

# ФРАКТОДІАГНОСТИКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СТАЛЕЙ РІЗНОЇ МІЦНОСТІ ДЛЯ ГАЗОГОНІВ

Г. В. Кречковська, О. З. Студент

Фізико-механічний інститут Г. В. Карпенка НАН України, Львів

The results of the fractography investigation of the gas pipeline steels of the various strength levels in the initial state and after operation are presented. The influence of operation degradation and strength level of steels on their fracture mechanisms after tension testing on air were analyzed. A number of fractographic features caused by service degradation of steels with various strength levels was shown. Macrot texture in the central part of the fracture surfaces and deep macro- and microstratifications in the direction of rolling steels associated with the steel damages during operation were revealed.

Фрактодіагностика – це один із нових інформативних науково-дослідних напрямів оцінювання реального технічного стану експлуатованих конструкційних сталей, основним інструментом якого є порівняння мікрособливостей зламів елементів конструкцій, пошкоджених в реальних технологічних умовах експлуатації об'єкта, і лабораторних зразків, зруйнованих за контрольованих умов (силових, температурних тощо). На сьогодні фрактографічний метод використовують для експертизи пошкоджених елементів об'єктів тривалої експлуатації [1, 2]. Він спрямований на з'ясування причин і встановлення хронології не прогнозованих руйнувань та для оцінювання технічного стану критично експлуатованого металу [3]. Такі експертизи визначають, що спричинило руйнування елемента конструкції: погіршення технічного стану металу (за мікроструктурою та фізико-механічними властивостями) чи порушення технології під час обслуговування експлуатованого об'єкта. З'ясування інтенсивності пошкоджуваності є основою для діагностування поточного стану об'єкта та необхідною передумовою для прогнозування можливості його руйнування. Адже кількісні оцінки фрактографічних ознак зламів пошкоджених елементів конструкцій, пов'язаних з розпорошеною пошкодженістю металу в часі експлуатації, відкривають перспективу використання баз даних щодо фізико-механічних властивостей сталей, експлуатованих у відповідних технологічних процесах, для визначення поточного технічного стану експлуатованого металу. Але інтерпретація і класифікація масиву фрактографічних ознак руйнування конструкційних матеріалів вимагає інформації про їх характер за дії технологічних чинників впливу (характер навантаження, середовище, температурний режим тощо) в контрольованих лабораторних умовах. Результати, наведені в цій роботі, є важливим наближенням у напрямку досягнення цієї мети.

**Об'єкт досліджень.** Дослідили механічні характеристики за одновісного розтягу на повітрі гладких осьових зразків трьох сталей різного класу міцності 17Г1С, Х60 та Х70 у вихідному стані та після експлуатації на газогонях та фрактографічні особливості їх руйнування. Фрактографічні особливості руйнування сталей здійснили на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP.

**Результати досліджень.** Механічні характеристики сталей наведено в табл. 1. За обома характеристиками міцності очевидне незначне зміцнення всіх трьох досліджених сталей внаслідок експлуатації за одночасного зниження (для сталей 17Г1С та Х60) або практичної незмінності (для сталі Х70) обох характеристик пластичності. Причому найбільше зміцнилася сталь 17Г1С (її значення  $\sigma_B$  зросло на 11 %, тоді як сталі Х70 лише на 4 %). Зрозуміло, що внаслідок експлуатації її характеристики пластичності знизилися також найбільше (її значення  $\delta$  зменшилося на 32%, а  $\Psi$  - на 18%, тоді як зміна цих характеристик для сталі Х70 не перевищувала 3%, що не виходить за межі розкиду даних).

Макрофрактографічний аналіз зламів зразків сталі 17Г1С у вихідному стані (рис. 1а) та після експлуатації (рис. 1б) виявив в'язкий механізм руйнування з формуванням в обох випадках зламів типу чашка-конус. Разом з тим на макрозламі зразка експлуатованої сталі, по-перше, кут нахилу його конусної частини до нормально орієнтованої центральної частини значно менший, ніж на зламі сталі у вихідному стані. Це ознака зростання ролі відривних

процесів під час формування не лише центральної, але і конусної частини зламу зразка з експлуатованої сталі. По-друге, в центральній частині зламу експлуатованої сталі чітко проявилася текстура, яка практично не проглядалася на зламі зразка з не експлуатованої сталі. Отже, внаслідок експлуатації навіть на макрорівні з'явилися ознаки окрихчення сталі.

