

ASSESSMENT OF THE CORROSION AND MECHANICAL DEFECTS OF THE UNDERWATER PIPELINES STEELS

ОЦІНЮВАННЯ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНИХ ДЕФЕКТІВ СТАЛЕЙ ПІДВОДНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

Andrii M. Syrotiuk

syrotiuk@ipm.lviv.ua

ORCID: 0000-0002-9558-0153

Ihor M. Dmytrakh

dmtr@ipm.lviv.ua

ORCID: 0000-0003-2318-0967

А. М. Сиротюк,

канд. техн. наук; старш. наук. співроб.;

І. М. Дмитрах,

д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН України

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv
Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, м. Львів

Abstract. The corrosion of the pipeline steels which takes place by the way of the formation and further development of the crack-like defects emanating from the stress concentrators under the influence of the aggressive environments has been studied. The model scheme of the corrosion fatigue in the pitting formation process is suggested. Based on the approaches of the fracture mechanics and electrochemistry, the criterial correlation for the assessment of the macrocrack initiation period is presented. This correlation combines the parameters of the stress-strain state of the material in the process zone and the parameters of the electrochemical dissolution of the deformed metal surface near the stress concentrator. The suggested approach for the assessment of the surface corrosion and fatigue crack formation takes into account the synergistic impact of the cyclic stresses and electrochemical processes and is advantageous for the engineering application.

Keywords: pipeline; pitting; macrocrack initiation period; surface corrosion fatigue crack; crack length.

Анотація. Досліджено руйнування сталей підводних трубопроводів, яке відбувається в результаті зародження та подальшого розвитку тріщиноподібних дефектів від концентраторів напружень за дії агресивних середовищ. Запропоновано підхід до оцінювання поверхневого корозійно-втомного тріщиноутворення, який враховує синергетичну дію циклічних напружень та електрохімічних процесів і є ефективним для інженерного застосування.

Ключові слова: трубопровід; піттинг; період зародження макротріщини; поверхнева корозійно-втомна тріщина; довжина тріщини.

Аннотация. Исследовано разрушение сталей подводных трубопроводов, которое происходит в результате зарождения и дальнейшего развития трещиноподобных дефектов от концентраторов напряжений при воздействии агрессивных сред. Предложен подход к оценке поверхностного коррозионно-усталостного трещинообразования, который учитывает синергетическое воздействие циклических напряжений и электрохимических процессов и является эффективным для инженерного применения.

Ключевые слова: трубопровод; питтинг; период зарождения макротрещины; поверхностная коррозионно-усталостная трещина; длина трещины.

REFERENCES

- [1] Syrotiuk A., Frankevych L., Kuts O., Hushchak Zh. Vykorystannia tekhniky prostorovo-chasovoi speklkoreliatsii dlia monitorynhu zarodzhennia mikrotrishchyn v okoli pitynha [Application of the technique of the space-time speckle correlation for monitoring of the microcracks initiation near the pitting]. *Tezisy IV mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Mekhanika ruinuvannia materialiv i mitsnist konstruktsii (23.06.–27.06.2009)»* [Proceedings of the 4th International Scientific and Technical Conference «Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity (23–27.06. 2009)»]. Lviv, 2009, pp. 963–968.
- [2] Dmytrakh I.M., Panasiuk V.V. *Vplyv koroziiynykh seredovyshch na lokalne ruinuvannia metaliv bilia kontsentratytoriv napruzhen* [Impact of corrosive environments on the localized fracture of metals near the stress concentrators]. Lviv, Fyzyko-mekhanichniy instytut im. H. V. Karpenka Publ., 1999. 342 p.

