

УДК 669.14:620.191.33

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ РОСТУ ТРІЩИН ПІД ДІЄЮ СТАТИЧНИХ І ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ В КОРОЗИЙНО-АГРЕСИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ НАСЕ

Ю.В. Макаренко¹,
магістерка

В.І. Савенко²,
д-р техн. наук, професор

О.М. Горлач²,
аспірант

І.В. Задорожнікова³,
канд. техн. наук, доцент

О.Е. Чигиринець⁴,
д-р хімічних наук, професор

С.С. Победа²,
аспірант

¹Університет Манітобо, м. Вінніпег, Канада

²Київський національний університет будівництва і архітектури

³Луцький національний технічний університет

⁴Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

DOI: 10.32347/2410-2547.2023.110.520-532

Розроблений аналітичний метод розрахунку і прогнозування статичної водневої втомленості трубних сталей, призначених для експлуатації в корозійно-агресивних середовищах з вмістом сірководню. Математичні розрахунки добре корелюють з експериментальними результатами (відхилення не перевищують 5-7%), що допускається в інженерних прогнозних розрахунках. Експериментальним шляхом досліджено швидкість росту тріщин в сталях 06Г2БА; побудовані графіки кривих росту тріщин і криві “навантаження-подовження” для компактних зразків із економно модифікованої сталі 06Г2БА з низькою швидкістю деформації (ЕНШД) в середовищі НАСЕ і на повітрі під змінними напруженнями. Вперше побудовані криві статичної і циклічної втомленості для трубних сталей 09Г2С і 17Г1С при випробуванні в середовищі НАСЕ, що дозволяє розрахувати і спрогнозувати їх безаварійний залишковий робочий ресурс. Вперше досліджено прискорений навколишнім середовищем ріст тріщини для трубної модифікованої сталі 06Г2БА в середовищі НАСЕ та виконані розрахунки ресурсу трубних сталей на основі механіки пружно-пластичного руйнування. Доведено експериментальними металографічними і механічними дослідженнями, що з ростом наводнення, яке відбувається в процесі тривалого терміну експлуатації трубної сталі 06Г2БА, різко зростає (в 2-3 рази) циклічна міцність, що сприяє подовженню робочого (безаварійного) ресурсу трубопроводів.

Ключові слова: труба, деформація, руйнування, тріщиностійкість, тріщини, пори, неметалеві включення.

Основні положення. Відомо [1-12], що тривалого терміну експлуатації трубні сталі, наприклад, нафтогазопроводів, підземних каналізаційних систем тощо, піддаються деформаційному старінню, що спричиняє окрихнення металу труб з подальшим руйнуванням трубопроводів. Існуючі до цих пір науково-теоретичні і конструкторсько-технічні розробки щодо підвищення безпечного експлуатаційного ресурсу інженерних конструкцій, зокрема їх несучої здатності, пов'язаної з високою тріщиностійкістю, [1, 2, 3-7, 11, 12] знаходять протиріччя і невизначеність; відсутність кількісних науково-обґрунтованих практичних рекомендацій з оптимального вибору трубних сталей, необхідність комплексного і системного дослідження природи і механізмів корозійно-механічних руйнувань та визначення оптимальних антикорозійних і інженерно-технологічних заходів при спорудженні і експлуатації металевих устаткування і оснастки в промислових умовах будівництва.

Корозійне руйнування під напруженням виявляється (СКРН) важливою проблемою металознавців і механіків. Так, після виявлення такого роду руйнувань нафтогазопроводів та в корпусних сталях реакторних установок, для дослідження природи і механізму СКРН були залучені фахові спеціалісти Львівського фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАНУ, Інституту електрозварювання ім.Є.О.Патона НАНУ, Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАНУ, Національного технічного університету "Київська політехніка імені Ігоря Сікорського" та ін. Було встановлено, що чисто фізико-механічної точки зору основна особливість СКРН конструкційних сталей полягає в прискоренні росту тріщин під дією динамічних навантажень. Циклічні навантаження з низькою частотою помітно прискорюють швидкість росту тріщини, одночасно знижують граничне значення коефіцієнта інтенсивності напружень в порівнянні із статичним навантаженням [1, 3-7, 11, 12]. Крім того, швидкості росту тріщини, які отримували в експериментах з низькою швидкістю деформації (ЕНШД), виявляються значно вище швидкостей росту тріщини, отриманих в експериментах на КРН при постійному навантаженні і більш високому рівні напруження. Такі фактори надали можливість висловити припущення, що ріст корозійної тріщини швидше всього залежить від пластичної деформації у вершині тріщини, ніж від самого напруження.

