

УДК 620.191.33

МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ РУЙНУВАННЯ ТА МІЦНОСТІ ТРУБОПРОВІДНИХ СТАЛЕЙ ТА КОНСТРУКЦІЙ ЗА ДІЇ РОБОЧИХ СЕРЕДОВИЩ. Ч. II. ВПЛИВ ВОДНЕВОВМІСНИХ СЕРЕДОВИЩ

А. М. СИРОТЮК, І. М. ДМИТРАХ

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

Узагальнено сучасні методи оцінки міцності та ризику руйнування елементів трубопроводних конструкцій за підходами механіки руйнування матеріалів із урахуванням особливостей впливу водневовмісних середовищ. Розроблено методологію та встановлено характеристичні значення концентрації водню в металі залежно від прикладених напружень та фізико-хімічних умов наводнювання. На цій основі запропоновані нові методи оцінювання міцності трубопроводних сталей за дії робочих водневовмісних середовищ.

Ключові слова: *трубопроводні конструкції; низьколеговані сталі; водневовмісні середовища; статичні та циклічні навантаження; наводнюваність металу і концентрація водню; водневе окрихчення.*

На сьогодні загальновідомий факт різноманітності впливу водню на механічні властивості конструкційних металів і сплавів залежно від класу матеріалів, а також умов їх наводнювання. Це підтверджують численні літературні дані (див. наприклад, [1–3]). Однак, не дивлячись на це, все ще відсутні достатньо повні уявлення про весь спектр фізичних механізмів дифузії водню в метал, його концентрації біля зон підвищеної напруженості в металі і руйнування металів за цих умов. Тому важливо встановити вплив водню в металі на міцність та роботоздатність конструкційних сталей за їх статичного та циклічного навантаження у водневовмісних середовищах.

В останні роки у співпраці з іншими науковими колективами комплексно досліджували [4–8] низку низьколегованих сталей, які є найбільш типовими для систем транспортування водневовмісних середовищ. Зокрема, вивчали трубопроводні сталі класу API: X52; X70 та X100, а також феритно-перлітні сталі 20 та 16ГС, які також використовують для виготовлення трубопроводів. Випробовували в умовах електролітичного наводнювання металу у спеціальному водному розчині NS4, що є найбільш загальноприйнятним та ефективним методом [4–6, 9–12]. Зауважимо, що під час наводнювання зразки були навантажені. Рівень навантаження відповідав номінальному напруженню розтягу $\sigma = \sigma_{\text{exp}}$, яке виникає в стінці труби під час її експлуатації з внутрішнім тиском $p_{\text{exp}} = 7$ МПа. Для визначення об'ємної концентрації водню в матеріалі застосовували модифіковані електрохімічні підходи [4–6, 12, 13], що ґрунтуються на вивченні окиснення наводненого металу [14]. Нижче подано узагальнені результати цих досліджень.

Оцінювання схильності до наводнювання трубопроводних сталей. Визначення середньої об'ємної концентрації водню в матеріалі C_H залежно від часу дії середовища τ та прикладених механічних напружень σ_{exp} має принципово важливе значення для подальшого дослідження його міцності та довговічності в умовах тривалої експлуатації у водневовмісних середовищах.

Для цих сталей ефективність проникнення водню достатньо низька та залежить від тривалості наводнювання [4, 15]. Тут характерні немонотонні залежності концентрації C_H від часу наводнювання τ (рис. 1). Досягнувши максимуму, концентрація водню в металі з часом зменшується, і час $\tau_{C_{H(\max)}}$ неоднаковий для різних сталей. Під час наводнювання ненавантажених зразків ($\sigma = 0$) значення $C_{H(\max)}$ досягається в такій послідовності: X100 – X70 – X52 (рис. 1a), а для навантажених ($\sigma = \sigma_{\text{exp}}$): X70 – X52 – X100 (рис. 1b). Значення $C_{H(\max)}$ та $\tau_{C_{H(\max)}}$ наведено в табл. 1.

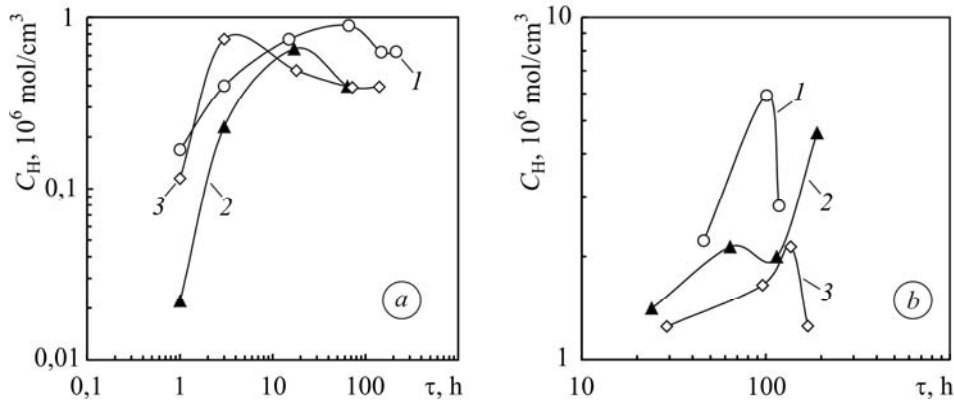


Рис. 1. Концентрація водню в металі залежно від часу наводнювання для ненавантажених (a) та навантажених (b) зразків зі сталей X52 (1); X70 (2) та X100 (3).