- [3] Dmytrakh I., Syrotyuk A., Leshchak R. Otsinka poverkhnevoi koroziiino-vtomnoi poshkodzhuvanosti truboprovodnykh stali [Assessment of the surface corrosion and fatigue damageability of the pipeline steels]. *Problemy korozii ta protykoroziihnoho zakhystu materialiv. Fizyko-khimichna mekhanika materialiv* [Problems of corrosion and anticorrosive protection of materials. Physicochemical mechanics of materials], 2004, vol. 1, no. 4, pp. 67–72.
- [4] Romaniv O.N., Yarema S.Ya., Nikiforchin G.N. et al. *Mekhanika razrusheniya i prochnost materialov. Ustalost i tsiklicheskaya treshchinostoykost konstruktivnykh materialov* [Fracture mechanics and the strength of materials. Fatigue and the cyclic crack strength of the constructional materials]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1990. 680 p.
- [5] Dmytrakh I.M., Tot L., Bilyi O.L., Syrotyuk A.M. *Mekhanika ruinovannia ta mitsnist materialiv. Pratsездatnist materialiv i elementiv konstruktiv z hostrokintsevymy kontsentratoramy napruzhen* [Fracture mechanics and the strength of materials. The working efficiency of materials and structural elements with pointed stress concentrators]. Lviv, Spolom Publ., 2012. 316 p.
- [6] Syrotyuk A., Muravskiy L., Kuts O. Doslidzhennia mikroposhkodzhuvanosti materialu ta zarodzhennia trishchyn v okoli pitynhu metodom prostoroovo-chasovoi spekl-koreliatsii [Study on the microdamageability of the material and the microcracks initiation near the pitting using the method of the space-time speckle correlation]. *Mashynoznavstvo – Machine science*, 2008, no. 5, pp. 8–11.
- [7] Akid R., Dmytrakh I.M., Gonzalez-Sanchez J. Fatigue Damage Accumulation: the role of corrosion on the early stages of crack growth. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 2006, vol. 41, no. 4, pp. 328–335.
- [8] Akid R. Localised corrosion a new evaluation approach. *Materials World*, 1995, vol. 3, no. 11, pp. 522–525.
- [9] Akid R. The role of Stress-Assisted Localised Corrosion in the Development of Short Fatigue Cracks. Effects of the environment on the initiation of crack growth. Philadelphia (USA), *American Society for Testing and Materials*, 1997, STP 1298, pp. 3–17.
- [10] Dmytrakh I., Akid R., Syrotyuk A. On pitting corrosion of stainless steels induced by cyclic stress. *Problemy korozii ta protykoroziihnoho zakhystu materialiv. Fizyko-khimichna mekhanika materialiv* [Problems of corrosion and anticorrosive protection of materials. Physicochemical mechanics of materials], 2006, no. 5, vol. 1, pp. 39–42.
- [11] Dmytrakh I.M. Corrosion fatigue cracking and failure risk assessment of pipelines. *Safety, Reliability and Risks Associated with Water, Oil and Gas Pipelines: NATO Science for Peace and Security Series*. The Netherlands. Springer, 2008, pp. 99–113.
- [12] Dmytrakh I.M., Syrotyuk A.M., Hrabovskiy R.S. Model of surface fatigue crack nucleation as result of corrosion deformation interactions. *Fracture Mechanics Beyond 2000: 14th European Conf. on Fracture (ECF-14)*, 8–13 Sept., 2002. Cracow, 2002, vol. 1, pp. 489–496.
- [13] Dmytrakh I.M., Pluvina G., Qilafku G. On corrosion fatigue emanating from notches: stress field and electrochemistry. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv – Physicochemical mechanics of materials*, 2001, vol. 37, no. 2, pp. 43–53.
- [14] Dmytrakh I.M. On corrosion fatigue initiation from notches and the local corrosion fracture approaches. *Notch Effects in Fatigue and Fracture: NATO Science Series*, 2001, vol. 11 pp. 331–346.
- [15] Dmytrakh I.M., Syrotyuk A.M., Hrabovskiy R.S. Surface cracking of steels in the process of cyclic deformation in aqueous media. *Materials Science*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 524–532.
- [16] Safety, Reliability and Risks Associated with Water, Oil and Gas Pipelines. *NATO Science for Peace and Security Series*. The Netherlands, Springer, 2008. 349 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Перспективи нафтогазовидобутку в Україні пов'язані з акваторіями Азовського та Чорного морів. Прогнозні ресурси вуглеводнів акваторій морів обліковуються в обсязі близько 1,9 млрд т умовного палива. За умов значної залежності від імпорту вуглеводнів активна розробка шельфових родовищ є пріоритетним напрямком розвитку паливно-енергетичного комплексу держави.

Водночас розвідка та розробка газових, нафтових, газоконденсатних та нафтогазоконденсатних родовищ на шельфі Азовського та Чорного морів потребують розвинутої інфраструктури, зокрема

підводних трубопроводів різноманітного призначення.

