

**Галина КРЕЧКОВСЬКА¹, Наталія КРЕТ¹,
Олександр ЦИРУЛЬНИК¹, Олександра СТУДЕНТ¹, Ігор ПАЛІЙЧУК²**

АНАЛІЗ ПОВЕРХНЕВИХ КОРОЗІЙНИХ УШКОДЖЕНЬ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ ОБСАДНИХ ТРУБ

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
вул. Наукова 5, м. Львів, 79060. E-mail: galyna@ipm.lviv.ua

²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
вул. Карпатська 15, м. Івано-Франківськ, 76000

***Halyna KRECHKOVSKA, Nataliya KRET,
Oleksandr TSYRULNYK, Oleksandra STUDENT, Ihor PALIYCHUK***

ANALYSIS OF SURFACE CORROSION DAMAGES AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE CASING PIPES METAL

¹Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine
5, Naukova Str., Lviv, 79060Ukraine. E-mail: galyna@ipm.lviv.ua

²Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
15, Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76000

ABSTRACT

The propensity to local corrosion of casing pipes steel operated under the influence of produced water in well and mechanical stresses by analyzing the shape and dimensions of the large and deep corrosion damages was estimated. The connection between the intensity of local corrosion damages to the structure of the investigated steels was revealed. It was grounded the need, first, to implement in practice the input control of steel casing structure to prevent the use of steels with roughly dispersed structure revealed the highest tendency to form corrosive damages and, secondly, to supplement existing regulatory documents by requirements regarding of the brittle fracture resistance values of the casing steels.

KEY WORDS: *steels, casing pipe, corrosion damages.*

У процесі експлуатації в металі обсадних труб, що використовують для закріплення ґрунту від розмивання та осування під час розроблення глибоких бурових свердловин, виникають і розвиваються експлуатаційні пошкодження, які можуть спричинити аварійні ситуації. Ефективність експлуатації труб, залежить від здатності матеріалу витримувати вплив різного роду негативних чинників. Обсадні труби експлуатуються за дії зовнішнього та внутрішнього тисків, які створюють напруження у стінці труби. Крім того, вони навантажені розтягом, спричиненим впливом загальної ваги колони труб. Додатковим чинником впливу є фізико-хімічна взаємодія напруженого металу з агресивним середовищем. Основною ознакою експлуатації є корозійні ураження, що створюють передумови для подальшого корозійного та водневого розтріскування чи корозійно-втомного поширення тріщини [1]. Ці види руйнувань є небезпечними, оскільки їх важко прогнозувати. Тому оцінювання схильності сталей до формування на їх поверхні корозійних уражень є важливою передумовою прогнозування роботоздатності труб в експлуатаційних умовах.

Мета роботи – проаналізувати вплив структурного стану металу обсадних труб на інтенсивність корозійних уражень на внутрішній поверхні обсадних труб за дії реальної та модельної пластових вод, його механічні характеристики та фрактографічні ознаки руйнування за випробуванням.

ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідили технічний стан двох обсадних труби: труба резерву (у вихідному стані) та експлуатована (зовнішній діаметр 146 мм, товщина стінки – 10,7 мм). Ділянка дослідженої експлуатованої обсадної труби була всередині проміжної колони на глибині до 1000 м і не контактувала з породою ззовні. Згідно з отриманим хімічним складом (табл. 1) метал у вихідному стані відповідає сталі 50Г групи міцності Д [2], а експлуатована труба виготовлена зі сталі 32Г2 і відповідає класу міцності Е.

Таблиця 1. Хімічний склад сталей обсадних труб
Table 1. Chemical composition of the casing pipes steels

Матеріал	Вміст елементів, mass. %						
	C	Si	Mn	Cr	S	P	Cu
Сталь у вихідному стані	0,53	0,25	0,72	0,046	0,03	0,023	0,024
Сталь після експлуатації	0,35	0,26	1,22	0,135	0,01	0,02	0,129

За допомогою програми JMicro Vision проаналізувати рельєф, сформований на внутрішній поверхні труб внаслідок їх взаємодії з робочим корозивним середовищем. Для цього використали цифрові (у форматі JPEG) зображення поверхневих ушкоджень.