Fig. 1. Hydrogen concentration in metal depending on hydrogenation time for non-loaded (a) and loaded (b) X52 (1), X70 (2) and X100 (3) steel specimens.

Таблиця 1. Максимальна концентрація водню $C_{H(\max)}$ та відповідний час її досягнення $\tau_{C_{H(\max)}}$

Сталь	Невантажений метал ($\sigma = 0$)		Під напруженням ($\sigma = \sigma_{\text{exp}}$)		$\frac{C_{H(\max)}^{\text{stressed}}}{C_{H(\max)}^{\text{unloaded}}}$
	$C_{H(\max)}$, 10^6 mol/cm^3	$\tau_{C_{H(\max)}}$, h	$C_{H(\max)}$, 10^6 mol/cm^3	$\tau_{C_{H(\max)}}$, h	
X52	0,895	66	5,924	101	6,62
X70	0,665	17	2,133	64	3,21
X100	0,747	3	2,136	136,5	2,86

У діапазоні $\tau \leq \tau_{C_{H(\max)}}$ інтенсивність абсорбції водню сталями можна оцінити за нахилом кривих $C_H = f(\tau)$. Невантажені зразки зі сталі X52 мають найнижчу початкову швидкість поглинання водню, а зі сталі X100 – найвищу. Навантаженим зразкам зі сталі X70 властива найвища початкова швидкість абсорбції водню. З іншого боку, час досягнення максимуму його концентрації найкоротший для ненавантаженої X100 та навантаженої X70 сталей.

Наведені результати свідчать про відмінність процесів на межі поділу “середовище–поверхня металу” для різних сталей, що спричинено їх мікроструктурними особливостями та хімічним складом [4–6, 15, 16], а також про суттєву різницю значень $C_{H(\max)}$ (табл. 1). Загалом така тенденція є очікуваною і відомою в літературі, однак одержані нами дані мають практичну цінність, оскільки відтворюють вплив експлуатаційних напружень для розглянутих типорозмірів труб,

коли заданий внутрішній тиск. Встановлено, що абсорбція водню у сталі X52 найчутливіша до прикладення напружень. Тут величина $C_{H(max)}$ зростає більш ніж у шість разів порівняно із ненавантаженим металом. Цей факт слід враховувати, розробляючи ефективні методи оцінювання роботоздатності трубопроводів транспортування водню чи водневовмісних середовищ.

На нашу думку, певну умовну порівняльну оцінку схильності до наводнювання цих сталей слід робити в діапазоні $0 \leq \tau \leq \tau_{max}$, коли деякий час ще зберігається первісний (“virgin”) стан поверхні металу. В таких умовах найефективніше поглинає водень сталь X100. Цей факт важливий, коли досліджувати наводнювання металу зі свіжої поверхні, наприклад, під час розвитку дефектів типу тріщин. Тоді в сталі X100 слід очікувати суттєве пришвидшення розвитку тріщин. Для тривалої витримки, тобто для діапазону $\tau \geq \tau_{C_{H(max)}}$, зростання концентрації водню у металі залежно від часу експозиції зразків в умовах наводнювання можна описати степеневу залежністю [6, 15]

$$C_H = A \cdot 10^{-6} \cdot \tau^m \text{ [mol/cm}^3\text{]}, \quad (1)$$

де A і m – константи системи “матеріал–середовище” (табл. 2).

Таблиця 2. Значення констант у залежності (1)

Сталь	Ненавантажений метал ($\sigma = 0$)		Під напруженням ($\sigma = \sigma_{exp}$)	
	A	m	A	m
X52	0,253	0,24	0,30	0,57
X70	0,049	0,67	0,40	0,42
X100	0,200	0,19	0,80	0,13

За схильністю до наводнювання за цих умов досліджені сталі можна розмістити у такий ряд: X52 – X70 – X100 (табл. 3). Тобто їх здатність поглинати водень слабшає за переходу від перлітно-феритної структури (X52) до структури полігонального фериту (X70), а відтак – до феритно-бейнітної (X100).

Таблиця 3 . Концентрація водню в сталях залежно від їх механічних властивостей ($\tau = 200$ h)

Сталь	σ_y	σ_U	$C_H,$ 10^6 mol/cm^3
	МПа		
X52	410	528	6,14
X70	590	712	3,70
X100	866	890	1,59

Результат порівняльної оцінки схильності до наводнювання сталей X52, X70 та X100 ілюструє рис. 2. Як бачимо, різниця між значеннями $C_{H(max)}$ для ненавантаженого металу практично відсутня, хоча дещо більша для сталі X52, ніж для сталей X70 та X100. Однак при $\sigma = \sigma_{exp}$ опір наводнюванню сталі X52 суттєво падає, а сталі X70 та X100 приблизно однаково опираються поглинанню водню, хоча сталь X100 – дещо сильніше. Отже, опірність до наводнювання сталей знижується зі зменшенням границі текучості матеріалу.

