

УДК 620.191.33

Дмитрах І.М., д.т.н., проф., чл.-кор. НАН України, Сиротюк А.М., к.т.н., Лещак Р.Л., к.т.н.
 Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна

ДЕФОРМУВАННЯ ТА ОПІР РУЙНУВАННЮ ТРУБОПРОВІДНИХ СТАЛЕЙ У ВОДЕНЬВМІСНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Dmyrakh I., Syrotyuk A., Leschak R.

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine
 (syrotyuk@ipm.lviv.ua)

STRAIN BEHAVIOUR AND FRACTURE RESISTANCE OF PIPELINE STEELS IN HYDROGEN-CONTAINED ENVIRONMENT

Поєднанням експериментальних методів фізичної хімії, механіки матеріалів та матеріалознавства досліджувались низьколеговані трубопровідні сталі з метою встановлення схильності до наводнюваності за деформування у воденьвмісних середовищах. Розроблено методологію та встановлено характеристичні значення концентрації водню на гладких металевих поверхнях та біля дефектів – концентраторів напружень залежно від прикладених навантажень та фізико-хімічних умов наводнювання. На цій основі запропоновані нові методи оцінювання міцності та опору поширенню тріщин у трубопровідних сталях за дії робочих воденьвмісних середовищ.

Ключові слова: низьколеговані сталі; воденьвмісні середовища; статичні та циклічні навантаження; наводнюваність металу і концентрація водню; водневе окрихнення.

Вступ. На сьогодні відомий факт різноманітності впливу водню на механічні властивості конструкційних металів і сплавів залежно від класу матеріалу, а також умов наводнювання. Це підтверджують численні літературні дані (див., наприклад, [1, 2]). Однак, не дивлячись на це, все ще не вироблено достатньо чітких уявлень про весь спектр фізичних механізмів дифузії водню на метал, його концентрації біля зон підвищеної напруженості в металі і механізмів руйнування металів у водні. Тому актуально встановити вплив концентрації водню в металі на міцність та роботоздатність конструкційних сталей за умов їх статичного та циклічного навантаження у воденьвмісних середовищах.

В останні роки ми у співпраці з іншими науковими колективами виконали комплекс таких досліджень [3–6] для низки низьколегованих сталей, які є найбільш типовими для трубопровідних систем транспортування водневомісних середовищ.

Постановка задачі – формулювання мети статті.

Метою роботи було встановлення впливу концентрації водню в металі на міцність та роботоздатність конструкційних сталей за умов їх статичного та циклічного навантаження у воденьвмісних середовищах.

Об'єкт дослідження: деформування та опір руйнуванню трубопровідних сталей у воденьвмісних середовищах, під якими розуміється, в першу чергу, газоподібний водень, а також потенційно воденьвмісні середовища, тобто такі, які за певних умов при взаємодії з деформованим металом можуть виділяти водень, як продукт відповідних фізико-хімічних реакцій (наприклад, водні середовища, нафтопродукти тощо).

Предмет дослідження: наводнюваність та об'ємна концентрація водню в металі трубопровідних сталей за деформування у воденьвмісних середовищах.

Методи дослідження – поєднання експериментальних методів фізичної хімії, механіки матеріалів та матеріалознавства.

Методика досліджень. Всі дослідження виконані в умовах електролітичного наводнювання металу. Слід зауважити, що в багатьох недавніх публікаціях (див. збірник [2]) обговорено результати експериментів, де використовували катодне наводнювання сталей за дуже високих поляризаційних струмів. Такий процес не відповідає наводнюванню досліджуваних конструкційних сталей у реальних умовах експлуатації, де фактично існує ситуація вільнокородівної системи. На цю обставину звернено увагу в праці [7].

Враховуючи цей факт, а також те, що досягти стабільних (усталених) умов наводнювання за потенціалу корозії важко, застосовували таку процедуру [3, 5]. Зразки наводнювали за деякого постійного потенціалу

поляризації $E_{cath} = \text{const}$, який є дещо негативніший, ніж потенціал вільної корозії для цієї сталі. Дослідження виконували у спеціальному водному розчині NS4 [3, 5], що імітує підземні води в умовах нейтральних ґрунтів (рН 6,7). Хімічний склад цього середовища наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад розчину NS4 (г/л)			
NaHCO ₃	KCl	CaCl ₂	MgCl ₂ · H ₂ O
0,483	0,120	0,137	0,131

Наводнювання контролювали, реєструючи в часі катодний поляризаційний струм $I_{cath}(\tau)$ (рис. 1). Загальну кількість утвореного на поверхні водню оцінювали за співвідношенням

$$Q_H^{ev} = \int_0^{\tau_{exp}} I_{cath}(\tau) d\tau \text{ при } E_{cath} = \text{const}. \quad (1)$$