Трубопроводи, що використовуються для транспортування корозивних (хімікати, що використовуються для боротьби з відкладеннями парафіну, асфальтету, гідратів та окисних плівок) чи водень-вмісних (неочищені суміші видобутих вуглеводнів) середовищ, є об'єктами підвищеної відповідальності і мають важливе значення в рамках офшорної інфраструктури [16]. З технічної точки зору вони є складними тривимірними конструкціями, які складаються з прямолінійних ділянок, патрубків, згинів, різнорідних зварних з'єднань тощо. Умови їх експлуатації є

досить жорсткими і складними, оскільки вони зазнають впливу ряду чинників, таких, як внутрішній тиск та циклічні навантаження (вібрації), дія яких посилюється внутрішнім та зовнішнім середовищами. Потенційний синергізм впливу цих чинників підвищує ризик виникнення непрогнозованих пошкоджень та руйнувань упродовж їх тривалої експлуатації, що може спричинити аварійні ситуації з непередбачуваними техніко-економічними та соціальними наслідками [16].

У зв'язку з цим безпека експлуатації, надійність та цілісність підводних трубопроводів морської інфраструктури є актуальною науковою та прикладною проблемою. Дана робота присвячена важливому аспекту цієї проблеми, а саме дослідженню процесів руйнування трубопроводних сталей, що реалізуються шляхом зародження та подальшого розвитку тріщиноподібних дефектів від концентраторів напружень при впливі корозивних та воденьвмісних середовищ.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Корозійна втома конструкційних металів і сплавів трактується як багатостадійний процес [2, 4], що складається з чотирьох основних стадій (рис. 1).

Вклад і важливість кожної із стадій у загальну оцінку процесу корозійної втоми зразка чи елемента конструкції може бути різним і залежить від фізико-хімічних особливостей системи «матеріал–середовище», умов навантаження та геометричних розмірів об'єкта [2, 7]. Аналіз експлуатаційних пошкоджень трубопроводів підтверджує, що основними характеристиками цих процесів є, по-перше, певна локалізація залежно від особливостей стану металеві поверхні, а по-друге – їх стадійність.

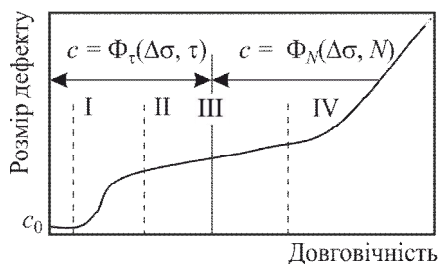


Рис. 1. Стадійність розвитку дефектів з гладкої поверхні в умовах корозійної втоми матеріалу: I – руйнування пасивної плівки; II – розвиток пітингу; III – перехід «пітинг–тріщина»; IV – ріст тріщини

Початкова локалізація процесу руйнування спричинена певними неоднорідностями чи включеннями на поверхні металу, що зумовлює утворення локальних корозійно-активних ділянок. Наслідком цього є зародження корозійно-механічних пітингів та виразок, які слід розглядати як потенційні концентратори напружень. Вирішальна роль на цьому початковому етапі корозійного руйнування відводиться електрохімічним процесам, які активуються механічними напруженнями. Другий етап руйнування матеріалу характеризується утворенням від

уже існуючих пітингів перших тріщиноподібних дефектів, так званих фізично коротких тріщин – тріщин, довжина яких практично не перевищує віддалі між головними мікроструктурними бар'єрами. На цьому етапі процесу корозійного руйнування зростає роль механічного чинника. Подальше корозійно-механічне руйнування приводить до розвитку та злиття мікротріщин, після чого настає формування макротріщини, яка розвивається переважно в глибину матеріалу. Досягнення нею критичних розмірів спричиняє спонтанне катастрофічне руйнування елемента конструкції.

Слід зауважити, що для конкретного конструктивного елемента, залежно від його геометричних розмірів та умов експлуатації, властива своя лімітуюча стадія процесу корозійно-механічного руйнування [7]. Так, наприклад, для тонкостінних трубопроводів стадії утворення корозійно-механічних виразок та зародження макротріщини будуть визначальними з точки зору оцінювання їх роботоздатності та довговічності. Водночас для труб із товщиною стінки в декілька десятків міліметрів визначати їх залишкову довговічність буде вже стадія розвитку макротріщини в глибину матеріалу. Тому для технічної діагностики роботоздатності конструктивних елементів трубопроводів необхідним є розвиток та апробація різних методів оцінювання корозійно-механічної пошкоджуваності металу для кожної із зазначених стадій руйнування матеріалу.

МЕТА РОБОТИ – оцінити корозійно-механічні дефекти трубопроводних конструкцій на різних стадіях їх розвитку. Досягнення поставленої мети передбачало вирішення наступних задач:

- запропонувати модельне представлення корозійної втоми за пітингоутворення;
- оцінити розвиток корозійно-механічних пітингів та виразок;
- оцінити поверхневе корозійно-втомне тріщиноутворення.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Модельне представлення корозійної втоми за пітингоутворення. У процесі циклічного деформування кількість корозійно-втомних пітингів та виразок зростає і вони є джерелом зародження поверхневих тріщин (рис. 2). Таку стадійність процесу «пітинг–поверхнева тріщина» можна, по аналогії, порівняти з відомим процесом зародження корозійно-втомної тріщини біля напівколових концентраторів напружень [13].

