

УДК 621.181:669.018

**О. Цирульник, канд. техн. наук; М. Греділь;
О. Студент, докт. техн. наук; Г. Никифорчин, докт. техн. наук**

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

ОЦІНЮВАННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ СТАЛІ 17Г1С ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА ГАЗОГОНІ

Роботоздатність сталі 17Г1С оцінювали за ударною в'язкістю KCV і статичною тріщиностійкістю J_{Ic} . Встановлено, що ці показники однозначно знижуються зі зростанням тривалості експлуатації сталі на газогоні. Якщо ударна в'язкість широко застосовують для оцінювання придатності металу до експлуатації в газотранспортних мережах, то вища чутливість до деградації локальнішого показника механіки руйнування J_{Ic} дає змогу істотно підвищити чутливість оцінювання зміни стану металу внаслідок експлуатації.

Фрактографічне обстеження зразків сталі 17Г1С, випробуваних на в'язкість руйнування, виявило істотне окрихчення ламів внаслідок експлуатації на газогоні. Зміна механізму руйнування чітко проявляється і за низької, і за високої роздільної здатності у вигляді зниження рельєфності ламів, поширенням зон, в яких домінують розшарування вздовж текстури на всю товщину зразків, появою вторинних тріщин вздовж текстури, зменшенням кількості і глибини в'язких елементів ламу у вигляді ямок. Це дає підстави рекомендувати фрактографічні дослідження як ефективний метод оцінювання роботоздатності сталей газогонів.

O. Tsyurulnyk, M. Hredil, O. Student, H. Nykyforchyn

ESTIMATION OF THE SERVICEABILITY OF 0.17C-Mn-Si STEEL AFTER LONG-TIME SERVICE ON THE GAS PIPELINE

Serviceability of 0.17C-Mn-Si steel has been estimated by impact toughness KCV and fracture toughness J_{Ic} . It was shown that these parameters unambiguously decrease for pipe steel after long term service on the gas main. Impact toughness is commonly used for assessment of the metal operation suitability on the gas-transport systems. But using J_{Ic} as more local fracture mechanics parameter leads to improvement of estimation sensibility of metal state changes through the long term service.

It was revealed by fractography investigation of the specimens tested on the fracture toughness that fracture surfaces are essentially embrittled after service on the gas main. The distinction of fracture mechanism clearly appears for both low and high resolutions. As a result of degradation the fracture surface relief became more smooth, zones with prevailing delamination along texture are expanded on the whole specimen thickness and secondary cracks arise along texture. At the same time amount and deep of ductile fracture elements such as dimples are decreased. Thereupon the fractography investigation may be recommended as an effective method for serviceability estimation of pipeline steels.

На території України експлуатується розгалужена мережа магістральних газо- і нафтогонів. Понад 30 % із них продовжує експлуатуватися вже понад амортизаційний термін служби (33 роки), а ще більша їх кількість наближається до цього терміну і має час напрацювання від 20 до 30 років.

Внаслідок тривалого впливу експлуатаційних навантажень і навколишнього середовища в трубах поступово накопичуються незворотні пошкодження. Окрім того, в металі навіть неексплуатованих труб вже існують дефекти (металургійні, будівельно-монтажні тощо). Все це приводить до позаштатних ситуацій, а інколи - і до масштабних аварій, які спричиняють не лише значні матеріальні збитки, але і порушують екологічну безпеку довкілля. Тому надійність і безпека магістральних трубопровідних систем є визначальною вимогою їх допуску до експлуатації.

Аналіз причин аварій магістральних трубопроводів виявив, що позаштатні ситуації в багатьох випадках завершуються повздовжніми розривами труб по

основному металу або вздовж кільцевих зварних з'єднань. Причому понад 50 % трубопроводів руйнуються від корозійних уражень, а 37 % – через незадовільну якість металу, його недостатню пластичність, ударну в'язкість тощо. Детальніший аналіз причин аварій, як правило, виявляє безпосередній зв'язок місць зародження руйнування з дефектами металургійного, виробничого, будівельно-монтажного або експлуатаційного характеру. Вони можуть бути непомітними, але, не дивлячись на це, виконують роль концентраторів напружень на внутрішніх і зовнішніх поверхнях труб.

