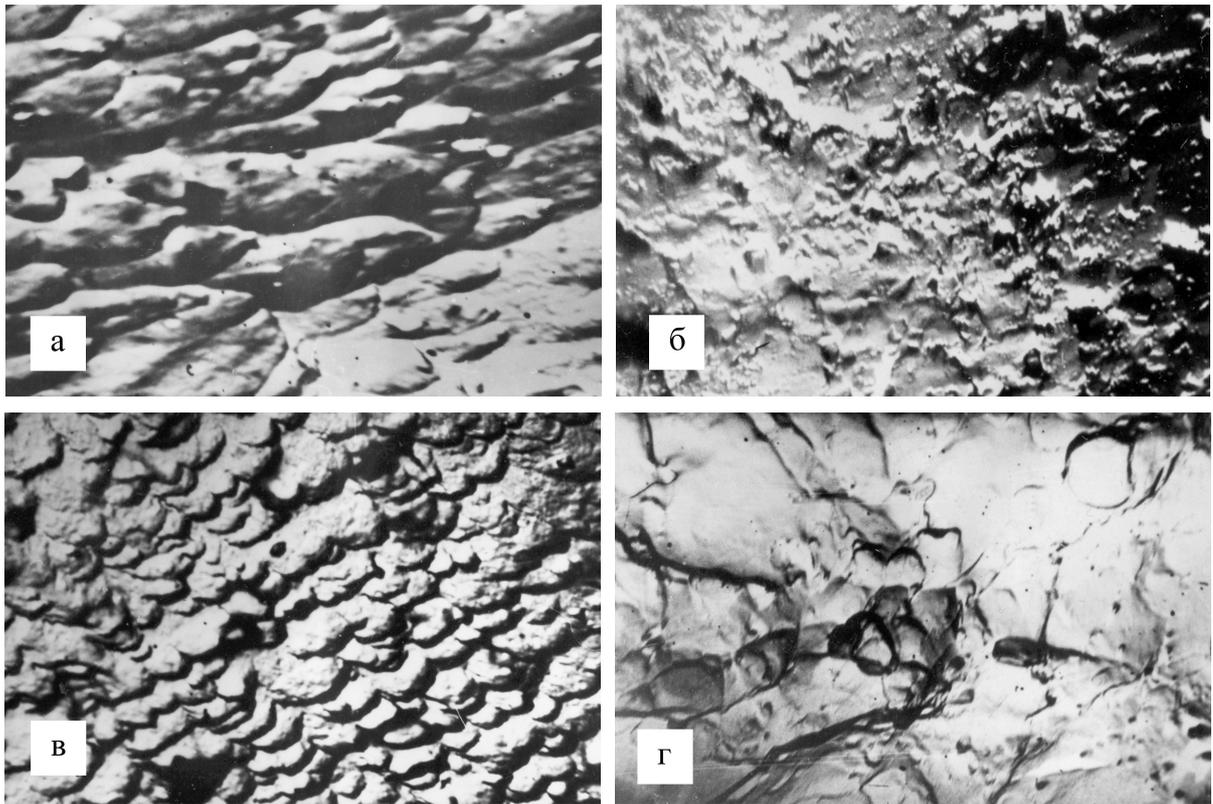


а,б – зразки, вирізані з контрольних труб; в,г – зразки, вирізані з експлуатованих труб;
а,в – випробування на повітрі; б,г – випробування у дистильованій воді
($T_{\text{випр}}=293\text{К}$. Масштаб 1×1500)

Рисунок 4 – Характерні мікрофрактограми стартівих ділянок поширення тріщин зламіть зразків, призначених для оцінки в'язкості руйнування

Мікрофрактографічні дослідження також показали відмінності в характері поширення тріщин у зразках, вирізаних з контрольних (рис. 4 а, б і 5 а, б) і експлуатованих (рис. 4 в, г і 5 в, г) труб. При цьому враховувалась специфіка електроннофрактографічної картини різних частин зламіть. Найскладнішу будову має центральна частина зламу (рис. 4). Тут до втомної ділянки (ВТ), яка відповідає нанесенню тріщин на зразках, призначених для оцінки в'язкості руйну-