Слід відзначити, що викладені результати одержані в умовах, дуже близьких до реальних, що робить їх придатними для розроблення критеріїв оцінювання міцності та роботоздатності трубопроводів.

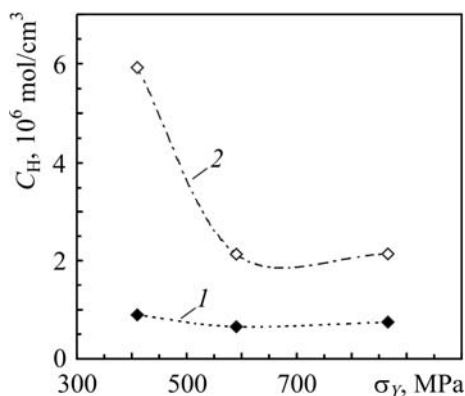


Рис. 2. Залежність максимальної концентрації водню в сталях X52, X70, X100 від їх границі текучості σ_Y :

1 – $\sigma = 0$; 2 – $\sigma = \sigma_{\text{exp}}$.

Fig. 2. Dependence of maximal hydrogen concentration in X52, X70, X100 steels on their yield stress σ_Y :

1 – $\sigma = 0$; 2 – $\sigma = \sigma_{\text{exp}}$.

Вплив водню на руйнування та локальну міцність сталей біля дефектів – концентраторів напружень. Щоб забезпечити довготривалу міцність та оцінити ризик руйнування систем транспортування водню, принципово важливо визначити локальні характеристики міцності матеріалів біля модельних дефектів – концентраторів напружень у присутності водню. Ефективною характеристикою матеріалу вважають [5, 15] роботу його локального руйнування біля надрізу за

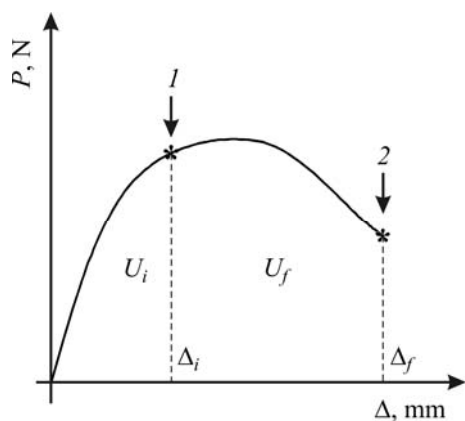


Рис. 3. Схема визначення параметрів U_i та U_f : 1 – початок руйнування (за сигналом АЕ); 2 – руйнування зразка.

Fig. 3. Scheme of determination of parameters U_i and U_f : 1 – start of fracture (according to AE-signal); 2 – fracture of specimen.

“навантаження–переміщення” визначають (рис. 3) роботу початку локального руйнування матеріалу біля концентратора напружень U_i , а також загальну роботу руйнування зразка з таким концентратором U_f [5, 15]:

$$U_i = \int_0^{\Delta_i} P(\Delta) \cdot d\Delta, \quad (2)$$

$$U_f = \int_0^{\Delta_f} P(\Delta) \cdot d\Delta. \quad (3)$$

Концентрацію водню в металі C_H визначали за формулою (1) (табл. 4).

Таблиця 4. Значення параметрів U_i та U_f для сталей за умов їх наводнювання впродовж часу τ

τ , h	U_i	U_f	C_H , 10^6 mol/cm^3
	N·m		
Сталь X52			
0	27,23	226,47	0
46	32,12	170,84	2,660
101	26,57	126,33	4,165
118	15,53	132,98	4,551
167,3	10,47	124,90	5,553
Сталь X70			
0	17,64	145,46	0
24	12,68	136,26	1,52
64	6,88	142,62	2,294
114,5	11,41	135,59	2,929
190	15,25	129,00	3,623
Сталь X100			
0	119,00	318,00	0
29	114,75	312,63	1,239
96	102,86	296,78	1,448
136,5	64,29	258,46	1,516
169	12,72	241,77	1,558

Отже (рис. 4), існує деякий критичний час наводнювання сталей, коли досягається відповідна критична концентрація C_H^* , внаслідок чого суттєво знижується їх опір руйнуванню. Її значення встановили за залежностями $U_i=f(C_H)$ та $U_f=f(C_H)$. Слід зауважити, що вони збігаються (табл. 5), тому що параметр U_f можна вважати характеристичним для цього класу сталей за вказаних фізико-хімічних умов наводнювання.