Дані корозійні пошкодження, з одної сторони, можна розглядати як типові концентратори механічних напружень, а з другої сторони – як об'єкти, де очікуються типові форми локалізованої корозії [7–9]. Цей тип корозії властивий малим об'ємам нерухомого розчину, що міститься в пітингу чи виразці. Для нього характерні наступні специфічні умови:

- різке розділення анодної та катодної ділянок електрохімічних процесів;

- присутність у розчині окиснювачів, тобто розчиненого кисню та негативно заряджених іонів;
- підвищена концентрація солей у порожнині пітингу, які є розчинними продуктами електрохімічних реакцій.

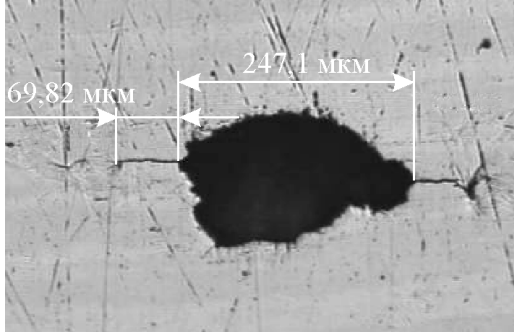


Рис. 2. Зародження корозійно-втомної тріщини біля пітингу для сталі 08X18H12T

Прикладення циклічних напружень до такої пошкодженої металевої поверхні спричиняє додаткову інтенсифікацію корозійних процесів у порожнинах пітингів чи виразок. Це пояснюється зростанням електрохімічної неоднорідності поверхні пітингу в результаті градієнта механічних напружень. З цієї причини дно пітингу є місцем максимальної інтенсивності електрохімічного процесу розчинення металу, а сам пітинг, по аналогії з механікою, може розглядатись як своєрідний «концентратор корозії».

На цій основі можна запропонувати наступне модельне представлення (рис. 3) корозійної втоми за пітингоутворення.

Перша стадія – це зародження та зростання пітингу до деякого характеристичного розміру $c = d$ за механізмом електрохімічного розчинення металу, що інтенсифікується прикладеними циклічними напруженнями (див. рис. 3,а):

$$c = F_{pit}(i_{pit}; \Delta\sigma; \tau) \text{ при } 0 \leq c \leq d. \quad (1)$$

Друга стадія полягає у зародженні втомної тріщини довжиною a від пітингу розміром $c = d$ як результат сумісної дії локальної електрохімічної корозії та локальних «ефективних» циклічних напружень (див. рис. 3,б):

$$a = F_{crack}(i_{pit}^*; \sigma_{eff}; N) \text{ при } c \geq d. \quad (2)$$

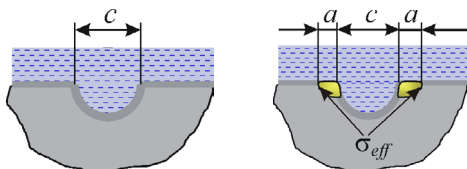


Рис. 3. Схематичне зображення пітингу (а) та переходу «пітинг–тріщина» (б)

Тут особливістю є те, що локалізована фізико-хімічна дія середовища спричиняє локальну концентра-

цію механічних напружень поблизу дна пітингу, а ці підвищені напруження, в свою чергу, інтенсифікують його зростання. Тобто, існує синергізм локальних механічних та фізико-хімічних взаємодій.

Оцінювання розвитку корозійно-механічних пітингів та виразок. Тут найбільш ефективними є сучасні методи, що ґрунтуються на даних електрохімічного сканування деформованої поверхні спеціальними зондами [8–10]. Це дає змогу одержати карту розподілу локальних корозійних струмів навколо корозійно-втомного пошкодження типу пітингу. Слід зауважити, що значення густини локального корозійного струму на дні пітингу на порядок перевищують значення інтегрального корозійного струму на поверхні металу, виміряні стандартними потенціостатичними методами.

Тому важливо встановити закономірності утворення корозійних пітингів та виразок на деформованих металевих поверхнях. Проблема пітингової корозії відома давно і її дослідження в основному сконцентровані на електрохімічних аспектах системи «матеріал–середовище», тобто на встановленні потенціалу пітингоутворення залежно від чинників середовища (хімічний склад, рН, концентрація кисню тощо).