Розраховуючи трубопроводи на міцність, в основному оперують границею текучості, яка і обмежує допустимі напруження. Разом з тим літературні дані свідчать, що показники міцності трубних сталей можуть неоднозначно змінюватися після експлуатації труб впродовж 10–30 років: міцність або залишається незмінною [1–4], або ж підвищується [5–8]. Зрозуміло також, що завершальному етапу руйнування трубопроводу повинна передувати зміна механічних властивостей металу, які забезпечували його роботоздатність на початку експлуатації. Тому оцінювання стану деградованого металу з використанням показників, які однозначно знижувалися би зі зростанням тривалості експлуатації і були б максимально чутливими до змін у металі, відкриє перспективу коректного прогнозування ресурсу (у тому числі і залишкового) таких відповідальних об'єктів, як трубопроводи різного призначення (газо-, нафтогони тощо).

Мета роботи – оцінити чутливість ударної в'язкості і показника статичної тріщиностійкості до зміни стану експлуатованого на газогонях металу та розкрити фрактографічні особливості прояву деградації сталі 17Г1С, експлуатованої впродовж різного часу на газогонях.

Матеріали та методи досліджень. Зразки для випроб вирізували з труб магістральних газогонів після різного часу експлуатації τ . Для порівняння дослідили також зразки з труби запасу (табл. 1).

Таблиця 1 – Геометричні розміри та тривалість експлуатації труб для досліджень

Ділянка трубопроводу	Діаметр труби D , мм	Товщина стінки труби t , мм	Тривалість експлуатації труби τ , роки
Труба запасу	1020	10	0
Долина – Ужгород	1420	20	28
Пісочна – Долина	529	7	40

Всі досліджені труби виготовлені з ферит-перлітної сталі 17Г1С. У табл. 2 наведені хімічний склад та механічні властивості цієї сталі, регламентовані відомчим нормативним документом [9]. За властивостями сталь 17Г1С прирівнюють до зарубіжних трубних сталей категорії міцності X52.

Таблиця 2 - Хімічний склад (ваг. %) та механічні властивості сталі 17Г1С, регламентовані [9]

C	Mn	Si	S	P	Al	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
0,2	1,3	0,4	$\leq 0,04$	$\leq 0,01$	$\leq 0,04$	≥ 363	≥ 510	≥ 20

Для оцінювання стану металу з різних газогонів використали ударну в'язкість KCV (як найпоширеніший практично в усіх нормативних документах механічний показник стану металу) та статичну тріщиностійкість, яку оцінювали за величиною критичного значення J -інтегралу. Схему вирізання зразків з труб для визначення статичної тріщиностійкості та ударної в'язкості показано на рис. 1.

Значення KCV визначали на призматичних зразках стандартної висоти 10 мм з V -подібним надрізом (ГОСТ 9454-78). Із труб з більшою товщиною стінки зразки вирізували біля внутрішньої та зовнішньої поверхонь та знаходили середнє значення. Коли труба мала недостатню товщину стінки, зразки, відповідно, мали меншу товщину. При цьому

порушувалася вимога щодо розмірів зразка, але, враховуючи те, що під час розрахунку K_{IC} береться до уваги площа нетто-перерізу зразка, можливою похибкою нехтували.

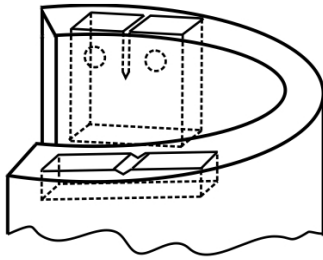


Рисунок 1 – Схема вирізання зразків з газогонів для визначення статичної тріщиностійкості J_{Ic} та ударної в'язкості K_{CV}