Таблиця 1. Механічні характеристики сталей 17Г1С, Х70 та Х60

Сталь	Стан металу (тривалість експлуатації)	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %
17Г1С	Вихідний	565	483	26,0	78,0
	експлуатований ( $\tau=30$ років)	627	502	20,2	64,0
Х60	вихідний	585	485	23,5	82,0
	експлуатований ( $\tau=25$ років)	633	502	18,5	71,1
Х70	вихідний	615	521	22,3	73,4
	експлуатований ( $\tau=37$ років)	641	547	23,0	74,5

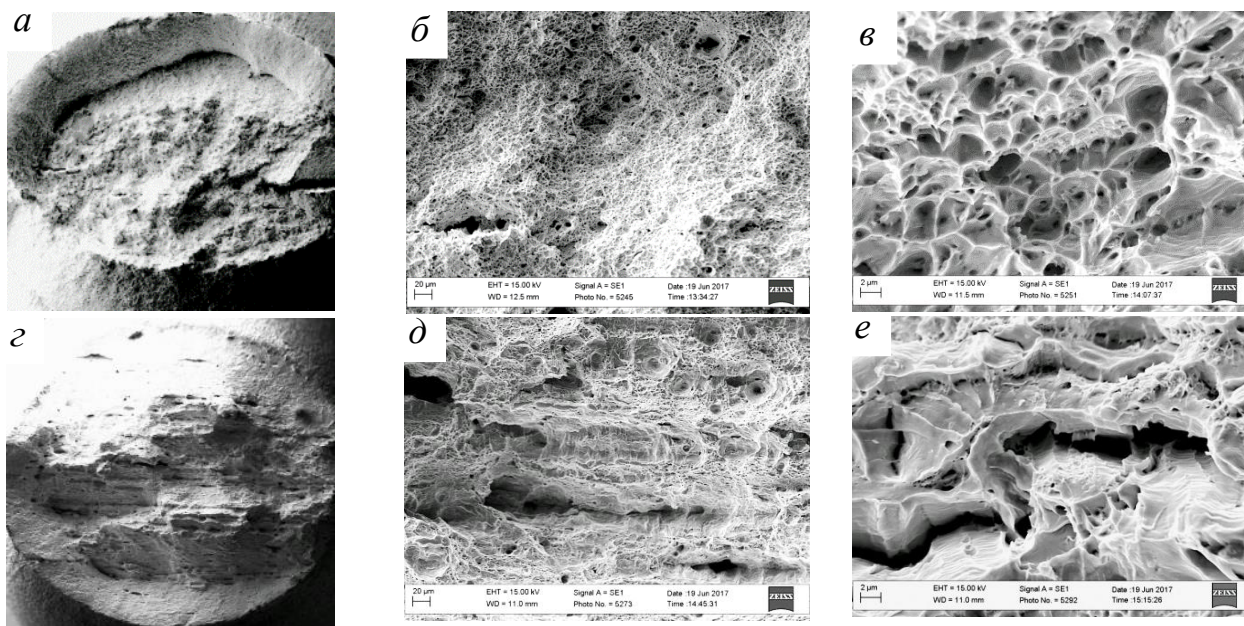


Рис. 1 Макро- (а, з) та мікрофрактограми (б, в, д, е) осьових зразків сталі 17Г1С у вихідному стані (а-в) та після 30 років експлуатації на газогоні (з-е), випробуваних розтягом на повітрі