вання, завжди прилягає зона витяжки (ЗВ). Остання переходить у ділянку димплів (Д), які до кінця покривають зони доламу зразків (рис. 5 а, в). Статистичні дослідження зон витяжок встановили, що з пониженням температур випробувань, ширина зони суттєво зменшується (рис. 6). У всьому діапазоні температур випробувань ширини зон витяжок зламіть зразків експлуатованих труб були меншими, ніж контрольних труб (порівняйте рис. 4, а і в, див рис. 6).



а,б – зразки, вирізані з контрольних труб; в,г – зразки, вирізані з експлуатованих труб;
а,в – випробовування на повітрі; б,г – випробовування у дистильованій воді
($T_{\text{випр}}=293\text{K}$. Масштаб 1x2700)

Рисунок 5 – Електронні фрактограми зон доламу зразків, призначених для оцінки в'язкості руйнування

Більш чутливими до спаду температур випробувань виявились структурні параметри деградованої сталі. У зламах зразків, які руйнувались за стрибкоподібним характером (рис. 2 б), з віддаленням від втомної зони спостерігається почергова зміна димплових і відпольних ділянок. Чим ширша зона витяжки, тим гладша її поверхня, на якій чітко проявляються хвилеподібні боріздки, що є наслідками поетапного зсувного поширення тріщини (рис. 4 в). Розміри димплів зон доламу зразків, вирізаних з контрольних і експлуатованих труб (порівняти рис. 5 а і в) суттєво відрізняються між собою: розміри димплів вихідного матеріалу були набагато більшими, ніж деградованого. Це свідчить про те, що в першому випадку в'язкому поширенню тріщини властиве більш високе енергоємне руйнування, ніж у другому.

Відзначимо також, що в роботі [6] була встановлена лінійна залежність між усередненою шириною зони витяжки і критичним розкриттям тріщини для неексплуатованої сталі 17Г1С. На цій основі запропонована аналітична оцінка критичного розкриття тріщини $\delta_{\text{к}}^a$ залежно від ширини зони витяжки \bar{a} та механічних характеристик сталі 17Г1С ($\sigma_{0,2}$, E і μ). З рис. 6 видно, що така ж лінійна залежність існує і для тривало експлуатованої сталі 17Г1С. Тому для аналітичної оцінки $\delta_{\text{к}\delta}^a$ деградованої

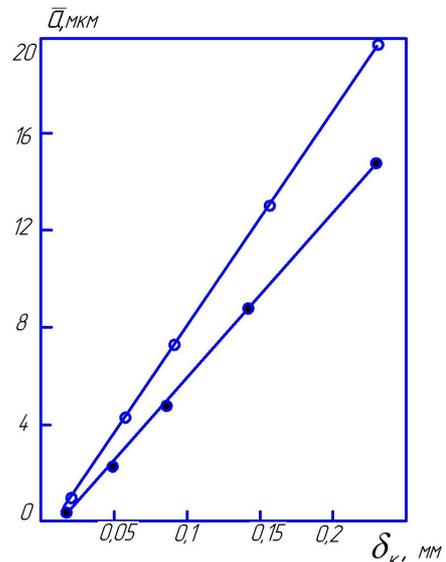


Рисунок 6 – Залежність ширини зони витяжки \bar{a} від $\delta_{\text{к}}$ при зміні температур випробувань для сталі 17Г1С для зразків, вирізаних з контрольних (○) і експлуатованих (●) труб

сталі отримане раніше співвідношення можна представити у вигляді:

$$\delta_{\text{к}\delta}^a = \frac{(1 - \mu_{\delta}^2) \cdot \sigma_{0,2}^{\delta}}{B \cdot E^{\delta}} (\bar{a}^{\delta} + A),$$

де: $\sigma_{0,2}^{\partial}$ – границя плинності деградованої сталі;

E^{∂} і μ_{∂} – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона деградованої сталі відповідно;

a^{∂} – усереднена ширина зони витяжки деградованої сталі.