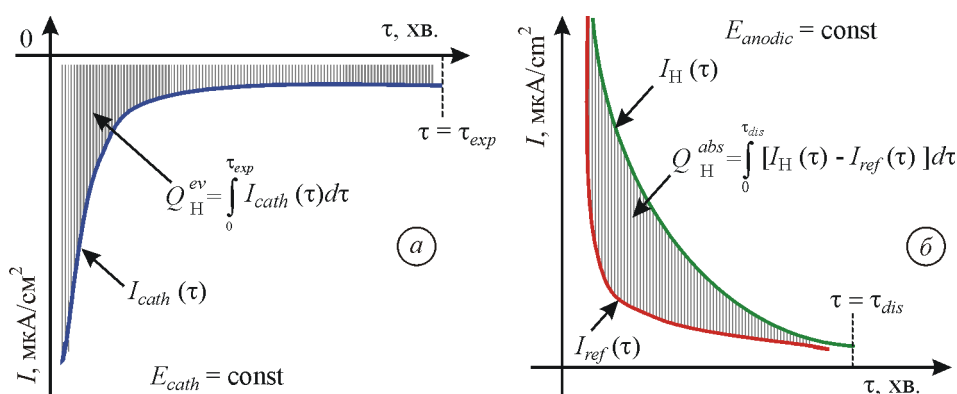


Рис. 1. Схема визначення загальної кількості утвореного на поверхні зразка водню за катодної поляризації (а) та загальної кількості абсорбованого металом водню (б)

Електрохімічний процес утворення водню на поверхні сталі в деаерованому розчині з рН, близьким до нейтрального, реалізується через реакцію електрохімічного розкладу молекули води [8]. Концентрацію водню в металі визначали за модифікованим методом [3, 5], який використовували раніше [9]. Він ґрунтується на впливі водню на реакцію окиснення сталі в умовах анодної поляризації. При цьому застосовували стандартну триелектродну електрохімічну комірку.

Окиснювали наводнений метал в 0,2 М розчині NaOH (рН 12,4) за анодної поляризації $E_{anodic} = +160$ мВ упродовж визначеного проміжку часу τ_{dis} (див. рис. 1а). Загальну кількість абсорбованого металом водню визначали як

$$Q_H^{abs} = \int_0^{\tau_{dis}} [I_H(\tau) - I_{ref}(\tau)] d\tau \text{ при } E_{anodic} = \text{const}. \quad (2)$$

Тут $I_H(\tau)$ – функція анодного поляризаційного струму наводненого зразка; $I_{ref}(\tau)$ – функція анодного поляризаційного струму ненаводненого зразка (див. рис. 3).

Концентрацію водню в металі розраховували за формулою [5]

$$C_H = \frac{Q_H^{abs}}{zFv}. \quad (3)$$

Тут $z = 1$ – кількість електронів, які беруть участь в електрохімічній реакції; $F = 9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль – стала Фарадея; v – ефективний об'єм наводненого металу [см³]. У цьому випадку концентрація водню C_H матиме розмірність [моль/см³].

Досліджували на спеціальному комплексі устаткування, який базується на динамічній електрохімічній лабораторії VoltaLab40 [10] виробництва Radiometer Analytical SAS, Франція (рис. 2).

Слід зауважити, що під час таких досліджень принципово важливо визначити середню об'ємну концентрацію водню в матеріалі трубопроводу залежно від часу дії середовища та прикладених механічних навантажень, оскільки на її основі можна здійснювати прогностичні оцінки міцності та довговічності трубопроводів в умовах тривалої експлуатації у водневовмісних середовищах.

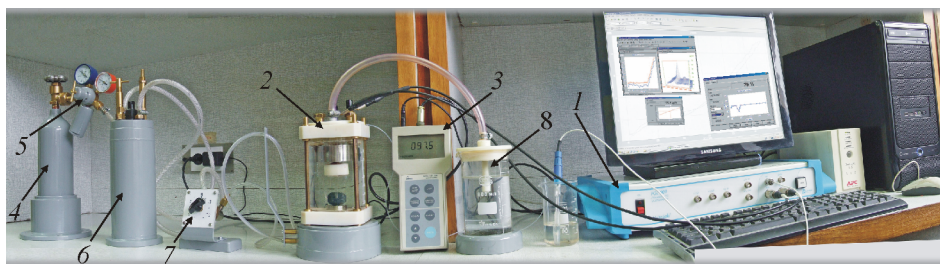


Рис. 2. Загальний вигляд лабораторного комплексу для електрохімічних досліджень особливостей наводнювання трубопровідних сталей та визначення об'ємної концентрації водню у металі: 1 – динамічна електрохімічна лабораторія VoltaLab40; 2 – універсальна електрохімічна комірка; 3 – киснемір; 4 – газовий балон високого тиску; 5 – понижувальний газовий редуктор; 6 – газовий балон низького тиску; 7 – регулювальний вентиль; 8 – водяний затвор