Відомо [1, 12], що у випадку чисто механічного руйнування максимальні розтягуючі напруження в околицях вершини тріщини визначають умови руйнування. Таким чином, потрібні експерименти з досліджень руйнування при плоскій деформації, із яких можна було б отримати вірогідне критичне значення напруження. Коли явище СКРН залежить від швидкості пластичної деформації на околицях вершини тріщини, тоді в експериментах на КРН необхідно прийняти до уваги додаткові припущення з метою розширення уявлень механіки руйнування для пояснення високої швидкості росту тріщини в ЕНШД. Для цього необхідно експериментальні випробування проводити не тільки на компактних зразках, але й зразках у вигляді тонких пластин з

центральною надрізом із залученням уявлень пружно-пластичного руйнування [2] з урахуванням інтенсивного наводнення металу, яке відбувається в процесі тривалої експлуатації.

Відомо [1-12], що в процесі тривалої експлуатації суттєво змінюються механічні характеристики експлуатованих конструкцій, що пов'язано з втомою металу, спричиненою його сірко-водневою деградацією. А тому нагостріла потреба в отриманні науково-практичних результатів відносно цього специфічного виду корозійних ушкоджень з подальшим руйнуванням (СКРН), які можуть служити підґрунтям для розробки розрахунково-експериментального методу оцінки залишкового ресурсу інженерного обладнання з урахуванням деградації трубної сталі в процесі тривалої експлуатації в хімічно-агресивних середовищах промислових об'єктів.

Враховуючи вищевикладене, можна стверджувати, що проблема підвищення службового безаварійного ресурсу інженерних конструкцій, таких як трубопроводи, залишається занадто актуальною, а її вирішення має важливе значення в промисловій галузі України.

Ціль роботи – дослідження кінетики росту корозійних тріщин за допомогою експериментів з низькою швидкістю деформацій (ЕНШД) з використанням зразків у вигляді тонкої пластини з центральним надрізом із застосуванням механіки пружно-пластичних руйнувань. На базі експериментальних результатів розробити аналітичний метод розрахунку і прогнозування статичної водневої втоми трубних сталей інженерних конструкцій тривалого терміну експлуатації в корозійно-агресивних середовищах.

Методика досліджень і матеріали. Кінетику росту тріщин трубної удосконаленої сталі марки 06Г2БА досліджували на зразках двох типів:

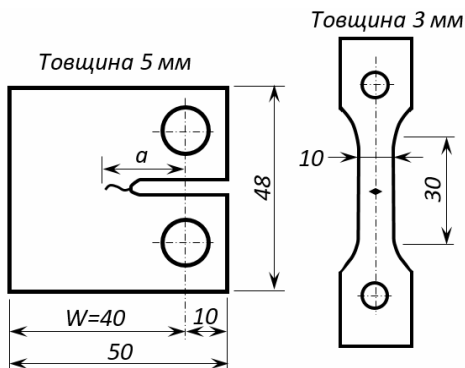


Рис. 1. Розміри компактного зразка (а) і зразка з центральним надрізом (б)

компактні зразки (КЗ) товщиною 5 мм і зразки з центральним надрізом (ЦН). На рис. 1 показані форма і розміри зразка КЗ, а також розміри зразка з ЦН.

Як засвідчили попередні експериментальні дослідження, критичні значення коефіцієнта інтенсивності напружень для плоскої деформації K_{IC} при випробуванні за методикою ASTM E399-78 для

зразків КЗ виявилися менше $4.2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, а для зразки ЦН – відповідно $3.4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Усі зразки перед експериментальними випробуваннями піддавали термообробці на твердий розчин при температурі 1050°C на протязі 2-х годин з подальшим загартуванням у воді. Перед експериментами поверхні усіх зразків обробляли наждачним папером із