Суттєвий вплив на в'язкість руйнування сталі 17Г1С мають поверхнево-активні робочі середовища. В дослідженнях за робоче середовище була прийнята дистильована вода. Вона зменшує δ_k неексплуатованої сталі майже на 7%. В той же час для експлуатованої сталі цей спад складає ~ 9%.

Для середовища проявляє себе в характері діаграм руйнування (рис. 2). Зразки, вирізані з контрольних труб, руйнуються у повітрі та воді практично за одним механізмом. Наявність води дещо зменшує величину критичного навантаження, за якого починається підростання тріщини (рис. 2а).

При випробуваннях у воді зразків, вирізаних з експлуатованих труб, на діаграмах руйнування зникає стрибкоподібний характер поширення тріщини, властивий випробуванням на повітрі (рис. 2б).

Електронно-фрактографічним аналізом встановлено, що під впливом середовища зона витяжки звужується, як для неексплуатованого матеріалу (порівняти рис. 4 а і б), так і для експлуатованого матеріалу. Причому більш чутливим до звуження зони витяжки під впливом середовища є експлуатований матеріал.

На деяких ділянках його зламів було навіть зафіксовано повне усунення зони витяжки (порівняти рис 4 в і г). В останньому випадку зона втомного руйнування переходить безпосередньо в зону в'язкого типу (площини гладкого розшарування та димпли). Зони доламу зберігають в основному в'язкий характер руйнування. Однак для неексплуатованого матеріалу димпли значно зменшують свої розміри та глибину (порівняти рис 5 а і б), що свідчить про більш низькоенергоємне руйнування в присутності дистильованої води. Димпли в зламах експлуатованого матеріалу переходять, як правило, в площини гладкого розшарування, які декоровані димплами (порівняти рис. 5 в і г), що також є наслідком зниження поверхневої енергії руйнування під впливом дистильованої води. Отже, адсорбційне зниження ефективної поверхневої енергії полягає, насамперед, у зменшенні ширини зони витяжки, що ослаблює її бар'єрну дію в поширенні тріщини та досягненні високого рівня в'язкості руйнування, а також в зменшенні розмірів димплів і перехід останніх в площини гладкого розшарування.

Визначено також характеристики статичної тріщиностійкості сталі 17Г2С за результатами експериментальних досліджень компактних зразків у нафті (таблиця 2).

Загалом вираз для коефіцієнта інтенсивності напружень можна представити у вигляді

$$K = \sigma \sqrt{\pi \ell} \cdot Y,$$

Таблиця 2 – Статична тріщиностійкість сталі 17Г2С у нафті

Місце вирізки зразка	Час експлуатації, роки	K_Q , МПа $\sqrt{м}$
Контрольна труба	-	55,3
Верх	28	43,6
Низ	28	44,02

де: σ – напруження, що діють у зоні розміщення тріщини;

ℓ – розмір тріщини;

Y – поправочна функція, що залежить від геометрії конструктивного елемента і тріщини та розподілу напружень у послабленому перерізі.

Для розв'язку цієї задачі необхідно знати розмір дефекту, його орієнтацію, слід побудувати тарувальну функцію, що пов'язано з багатьма труднощами. З метою оперативної оцінки стану сталі використовують метод порівняння вихідного та існуючого станів металу.

При геометричній подібності дефектів величина K пропорційна значенню σ і кореню квадратному з довжини тріщини ℓ . Отже, за однакових розмірів тріщини зниження руйнівного напруження в n разів призводить до спаду параметра K_c також в n разів. Ідентичний спад K_c можна отримати за тих же значень напружень, але для зменшених критичних розмірів тріщини в n^2 разів.