Нижче розглянуто принципово відмінний випадок [10], а саме – ініціювання пітингу циклічними напруженнями на металевій поверхні за постійного потенціалу поляризації, який відповідає її пасивному (з електрохімічної точки зору) стану. На можливість існування такого явища опосередковано вказують відомі результати [7] про вплив статичної деформації та циклічного напруження на корозійну активність пітингів, які первинно були ініційовані класичним електрохімічним шляхом, тобто прикладенням до поверхні потенціалу поляризації рівного потенціалу пітингоутворення.

Одержані результати показали відчутний вплив значення $\Delta\sigma$ на електрохімічну поведінку циклічно деформованої поверхні [10]. Інтегруючи поляризаційні криві, процес пітингоутворення на циклічно деформованій поверхні оцінено за допомогою наступного параметра:

$$W = \int_{E_p}^{E_{rp}} I(E) dE, \quad (3)$$

де E_p – потенціал пітингоутворення; E_{rp} – потенціал репасивації.

Параметр W можна інтерпретувати як величину електрохімічної енергії, яка необхідна для відновлення пасивного стану поверхні після утворення пітингу, тобто як енергію репасивації поверхні. Розраховані значення W для поляризаційних кривих, одержаних за різних значень розмаху циклічних напружень $\Delta\sigma$, показали [10] потенційне зростання енерговитрат на відновлення пасивного стану поверхні зі зростанням рівня циклічного навантаження. Для дослідженого

випадку цю тенденцію можна описати наступним співвідношенням [10]:

$$W = W_0 \cdot \exp[A \cdot (\Delta\sigma / \sigma_{0,2})], \quad (4)$$

де $W_0 = 6 \times 10^{-8}$ Вт – електрохімічна енергія для відновлення пасивного стану ненавантаженої ($\Delta\sigma = 0$) поверхні після утворення на ній пітингу; $A = 0,606$ – деяка стала.

Окрім цього, було проведено дослідження локальної корозії (пітингоутворення) в умовах корозійної втоми зразка при $\Delta\sigma = \sigma_{0,2}$, коли до його поверхні був прикладений постійний потенціал поляризації $E = 0,1$ В = const, що відповідав пасивній ділянці поляризаційної кривої. Тобто, тут були відсутні умови для реалізації пітингоутворення за класичним електрохімічним механізмом.

Результати цих досліджень показали неочевидний результат, а саме – ініціювання пітингоутворення циклічними напруженнями на поверхні, що інтегрально перебуває в пасивному стані. При цьому спочатку виникає поодинокий пітинг (рис. 4,а), навколо якого густина корозійного струму перевищує аналогічні значення на непошкодженій поверхні металу на порядок і більше (див. рис. 4,б). У подальшому, зі зростанням числа циклів навантаження, інтенсивність пітингоутворення збільшується, що призводить до суттєвого зростання корозійної активності циклічно деформованої поверхні (рис. 5).

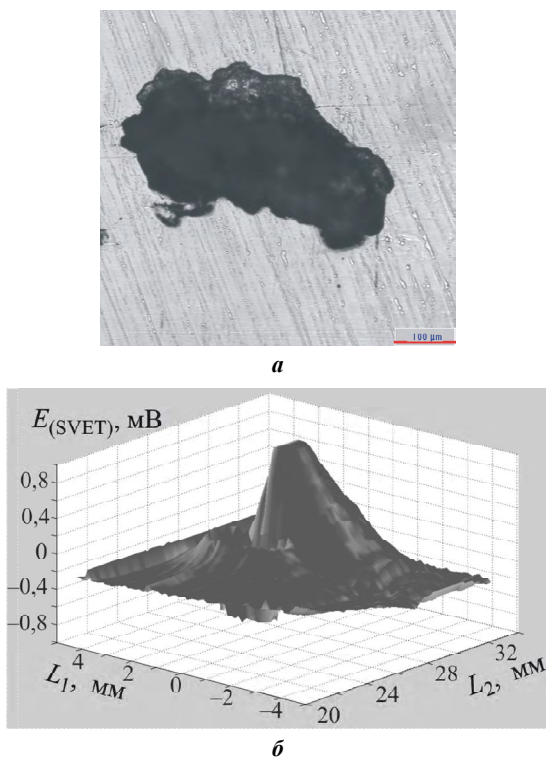


Рис. 4. Корозійно-втомний пітинг на поверхні сталі 08X18H12T у середовищі з рН6,5 (а) та карта розподілу локальних корозійних струмів навколо нього (б)