зернистістю 500-600 і знежирювали оцтом. Експериментальні дослідження кінетики росту тріщин проводили за допомогою випробувальної машини моделі “1521” фірми “Інстрон” (Великобританія), в яку був змонтований пристрій з камерою, в яку заливали розчин NACE (5% розчин NaCl з 0.5% CH_3COOH (концентрацію встановлювали дослідним шляхом для досягнення рН4), насичений сірководнем. Температура випробувань становила 24°C . Експерименти з низькою швидкістю деформації (ЕНШД) проводили при чотирьох швидкостях деформації (розтягування), яка змінювалася від 6.0 нм/с до 200 нм/с при температурі 24°C і тиском 8 МПа та швидкістю 1820 нм/с на повітрі при температурі 24°C . Довжину тріщини вимірювали за допомогою телевізійної камери з відеомагнітофоном і лічильником часу (рис. 2 і 3). Металографічні дослідження проводили за допомогою растрового електронного мікроскопу фірми “Джеол” (Японія).

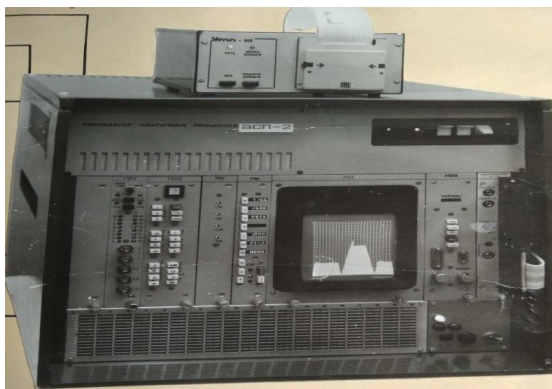


Рис. 2. Інформаційно-вимірювальна система АНЕП

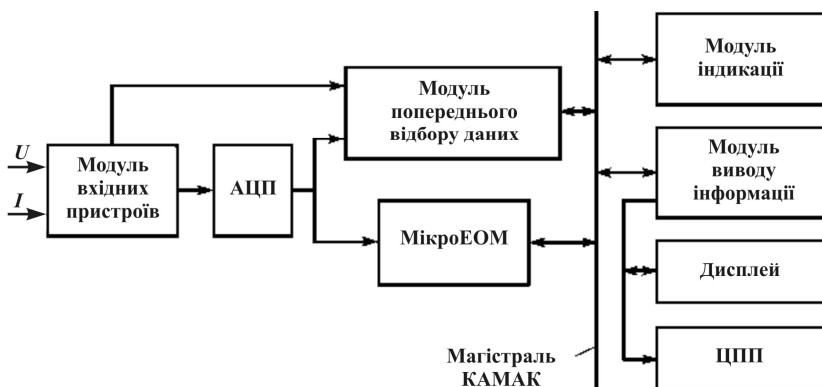


Рис. 3. Блок-схема інформаційно-вимірювальної системи АНЕП

Результати досліджень і їх обговорення. На рис. 2 показані криві росту тріщини і зміни навантаження для КЗ при експериментах з низькою швидкістю деформації і результати випробувань на повітрі при температурі 24°C. Встановлено, що в розчині NACE при зниженні швидкості розтягування dl/dt тріщини починають рости при менших значеннях подовження. Відповідно з таким ростом тріщини максимальні навантаження і подовження до руйнування зменшуються при зниженні швидкості розтягування. Крім того, при руйнуванні на повітрі спостерігається стійкий пластичний ріст тріщини після виникнення великих деформацій навколо її вершини.

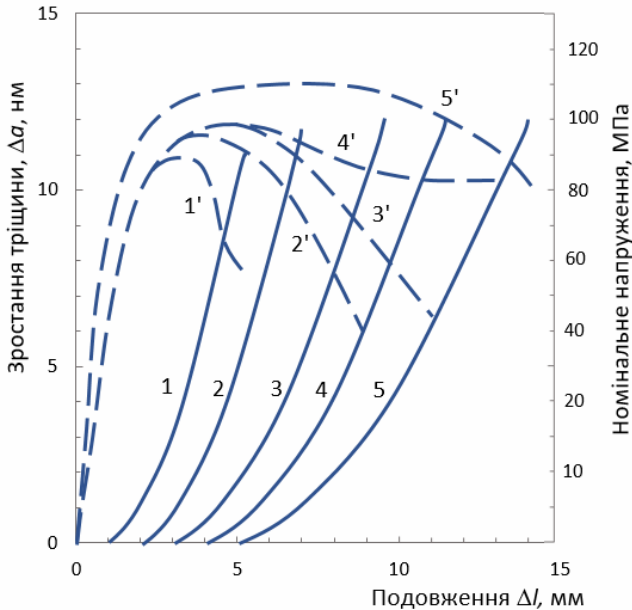


Рис. 4. Графіки кривих росту тріщини і криві навантаження – подовження отримані для компактних зразків із економно модифікованої сталі 06Г2БА при температурі 24°C з низькою швидкістю деформації (ЕНШД) в середовищі NACE і на повітрі.