Так, статична тріщиностійкість сталі 17Г2С експлуатованої труби в середовищі нафти становить тільки ~ 79% від статичної тріщиностійкості вихідного матеріалу. Тріщиностійкість зменшилась приблизно на 21%, що може призвести до зниження граничного навантаження на матеріал труби в 1,21 разів.

Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами почали проводити з введенням будівельних норм [8]. Оцінка залишкової міцності трубопроводів проводиться за критичними коефіцієнтами інтенсивності напружень K_{IC} , однак довідникова література практично не містить інформації про K_{IC} трубних сталей. Це пов'язано з методичними труднощами при експериментальному визначенні параметра K_{IC} : для високопластичних трубних сталей важко створити умови плоскодеформованого стану в площині поширення тріщини, які відповідають вимогам лінійної механіки руйнування. Тому ці ж будівельні норми пропонують для визначення K_{IC} використовувати його кореляційні зв'язки з величиною ударної в'язкості [2]. Однак в нашій роботі [7] була встановлена відмінність між структурною чутливістю параметра K_{IC} і величиною ударної в'язкості в широкому діапазоні температур випробувань, що порушує між ними кореляційні

зв'язки і призводить до суттєвих похибок вимірювань величини в'язкості руйнування. В цій же роботі була встановлена хороша кореляція між параметрами K_{1C} та показниками механічних властивостей неексплуатованої сталі 17Г1С при розтязі. З аналізу кривої на рис. 7 отримали рівняння [7]

$$K_{1C} = \frac{b}{1 - \frac{k}{\sigma_B - \sigma_B + \sigma_T}}, \quad (1)$$

де: σ_B і σ_T – границі міцності та плинності неексплуатованої сталі 17Г1С відповідно;

b і k – постійні матеріалу.

В даній роботі аналогічні дослідження на предмет встановлення кореляції між параметрами K_{1C} та показниками механічних властивостей тривалоексплуатованої впродовж 40 років сталі 17Г1С при розтягуванні.

Спочатку знайшли температурні залежності границі міцності і границі плинності деградованої сталі 17Г1С (рис. 8). Для цієї ж сталі з рис. 1 вибираємо значення K_{1C} для відповідних температур випробувань.

За методикою, розробленою в роботі [7], обчислимо співвідношення $K_{1C} / \sigma_B + \sigma_{0,2}$ і K_{1C} / σ_B та знаходимо координати точок a' , b' , c' , d' , які лягли практично на пряму лінію 2 (рис. 7). Враховуючи ідентичність залежностей 1 і 2, можна зробити висновок про доцільність використання формули (1) для визначення величини параметра K_{1C} за результатами випробувань деградованої сталі на розтяг. В даному випадку формулу (1) можна подати у вигляді

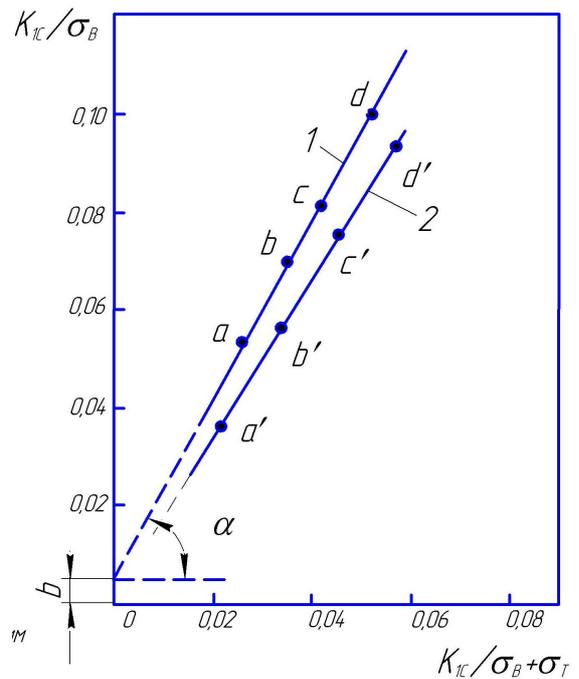
$$K_{1C}^\partial = \frac{b^\partial}{1 - \frac{k^\partial}{\sigma_B^\partial - \sigma_B^\partial + \sigma_T^\partial}}, \quad (2)$$