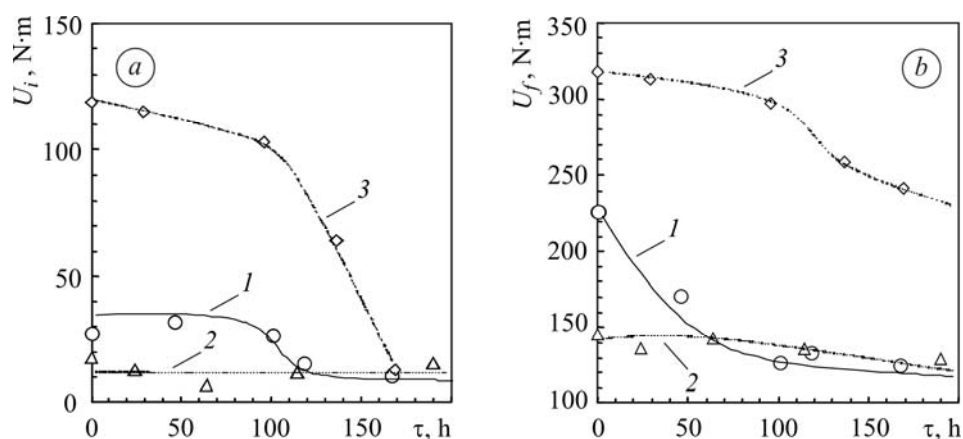


Рис. 4. Залежність параметрів U_i (a) та U_f (b) для сталей X52 (1), X70 (2) та X100 (3) від часу наводнювання зразків.

Fig. 4. Dependence of parameters U_i (a) and U_f (b) for X52 (1), X70 (2) and X100 (3) steels on hydrogenation time of specimens.

Таблиця 5. Оцінка критичної концентрації водню C_H^* для трубопровідних сталей

Сталь	$C_H^*, 10^6 \text{ mol/cm}^3$	
	за значеннями U_i	за значеннями U_f
X52	4,3	4,3
X70	2,3	2,3
X100	1,5	1,5

Таким чином, величину C_H^* з-поміж інших важливих інженерних параметрів можна рекомендувати для оцінки надійності та довговічності трубопроводів транспортування водню, виготовлених зі сталей X52, X70 та X100. Використовуючи її, порівняльно оцінювали вплив водню на локальну міцність сталей біля

концентраторів напружень. Зазначимо, що термін “критична концентрація” часто вживають у водневому матеріалознавстві, однак фізичний його зміст у різних працях різний. Тут – це така концентрація водню в металі, за досягнення якої локальний опір матеріалу руйнуванню біля надрізу суттєво втрачається.

Порівняльна оцінка параметра C_H^* для досліджуваних сталей виявила таке. Існує тенденція монотонного його пониження зі зростанням границь текучості σ_Y чи міцності σ_U матеріалу (рис. 5). Ці закономірності можна описати степеневими функціями типу [5]

$$C_H^* = \frac{A_1}{(\sigma_Y)^{n_1}}, \quad (4)$$

$$C_H^* = \frac{A_2}{(\sigma_U)^{n_2}}, \quad (5)$$

де A_1, A_2, n_1, n_2 – деякі константи властивостей матеріалу та умов випробувань. Тут слід зазначити, що для вказаних сталей стандартне середньоквадратичне відхилення високе ($R^2 = 0,98 \dots 0,99$), що свідчить про достовірність опису одержаних результатів за допомогою співвідношень (4) і (5):

$$C_H^* \cdot (\sigma_Y)^{n_1} = A_1 = \text{const}, \quad (6)$$

$$C_H^* \cdot (\sigma_U)^{n_2} = A_2 = \text{const}. \quad (7)$$

Тобто існує певна критична комбінація параметрів C_H^* та σ_Y (або σ_U).

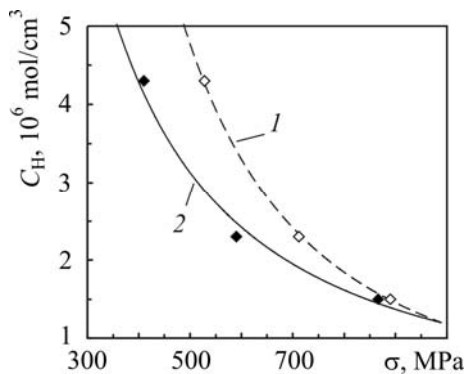


Рис. 5. Залежність критичної концентрації водню C_H^* у металі від границь текучості σ_Y та міцності σ_U :

$$1 - C_H^* = 10^6 (\sigma_U)^{-2,0212}; R^2 = 0,9994;$$

$$2 - C_H^* = 19486 (\sigma_Y)^{-1,4058}; R^2 = 0,9848.$$

Fig. 5. Dependence of critical hydrogen concentration C_H^* in metal on yield stress σ_Y

and ultimate stress σ_U : $1 - C_H^* = 10^6 (\sigma_U)^{-2,0212}; R^2 = 0.9994;$

$$2 - C_H^* = 19486 (\sigma_Y)^{-1,4058}; R^2 = 0.9848.$$

Для цього класу сталей у першому наближенні можна вважати, що

$$C_H^* \approx \frac{1}{\sigma_U^2}. \quad (8)$$

Залежність (8) можна рекомендувати для інженерних оцінок під час вибору марки трубопровідної сталі на початкових етапах проектування нових трубопроводів або заміни зношених ділянок існуючих.