Позначення: ----- ріст тріщини; - - - - номінальне напруження.

Швидкості росту тріщин (нм/с): 1 – 6.0; 2 – 15.5; 3 – 65; 4 – 200; 5 – 1820 (на повітрі);
1', 2', 3', 4', 5' - криві напруження

На рис. 5 показані фрактограми, які були отримані на растровому електронному мікроскопі фірми “Джеол” (Японія) для компактних зразків при ЕНШД; для ЦН – зразків зі швидкістю розтягування 15.5 нм/с. По усій поверхні руйнування спостерігали міжкристалічне розтріскування. Стосовно детальної картини руйнування, можна відмітити, що деформація зерна в середині зразка відрізняється від деформації зерна поблизу його бокових сторін, це, ймовірно, пов’язано з різним напруженим станом. Поверхня руйнування зразка, випробуваного при швидкості 60 нм/с, майже така ж, як на рис. 5. В той же час в зразку,

випробуваному при швидкості 65 нм/с, в середині по товщині спостерігали тонку область транскристалічного пластичного розтріскування аж до просування тріщини на довжину 5-7 мм. Поверхні руйнування зразків випробуваних при швидкості 200 нм/с в середовищі NACE і на повітрі показали тільки транскристалічне пластичне розтріскування (рис. 5).

Відомо[2, 3, 12], що одним з основних видів корозійного руйнування трубопровідних конструкцій тривалої експлуатації в корозійно-агресивних середовищах є воднева статична втомленість, яка пов'язана із зниженням міцності сталі в результаті водневого окрихчення в умовах статичного навантаження металу.

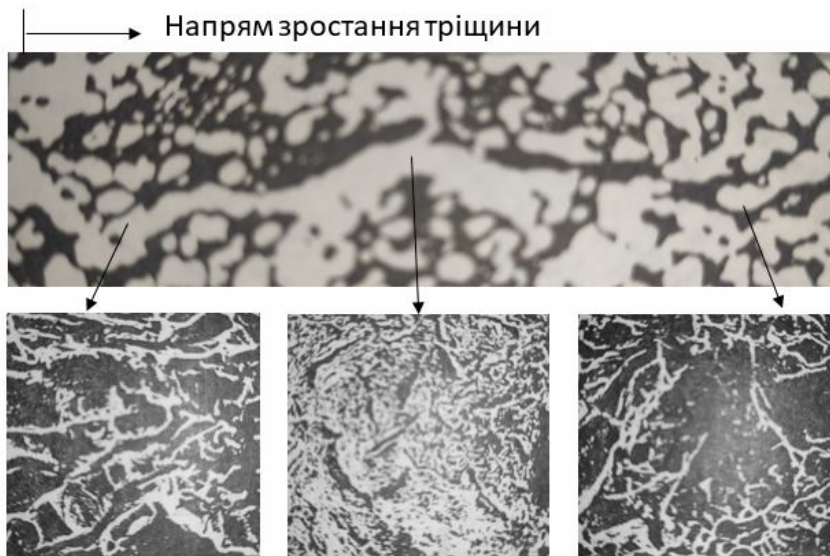


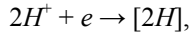
Рис. 5. Фрактограми випробуваного при швидкості розтягування 15.5 нм/с компактного зразку, отримані на растровому електронному мікроскопі

Аналіз літературних джерел [1, 2, 4-7, 12] свідчить, що відповідно сучасним фізико-механічним уявленням про природу статичної втомленості металу і реалізації її по механізму водневого окрихчення існує критична концентрація водню, при якій різко послаблюється когезійний зв'язок в кристалічній решітці, тобто відбувається розрив міжатомних зв'язків. Критична концентрація водню створюється під впливом двомірного поля розтягуючих напружень направленою орієнтованою дифузією водню. Термін, на протязі якого досягається в металі критична концентрація водню і критична величина напружень ($C_{KP} + \sigma_{KP}$), відповідає інкубаційному періоду росту мікротріщини.