В останні роки науковці Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України разом з французькими колегами виконали комплекс досліджень [3–5] схильності до наводнювання низьколегованих трубопровідних сталей класу API: X52; X70 та X100. Зауважимо, що сталь X52 із домінують перлітно-феритною структурою найчастіше застосовують в існуючих газопроводах. Сталь X70 (структура – полігональний ферит із мартенситно-аустенітними включеннями на межах зерен) та сталь X100 з феритно-бейнітною структурою – перспективні для впровадження в нові газотранспортні мережі. Зразки для випробувань вирізали безпосередньо з труб, що дало змогу максимально врахувати стан матеріалу в реальному трубопроводі. Зазначимо також, що під час наводнювання зразки були навантажені. Рівень навантаження відповідав номінальному напруженню розтягу $\sigma = \sigma_{exp} = 194,1$ МПа, яке виникає в стінці труби під час її експлуатації з внутрішнім тиском $p_{exp} = 7$ МПа.

Вклад основного матеріалу дослідження. За результатами досліджень встановили [5], що зростання концентрації водню у металі залежно від часу експозиції зразків в умовах наводнювання можна описати такою степеневу залежністю:

$$C_H = A \cdot 10^{-6} \cdot \tau^m \text{ [моль / см}^3\text{]}, \quad (4)$$

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

Таблиця 2

Значення констант у залежності (4)

Марка сталі	Невантажений метал		Напружений метал	
	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

Порівняльне оцінювання досліджених сталей виявило таке [3]. Сталь X100 володіє найвищим опором наводнюванню, а сталь X70 найчутливіша до нього в заданих умовах випробування. Виділення водню на поверхні металу дещо інтенсивніше для сталі X100, ніж для сталей X52 та X70. Для всіх сталей ефективність проникнення водню в метал достатньо низька і залежить від часу витримки зразків у середовищі. Можна стверджувати, що після $\tau \geq 20$ год. помітна тенденція до монотонного зменшення ефективності поглинання водню цими сталями, на що вказує падіння значень параметра $k = Q_{abs}/Q_{ev}$ до $k = 0,0012 \dots 0,0024$.

Встановлено [3], що прикладене напруження, яке відповідає номінальному σ_{exp} , що виникає в стінці труби під час її експлуатації з внутрішнім тиском $p_{exp} = 7$ МПа, інтенсифікує наводнювання сталей у декілька разів. При цьому за витримки $\tau \geq 100$ год. різниця між концентрацією водню в невантаженому і напруженому металі може сягати більше ніж 5 разів. Цей факт необхідно враховувати, оцінюючи наводнювання матеріалів у реальних умовах експлуатації трубопроводів.

Зазначимо, що така методологія оцінювання середньої об'ємної концентрації водню в металі впроваджена в практику лабораторних досліджень Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України та використовується під час інших науково-дослідних робіт, пов'язаних із водневим матеріалознавством.

Вплив об'ємної концентрації водню в металі на особливості деформування трубопровідних сталей

Сьогодні в літературі нагромаджено значний об'єм інформації про вплив водню на механічні властивості конструкційних сталей і сплавів [1, 2], проте результати досліджень часто доволі суперечливі. Наприклад, в одних працях спостерігали зміцнювальний ефект водню на матеріал, що супроводжувався підвищенням його границі текучості [11], а в інших, навпаки, – границя текучості матеріалу знижувалась під впливом водневого середовища [12]. Така ситуація, найімовірніше, пов'язана зі складністю чи неможливістю врахувати усі існуючі

чинники (розміри зразків, умови їх наводнювання, контроль концентрації водню в матеріалі, специфіка прикладених навантажень, тощо), які впливають на досліджувані явища.

Слід також зауважити, що більшість проведених досліджень мають суттєвий недолік, зокрема – дійсне значення концентрації водню в металі було невідоме, а ступінь наводнюваності матеріалу враховувався опосередковано. Виконані нами дослідження, результати яких наведено нижче, усувають цей недолік. Тут зразки деформували за відомого значення об'ємної концентрації водню в металі, а зміну механічних характеристик матеріалу під впливом водню визначали як функцію його концентрації.

Встановлено [13] існування деякого характеристичного значення концентрації водню C_H^* , за якого змінюється механізм впливу водню на деформування сталі, зокрема при $C_H \leq C_H^*$ водень спричиняє пластифікацію матеріалу, а при $C_H \geq C_H^*$ – окрихнення (рис. 3). Наприклад, для сталі 20 значення C_H^* є достатньо низьким і знаходиться в межах $(1,77...2,09) \cdot 10^{-6}$ моль/см³, тобто малі об'ємні концентрації водню в металі полегшують його пластичне деформування.