Оцінка концентрації водню біля тріщиноподібних дефектів та визначення циклічної тріщиностійкості матеріалів у водневовмісних середовищах. Наведені вище результати обмежені визначенням опору руйнуванню сталевих зразків з концентраторами напружень, які моделюють механічні дефекти типу надрізів, подряпин та вм'ятин, з заокругленою вершиною. Для глибшого розуміння впливу водню на довговічність конструктивних елементів водневої енергетичної інфраструктури у реальних експлуатаційних умовах необхідні також дані про поширення тріщин, яке інтенсифікує водень, оскільки, наприклад, відомі випадки порушення суцільності трубопроводів в результаті субкритичного підростання тріщиноподібних дефектів [17, 18].

Для цього спільно із ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України виконали комплекс фізико-механічних досліджень [7, 8] для експериментального встановлення взаємозв'язку між об'ємною концентрацією водню в металі і локальною біля вершини гострих концентраторів напружень – тріщин, а також параметрами, що характеризують розвиток тріщини в низьколегованій трубопровідній сталі 16ГС за циклічного навантаження у наводнювальних середовищах різного складу.

Щоб визначити концентрацію водню біля вершини тріщини, використали спеціальний метод локального мас-спектрального аналізу з лазерним мікрозондом [7, 8], а процедура досліджень була така. Під час досягнення тріщиною у циклічно деформованому наводненому зразку певної довжини a випробовування зупиняли і визначали локальну концентрацію водню в околі її вершини. При цьому сканували, починаючи з віддалі 0,1 мм від вершини тріщини в напрямку її поширення і в напрямку, перпендикулярному до площини поширення. Виявили, що для обох напрямків сканування концентрація водню в металі різко знижується з віддаленням від вершини тріщини і прямує до певного значення, що відповідає концентрації в об'ємі металу за даних умов випробувань (рис. 6).

Рис. 6. Розподіл локальної концентрації водню біля вершини втомної тріщини різної довжини a в низьколегованій сталі 16ГС (об'ємна концентрація водню в металі $C_{H(v)} = 1,97$ ppm; сканування в напрямку, перпендикулярному до площини поширення тріщини на віддалі 0,1 мм від її вершини):
 ◆ – $a = 3,18$ mm; ◇ – 4,78; ▲ – 7,53;
 □ – 8,58; * – 9,98; ○ – 12,53 mm.

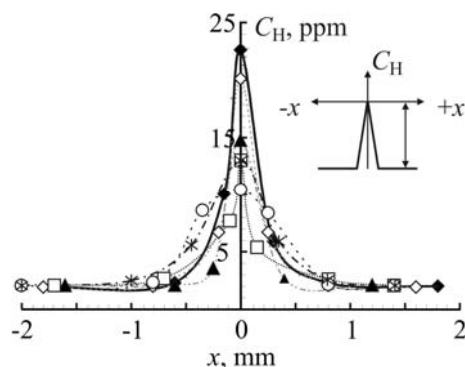


Fig. 6. Examples of local hydrogen distribution at the tip of fatigue crack of different length a in low-alloyed 16GS steel (hydrogen concentration in bulk of metal $C_{H(v)} = 1.97$ ppm; scanning in perpendicular direction to the crack propagation plane at the distance of 0.1 mm from the crack tip): ◆ – $a = 3.18$ mm; ◇ – 4.78; ▲ – 7.53; □ – 8.58; * – 9.98; ○ – 12.53 mm.

За результатами цих випроб для п'яти різних значень об'ємної концентрації водню $C_{H(v)}$ в сталі 16ГС встановили [7] залежності між швидкістю росту втомної

тріщини da/dN та розмахом коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) ΔK в її вершині; між локальною концентрацією водню біля вершини втомної тріщини $C_{H(t)}$ та розмахом КІН ΔK ; між локальною концентрацією водню біля вершини втомної тріщини $C_{H(t)}$ та швидкістю її росту в сталі da/dN .

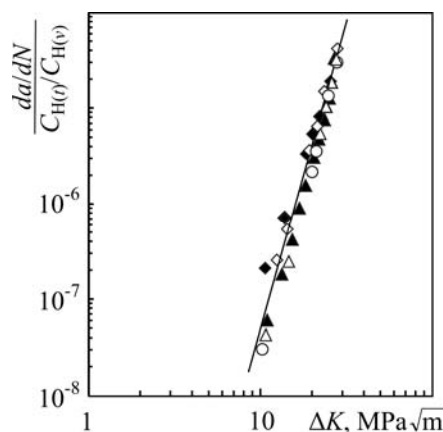


Рис. 7. Взаємозв'язок між швидкістю росту тріщини, локальною концентрацією водню у її вершині, середньою його концентрацією в об'ємі металу та КІН (сталь 16ГС, $f=1$ Hz, $R=0$, $H_2O + HCOOH$, пряму описує залежність (9)):
 ◆ – $C_{H(v)} = 1,97$ ppm; ◇ – 2,07;
 ▲ – 2,20; △ – 2,47; ○ – 2,68.