Трубні сталі відзначаються високою пластичністю, тому розміри зразків, які можна виготовити з газогінних труб, не забезпечують коректності використання підходів лінійної механіки руйнування для визначення їх статичної тріщиностійкості за показником K_{Ic} . У цьому випадку коректніше користуватися підходами нелінійної механіки руйнування (зокрема методом J -інтегралу) і визначати показник статичної тріщиностійкості J_{Ic} , а з нього вже за відомими формулами розраховувати показник K_{Ic} . Для цього розтягували компактні зразки 0,5 СТ товщиною 10 або 7 мм, записуючи діаграму їх навантаження в координатах “прикладена сила – переміщення точки прикладання навантаження”. Щоб отримати різні прирости тріщини Δa , навантаження кожного зі зразків переривали таким чином, щоб забезпечити різне за величиною відхилення діаграми навантаження від лінійності. Зразки відтінювали, витримуючи в печі до отримання на їх поверхні окисної плівки, а після охолодження розтягували їх до руйнування. Окисна плівка чітко відокремлювала зону докритичного підростання тріщини на зламі від неокисленої зони доламування і гладкої зони, яка відповідає початковій утомній тріщині. Замірявши підростання тріщин як середнє арифметичне дев'яти замірів вздовж фронту втомної тріщини і визначивши відповідні йому значення J -інтегралу, побудували R -криві для кожного з досліджуваних матеріалів. J -інтеграл визначали за площею під діаграмою навантаження, яка характеризує затрати енергії на пружне і пластичне деформування металу в зоні попереду вершини втомної тріщини, які передують старту тріщини, і на підростання тріщини на величину Δa . Площу, яка відповідає етапу пружного деформування, віднімали. J_{Ic} відповідає значенню J -інтегралу, отриманому внаслідок перетину R -кривої з лінією затуплення тріщини у вигляді прямої $J = 2\sigma_{0,2}\Delta a$. Точка перетину визначає рівень J -інтегралу, який забезпечує старт статичного підростання тріщини.

J -інтеграл на будь-якому етапі підростання тріщини визначали з виразу [10]:

$$J_k = \frac{K_i^2(1-\nu^2)}{E} + J_{pl(i)};$$

$$\text{у якому: } K_i = Y \left[\frac{P_i}{BW^{1/2}} \right]; \quad J_{pl(i)} = \frac{\eta A_{pl(i)}}{Bb_0},$$

$$Y = \frac{(2 + a_0/W)[0.886 + 4.64(a_0/W) - 13.32(a_0/W)^2 + 14.72(a_0/W)^3 - 5.6(a_0/W)^4]}{(1 - a_0/W)^{3/2}},$$

$A_{pl(i)}$ – площа під кривою “навантаження – переміщення”, виключаючи площу, яка відповідає пружному деформуванню; W і B – висота і товщина зразка; a_0 – довжина попередньо наведеної тріщини; $b_0 = (W - a_0)$ – залишковий переріз зразка; $\eta = 2 + 0,522(b_0/W)$.

Злами випробуваних на статичну тріщиностійкість зразків дослідили на сканівному електронному мікроскопі EVO 4XVP.

Результати механічних випроб. Наведені у табл. 3 механічні властивості сталі 17Г1С з досліджених елементів труб дозволяють стверджувати, що навіть після 28 років експлуатації за характеристиками міцності вона відповідає вимогам вищезгаданого регламентуючого документа, оскільки її міцність не нижча за регламентовані значення. І лише через зниження характеристик пластичності можна говорити про погіршення її властивостей внаслідок експлуатації. Проте після 40 років експлуатації сталі на газогоні

властиве їй значення границі текучості виходить за регламентовані межі. Щодо характеристик пластичності, то попри зниження відносного звуження ψ (порівняно з визначеним для металу з труби запасу), яке свідчить про втрату пластичності, отримали хоч і незначне, але зростання відносного видовження δ , що мало би свідчити про зростання пластичності. Подібний ефект нетрадиційної зміни характеристик пластичності як особливість прояву деградації сталей внаслідок експлуатації отримано раніше на металі шва головних парогонів ТЕС [11, 12] та на сталі X52 з магістральних газогонів [13]. Така неоднозначна зміна характеристик пластичності пов'язана з полегшенням утворення тріщин в експлуатованому металі. Тому відносне видовження в цьому випадку відбиває не лише видовження, а ще й сумарне розкриття утворених тріщин.

На відміну від стандартних механічних властивостей, які виявилися слабо чутливими до деградації металу в експлуатаційних умовах, використання локальніших підходів, а саме, ударної в'язкості KCV і статичної тріщиностійкості J_{Ic} , дозволяє однозначно говорити про зниження робоздатності металу внаслідок експлуатації (рис. 2).