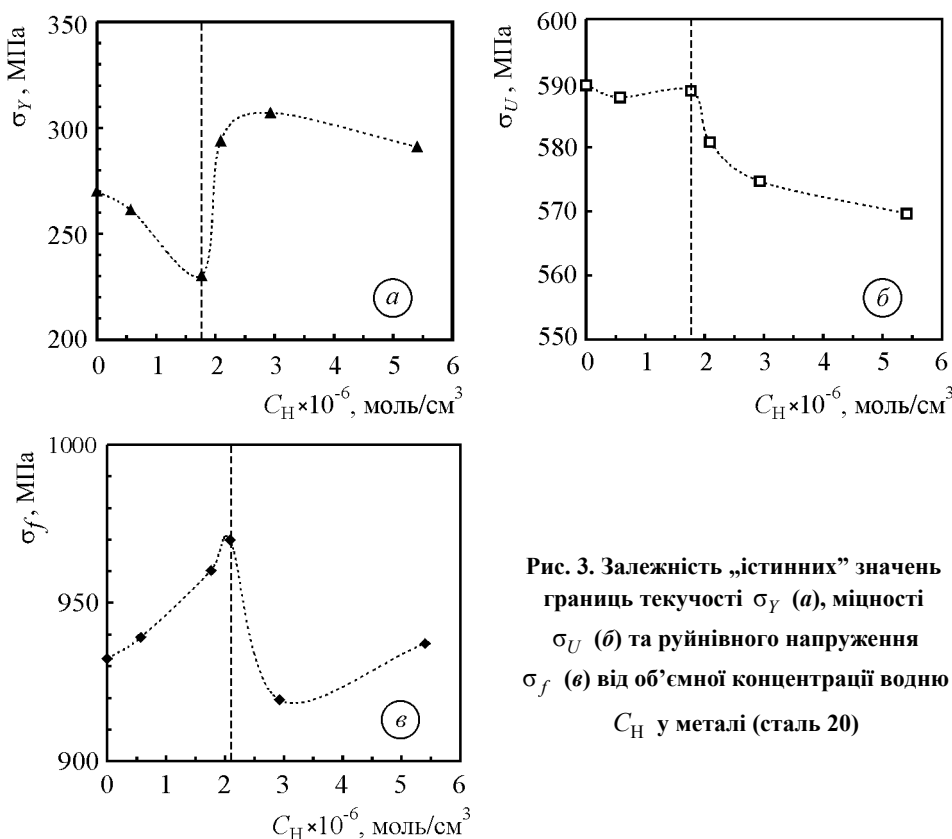


Рис. 3. Залежність „істинних” значень границь текучості σ_Y (а), міцності σ_U (б) та руйнівного напруження σ_f (в) від об'ємної концентрації водню C_H у металі (сталь 20)

Встановлене характеристичне значення концентрації водню C_H^* можна розглядати як важливий інженерний параметр для оцінювання міцності та руйнування матеріалів та елементів конструкцій у водневомісних середовищах, а також під час розроблення технологій водневої обробки конструкційних матеріалів для оптимізації їх службових характеристик.

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.

Виявлено [4], що ефективною характеристикою матеріалу може служити робота локального руйнування біля надрізу за різної концентрації водню в об'ємі металу. На цій основі для заданої системи „матеріал–середовище” будують відповідні діаграми „робота локального руйнування–концентрація водню”.

Дані для таких діаграм одержують експериментально на підставі таких випробувань. Зразки із дефектами–концентраторами напружень після витримки в заданих умовах наводнювання упродовж часу τ (який призводить до об'ємної концентрації водню $C_H(\tau)$ у металі), випробовують до руйнування під монотонно зростаючим статичним навантаженням. Під час випробувань за допомогою комп'ютера одночасно

реєструють діаграму „навантаження–переміщення” та сигнали акустичної емісії, що виникають у процесі деформування зразка. Початок локального руйнування встановлюють за методом акустичної емісії [4]. З одержаної діаграми „навантаження–переміщення” визначають (рис. 4) роботу початку локального руйнування матеріалу біля концентратора напружень U_i , а також загальну роботу руйнування зразка з концентратором напружень U_f [4]:

$$U_i = \int_0^{\Delta_i} P(\Delta) \cdot d\Delta; U_f = \int_0^{\Delta_f} P(\Delta) \cdot d\Delta. \quad (5)$$

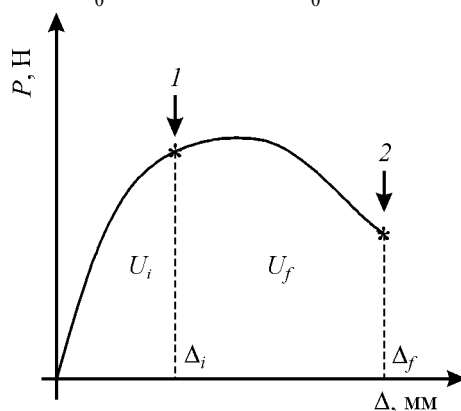


Рис. 4. Схема визначення параметрів U_i та U_f :