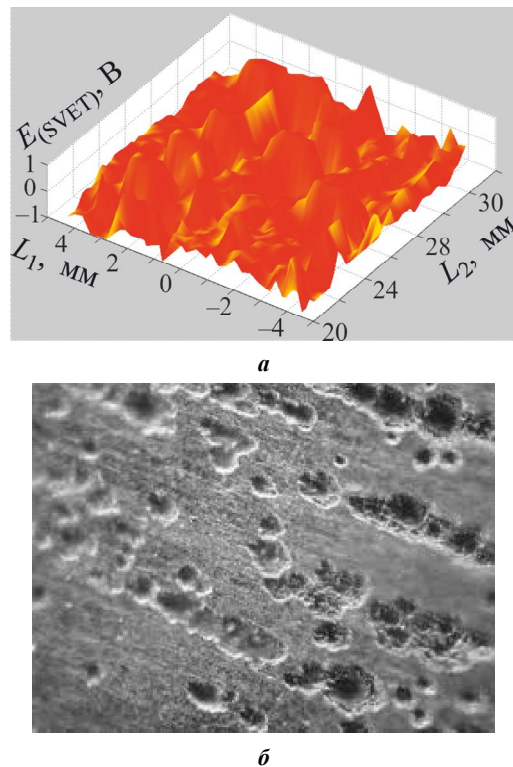


Рис. 5. Карта розподілу локальних корозійних струмів на циклічно деформованій поверхні (а) в сталі 08X18H12T у середовищі рН6,5 та при інтенсивному пітингоутворенні (б)

Оцінку зародження макротріщини біля пітингу в умовах корозійної втоми можна здійснити моделюючи його напівколовим концентратором напружень. Експериментально встановлено [2], що особливістю утворення макротріщини на поверхні напівкологового концентратора напружень є досягнення деякої критичної густини q_* поверхневих тріщин, що мають сталу (характеристичну) довжину $a = a_*$. Після досягнення такого критичного стану відбувається швидка стадія злиття (коалесценції) цих тріщин, що призводить до утворення макротріщини біля вершини концентратора напружень [1, 6–9]. У зв'язку з цим за період утворення макротріщини було прийнято число циклів навантаження $N = N_*$, з досягненням якого реалізується умова $q = q_*$. У роботах [13, 14] показано, що критеріальне співвідношення для оцінки періоду зародження макротріщини є деякою комбінацією параметрів напружено-деформованого стану матеріалу в зоні процесу та параметрів електрохімічного розчинення поверхні деформованого металу біля концентратора напружень, тобто:

$$(\Delta\sigma_{eff})^m \cdot \left[\frac{M}{zF\rho} \cdot \left(\frac{1}{\omega} \right) \cdot \int_0^{N_*} i(N) dN \right] = C = \text{const}, \quad (5)$$

де $\Delta\sigma_{eff}$ – розмах ефективних напружень; m, C, M, z, F, ρ – константи електрохімічного розчинення металу для заданої системи «метал–середовище»; ω – частота циклічного навантаження; $i(N)$ – густина струму

електрохімічного розчинення металу як функція числа циклів навантаження N ; N_* – число циклів навантаження, при якому досягається критичне значення q_* густини поверхневих тріщин довжиною $a = a_*$.

На основі співвідношення (5) за умови $i(N) = i_{corr} = \text{const}$ одержуємо наступне співвідношення:

$$N_* = \frac{zF\rho}{Mi_{corr}} \cdot \omega \cdot \frac{C}{(\Delta\sigma_{eff})^m} \quad (6)$$

У залежності (6) змінними параметрами є $\Delta\sigma_{eff}$ та i_{corr} , а решта – це відомі константи електрохімічного розчинення металу для заданої системи «метал–середовище».

Оцінка поверхневого корозійно-втомного тріщиноутворення. Цей вид пошкоджень стосується товстостінних трубопроводів, товщина стінок яких досягає декількох десятків міліметрів.