Таблиця 3 – Механічні властивості сталі 17Г1С після різної тривалості експлуатації

τ , роки	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
0	378	595	20	79
28	403	590	19	68
40	302	515	25	69

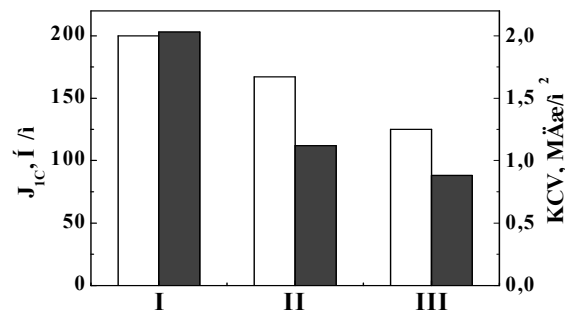


Рисунок 2 – Ударна в'язкість KCV (світлі) та статична тріщиностійкість J_{Ic} (темні стовпчики) сталі 17Г1С у вихідному стані (I) та після експлуатації впродовж 28 (II) та 40 (III) років на магістральних газогонях

Попри однозначне зниження обох показників, зниження показника J_{Ic} відчутно сильніше за KCV . Зокрема, якщо після 28 років експлуатації KCV знижується на 17, то J_{Ic} - на 45 %. Після 40 років експлуатації ця відмінність стає ще відчутнішою і KCV знижується на 38, а J_{Ic} - на 56 %. Останнє дозволяє стверджувати, що максимально чутливим до деградації металу є показник, який характеризує енерговитрати на старт тріщини з вершини попередньо створеної втомної тріщини, а не з механічного надрізу, який хоч і гострий, але створює, по-перше, меншу концентрацію напружень порівняно з тріщиною, а, по-друге, віддаль від вершини тріщини, на якій виникає максимальний гідростатичний розтяг, значно менша, ніж від вершини надрізу. Отже, за чутливістю статичну тріщиностійкість J_{Ic} можна рекомендувати для широкого вжитку з метою оцінювання стану експлуатованого металу. Його використання дозволить обґрунтовано і однозначно відбракувати метал через його низький опір руйнуванню.

Результати фрактографічного аналізу зразків, випробуваних на статичну тріщиностійкість. Оскільки значення J_{Ic} характеризують енергозатрати на старт тріщини з вершини попередньо створеної втомної тріщини внаслідок активного навантаження зразків розтягом, то під час фрактографічного обстеження, в основному, зосередилися на переході між втомним та субкритичним підростанням тріщини. Крім того, враховуючи те, що старт тріщини за активного навантаження відбувається в зоні з об'ємним напруженим станом всередині (по товщині) зразка, де деформація максимально обмежена (плоска деформація), чисто методично увагу зосереджували саме на центральній частині зламів зразків.

Дослідження зразків у вихідному стані та після різної тривалості експлуатації виявили, що в усіх випадках спостерігали класичні макрозлами з чітко окресленими ділянками субкритичного підростання у вигляді практично трикутних за формою зон (рис. 3 а). Якщо розшарування вздовж напрямку деформування під час прокатування у вигляді видовжених рівчаків на зламі неексплуатованого металу виявили лише в

центральної частині зламу (рис. 3 а), то в експлуатованому металі вони домінують на макрозламі (рис. 3 в, д). При цьому істотно зростає їх густина та зменшується рельєфність, що само по собі свідчить про зниження енергоємності руйнування.