1 – початок руйнування (за сигналом АЕ), 2 – остаточне руйнування зразка

Отже (рис. 5), для досліджених сталей існує деякий критичний час наводнювання, коли досягається відповідна критична концентрація водню C_H^* в металі, за якої суттєво знижується опір руйнуванню матеріалу. Її значення для вказаних сталей встановлено за залежностями $U_i = f(C_H)$ та $U_f = f(C_H)$. Слід зауважити, що ці значення C_H^* збігаються (див. табл. 3), що дає підстави вважати параметр U_f характеристичним для цих сталей за розглянутих фізико-хімічних умов наводнювання.

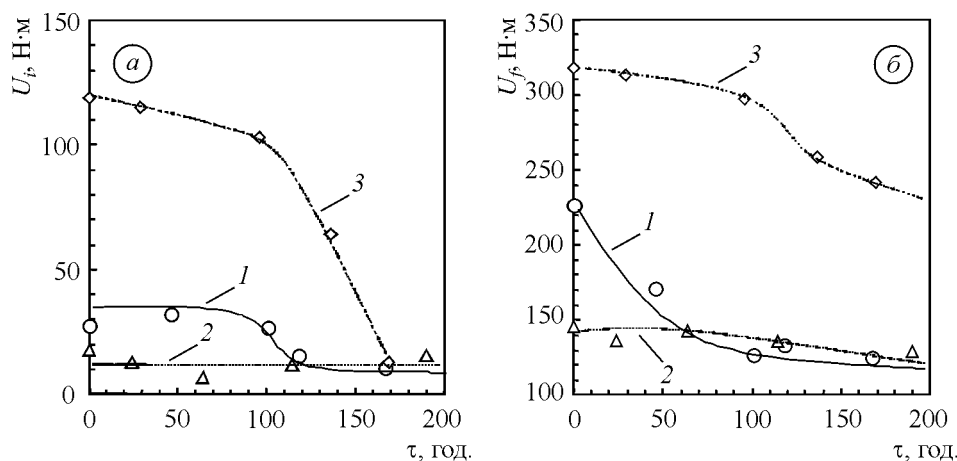


Рис. 5. Залежність U_i (а) та U_f (б) для сталей X52 (1), X70 (2) та X100 (3) від часу наводнювання зразків

Таблиця 3

Оцінка критичної концентрації водню C_H^* для трубопровідних сталей

Сталь	$C_H^*, 10^6 \text{ моль/см}^3$	
	На основі даних U_i	На основі даних U_f
X52	4,3	4,3
X70	2,3	2,3
X100	1,5	1,5

Таким чином, концентрацію C_H^* можна рекомендувати як важливий інженерний параметр для оцінки надійності та довговічності трубопроводів транспортування водню, виготовлених зі сталей X52, X70 та X100.

Вплив водню на локальну міцність цих сталей біля концентраторів напружень порівняльно оцінювали на основі параметра C_H^* . Зазначимо, що термін „критична концентрація” часто використовують у водневому матеріалознавстві, однак фізичний зміст його є різний у різних роботах. Тут, „критична концентрація” – це така концентрація водню в металі, з досягненням якої суттєво втрачається локальний опір матеріалу руйнуванню біля надрізу.

Порівняльною оцінкою параметра C_H^* для сталей X52, X70 та X100 виявили таке. Для цих сталей існує тенденція монотонного пониження значень C_H^* зі зростанням границь текучості σ_Y чи міцності σ_U матеріалу (рис. 5). Ці закономірності можна описати степеневими функціями типу [4]

$$C_H^* = \frac{A_1}{(\sigma_Y)^{n_1}}; C_H^* = \frac{A_2}{(\sigma_U)^{n_2}}, \quad (6)$$

де A_1, A_2, n_1, n_2 – деякі константи властивостей матеріалу та умов випробувань. Тут слід зазначити, що стандартне середньоквадратичне відхилення для досліджуваних сталей є високе: $r^2 = 0,98 \dots 0,99$, що свідчить про достовірність опису одержаних даних за допомогою співвідношень (6). Із останніх випливає:

$$C_H^* \cdot (\sigma_Y)^{n_1} = A_1 = \text{const}; C_H^* \cdot (\sigma_U)^{n_2} = A_2 = \text{const}, \quad (7)$$

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

Для цього класу сталей, у першому наближенні, можна вважати, що (див. рис. 5):