Випробування на корозійну тривалість проводили за температури 40 °С на шліфованих пластинках із досліджуваних сталей у модельному середовищі 0,5 М NaCl + 3 г/дм³ СН₃СООН, барботованому СО₂, яке за корозійною активністю моделює пластову воду.

З аналізованих труб у поздовжньому напрямі вирізали циліндричні зразки (Ø 5 мм) на розтяг для визначення характеристик міцності і пластичності, а також балкові зразки з V-подібним надрізом з боку внутрішньої поверхні труби для визначення ударної в'язкості KCV. Механічні властивості за розтягу визначали на установці УМЕ-10Т, а ударну в'язкість - на маятниковому копрі ІО 5101.

Хімічний склад сталі оцінили на оптичному іскровому атомно-емісійному спектрометрі SPECTROMAX LMF 0,5. Металографічні дослідження провели на оптичному мікроскопі Neofot-21, а фрактографічні – на сканівному електронному мікроскопі ZEISS EVO 40XVP.

РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБ ТА ЇХ АНАЛІЗ

З огляду на поставлену мету візуально обстежили внутрішні поверхні обсадних труб у вихідному стані, після експлуатації та після витримки у модельному середовищі. На внутрішній поверхні експлуатованої труби виявили глибокі корозійні ураження, оскільки умови її експлуатації сприяли цьому (значна тривалість експлуатації – до 28 років, сумісний вплив напружень і корозивного середовища). Такі дефекти небезпечні, оскільки створюють концентрацію напружень і можуть ініціювати корозійно-водневе розтріскування чи корозійно-втомне поширення тріщини.

Проаналізували рельєфність внутрішньої поверхні труб у вихідному стані та після експлуатації. Досліджені профілі цих поверхонь свідчать про те, що геометрія дефектів (їх глибина, діаметр та віддаль між ними) на поверхнях труб істотно відрізнялися (рис. 1). У вихідному стані спостерігали точкові дефекти, які достатньо рівномірно розташовувалися уздовж труби і могли утворитися під час виготовлення труб або внаслідок атмосферної корозії. Їх максимальна глибина та діаметр не перевищувала 0,4 мм. На поверхні експлуатованої труби спостерігали численні корозійні ураження глибиною до 2,5 мм.

Проаналізували кількість корозійних уражень та їх розміри на поверхні обсадних труб у вихідному стані та після експлуатації (рис. 2). З наведених гістограм видно, що невеликі за розмірами ураження на внутрішній поверхні труби у вихідному стані розташовані рівномірно. Глибина більшості уражень не перевищувала 0,3 мм. На внутрішній поверхні експлуатованої труби уражень було набагато більше і їх глибина коливалася від 0,15 до 2,25 мм. На поверхні труби вони розташовані досить нерівномірно.

З огляду на практично однаковий розподіл уражень глибиною до 0,4 мм на обох досліджених трубах можна зробити висновок, що ці ураження однакового походження, тобто вони утворилися на етапі виготовлення труб. Глибина власне корозійних уражень експлуатованої труби знаходиться у межах 0,5...2,25 мм. Звідси суто корозійний приріст уражень (за вираху-

ванням початкової глибини технологічних дефектів 0,4 мм) максимально може становити 1,85 мм. Враховуючи тривалість експлуатації 28 років, максимальна швидкість локальної корозії – 0,07 мм/р.