Fig. 7. Relationship between crack growth rate, local hydrogen concentration at the crack tip, hydrogen concentration in the metal bulk and stress intensity factor (steel 16ГС, $f=1$ Hz, $R=0$, $H_2O + HCOOH$, line is described by dependence (9)):
 ◆ – $C_{H(v)} = 1.97$ ppm; ◇ – 2.07; ▲ – 2.20; △ – 2.47; ○ – 2.68.

Результати досліджень узагальнили у вигляді діаграми (рис. 7), яка пов'язує у подвійній логарифмічній системі координат величини $(da/dN)/(C_{H(t)}/C_{H(v)})$ та ΔK і вказує на лінійну залежність між ними. При цьому середньоквадратичне відхилення r^2 експериментальних даних від аналітичної прямої досить суттєве і становить 0,98. Необхідно відзначити, що діаграма єдина для всіх п'яти значень (див. рис. 7) об'ємної концентрації водню $C_{H(v)}$ у цій сталі.

Враховуючи це, швидкість росту втомної тріщини da/dN в низьколегованих трубопровідних сталях в умовах наводнювання подали [7] як функцію локальної концентрації водню біля вершини тріщини, концентрації водню в об'ємі металу і розмаху КІН, що зумовлений зовнішнім навантаженням:

$$\frac{da}{dN} = A \cdot \left(\frac{C_{H(t)}}{C_{H(v)}} \right) \cdot (\Delta K_I)^m, \quad (9)$$

де величини $C_{H(v)}$ і $C_{H(t)}$ задовольняють умови

$$C_{H(v)} \neq 0; C_{H(t)} \geq C_{H(v)}. \quad (10)$$

Залежність (9) є важливим результатом фізико-хімічної механіки матеріалів для визначення та прогнозування довговічності металевих конструкцій у водневмісних середовищах.

Оцінювання роботоздатності та ризику руйнування трубопроводів в умовах дії водневмісних середовищ. Одержані результати можуть послужити основою для експертних оцінок надійності та продовження експлуатації трубопровідних систем із виявленими дефектами. Використовуючи залежність (22), а також результати експериментів [7], розраховували локальну концентрацію водню біля вершини тріщини $C_{H(t)}$ за різного його вмісту в об'ємі металу $C_{H(v)}$ та різної швидкості da/dN розвитку тріщини. За основу брали спрощену діаграму циклічної тріщиностійкості матеріалів для трубопровідних сталей для різних умов наводнювання (рис. 8). Встановили значення порогового K_{th} та критичного K_{fc}

КІН від концентрації $C_{H(v)}$. Тріщиноподібні дефекти у стінці трубопроводу з внутрішнім діаметром d та товщиною стінки t моделювали півеліптичною тріщиною із розмірами півосей a та c [17].

Рис. 8. Діаграма циклічної тріщинозростаючості трубопровідних сталей у водневовмісних середовищах; суцільна лінія описується залежністю (9),

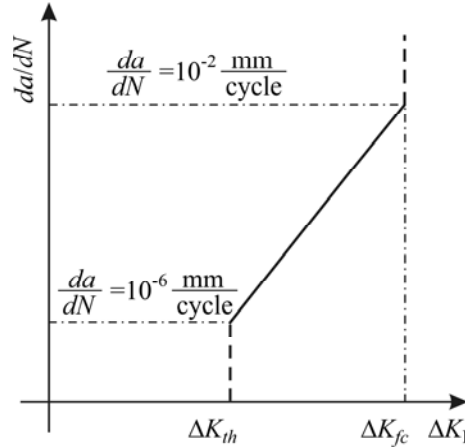
$$\Delta K_{th} = \Delta K_{da/dN=10^{-6} \text{ mm/cycle}}$$

$$\Delta K_{fc} = \Delta K_{da/dN=10^{-2} \text{ mm/cycle}}$$

Fig. 8. Schematic presentation of fatigue crack growth diagram for pipeline steels in hydrogen-containing environments; solid line is described by (9),

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{da/dN=10^{-6} \text{ mm/cycle}}$$

$$\Delta K_{fc} = \Delta K_{da/dN=10^{-2} \text{ mm/cycle}}$$



Побудували також залежності порогової глибини півеліптичного дефекту c_{th} та критичної глибини тріщини c_{fc} для трубопроводу із розмірами $D=610$ mm, $t=11$ mm від середньої концентрації водню в об'ємі металу труби $C_{H(v)}$ (рис. 9). Ці діаграми можна розглядати як базові для оцінювання роботоздатності та ризику руйнування трубопроводу за конкретних умов його експлуатації, а також для диференційованої оцінки впливу на довговічність конструкції розмірів виявлених дефектів залежно від стану матеріалу трубопроводу (ступеня його наводнення).