Аналіз гіпотез показує, що в мікромасштабі дія водню може проявлятися не стільки в окрихненні, скільки в пластифікуванні металу. Механізм пластифікації виглядає як зниження граничного напруження

руйнування в результаті локального полегшення пластичного руху і руйнування мікрооб'єктів металу у вершині тріщини, а тому передбачає протікання ряду процесів:

1) розряд іонів водню на поверхні тіла зерен (блоків, дислокаційних пасток, неметалевих включень, фаз впровадження, тощо) в результаті катодної реакції:



де $[2H]$ складається з двох складових: $[H]_{ME} + (H)_G$, тобто з концентрації розчиненого атомарного водню в металі і концентрації в газовій фазі;

2) проникнення і транспортування (по дифузійному чи дислокаційному механізмі) атомів водню в області з підвищеною концентрацією напружень, тобто до вершини зародження мікротріщини;

3) полегшене підростання мікротріщини в результаті обумовленого воднем зниження пластичності наводненого металу.

В даному випадку, на наш погляд, доцільно буде запропонувати модель статичної (водневої) втомленості, в основу якої покладений молекулярно-кінетичний механізм руйнування твердих тіл. Ця модель використовує теорію тимчасової залежності міцності, тобто розглядається ріст кожної тріщини в даному випадку, як послідовний розрив зв'язків в гирлі її вершини під дією напружень і теплових флуктуацій атомів чи молекул.

Виходячи з механіки атомного механізму руйнувань, тріщини в металі виникають по границях зерен під дією зсувних напружень I-го роду [3, 5]. Зусилля $\sigma_{зс}$, яке потрібно прикласти, щоб здійснити такий зсув, частково розраховано Я.И.Френкелем по формулі [12]:

$\sigma_{зс} = (\delta_A/\delta_B) \cdot (G/2\pi)$, де G - модуль зсуву (Юнга), δ_A – міжатомна відстань в напрямку ковзання, δ_B – міжплоскісна відстань.

Виникнення і існування таких тріщин енергетично вигідно, так як витрачається менша енергія в порівнянні з не наводненим металом [9, 11].

З використанням атомного механізму руйнування розрахунково-експериментальним шляхом був визначений термін зародження тріщин в металі під статичним навантаженням з урахуванням наводнення: $\tau = \tau_0 \cdot \exp\{[U_0 - U_C - U_{C\sigma} - U_\sigma] / RT\}$, де U_0 – енергія активації елементарного акту процесу руйнування у відсутності напруження і відсутності агресивного середовища, близька до енергії сублімації металу; U_C – внутрішня енергія обумовлена кулонівською взаємодією протонів з іонами металу в кристалевій ґратці; $U_{C\sigma}$ – внутрішня енергія обумовлена взаємодією розчиненого водню з полем напружень в металі; U_σ – внутрішня енергія обумовлена дією на метал зовнішньої сили; τ_0 – стала величина численно близька до періоду теплових коливань атомів ($\tau_0 = 10^{-13}$ с). Як правило, величиною U_σ з-за її малості в розрахунках нехтують. З урахуванням деяких доповнень для практичних розрахунків використовують наступну формулу:

$$\tau = \tau_0 \exp\{[U - \alpha \cdot (\sigma_p \cdot V / RT)] / RT\},$$

де $\alpha = (\gamma \cdot \alpha_0 \cdot C_0)$, а $[U_0 - U_c] = U$; γ – структурно-чутливий коефіцієнт ($\gamma = \beta_K \cdot \Omega$); β_K – коефіцієнт концентрації напружень, рівний $(d/\delta_F)^{1/2}$; Ω – активіційний об'єм; R – універсальна газова стала; T – температура (в градусах Кельвина).

Значення параметрів U і α залежать від хімічного складу і структури сталі і можуть бути визначені експериментально. Так, для сталі 09Г2С величини U і α відповідно рівні 173 і 35 кДж/моль, а для сталі 17Г1С $U = 124$ кДж/моль, $\alpha = 27$ кДж/моль.