Оцінювання у такому випадку може бути здійснене на основі запропонованої модельної схеми [15] корозійної втоми матеріалу, коли процес утворення поверхневих корозійно-втомних тріщин пов'язаний з інтенсивністю електрохімічного розчинення циклічно деформованої поверхні. При цьому було використано встановлене співвідношення між довжиною поверхневої тріщини a , характеристичним значенням прикладеного напруження s_s [12, 15] та параметрами електрохімічного розчинення металу:

$$F(a) = \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{max}} \right)^m \cdot Q; \quad Q = \frac{M}{z \cdot F \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \int_0^N I_{corr}(N) dN, \quad (7)$$

де $F(a)$ – функція довжини тріщини; σ_s – характеристичне значення напруження, починаючи з якого відбувається суттєва електрохімічна активація поверхні металу в межах кожного циклу навантаження; σ_{max} – максимальне напруження циклу навантаження; m – константа системи «матеріал–середовище»; Q – інтегральний об'єм розчиненого металу з одиниці площі поверхні впродовж заданого числа циклів навантаження N . Тут M, z, F, ρ – відомі константи електрохімічного розчинення металу для заданої системи «метал–середовище»; ω – частота циклічного навантаження; $I_{corr}(N)$ – залежність інтегрального корозійного струму на циклічно деформованій поверхні від числа циклів навантаження N , що для всіх розглянутих випадків задовільно представляється степеневу залежністю виду $I_{corr} = I_0 \cdot N^k$ [15], де I_0 та k – константи системи «матеріал–середовище». Було показано, що розрахункове оцінювання періоду зародження поверхневої корозійно-втомної макротріщини з використанням співвідношень (7) задовільно узгоджується з експериментальними даними (рис. 6).

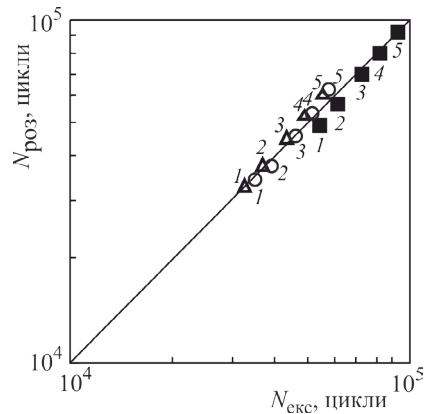


Рис. 6. Порівняння експериментальних та розрахункових значень визначення періоду зародження поверхневої корозійно-втомної макротріщини різної довжини у сталі 08X18H12T: 1–5 – $a = 1; 2; 5; 10$ і 20 мм; Δ – рН 3,0; \blacksquare – 6,5; \circ – 9,0

Такий підхід до оцінювання поверхневого корозійно-втомного тріщиноутворення, що враховує одночасну дію циклічних напружень та електрохімічних процесів, є ефективним у плані інженерного застосування і був використаний для прогнозних оцінок залишкової довговічності та роботоздатності товстостінних трубопровідних систем [5].

ВИСНОВКИ

Запропоновано двостадійну модельну схему корозійної втоми за пітингоутворення. На першій стадії відбувається ініціювання та зростання пітингу до деякого характеристичного розміру $c = d$ за механізмом електрохімічного розчинення металу, що інтенсифікується прикладеними циклічними напруженнями. Друга стадія – це зародження втомної тріщини довжиною a від пітингу розміром $c = d$ як результат сумісної дії локальної електрохімічної корозії та локальних «ефективних» циклічних напружень.

Наведене критеріальне співвідношення для оцінки періоду зародження макротріщини є деякою комбінацією параметрів напружено-деформованого стану матеріалу в зоні процесу та параметрів електрохімічного розчинення поверхні деформованого металу біля концентратора напружень.

Запропонований підхід до оцінювання поверхневого корозійно-втомного тріщиноутворення враховує синергетичну дію циклічних напружень та корозійних процесів електрохімічної природи і є ефективним у практичному застосуванні, оскільки дозволяє здійснювати чисельні оцінки періоду зародження поверхневих корозійно-механічних тріщиноподібних дефектів залежно від величини прикладених циклічних напружень та параметрів електрохімічних процесів, що протікають на поверхні напруженого матеріалу. Цей підхід може бути рекомендованим для практичного застосування при прогнозних оцінках безпечної