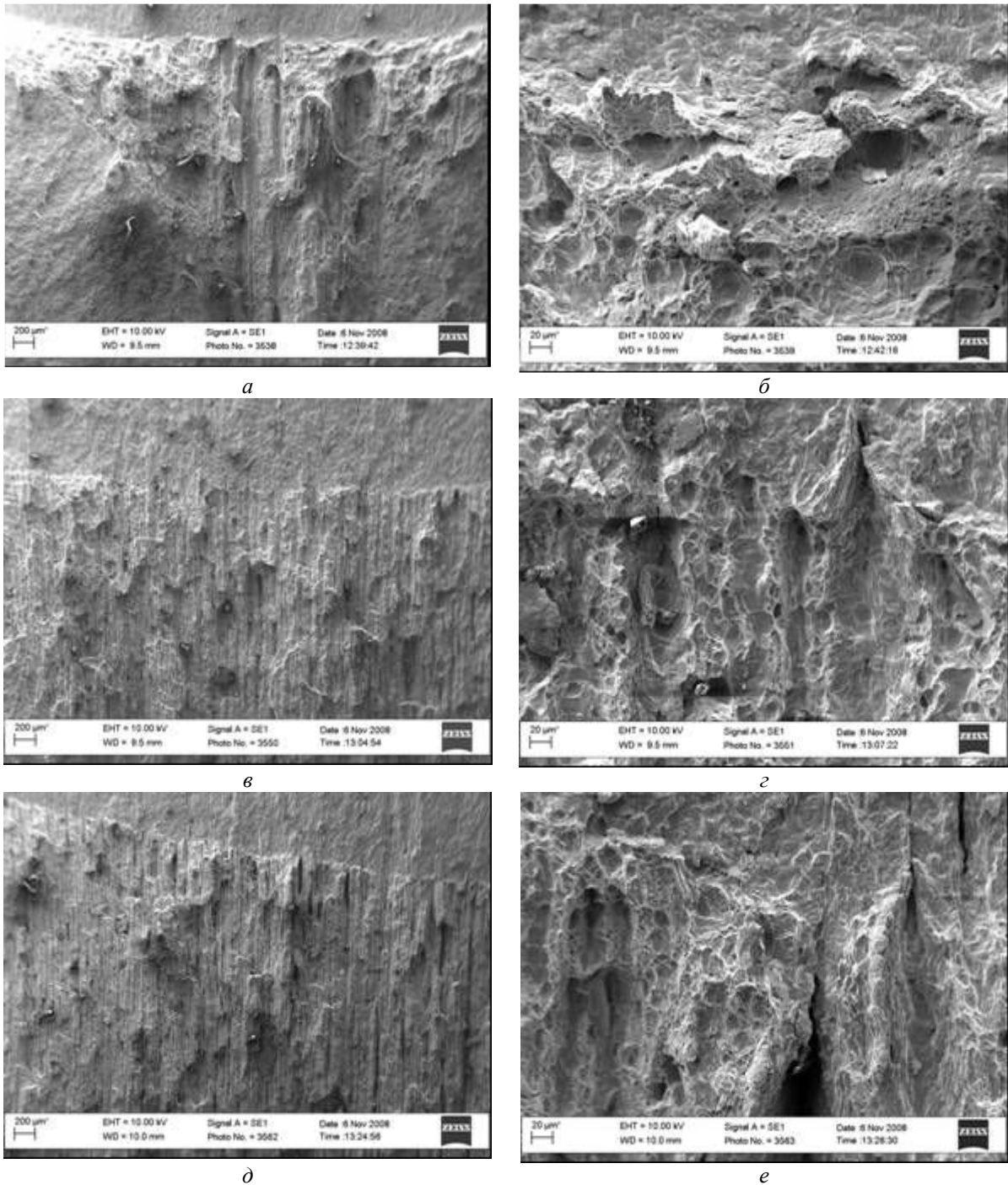


Рисунок 3 – Фрактограми зразків зі сталі 17Г1С у вихідному стані (а, б), після 28 (в, г) та 40 (д, е) років експлуатації на газогонах, зруйнованих за випроб на J_{Ic}

За більшої роздільної здатності виявили дрібніші деталі руйнування. Зокрема, у неексплуатованому металі злам має всі ознаки в'язкого, високоенергоємного руйнування у вигляді ямок за механізмом відриву (рис. 3 б, 4 б). Після експлуатації на зламі домінують достатньо великі, але неглибокі ямки, утворені за зсувним механізмом (рис. 3 г, е та рис. 4 г, е). Дрібні, рівновісні ямки з включеннями на їх дні лише окантовують ці великі ямки. Гребені, увінчані такими ямками, розмежують також рівчаки розшарувань вздовж напрямку прокатування. Останнє властиво металі у вихідному стані також (рис. 4 а). Але розмір ямок і ширина самого гребеня відриву, що розмежує суміжні рівчаки, в металі у вихідному стані значно більші.