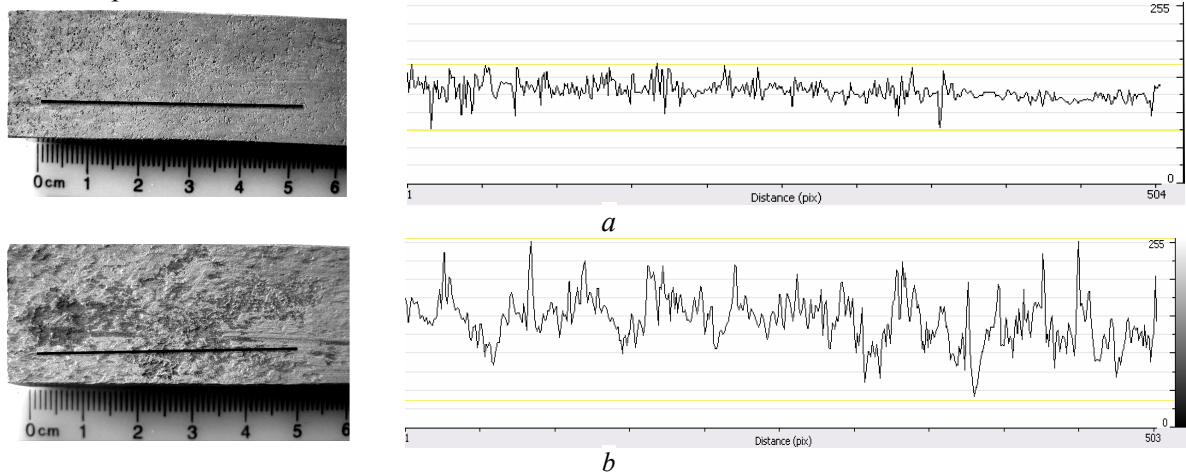


Рис. 1. Загальний вигляд та типові профілограми рельєфу на внутрішніх поверхнях обсадних труб перед (а) та після (б) експлуатації.

Fig. 1. General view and typical profilograms of relief on the inner surfaces of the casing pipes before (a) and after operation (b).

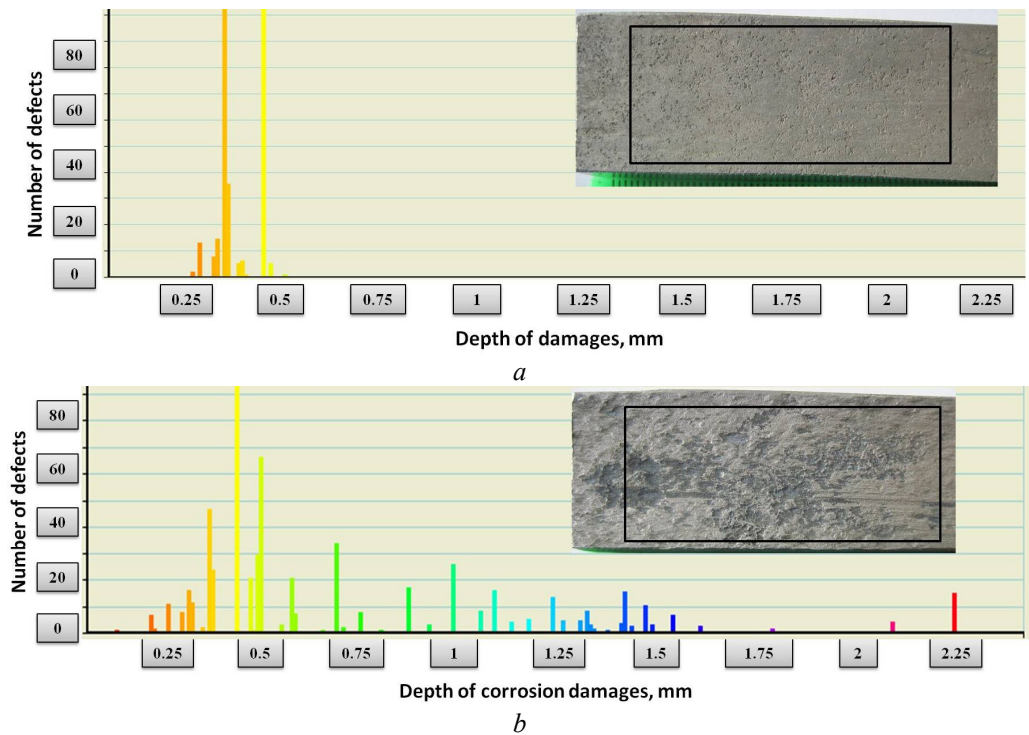


Рис. 2. Розподіл за глибиною дефектів на внутрішній поверхні обсадних труб перед (а) та після експлуатації (б) за їх глибиною.