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

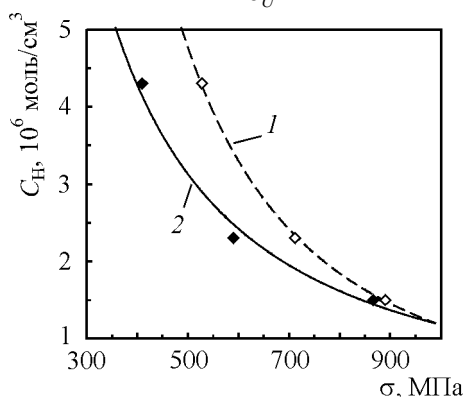


Рис. 6. Залежність критичної концентрації водню C_H^* у металі від границь текучості σ_Y та міцності σ_U сталей:

$$1 - C_H^* = 10^6 (\sigma_U)^{-2,0212}; r^2 = 0,9994; 2 - C_H^* = 19486 (\sigma_Y)^{-1,4058}; r^2 = 0,9848$$

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 воденьвмісних середовищах

Наведені вище результати обмежені випадком визначення опору руйнуванню зразків сталей з концентраторами напружень, які моделюють механічні дефекти типу надрізів, подряпин та вм'ятин, які мають закруглену вершину. Є очевидним, що для глибшого розуміння впливу водню на довговічність конструктивних елементів водневої енергетичної інфраструктури у реальних експлуатаційних умовах необхідні також дані про поширення тріщин, який інтенсифікує водень, оскільки, наприклад, відомі випадки порушення суцільності трубопроводів у результаті субкритичного підростання тріщиноподібних дефектів.

Нами спільно з Інститутом електростварювання ім. Є. О. Патона НАН України виконаний комплекс фізико-механічних досліджень [6] для встановлення, експериментальним шляхом 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 умов її циклічного навантаження у наводнювальних середовищах різного складу.

Для визначення концентрації водню біля вершини тріщини використовували спеціальний метод локального мас-спектрального аналізу з лазерним мікрозондом [6], а сама процедура досліджень така. Під час досягнення тріщиною у циклічно деформованому наводненому зразку певної довжини a , випробування 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 водню в об'ємі металу за даних умов випробувань. Типовий приклад розподілу концентрації водню в околі вершини тріщини наведений на рис. 7.

За результатами цих досліджень для п'яти різних значень об'ємної концентрації водню $C_{H(v)}$ в досліджуваній сталі встановили [6]: залежності між швидкістю росту втомної тріщини da/dN та розмахом коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) ΔK в її вершині; залежності між локальною концентрацією водню біля вершини втомної тріщини $C_{H(t)}$ та розмахом КІН ΔK ; залежності між локальною концентрацією водню біля вершини втомної тріщини $C_{H(t)}$ та швидкістю її росту в сталі da/dN .

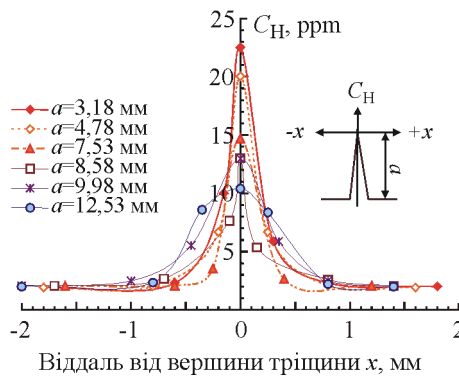


Рис. 7. Приклад розподілу локальної концентрації водню біля вершини втомної тріщини різної довжини a в низьколегованій сталі 16ГС (об'ємна концентрація водню в металі $C_{H(v)} = 1,97$ ppm; сканування в напрямку, перпендикулярному до площини поширення тріщини на віддалі 0,1 мм від її вершини)

Результати цих досліджень узагальнено у вигляді діаграми (рис. 8), яка пов'язує у подвійній логарифмічній системі координат величини $(da/dN)/(C_{H(t)}/C_{H(v)})$ та ΔK . Така діаграма вказує на існування лінійної залежності між розглядуваними параметрами. При цьому середньоквадратичне відхилення r^2 експериментальних даних від аналітичної прямої досить високе і становить 0,98. Необхідно відзначити, що діаграма є єдиною для всіх п'яти значень об'ємної концентрації водню $C_{H(v)}$ у досліджуваній сталі.