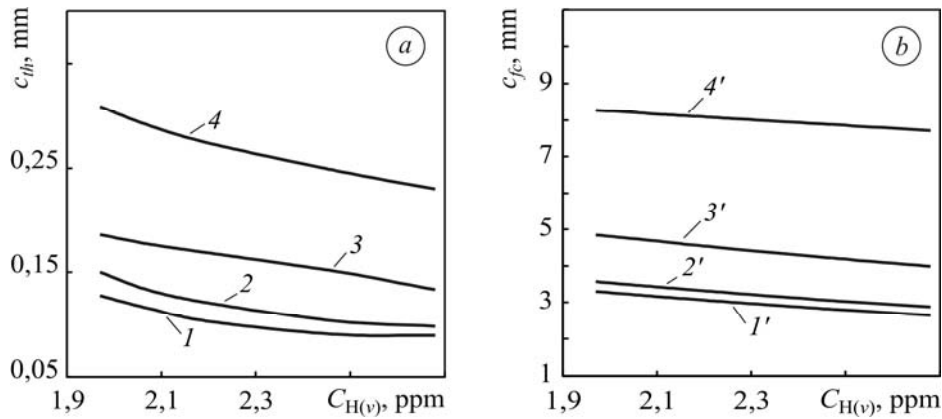


Рис. 9. Вплив об'ємної концентрації водню в металі на критичні розміри дефектів c_{th} (a) та c_{fc} (b) у трубопроводі з перерізом $D=610$ mm, $t=11$ mm: 1, 1' - $c/a=0,01$; 2, 2' - $0,1$; 3, 3' - $0,4$; 4, 4' - $0,8$.

Fig. 9. Influence of hydrogen concentration in the bulk of metal on the critical sizes of defects c_{th} (a) and c_{fc} (b) in the pipeline with cross-section $D=610$ mm, $t=11$ mm: 1, 1' - $c/a=0,01$; 2, 2' - $0,1$; 3, 3' - $0,4$; 4, 4' - $0,8$.

За одержаними результатами розробили комп'ютерну експертну програму для оцінювання роботоздатності та подальшої безпечної експлуатації дефектних трубопроводів, за якою можна зробити експертний висновок про ризик руйнування конструкції [17, 19, 20–22].

ВИСНОВКИ

Узагальнено сучасні методи оцінки міцності та ризику руйнування елементів трубопровідних конструкцій за підходами механіки руйнування матеріалів із урахуванням особливостей впливу водневовмісних середовищ. Розроблено методологію та встановлено характеристичні значення концентрації водню в металі залежно від прикладених напружень та фізико-хімічних умов наводнювання. Виявлено деяку критичну концентрацію водню в металі, яка спричиняє суттєву втрату матеріалом опору локальному руйнуванню, і встановлено її значення для низьколегованих трубопровідних сталей. Цю характеристичну величину з-поміж інших важливих інженерних параметрів можна рекомендувати для оцінки надійності та довговічності трубопроводів транспортування водню. З використанням підходів механіки руйнування запропоновано та обґрунтовано критерії оцінки безпечної експлуатації трубопроводу з тріщиноподібними дефектами у водневовмісному робочому середовищі різного складу. Встановлено вплив об'ємної концентрації водню в металі трубопроводу з тріщиноподібними дефектами на його міцність та тріщиностійкість.

РЕЗЮМЕ. Обобщены современные методы оценки прочности и риска разрушения элементов трубопроводных конструкций за подходами механики разрушения материалов с учетом особенностей влияния водородосодержащих сред. Разработана методология и установлены характеристические значения концентрации водорода в металле в зависимости от приложенных напряжений и физико-химических условий наводороживания. Предложены новые методы оценки прочности трубопроводных сталей при воздействии рабочих водородосодержащих сред.

SUMMARY. The modern methods for strength and fracture risk assessment of pipeline structures are generalized on the base of fracture mechanics approaches and with account of specific influence of hydrogen-containing environments. The methodology was developed and the characteristic values of hydrogen concentration in the metal, depending on the applied stresses and physico-chemical conditions of hydrogenation, were established. On this basis the new methods for assessing the strength of the pipeline steels in hydrogen-containing environments were proposed.

1. *Hanneken J.W.* Hydrogen in metals and other materials: a comprehensive reference to books, bibliographies, workshops and conferences // *Int. J. of Hydrogen Energy.* – 1999. – **24**, № 10. – P. 1005–1026.
2. *Effects of Hydrogen on Materials: Proceedings of the 2008 International Hydrogen Conference* / Ed. by Brian Somerday, Petros Sofronis, Russell Jones. – Ohio (USA): ASM Int., Materials Park, 2009. – 766 p.
3. *Carter T. J. and Cornish L. A.* Hydrogen in metals // *Engng. Failure Analysis.* – 2001. – **8**, № 2. – P. 113–121.
4. *Capelle J., Dmytrakh I., and Pluinage G.* Comparative assessment of electrochemical hydrogen absorption by pipeline steels with different strength // *Corr. Sci.* – 2010. – **52**, № 5. – P. 1554–1559.
5. *The effect of hydrogen concentration on fracture of pipeline steels in presence of a notch* / J. Capelle, J. Gilgert, I. Dmytrakh et al. // *Eng. Fract. Mech.* – 2011. – **78**, № 2. – P. 364–373.
6. *Sensitivity of pipelines with steel API X52 to hydrogen embrittlement* / J. Capelle, J. Gilgert, I. Dmytrakh et al. // *Int. J. of Hydrogen Energy.* – 2008. – **33**, № 24. – P. 7630–7641.
7. *Relationship between fatigue crack growth behaviour and local hydrogen concentration near crack tip in pipeline steel* / I. M. Dmytrakh, O. D. Smiyan, A. M. Syrotyuk et al. // *Int. J. of Fatigue.* – 2013. – **50**. – P. 26–32.
8. *Dmytrakh I. M., Smiyan O. D., and Syrotyuk A. M.* Experimental study of fatigue crack growth in pipeline steel under hydrogenating conditions [Електронний ресурс] // *Fracture of Materials and Structures from Micro to Macro Scale: 18th European Conf. on Fracture (ECF-18), 30.08–03.09.2010: Dresden (Germany): DVM, 2010.*
9. *Cheng Y. F. and Niu L.* Mechanism for hydrogen evolution reaction on pipeline steel in near-neutral pH solution // *Electrochemistry Communications.* – 2007. – **9**, № 4. – P. 558–562.