На рис.6 наведені криві статичної і циклічної втомності сталей 09Г2С і 17Г1С в модельному середовищі NACE з сірководнем в складі. Порівнюючи значення статичної і циклічної довговічності зразків при $\sigma_{\max} = \text{Const}$, отримуємо коефіцієнт втомленості:

$$K_{BT} = [\lg \tau_{CT}(\sigma_{\max})] / [\lg \tau_{Ц}(\sigma_{\max})],$$

де $\tau_{CT}(\sigma_{\max})$ і $\tau_{Ц}(\sigma_{\max})$ – довговічність зразків відповідно при статичному і циклічному режимах навантаженні розтягувальним напруженням σ_{\max} .

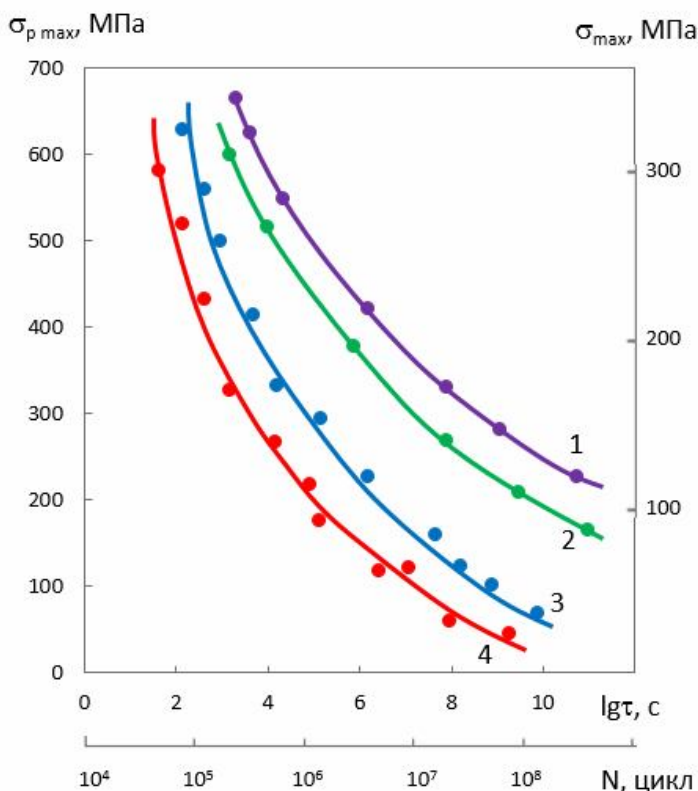


Рис. 6. Криві статичної і циклічної втомності трубних сталей при випробуванні в середовищі NACE: 2, 3 - сталь 17Г1С; 1, 4 - сталь 09Г2С

На рис. 7, де наведена залежність $K_{BT} = f(\sigma_{\max})$ для сталі 09Г2С і 17Г1С при коефіцієнті асиметрії $r = \text{Const}$, вираз для K_{BT} має лінійний характер $K_{BT} = 1 + \lambda_0 (1 - r)^m \cdot (\sigma_B - \sigma_{\max})$, де λ_0 – стала, яка залежить від хімічного складу і структури сталі (для сталі 09Г2С після термічної обробки – нормалізація - $\lambda_0 = 0.001$ (1/МПа), для сталі 17Г1С - $\lambda_0 = 0.001$ (1/МПа), r - коефіцієнт асиметрії, $m=3.6$ – показник степенів.

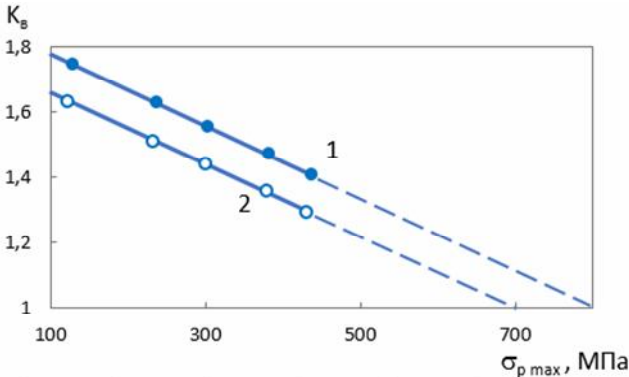


Рис. 7. Залежність коефіцієнта втомленості (K_{BT}) від $\sigma_{p \max}$.
Позначення:----- експериментальні результати; - - - прогнозовані дані;
1 – сталь 09Г2С; 2 – 17Г1С

Використовуючи отриману математичну модель спротиву трубних сталей втомним руйнуванням при змінних розтягувальних напруженнях у водному середовищі, яке містить сірководень, були проведені розрахунки часу зародження і розповсюдження тріщини (до злому) на сталях 09Г2С і 17Г1С при різних режимах навантаження в середовищі NACE, які наведені в порівнянні з експериментальними результатами (табл. 1).