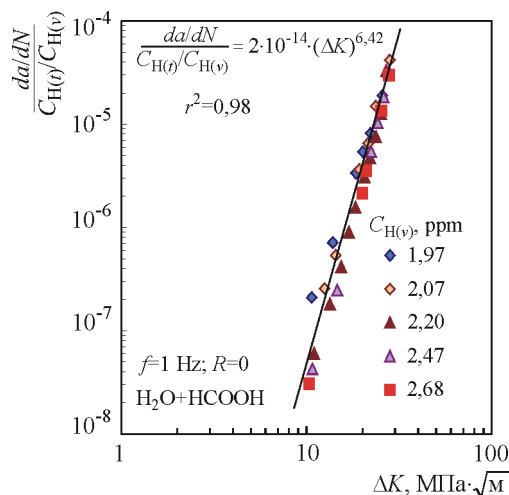


Рис. 8. Взаємозв'язок між швидкістю росту тріщини, локальною концентрацією водню у вершині тріщини, середньою концентрацією водню в об'ємі металу та коефіцієнтом інтенсивності напружень

Отже, швидкість росту втомної тріщини da/dN у низьколегованих трубопровідних сталях в умовах наводнення можна подати як функцію локальної концентрації водню біля вершини тріщини, концентрації водню в об'ємі металу і розмаху КІН, що зумовлений зовнішнім навантаженням [6]:

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

де A і m – константи системи „матеріал–середовище”, а 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 водневомісних середовищах.

Висновки

Розроблено методологію та встановлено характеристичні значення концентрації водню на гладких металевих поверхнях та біля дефектів–концентраторів напружень залежно від прикладених напружень та фізико-хімічних умов наводнення.

Показано існування деякої критичної концентрації водню в металі, яка спричиняє суттєву втрату матеріалом його опору локальному руйнуванню і встановлені значення цієї характеристики для низьколегованих трубопровідних сталей. Ця величина може бути рекомендована як один з важливих інженерних параметрів для оцінки надійності та довговічності трубопроводів транспортування водню.

Результати дослідження можуть послужити основою для розрахункових оцінок міцності та опору поширення тріщин у трубопровідних системах із виявленими дефектами.

Аннотация. Сочетанием экспериментальных методов физической химии, механики материалов и материаловедения исследовались низколегированные трубопроводные стали с целью установления склонности к наводороживанию при деформировании водородосодержащих средах. Разработана методология и установлены характеристические значения концентрации водорода на гладких металлических поверхностях и возле дефектов – концентраторов напряжений в зависимости от приложенных нагрузок и физико-химических условий наводороживания. На этой основе предложены новые методы оценивания прочности и сопротивления развитию трещин в трубопроводных сталях при действии рабочих водородосодержащих сред.

Ключевые слова: низколегированные стали; водородосодержащие среды; статические и циклические нагрузки; наводороживаемость металла и концентрация водорода; водородное охрупчивание.

Abstract. The work is dedicated to the evaluation of strength and risk of fracture of low-alloyed pipeline steels under presence of the hydrogen-contained environments.

Purpose. The assessment of hydrogen concentration effect in metal on strength and serviceability of pipeline steels under static and cyclic loading was the aim of presented study.

Design/methodology/approach. The study was realised with using of the methods of physical chemistry, mechanics of materials and materials science.

Findings. The relationship between hydrogen concentration in metal and work for initiation of the local fracture emanating from the notches has been derived. The evaluation of fatigue crack growth rate in pipeline steel with taking into account of local hydrogen concentration near the crack tip was made and it has been found that fatigue crack growth rate is the function of some critical combination of following parameters: local hydrogen concentration at the crack tip, hydrogen concentration in bulk of metal and range of stress intensity factor.

Originality/value. The existence of some critical hydrogen concentration, which causes the significant loss of local fracture resistance of given steels, was shown. This critical value can be considered as an important engineering parameter for strength and fracture assessment of materials and structural components in hydrogenous environments.

Keywords: low-alloyed steels; hydrogen-contained environments; static and cyclic loading; hydrogenation of metal and hydrogen concentration; hydrogen embrittlement.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Hanneken J.W. Hydrogen in metals and other materials: a comprehensive reference to books, bibliographies, workshops and conferences / John W. Hanneken // International Journal of Hydrogen Energy. – 1999. – V. 24, Is. 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 International, Materials Park, 2009. – 766 p.
3. Capelle J. Comparative assessment of electrochemical hydrogen absorption by pipeline steels with different strength / J. Capelle, I. Dmytrakh, G. Pluvinage // Corrosion Science. – 2010. – V. 52, Is. 5. – P. 1554–1559.
4. Capelle J. The effect of hydrogen concentration on fracture of pipeline steels in presence of a notch / J. Capelle, J. Gilgert,