За вищої роздільної здатності встановили, що сталь у вихідному стані руйнувалася за типовим в'язким механізмом шляхом зародження і росту порожнин з формуванням ямкового рельєфу зламу внаслідок витягування перетинок між ними аж до розриву (рис. 1 б, в). Разом з тим в експлуатованій сталі на фоні подібного ямкового рельєфу виявили текстурованість зламу (рис. 1д), пов'язану з напрямом вальцювання трубних елементів і зумовлену наявністю дефектів у вигляді розшарувань, орієнтованих вздовж цього напрямку. Оскільки подібні розшарування були скоріше винятком з правила на зламі не експлуатованої сталі, то їх наявність в експлуатованій сталі вважали за доказ формування в ній розсіяної пошкоженості під дією жорстких силових умов її тривалої експлуатації на газогоні за впливу наводнювального середовища (рис. 1е). Їх появу зв'язали з ослабленням зв'язків між структурними складовими сталі поперек стінки труби, легшим їх відокремленням, заповненням утворених між ними порожнин воднем і його сприянням поширенню розшарувань в напрямі вальцювання.

Відзначили, що ці дефекти сприяють формуванню в площині руйнування практично плитких (дископодібних) фрагментів зламу з гладкою поверхнею, на якій відбилися сліди деформування у вигляді смуг ковзання у вершинах порожнин заповнених воднем під час їх злиття між собою. Перетинки між цими продовгуватими ознаками розпорошеної пошкоженості руйнувалися за типовим в'язким механізмом з формуванням рівновісних ямок відриву.

Аналіз макрофрактограм сталі Х70 та Х60 у вихідному стані та після експлуатаційної деградації виявив, що за характером руйнування це в'язкі злами типу чашка-конус (рис. 2а,

з). Всі злами мали еліптичну форму, що пов'язали з текстурою, зумовленою технологією виготовлення труб. Відзначили, що на макрозламах сталей у вихідному стані ознаки зсуву переважали навіть у центральній частині зламу, тоді як в експлуатованих сталях центральна частина зламів нормально орієнтована і окантована конусною частиною, сформованою внаслідок макрозсуву.