де: K_{1C}^∂ – в'язкість руйнування експлуатованої сталі;

σ_B^∂ і σ_T^∂ – відповідно границі міцності та плинності експлуатованої сталі;

b^∂ і k^∂ – постійні деградованого матеріалу.

Циклічна тріщиностійкість сталі характеризується кінетичною діаграмою втомного руйнування (КДВР), яка встановлює залежність між швидкістю росту втомної тріщини $V = dl/dN$ і розмахом коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK у вершині тріщини. Використовуючи залежність $dl/dN = f(\Delta K)$ можна визначити залишкову довговічність сталі, тобто число циклів, необхідне для зростання тріщини від початкового розміру ℓ_0 до критичного ℓ_K .



a, a' - $T_{\text{випр}}=73\text{K}$; b, b' - $T_{\text{випр}}=125\text{K}$;
 c, c' - $T_{\text{випр}}=170\text{K}$; d, d' - $T_{\text{випр}}=170\text{K}$

Рисунок 7 – Залежності $K_{1C} / \sigma_B - K_{1C} / \sigma_B + \sigma_T$ за різних температур випробувань неексплуатованої (1) та експлуатованої (2) сталей 17Г1С

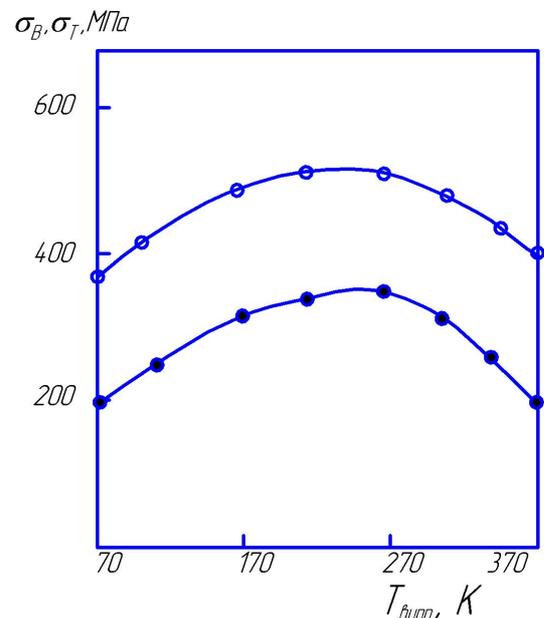


Рисунок 8 – Температурні залежності границі міцності (○) та границі плинності (●) експлуатованої сталі 17Г1С

Середньоамплітудні ділянки КДВР у діапазоні зміни швидкостей росту тріщини $10^{-8} \dots 10^{-6}$ м/цикл описуються загальновідомою формулою Періса

$$dl/dN = C(\Delta K)^n,$$

де C і n – константи системи “середовище-матеріал”.