Таблиця 1

Експериментальні і розрахункові значення терміну до руйнування зразків трубних сталей при різних режимах навантаження в середовищі NACE

Марка сталі	σ_{\max} , МПа	$\tau_{\text{РОЗР}}$, с	$\tau_{\text{ЕКСП}}$, с	Частота навантаження, цикл/хв	Δ , %
09Г2С	560	2.72	2.68	100	1.5
	525	5.12	5.20	100	2.0
	490	9.44	8.96	100	3.5
	555	2.69	2.76	100	2.4
17Г1С	540	1.80	1.71	100	3.0
	510	2.72	2.77	100	5.5
	470	1.41	1.52	100	6.4
	500	1.49	1.61	100	6.1

Аналіз даних табл. 1 свідчить, що відхилення не перевищують 5-7%, що показує на адекватність розробленої математичної моделі фізико-

механічному стану деформованої сталі і можливості використання її для визначення значення руйнівного критичного напруження при заданому ресурсі роботи трубопровідної конструкції в сірководеньмісному середовищі при змінному навантаженні. Так як запропонована модель враховує особливості будови металу і вмісту розчиненого водню, то дану модель можна використовувати для розрахунку і прогнозування ресурсу підвищення надійності і працездатності металоконструкцій на стадії проектних рішень і зведення нафтогазових споруд, які планується експлуатувати в сірководневих середовищах на родовищах України.

Висновки

1. Розроблений аналітичний метод розрахунку і прогнозування статичної водневої втомленості трубних сталей, призначених для експлуатації в корозійно-агресивних середовищах з вмістом сірководню. Математичні розрахунки добре корелюють з експериментальними результатами (відхилення не перевищують 5-7%), що допускається в інженерних прогнозних розрахунках.

2. Експериментальним шляхом досліджено швидкість росту тріщин в сталях 06Г2БА; побудовані графіки кривих росту тріщин і криві “навантаження-подовження” для компактних зразків із економно модифікованої сталі 06Г2БА з низькою швидкістю деформації (ЕНШД) в середовищі НАСЕ і на повітрі під змінними напруженнями.

3. Вперше побудовані криві статичної і циклічної втомленості для трубних сталей 09Г2С і 17Г1С при випробуванні в середовищі НАСЕ, що дозволяє розрахувати і спрогнозувати їх безаварійний залишковий робочий ресурс.

4. Вперше досліджено прискорений навколишнім середовищем ріст тріщини для трубної модифікованої сталі 06Г2БА в середовищі НАСЕ та виконані розрахунки ресурсу трубних сталей на основі механіки пружно-пластичного руйнування.

5. Доведено експериментальними металографічними і механічними дослідженнями, що з ростом наводнення, яке відбувається в процесі тривалого терміну експлуатації трубної сталі 06Г2БА, різко зростає (в 2-3 рази) циклічна міцність, що сприяє подовженню робочого (безаварійного) ресурсу трубопроводів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гумеров А.Г., Ямалеев Н.М., Журавлев Г.В. Трещиностойкость металла труб нефтепроводов// М.: ООО“Недра-Бизнесцентр”.-2001. -242 с.
2. Макаренко В.Д., Палий Р.В., Галиченко Е.Н. Физико-механические основы сероводородного разрушения промышленных трубопроводов// Челябинск: Изд-во ЦНТИ. - 2002. -412 с.
3. Макаренко В.Д., Гачев С.И., Прохоров Н.Н. Сварка и коррозия нефтегазопроводов Западной Сибири//Киев:Изд-во“Науковадумка”.—1996. -549 с.
4. Макаренко В.Д., Максимов С.Ю., Білик С.І. і ін. Корозійні руйнування каналізаційних систем України//Київ:НУБіП України.-2021.-272 с.
5. Самойленко М.І. Функціональна надійність трубопроводів них транспортних систем // Харків: ХНАМП. -2009.-184 с.