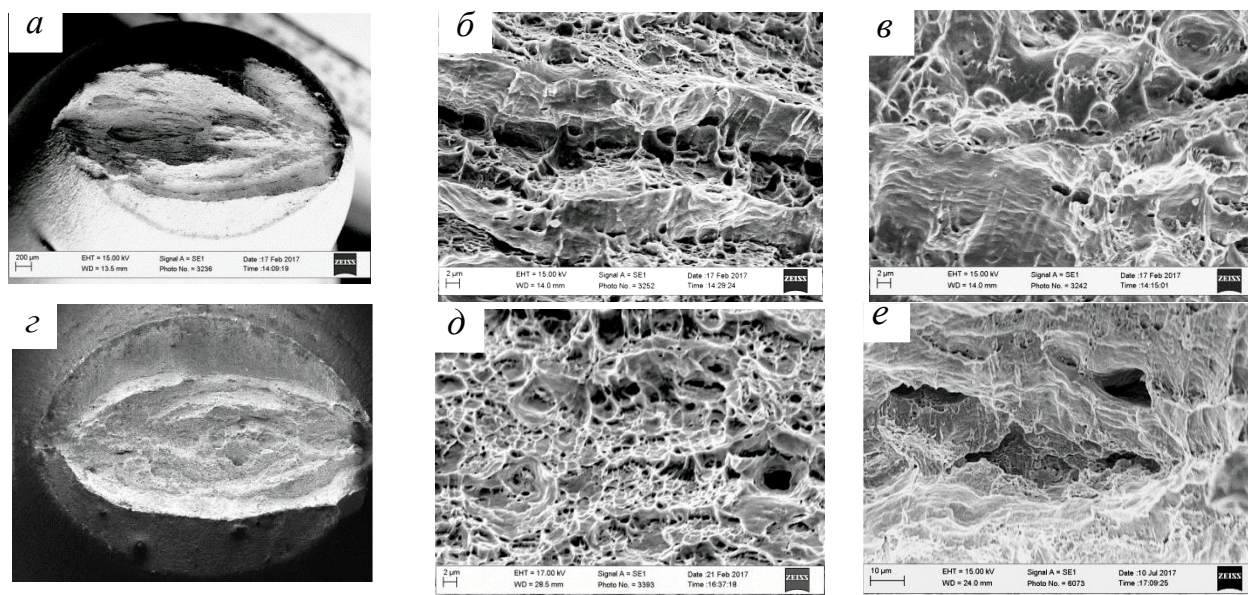


Рис. 2 Макро- (а, с) та мікрофрактограми (б, в, д, е) осевих зразків сталі X70 (а-д) і X60 (е) у вихідному стані (а-в) та після 37 (с, д) та 25 (е) років їх експлуатації на газогонах після випроб розтягом на повітрі

На мікрорівні в центральній частині зламів зразків обох сталей у вихідному стані реалізується класичне в'язке руйнування з формуванням рельєфу з ямок двох типів, утворених внаслідок відриву (рівно вісні) та зсуву (параболічні). Чіткіше це було видно на зламі сталі X70. Дрібні рівновісні ямки формувалися в витягнутих в напрямі вальцювання зонах з ослабленими зв'язками між структурними складовими шляхом утворення мікропорожнин та розриву перетинків між ними, а параболічні – як результат мікрозсуву у вузьких перетинках між цими зонами. Як наслідок на зламі утворився класичний ямковий рельєф, в якому смуги з ямками відривного характеру перемежовувалися ямками зсуву (рис. 2б, в). Особливість руйнування експлуатованих сталей полягала у переважанні рельєфу з ямок відривного характеру в центральній частині зламів зразків (рис. 2д). Однак відзначили велику кількість глибоких дефектів, які ініціювали появу розшарувань на зламі (рис. 2е). Ділянки із зсувним рельєфом навколо них та характерні паралельні сліди виходу смуг ковзання на вільну поверхню вважали за доказ існування цих дефектів ще перед випробами зразка розтягом. Адже на зламах сталей у вихідному стані таких дефектів не виявили. Тому їх вважали за ознаку розпорошеної пошкодженості, спричиненої експлуатацією сталей на газогонах.

В межах конусних частин зламів також виявили відмінності між параболічними ямками зсуву в не експлуатованих та експлуатованих сталях (рис. 3). В усіх випадках злами від бічної поверхні зразків формувалися за однаковим зсувним механізмом. На зламах експлуатованих сталей, по-перше, виявили дрібніші і менш глибокі ямки, ніж в не експлуатованих. По друге, розміри цих параболічних ямок зменшуються в міру підвищення рівня міцності сталей, що свідчить про зниження їх запасу пластичності внаслідок експлуатації. По-третє, поряд зі звичними параболічними ямками зсувного характеру, спостерігали елементи, які зв'язали з дефектами, утвореними під час експлуатації на газогонах (рис. 3б-г). Вони істотно витягнені в напрямі зсуву, а на їх твірній поверхні зафіксувалися овальні сліди, які звикло зв'язують із сходиками, що формуються на вільних поверхнях внаслідок виходу на них смуг ковзання. Оскільки таких елементів не виявили в не експлуатованих сталях, то вважали що вони є слідами від дефектів експлуатаційного походження, а рельєф на їх твірних поверхнях спричинений деформуванням зразків з

готовими дефектами під час активного навантаження розтягом. Відзначили, що в міру зростання рівня міцності сталей кількість таких витягнутих елементів зростає, але їх довжина зменшується, що зв'язано із зниженням характеристик пластичності сталей і, відповідно, їх здатності пластично деформуватися до досягнення критичного стану та з кількістю дефектів експлуатаційного походження. Руйнування зразків дало лише можливість їх виявити.