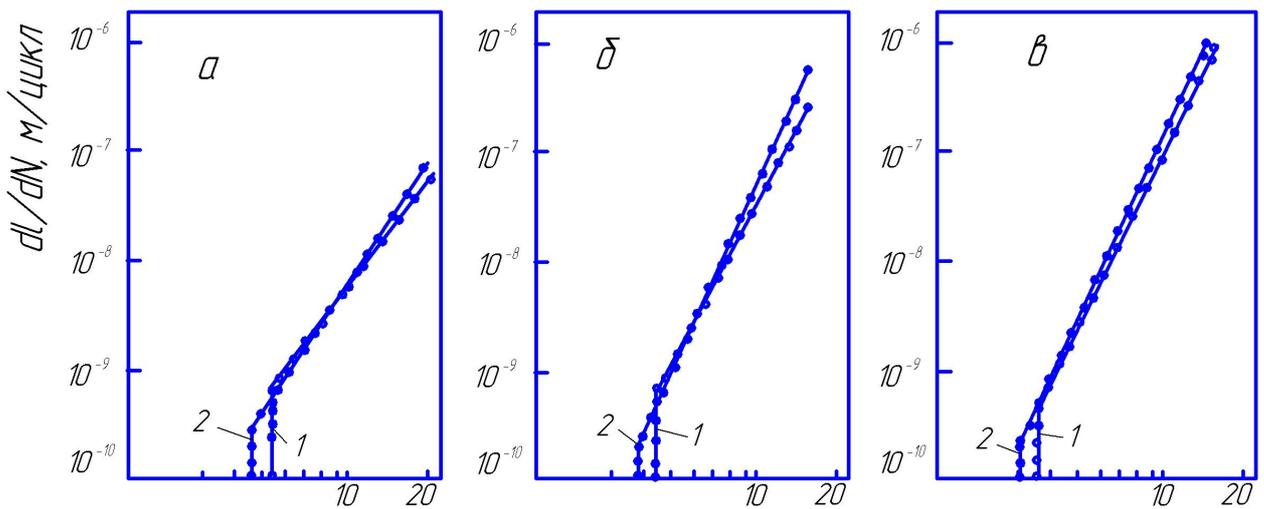


Рисунок 9 – Циклічна тріщиностійкість неексплуатованої (1) та експлуатованої (2) сталей 17Г1С на повітрі (а), у дистильованій воді (б) та 3%-ному розчині NaCl (в)

В роботі проведені дослідження циклічної тріщиностійкості неексплуатованої та експлуатованої впродовж 40 років сталей 17Г1С. Частота циклічного навантаження становила 1 Гц, коефіцієнт асиметрії циклу навантаження – $R = 0,8$. Випробування проводили на повітрі, у дистильованій воді (рН6,7) і в 3%-ному розчині NaCl (рН 6,5).

Аналіз результатів досліджень, представлених на рис. 9, свідчить, що з переходом випробувань від менш агресивних до більш агресивних середовищ (повітря → дистильована вода → 3%-ний розчин NaCl) циклічна тріщиностійкість неексплуатованої та експлуатованої сталей знижується. До впливу середовища більш чутливим проявив себе експлуатований метал.

Встановлено ступінь впливу корозійно-агресивних середовищ на характер поширення втомних тріщин у сталі 17Г1С. Так, при випробуваннях експлуатованих сталей у 3%-ному розчині NaCl значення порогових коефіцієнтів інтенсивності напружень K_{th} знижуються приблизно в 1,6 разів, а критична величина K_{fc} – у ~ 1,5 разів порівняно з аналогічними випробуваннями контрольної сталі на повітрі.

В таблиці 3 наведені характеристики циклічної тріщиностійкості для експлуатованої та неексплуатованої сталі 17Г2С, одержані під час випробувань зразків у нафті

Таблиця 3 – Циклічна тріщиностійкість сталі 17Г2С у нафті

Місце вирізання зразка	Час експлуатації, роки	$K_{th},$ $МПа\sqrt{м}$	$K_{fc},$ $МПа\sqrt{м}$
Контрольна труба	–	6,970	89,0
Верх	28	6,230	84,0
Низ	28	6,211	82,0

Порівняння КДВР для матеріалу низу і верху експлуатованої труби свідчить про те, що нижня частина труби зазнала більш суттєвої деградації. Тому подальші зіставлення характеристик в'язкості руйнування з вихідним матеріалом будемо проводити тільки для нижньої частини труби.