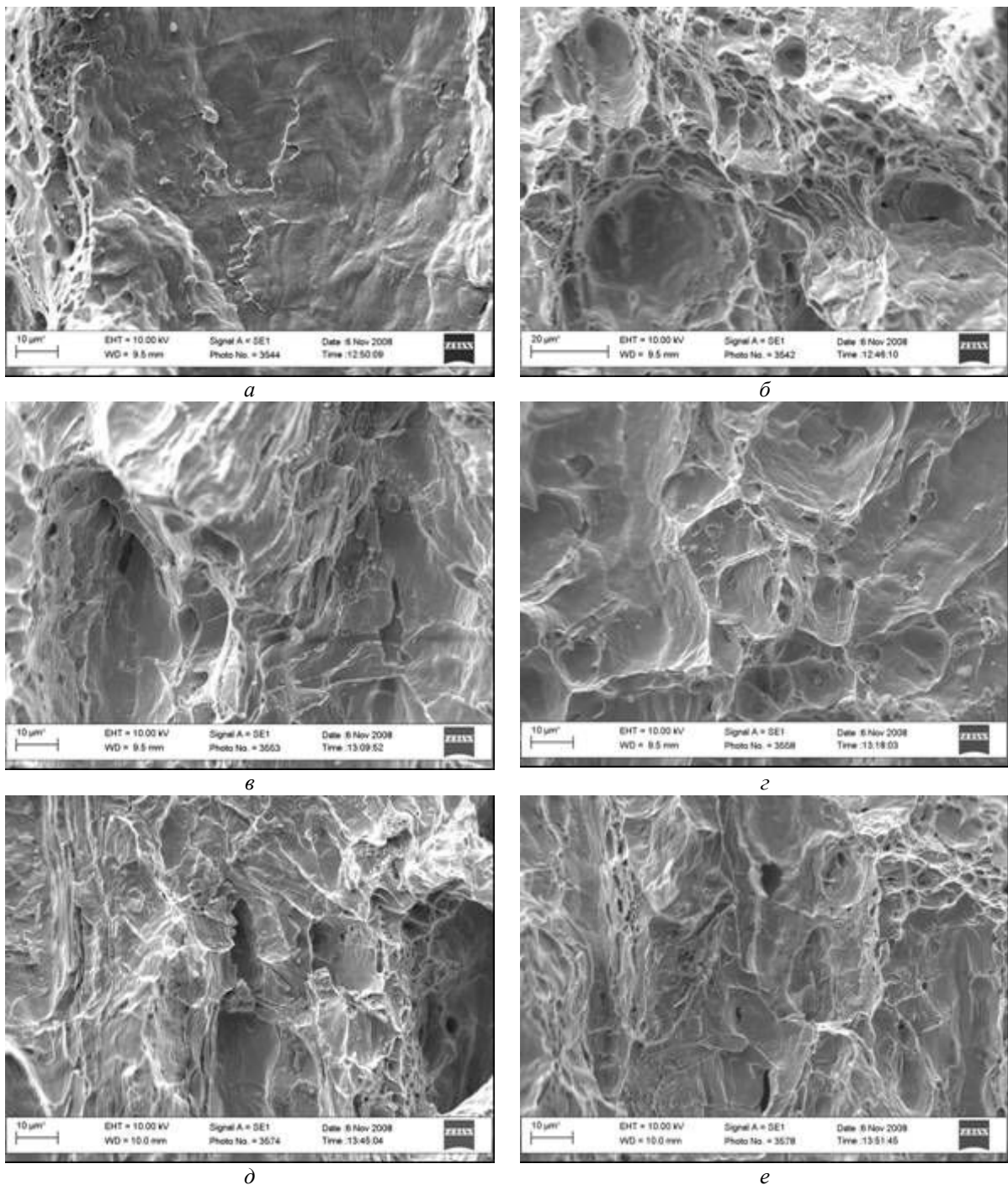


Рисунок 4 – Фрактограми зразків зі сталі 17Г1С у вихідному стані (а, б) та після 28 (в, г) та 40 (д, е) років експлуатації на газогоні, зруйнованих за випроб на J_{Ic} за вищої роздільної здатності

Оскільки рівчакоподібні елементи зламу, орієнтовані вздовж напрямку прокатування, домінують в експлуатованому металі, то важливо детальніше дослідити рельєф на їх дні за вищої роздільної здатності. У вихідному стані поверхня рівчака достатньо гладка з ледь помітними слідами у вигляді невисоких гребенів відриву, орієнтованих поперек напрямку статичного росту тріщини (рис. 4, а). Їх орієнтація може свідчити про етапність зупинок і наступне підростання тріщини шляхом розшарування. Отже, у вихідному стані навіть на ділянках з розшаруваннями руйнування відбувається поетапно, а не відразу на всю їх довжину. Цікаво, що ніяких слідів неметалевих включень, які звикло супроводжують такі розшарування, не виявлено.