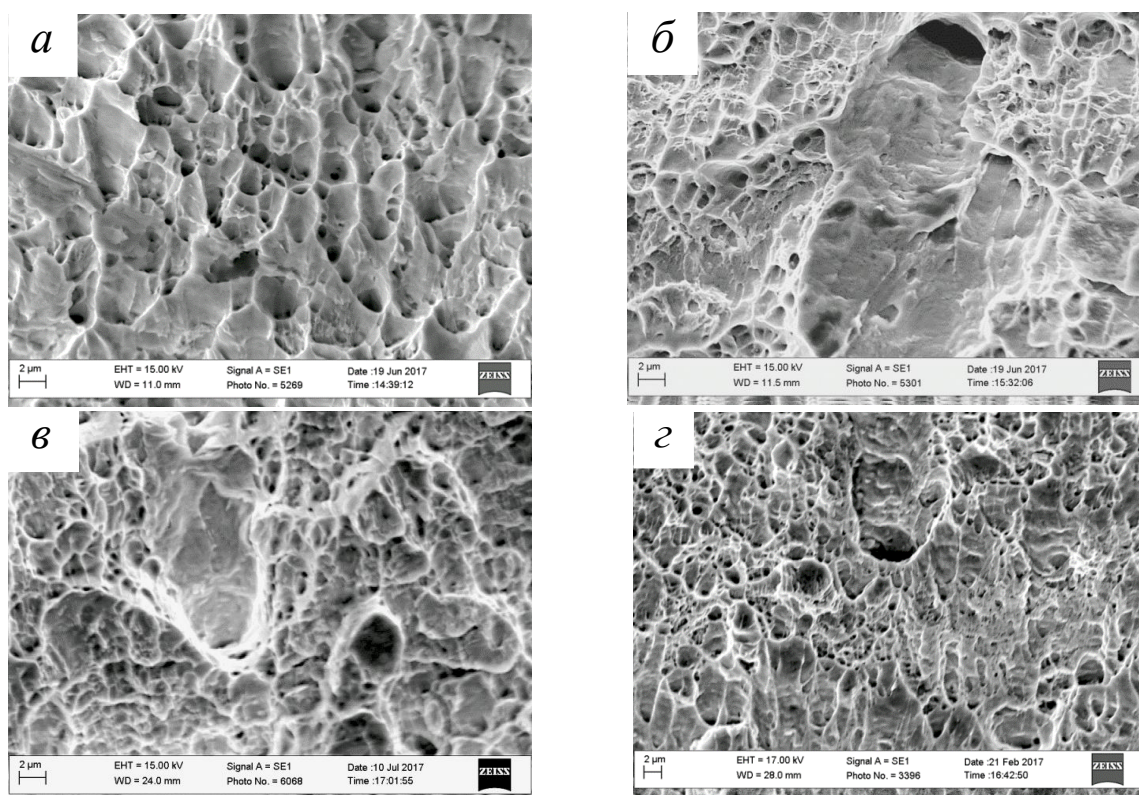


Рис. 3 Фрактограми зламів (в околі бокової поверхні) зразків сталей 17Г1С (б), X60 (а, в) та X70 (г) у вихідному стані (а) та після експлуатації на газогонях (б-г), випробуваних розтягом на повітрі.

**Висновки.** Проаналізувавши вплив рівня міцності сталей газогонів і їх деградації в експлуатаційних умовах на фрактографічні ознаки зламів гладких зразків, випробуваних розтягом на повітрі, виявили макротекстурованість зламів та глибокі макро- і мікророзшарування в центральній їх частині, які вважали за вияв розпорошеної пошкодженості сталей, спричиненої їх експлуатацією.

*The research has been supported by the NATO in the Science for Peace and Security Programme under the Project G5055.*

### Література

1. Фрактодіагностика множинних експлуатаційних та технологічних тріщиноподібних дефектів / П.Марущак, Г.Данилишин, І. Окіпний, А. Сорочак // *Машинознавство – Машинознавство*. – 2011. – № 3–4. – С.40 – 44.
2. Visualization of damages of the main pipelines using cyclic hydro testing / О. Student, Н. Krechkovs'ka // *Procedia Structural Integrity*. – 2016. – V.2 – P. 549–556.
3. Фрактографічні ознаки механізмів транспортування водню в конструкційних сталях / Г.В. Кречковська / *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 2015. – Т.51. – №4. – С. 67–70.