Fig. 2. Distribution of defects on the inner surface of the casing pipes before (a) and after operation (b) by their depth.

Корозійні випробування у модельному середовищі впродовж 10^3 год експозиції показали, що загалом густина корозійних уражень на обох сталях практично однакова (рис. 3). Водночас сталь у вихідному стані виказує суттєво вищу корозійну активність проти експлуатованої сталі. На ній зафіксовані корозійні ураження з максимальною глибиною до 24 мкм, однак найбільша їх кількість відповідає діапазону глибин 16...20 мкм. Для експлуатованої сталі виявлено ураження з максимальною глибиною 16 мкм, що відповідає максимальній швидкості локальної корозії – 0,12 мм/р. Це дещо вища швидкість порівняно з отриманою з аналізу розподілу коро-

зійних уражень на внутрішній поверхні експлуатованої труби, що можна зв'язати з не повною відповідністю умов для корозії сталі за лабораторних випроб і під час експлуатації.

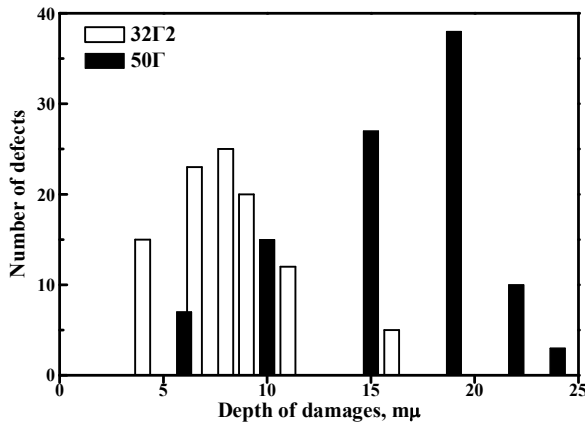


Рис. 3. Розподіл корозійних уражень за глибиною на поверхні сталевих пластин з не експлуатованої (а) і експлуатованої (б) обсадних труб після їх експозиції у модельному корозійному середовищі впродовж 1000 год.

Fig. 3. Distribution of the corrosion damage to their depth on the surface of the steel plates from an unexploited (a) and exploited (b) casing pipes after holding in model environment during 1000 h.

Структуру металу обсадних труб аналізували в їх осьовому перерізі (рис. 4). Сталі не експлуатованої труби властива ферит-перлітна структура з великими зернами перліту (їх середній розмір досягав 100 мкм), облямованих прошарками фериту шириною до 10 мкм. Крім того, відзначили грубодисперсну морфологію складових самого перліту (пластин цементиту), що дало можливість розрізнити їх навіть за оптичних збільшень. Степінь сфероїдизації перліту за шестибальною шкалою оцінювання відповідала балу 1 (пластинкова будова перліту).