Зовсім іншу картину спостерігали на ділянках з розшаруваннями експлуатованого металу. Значна кількість вторинних тріщин, орієнтованих в напрямі прокатування, та слідів від неметалічних включень характерної видовженої форми

(рис. 4 в, д), а подекуди і самих сульфідів (зокрема на рис. 4 в). Все це може свідчити про те, що внаслідок експлуатації відбувається декогезія вздовж меж між включеннями і матрицею. Утворені видовжені порожнини під час активного навантаження за випроб на статичну тріщиностійкість ініціюють локальні підростання тріщини, які фрактографічно проявляються як крихкі фасетки відколу (рис. 4 в та фрагменти в центральній та правій частині світлин на рис. 4 д). Причому чим більша тривалість експлуатації сталі, тим більша кількість, але менша протяжність крихких фрагментів.

Висновки

1. Виявлено, що внаслідок деградації під час експлуатації ударна в'язкість KCV і статична тріщиностійкість J_{Ic} сталі 17Г1С однозначно знижуються зі зростанням тривалості експлуатації. Причому зниження показника J_{Ic} відчутно сильніше ніж KCV . Останнє свідчить про те, що деградація сталі чіткіше проявляється на локальному рівні.

2. Фрактографічним аналізом показано, що існує чітка відмінність між характерними елементами руйнування металу у вихідному стані та після експлуатації. Це поява у зламі вторинних повздовжніх тріщин та крихких елементів відколу в експлуатованому металі, ініційованих порожнинами, що виникли внаслідок декогезії вздовж меж між включеннями і матрицею. Навіть за в'язкими елементами енергоємність руйнування експлуатованого металу істотно нижча, оскільки на зламах експлуатованого металу домінують достатньо великі, але неглибокі ямки, утворені за зсувним механізмом, тоді як у вихідному стані – це ямки відривного характеру, злиттю яких передують достатньо велика деформація.

Робота виконана за підтримки МОН України, проект М/196 – 2006.

Література

1. Ланчаков Г. А., Степаненко А. И., Пашков Ю. И. Влияние времени эксплуатации на ресурс прочности трубопроводов // Газовая промышленность. – 1994. – № 3. – С. 11–12.
2. Работоспособность трубопроводов. Спротивляемость разрушению. Ч. 2. / Г. А. Ланчаков, Е. Е. Зорин, Ю. И. Пашков, А. И. Степаненко. – М.: Недра, 2001. – 350 с.
3. Дмитриев В. Ф., Мурзаханов Г. Х., Филиппов Г. А. Оценка ресурса нефтепровода и планирование его капитального ремонта // Строительство трубопроводов. – 1997. – № 3. – С. 29–32.
4. Филиппов Г. А., Ливанова О. В. Взаимодействия дефектов структуры и деградация свойств конструкционных материалов // Материаловедение. – 2002. – № 10. – С. 17–21.
5. Ямалеев К. М. Старение металла труб в процессе эксплуатации трубопроводов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1994. – 64 с.
6. Пирогов А. Г. Динамика изменения свойств металла труб при эксплуатации трубопроводов // 4-й Конгресс нефтепромышленников России. Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности объектов трубопроводного транспорта углеводородного сырья. – Уфа, 2004. – С. 41–49.
7. Пенкин А. Г., Терентьев В. Ф., Маслов Л. Г. Оценка степени деградации механических свойств и остаточного ресурса работоспособности трубных сталей с использованием методов акустической эмиссии и кинетической твердости // www.sds.ru/articles/degradation/index.html, 2004.
8. Сандаков В. А. Оценка склонности к замедленному разрушению объектов газораспределения: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Уфа: Ротапринт ГУП ИПТЭР, 2005.
9. Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами. Відомчі будівельні норми України. – К.: Держнафтогазпром, 2000. – 56 с.
10. Standard Test Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness. ASTM. E 813 / In: Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.01. – P. 713-727.
11. Никифорчин Г.М., Студент О.З., Марков А.Д. Аномальный прояв високотемпературної деградації металу зварного з'єднання оцаднолегованої сталі // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – №1. – С. 73-79.
12. Nykyforchyn H.M., Student O.Z., Markov A.D. Abnormal manifestation of the high-temperature degradation of the weld metal of a low-alloy steel welded joint // Materials Science – 2007. V. 43, №1. – P. 77-84.
13. Effect of in-service degradation of trunk gas pipeline steel on its “in-bulk” properties / G. Gabetta, H.M. Nykyforchyn, E. Lunarska et al. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – N 1. – С. 88-99.

Одержано 03.11.2008 р.