10. Cheng Y. F. Fundamentals of hydrogen evolution reaction and its implications on near-neutral pH stress corrosion cracking of pipelines // *Electrochimica Acta*. – 2007. – **52**, № 7. – P. 2661–2667.
11. Hydrogen entry into pipeline steel under freely corroding conditions in two corroding media / S. Dey, A. K. Mandhyan, S. K. Sondhi et al. // *Cor. Sci.* – 2006. – **48**, № 9. – P. 2676–2688.
12. Вплив об'ємної концентрації водню в металі на особливості деформування низьколегованої трубопровідної сталі / І. М. Дмитрах, Р. Л. Лещак, А. М. Сиротюк та ін. // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2014. – **50**, № 2. – С. 16–23.
13. Методика для досліджень особливостей взаємодії деформованих поверхонь металу трубопроводів з воденьвмісними середовищами / І. М. Дмитрах, А. М. Сиротюк, Р. Л. Лещак та ін. // *Наук. вісник Івано-Франк. нац. техн. ун-ту нафти та газу*. – 2013. – **35**, № 2. – С. 144–154.
14. Yan M. and Weng Y. Study on hydrogen absorption of pipeline steel under cathodic charging // *Cor. Sci.* – 2006. – **48**, № 2. – P. 432–444.
15. Проблеми міцності матеріалів для систем транспортування водню / І. М. Дмитрах, Г. М. Никифорчин, А. М. Сиротюк та ін. // *Фундаментальні проблеми водневої енергетики* / За ред. В. Д. Походенка, В. В. Скорохода, Ю. М. Солоніна. – К.: КІМ, 2010. – С. 309–323.
16. Порівняльні дослідження руйнування труб під тиском газоподібного водню та чистого метану / І. М. Дмитрах, А. М. Сиротюк, О. Л. Лутицький та ін. // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2013. – **49**, № 4. – С. 34–44.
17. Оцінка ризику руйнування та запобігання виникненню аварійних ситуацій у парогенеруючих системах енергоблоків ТЕС за присутності техногенних органічних домішок у теплоносії / І. М. Дмитрах, О. Л. Білий, А. М. Сиротюк та ін. // *Цільова комплексна програма НАН України “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”*: Зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2007–2009 рр. / Наук. кер. Б. Є. Патон. – К.: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона, 2009. – С. 109–114.
18. Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. пос. / За заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І. М. Дмитрах, А. Б. Вайнман, М. Г. Сташук, Л. Тот / За ред. І. М. Дмитраха. – К.: Академперіодика, 2005. – 378 с.
19. Створення сучасних методів технічної діагностики працездатності систем пароводяного тракту енергоблоків ТЕС / І. М. Дмитрах, А. М. Сиротюк, Б. П. Русин та ін. // *Цільова комплексна програма НАН України “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”*: Зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2004–2006 рр. / Наук. кер. Б. Є. Патон. – К.: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона, 2006. – С. 128–132.
20. До проблеми технічної діагностики та оцінювання ризику руйнування дефектних трубопровідних систем тривалої експлуатації / Б. П. Русин, А. М. Сиротюк, О. В. Капшій та ін. // *Неруйнівний контроль та технічна діагностика: Сьома нац. наук.-техн. конф. і вист.*, 20–23 лист. 2012 р. – К.: УТ НКТД, 2012. – С. 423–427.
21. Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. пос. / За заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 13: Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень / І. М. Дмитрах, Л. Тот, О. Л. Білий та ін. / За ред. В. В. Панасюка. – Львів: Сполом, 2012. – 316 с.
22. Syrotyuk A. M. Expert system for the service damage assessment of materials in energetic [Електронний ресурс] // *Safety, Reliability and Risk of Engineering Plants and Components: 1st Hungarian-Ukrainian Joint Conference, 11–12 April 2006: Bay Zoltan Institute for Logistics and Production Systems, Miskolc (Hungary): presentation*. – Режим доступу: http://www.part.bzlogi.hu/uh_download.html.

Одержано 18.12.2013