- I. Dmytrakh, G. Pluvinage // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2011. – V. 78, Is. 2. – P. 364–373.
5. *Capelle J.* Sensitivity of pipelines with steel API X52 to hydrogen embrittlement / J. Capelle, J. Gilgert, I. Dmytrakh, G. Pluvinage // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2008. – V. 33, Is. 24. – P. 7630–7641.
 6. *Dmytrakh I.M.* 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, O.L. Bilyy // *International Journal of Fatigue*. – 2013. – V. 50. – P. 26–32.
 7. *Dey S.* Hydrogen entry into pipeline steel under freely corroding conditions in two corroding media / S. Dey, A. K. Mandhyan, S. K. Sondhi, I. Chatteraj // *Corrosion Science*. – 2006. – V. 48, Is. 9. – P. 2676–2688.
 8. *Cheng Y.F.* Mechanism for hydrogen evolution reaction on pipeline steel in near-neutral pH solution / Y.F. Cheng, L. Niu // *Electrochemistry Communications*. – 2007. – V. 9, Is. 4. – P. 558–562.
 9. *Yan M.* Study on hydrogen absorption of pipeline steel under cathodic charging / Maocheng Yan, Yongji Weng // *Corrosion Science*. – 2006. – V. 48, Is. 2. – P. 432–444.
 10. *VoltaLab 40* (PGZ301 & VoltaMaster 4). Dynamic Electrochemical Laboratory. Instruction. – Radiometer Analytical, 2009. – 126 p.
 11. *Grodoi W.* Effect of the hydrogen outgassing time on the hardness of austenitic stainless steels welds / W. Grodoi, N.K. Kuromoto, A.S. Guimarães, C.M. Lepienski // *Materials Science and Engineering: A*. – 2003. – V. 354, Is. 1–2. – P. 251–256.
 12. *Gavriljuk V.G.* Diagnostic experimental results on the hydrogen embrittlement of austenitic steels / V.G. Gavriljuk, V.N. Shivanjuk, J. Foct // *Acta Materialia*. – 2003. – V. 51, Is. 5. – P. 1293–1305.
 13. *Дмитрах І.М.* Вплив об'ємної концентрації водню в металі на особливості деформування низьколегованої трубопровідної сталі / І.М. Дмитрах, Р.Л. Лещак, А.М. Сиротюк, О.Л. Лутицький // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2014. – Т. 50, № 2. – С. 16–23.

References

1. *Hanneken J.W.*, Hydrogen in metals and other materials: a comprehensive reference to books, bibliographies, workshops and conferences, *International Journal of Hydrogen Energy*, 1999, V. 24, Is. 10, pp. 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 International, Materials Park, 2009, 766 p.
3. *Capelle J.* Comparative assessment of electrochemical hydrogen absorption by pipeline steels with different strength. J. Capelle, I. Dmytrakh, G. Pluvinage. *Corrosion Science*. 2010. V. 52, Is. 5. P. 1554–1559.
4. *Capelle J.*, Gilgert J, Dmytrakh I., and all. The effect of hydrogen concentration on fracture of pipeline steels in presence of a notch, *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, V. 78, Is. 2, pp. 364–373.
5. *Capelle J.*, Gilgert J, Dmytrakh I., and all. Sensitivity of pipelines with steel API X52 to hydrogen embrittlement, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, V. 33, Is. 24, pp. 7630–7641.
6. *Dmytrakh I.M.*, Smiyan O.D., Syrotyuk A.M., and all, Relationship between fatigue crack growth behaviour and local hydrogen concentration near crack tip in pipeline steel, *International Journal of Fatigue*, 2013, V. 50, pp. 26–32.
7. *Dey S.*, Mandhyan A.K., Sondhi S.K., and all, Hydrogen entry into pipeline steel under freely corroding conditions in two corroding media, *Corrosion Science*, 2006, V. 48, Is. 9, pp. 2676–2688.
8. *Cheng Y.F.*, Niu L. Mechanism for hydrogen evolution reaction on pipeline steel in near-neutral pH solution, *Electrochemistry Communications*, 2007, V. 9, Is. 4, pp. 558–562.
9. *Yan M.*, *Weng Y.* Study on hydrogen absorption of pipeline steel under cathodic charging, *Corrosion Science*, 2006, V. 48, Is. 2, P. 432–444.
10. *VoltaLab 40* (PGZ301 & VoltaMaster 4). Dynamic Electrochemical Laboratory. Instruction. Radiometer Analytical, 2009. 126 p.
11. *Grodoi W.*, Kuromoto N.K., Guimarães A.S., and all, Effect of the hydrogen outgassing time on the hardness of austenitic stainless steels welds, *Materials Science and Engineering: A*, 2003, V. 354, Is. 1–2, pp. 251–256.
12. *Gavriljuk V.G.*, Shivanjuk V.N., Foct J. Diagnostic experimental results on the hydrogen embrittlement of austenitic steels, *Acta Materialia*, 2003, V. 51, Is. 5, pp. 1293–1305.
13. *Dmytrakh I.M.*, Leschak R.L., Syrotyuk A.M., and all, The influence of bulk hydrogen concentration in metal on peculiarities of low-alloyed pipeline steel deformation, *Physicochemical mechanics of materials*, 2014, V. 50, No 2, pp. 16–23.

Подана до редакції 04.11.2014