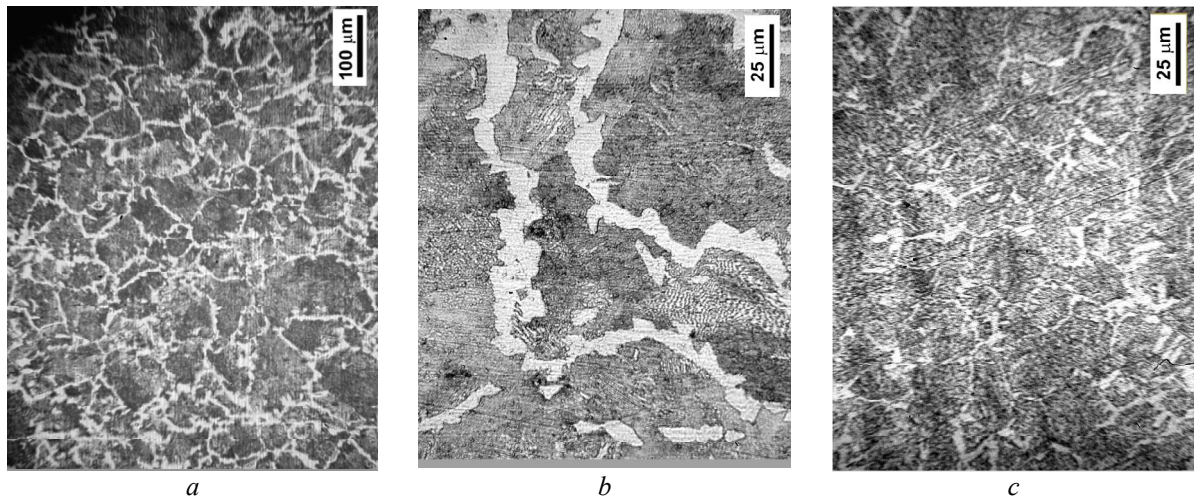


Рис. 4. Мікроструктура сталі обсадних труб у вихідному стані (а, б) та після експлуатації (с).

Fig. 4. Microstructure of the investigated steels of casing pipes in virgin state (a, b) and after service (c).

Обсадні труби звикло виготовляють за технологією, яка мала б забезпечувати отримання дрібнозернистої структури. Зокрема труби зі сталі 50Г групи міцності Д, як правило, поставляють у нормалізованому стані. Висока температура гарячої деформації труб визначає їх грубозернисту структуру (бал 2-3) у вигляді перлітних зерен з феритною обляміркою вздовж меж аустенітних зерен. Для підвищення роботоздатності труб після гарячого вальцювання їх звикло нормалізують (після повного потемніння металу по завершенні вальцювання). Під час такого охолодження і наступного нагрівання під нормалізацію звичайно відбувається перекристалізація грубозернистої та неоднорідної структури сталі, отриманої у результаті високотемпературного нагрівання на етапі вальцювання. Звідси зробили висновок, що збереження грубозернистої структури сталі 50Г групи міцності Д може свідчити про недотримання режиму її термічного оброблення (можливо нормалізація труб взагалі не була проведена), що й спричинило збереження грубозернистої структури.

Обсадні труби групи міцності Е звикло термічно обробляють шляхом нормалізації або гартування з високим відпуском. При цьому за достатньо швидкого охолодження труб під час нормалізації формується дрібнозерниста структура, яка забезпечує необхідні механічні характе-

ристки металу обсадних труб групи Е. У нашому випадку в мікроструктурі зафіксували дрібні зерна сорбітподібного перліту завбільшки до 25 мкм, розмежовані прошарками фериту шириною до 2 мкм.

З огляду на отримані структурні відмінності досліджених сталей можна зробити певні висновки про їх вплив на опір цих сталей корозійному ушкодженню. Насамперед слід відзначити, що за результатами лабораторних випроб не експлуатована сталь виявила менший опір корозії, ніж експлуатована, що не узгоджується із численними літературними даними щодо інтенсифікуючого впливу експлуатаційної деградації конструкційних сталей на швидкість їх корозії [3]. Тому виявлений протилежний ефект може бути зумовлений структурним чинником. Неоднорідна структура двофазних сталей (у нашому випадку це грубі перлітні зерна з феритною облямівкою) зумовлює і електрохімічну неоднорідність за впливу корозивного середовища (іншими словами електрохімічну гетерогенність), що, в свою чергу, спричиняє формування мікрогальванопар. Саме їх активність визначає швидкість корозії сталей, а ця активність залежить від інтенсивності катодних електродних реакцій на катодних ділянках, що лімітують корозію. Що більша площа катодних ділянок, то менше гальмуються катодні електродні реакції внаслідок поляризувального впливу анодних ділянок. Отже, активність мікрогальванопар і, відповідно, швидкість корозії сталі зростає зі збільшенням величини зерна, тобто структурної неоднорідності. Звідси, менший опір корозії не експлуатованої сталі проти експлуатованої зумовлений сильнішою її електрохімічною гетерогенністю внаслідок більшої структурної неоднорідності. Цей ефект став би ще очевиднішим, якби сталь експлуатованої труби досліджували у вихідному стані.