експлуатації трубопроводів з наявними корозійно-механічними дефектами, а також у комп'ютерних експертних системах для технічної діагностики робочих середовищ різного складу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Використання техніки просторово-часової спекл-кореляції для моніторингу зародження мікротріщин в околі пітинга [Текст] / А. Сиротюк, Л. Франкевич, О. Куць, Ж. Гуцак // *Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій : матеріали 4 міжнар. наук.-техн. конф., 23–27 червня 2009 р.; під заг. ред. В. В. Панасюка*. – Л. : Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка, 2009. – С. 963–968.
- [2] **Дмитрах, І. М.** Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень [Текст] / І. М. Дмитрах, В. В. Панасюк. – Л. : Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка, 1999. – 342 с.
- [3] **Дмитрах, І.** Оцінка поверхневої корозійно-втомної пошкоджуваності трубопровідних сталей [Текст] / Ігор Дмитрах, Андрій Сиротюк, Ростислав Лещак // *Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів (Корозія–2004) : у 2 т. // Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2004. – Спец. вип. № 4. – Т. 1. – С. 67–72.
- [4] *Механика разрушения и прочность материалов [Текст] : пособие : в 4 т. Т. 4. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин [и др.]*. – К. : Наукова думка, 1990. – 680 с.
- [5] *Механіка руйнування та міцність матеріалів [Текст] : посіб. : у 13 т. Т. 13. Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень / І. М. Дмитрах, Л. Тот, О. Л. Білий, А. М. Сиротюк ; за ред. В. В. Панасюка*. – Л. : Сполом, 2012. – 316 с.
- [6] **Сиротюк, А.** Дослідження мікропошкоджуваності матеріалу та зародження тріщин в околі пітингу методом просторово-часової спекл-кореляції [Текст] / А. Сиротюк, Л. Муравський, О. Куць // *Машинознавство*. – 2008. – № 5. – С. 8–11.
- [7] **Akid, R.** Fatigue Damage Accumulation: the role of corrosion on the early stages of crack growth [Текст] / R. Akid, I. Dmytrakh, J. Gonzalez-Sanchez // *Corrosion Engineering, Science and Technology*. – 2006. – V. 41, № 4. – P. 328–335.
- [8] **Akid, R.** Localised corrosion a new evaluation approach [Текст] / R. Akid // *Materials World*. – 1995. – V. 3, № 11. – P. 522–525.
- [9] **Akid, R.** The role of Stress-Assisted Localised Corrosion in the Development of Short Fatigue Cracks [Текст] / R. Akid // *Effects of the environment on the initiation of crack growth [ed. by W. A. Van Der Sluys, R. S. Piascik and R. Zawierucha]*. – Philadelphia (USA): American Society for Testing and Materials, 1997. – STP 1298. – P. 3–17.
- [10] **Dmytrakh, I.** On pitting corrosion of stainless steels induced by cyclic stress [Текст] / Ihor Dmytrakh, Robert Akid and Andriy Syrotyuk // *Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів (Корозія–2006) : у 2 т. // Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2006. – Спец. вип. № 5. – Т. 1. – С. 39–42.
- [11] **Dmytrakh, I. M.** Corrosion fatigue cracking and failure risk assessment of pipelines [Текст] / I. M. Dmytrakh // *Safety, Reliability and Risks Associated with Water, Oil and Gas Pipelines: NATO Science for Peace and Security Series*. – The Netherlands : Springer, 2008. – P. 99–113. – (C: Environmental Security).
- [12] **Dmytrakh, I. M.** Model of surface fatigue crack nucleation as result of corrosion deformation interactions [Текст] / I. M. Dmytrakh, A. M. Syrotyuk, R. S. Hrabovskyi // *Fracture Mechanics Beyond 2000: 14th European Conf. on Fracture (ECF-14), 8–13 Sept., 2002: Cracow (Poland): proceedings*. – Sheffield (UK): EMAS Publishing, 2002. – V. 1. – P. 489–496.
- [13] **Dmytrakh, I. M.** On corrosion fatigue emanating from notches: stress field and electrochemistry [Текст] / I. M. Dmytrakh, G. Pluvinage, G. Qilafku // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2001. – Т. 37, № 2. – С. 43–53.
- [14] **Dmytrakh, I. M.** On corrosion fatigue initiation from notches and the local corrosion fracture approaches [Текст] / I. M. Dmytrakh // *Notch Effects in Fatigue and Fracture: NATO Science Series*. – The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001. – Vol. 11. – P. 331–346. – (II: Mathematics, Physics and Chemistry).
- [15] **Dmytrakh, I. M.** Surface cracking of steels in the process of cyclic deformation in aqueous media [Текст] / I. M. Dmytrakh, A. M. Syrotyuk, and R. S. Hrabovskyi // *Materials Science*. – 2003. – V. 39, No 4. – P. 524–532.
- [16] *Safety, Reliability and Risks Associated with Water, Oil and Gas Pipelines [Текст]: NATO Science for Peace and Security Series*. – The Netherlands: Springer, 2008. – 349 p. – (C: Environmental Security).

© А. М. Сиротюк, І. М. Дмитрах

Надійшла до редколегії 19.11.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК

д-р техн. наук, проф. О. М. Дубовий

Статтю розміщено у Віснику НУК № 2, 2014