Про зміну опірності деградованого матеріалу втомному руйнуванню судять за спадом нижнього порогового значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_{th} і верхнього критичного значення K_{fc} , а також ростом швидкості поширення втомної тріщини в середній ділянці КДВР. З таблиці 3 видно, що в той час, коли зниження порогового коефіцієнта інтенсивності напружень для деградованого матеріалу становить ~ 11%, то параметр K_{fc} зазнав спаду тільки на ~ 7,9%. Отже, характеристика K_{th} більш чутлива до деградаційних процесів сталі 17Г2С. Зниження коефіцієнта K_{th} на 11% призводить до спаду порогової величини діючих напружень в 1,1 разів або зменшення безпечних розмірів тріщин в 1,2 рази. Що стосується швидкості росту втомної тріщини, то вона зростає в 1,6 разів, що призводить до спаду загального залишкового ресурсу магістрального нафтопроводу в 1,6 разів.

Висновки. Встановлено, що після 40-річної експлуатації магістральних газопроводів із сталі 17Г1С і 28-річної експлуатації магістральних нафтопроводів із сталі 17Г2С їх фізико-механічні характеристики значно погіршуються.

Найбільш чутливими до деградації є характеристики тріщиностійкості. Їх чутливість зростає з пониженням температури випробувань і дії робочих корозійно-активних середовищ. Так, спад температури випробувань від кімнатної на 100...150К знижує δ_K деградованої сталі 17Г1С на 20% більше, ніж неексплу-

атована сталь; дистильована вода зменшує δ_K контрольної сталі менш як на 7%, а для експлуатованої сталі цей спад складає ~9%. Дані результати підтверджені електроннофрактографічним аналізом зламів зразків.

Статична тріщиностійкість сталі 17Г2С експлуатованої сталі в середовищі нафти становить тільки ~79% статичної тріщиностійкості вихідного матеріалу.

Визначення величини K_{1C} за результатами випробувань на розтяг для тривалоексплуатованих сталей слід визнати доцільним.

З переходом випробувань від менш агресивних до більш агресивних середовищ циклічна тріщиностійкість неексплуатованої та експлуатованої сталей знижується. До впливу середовища більш чутливим є експлуатований метал. Так, у 3%-ному розчині NaCl значення K_{1C} знижуються приблизно в 1,6 разів, а K_{fc} – в 1,5 рази порівняно з аналогічними випробуваннями контрольної сталі на повітрі.

Характеристика циклічної тріщиностійкості K_{1C} для сталі 17Г2С після 28 річної експлуатації знизилась при випробуваннях у нафті на 11%, а швидкість поширення втомної тріщини зросла в 1,6 разів.

Література

1 Бут В.С. Стратегія розвитку технологій ремонту діючих магістральних трубопроводів / В.С. Буй, О.І. Олійник // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин; під заг. ред. Б.Є. Патона. – Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. – 2006. – С. 491-496.

2 Особливості корозії та корозійно-механічного руйнування тривало експлуатованих сталей магістральних нафтопроводів / [О.І. Звірко, З.В. Слободян, О.Т. Цирульник та ін.] // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – № 2. – С. 81-86.

3 Воднева деградація тривало експлуатованих сталей магістральних газопроводів / [О.Т. Цирульник, Г.М. Никифорчин, Д.Ю. Петрина та ін.] // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – № 5. – С. 97-104.

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

5 Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении: методические указания. – М., 1993. – 53 с.

6 Оцінка тріщиностійкості магістральних трубопроводів з позиції δ_K -моделі / Є.І. Крижанівський, В.П. Рудко, О.О. Онищук, Д.Ю. Петрина // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2002. – № 2. – С. 66-73.

7 Оцінка тріщиностійкості магістральних трубопроводів за критичними коефіцієнтами інтенсивності напружень / Є.І. Крижанівський, В.П. Рудко, О.О. Онищук, Д.Ю. Петрина // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 1. – С. 6-11.

8 ВБН В.2.3-00018201.04-2000. Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами. – К.: Держнафтогазпром, 2000. – 57 с.

Стаття поступила в редакційну колегію
05.05.10

Рекомендована до друку професором
В.Я.Грудзом