За характеристиками міцності та пластичності (табл. 2) сталь у вихідному стані відповідала регламентованим вимогам до сталей обсадних труб групи міцності Д [3]. У вихідному стані сталь мала особливо низьку ударну в'язкість, хоч стандарт [4] і не передбачає контролю сталей за їх опором крихкому руйнуванню. Разом з тим, оскільки не можна виключити ймовірності крихкого руйнування металу під час експлуатації (через наявність гідрударних навантажень, дію яких однозначно підсилюють глибокі корозійні ураження на внутрішній поверхні труб, спричинені їх тривалою експлуатацією), слід з пересторогою ставитися до здатності обсадних труб з такою низькою ударною в'язкістю забезпечувати безперебійну роботоздатність свердловин. Згідно з хімічним аналізом за вмістом елементів встановили, що сталь відповідає групі міцності Е. Механічні властивості металу цієї групи міцності та експлуатованого металу обсадної труби наведено в таблиці 2. Механічні характеристики міцності і пластичності не виявили чутливості до експлуатаційної деградації.

Таблиця 2. Механічні характеристики сталі обсадних труб
Table 2. The mechanical characteristic of the casing pipes steels

Матеріал	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2}/\sigma_b$	δ , %	Ψ , %	KCV, kJ/m ²	НВ
Регламентовані характеристики згідно ГОСТ 632-80							
Сталь 50Г групи міцності Д	>655	379...552	-	>14,3	>40	Не регламентоване	229
Сталь 32Г2 групи міцності Е	>689	552...758	-	>13	>45	>500	207
Метал досліджених труб							
у вихідному стані	736	392	0,53	16,6	51,0	223	205
після експлуатації	792	650	0,82	16,7	70,8	1625	191

Така низька ударна в'язкість сталі у вихідному стані фрактографічно проявилася крихким руйнуванням без губ витягування, а елементи в'язкого руйнування зафіксували лише в околі дна надрізу (на глибину до 0,2 мм). Руйнування розпочиналося в центрі робочого перерізу зразків (по їх товщині) і віялоподібно поширювалося за кризьзерним механізмом на весь їх переріз. Особливістю руйнування на мікрорівні є чіткий зв'язок рельєфу зламу з ферит-перлітною структурою сталі. Це прослідковували і на стартовій ділянці руйнування, і на ділянці спонтанного крихкого руйнування у вигляді зон з чітко окресленими межами між пластиноподібними складниками грубодисперсного перліту (рис. 5 а). При цьому простежували зміну орієнтації складових перліту від зерна до зерна. За сприятливої орієнтації пластин цементиту по відношенню до напрямку поширення руйнування на зламі фіксували практично паралельні ряди це-

ментиту, перемежовані феритом. Якщо ж фронт руйнування перетинав пластини цементиту, на зламі спостерігали дрібні округлі чи еліпсоподібні ямки. Типові в'язкі елементи руйнування (ямки) виявляли лише в межах фериту (рис. 5 *b, c*). Вплив структури металу на механізм руйнування не такий відчутний, але його фіксували також на етапі спонтанного крихкого крізь зеренного руйнування (рис. 5 *c*). Отже, навіть за високої швидкості руйнування структура впливає на характер руйнування.

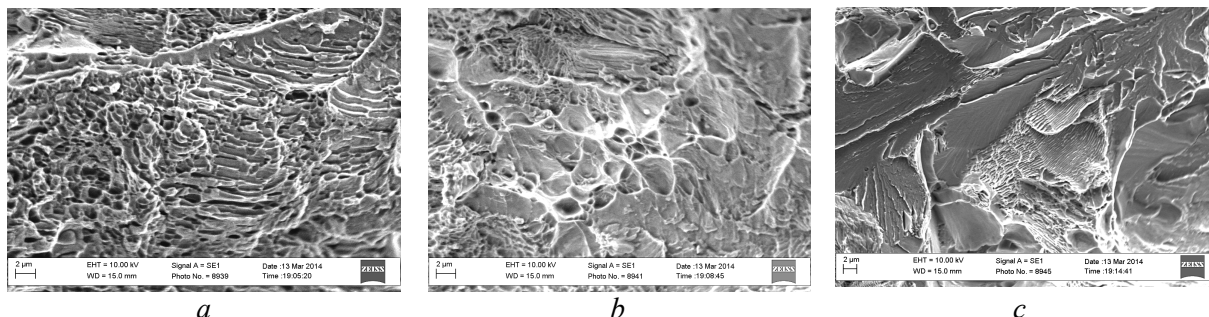


Рис. 5. Фрактографічні особливості руйнування поздовжніх зразків Шарпі, вирізаних з обсадних труб, на стартовому (*a, b*) та спонтанному (*c*) етапах руйнування.

Fig. 5. Fractographical features of destruction longitudinal Sharp samples cut from the casing pipes on the start (*a, b*) and spontaneous (*c*) destruction stages.

Оскільки характеристики опору крихкому руйнуванню сталей обсадних труб нижчої категорії міцності не регламентовані чинними нормативними документами [3–5], їх невисокі значення формально не є підставою для визнання цих сталей непридатними для експлуатації. Однак ці сталі особливо чутливі до дії корозивно-наводнювальних середовищ. Це береться до уваги для забезпечення робоздатності магістральних і промислових нафто- та газогонів [1]. Тому немає підстав робити виняток щодо вимог для обсадних труб.

ВИСНОВКИ

Чинні нормативні документи, регламентуючи механічні властивості сталей обсадних труб, не враховують можливість їх крихкого руйнування за дії експлуатаційних корозивно-наводнювальних середовищ (пластових вод). Тому існує потреба, по-перше, у запровадженні в практику вхідного контролю структури сталей обсадних труб, щоб виключити використання сталей з грубо дисперсною структурою, які виявили найвищу схильність до утворення корозійних уражень, а, по-друге, у доповненні чинних регламентуючих документів вимогами стосовно характеристик опору крихкому руйнуванню сталей обсадних труб як найчутливіших до реального технічного стану металу і перед, і після його тривалої експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Крижанівський Є.І., Никифорчин Г.М. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: Наук.-техн. пос. в 3-х т. За ред. В.В. Панасюка. – Івано-Франківськ: Івано-Франк. нац. техн. ун-т нафти і газу. – Т. 1: Основи оцінювання деградації трубопроводів. – 2010. – 458 с.; Т. 2: Деградація нафтопроводів та резервуарів і її запобігання. – 2011. – 448 с.; Т. 3: Деградація газопроводів та її запобігання. – 2012. – 432 с.
2. ГОСТ 4543-71. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 68 с.
3. ГОСТ 632-80. Трубы обсадные и муфты к ним. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 66 с.
4. ДСТУ ISO 11960:2006. Нафтогазова промисловість. Труби сталеві обсадні або насосно-компресорні для свердловин. Технічні умови (ISO 11960:2004, IDT). – К.: Держспоживстандарт України, 2008. – 264 с.
5. ГОСТ Р 53366-2009. Трубы стальные, применяемые в качестве обсадных или насосно-компресорных труб для скважин в нефтяной и газовой промышленности. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2010. – 187 с.