6. *Седак В.С., Нестеренко С.В.* Анализ утечек газа и причин стресс коррозионного разрушения подземных трубопроводов // Науково-технічний збірник.- №10.-2013.-С. 182-188.
7. *Ориняк І.В., Різгонюк В.В.* Ресурс довговічність і надійність трубопроводів Огляд сучасних підходів і проблеми нормативного забезпечення в Україні//Нафтова і газова промисловість. -2003.-№4.-С. 54-57.
8. *Насонкіна Н.Г., Антоненко Є.Г., Тряківа А.С.* Аналіз пошкодженості водопроводів і каналізаційних мереж// Сучасне промислове та цивільне будівництво. - 2019.-Том15.-№1.-С. 23-34.
9. *Мешков Ю.Я.* О возможности устойчивого равновесия острых трещин при их зарождении в металлах// Металлофизика. -1989.—Вып.23.-С. 5-12.
10. *Писаренко Г.С., Стрижало В.А.* Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела// Киев:Наукова думка. -1986.-262 с.
11. *T. Kawakubo, M. Hishida.* Elastic-Plastic Fracture Mechanics Analysis on Environmentally Accelerated Cracking of Stainless Steel in High Temperature Water// Journal of Engineering Materials and Technology.- 2005. –Vol.107.-pp. 240-245.
12. *Методика з визначення параметрів тріщиностійкості ASTM E399-78 (для компактних зразків і зразків з центральним надрізом) // Journal of Engineering Materials and Technology.- 2005. –Vol.107.-pp. 107-116.*

REFERENCES

1. *Gumerov A.G., Yamaleev N.M., Zhuravlev G.V.* Treshhy'nostojkost' metala trub nefteprovodov (Crack resistance of the metal of oil pipelines) // LCD "Nedra-By'znescentr".-2001. -242 s.
2. *Makarenko V.D., Paly'j R.V., Galy'chenko E.N.* Fy'zy'ko-mexany'chesky'e osnovy serovodorodnogo razrushen'y'a promysl'ovyx truboprovodov (Physico-mechanical foundations of hydrogen sulfide destruction of industrial pipelines) // Chelyaby'nsk: Y'zd-vo CzNTY'. - 2002.-412 s.
3. *Makarenko V.D., Gachev S.Y., Proxorov N.N.* Svarka y' korroz'y'a neftegazoprovodov Zapadnoj Sy'by'ry' (Welding and corrosion of oil and gas pipelines in Western Siberia) //Ky'ev:Y'zd-vo "Naukovadumka".—1996.-549 s.
4. *Makarenko V.D., Maksy'mov S.Yu., Bily'k S.I. i in.* Korozijni rujnuvannya kanalizacijny'x sy'stem Ukrayiny'(Corrosive destruction of sewage systems of Ukraine) //Ky'yiv:NUBIP Ukrayiny'.-2021.-272 s.
5. *Samojlenko M.I.* Funkcional'na nadijnist' truboprovodiv ny'x transportny'x sy'stem (Functional reliability of pipelines of transport systems) // Xarkciv: XNAMP. -2009.-184 s.
6. *Sedak V.S., Nesterenko S.V.* Anal'y'z uteчек gaza y' pry'chy'n stress korroz'y'onogo razrushen'y'a podzemny'x truboprovodov (Analysis of gas leaks and causes of stress corrosive destruction of underground pipelines) // Naukovo-texnichny'j zbirny'k. -#10.-2013.-S.182-188
7. *Ory'nyak I.V., Rizgonyuk V.V.* Resurs dovgovichnist' i nadijnist' truboprovodiv Oglyad suchasny'x pidxodiv i problemy' normaty'vnogo zabezpechennya v Ukraini (Resource durability and reliability of pipelines Review of modern approaches and problems of regulatory support in Ukraine) //Naftova i gazova promy'slovist'. -2003.-#4.-S. 54-57.
8. *Nasonkina N.G., Antonenko Ye.G., Tryakiva A.S.* Analiz poshkodzenosti vodoprovodiv i kanalizacijny'x mrezezh (Damage analysis of water pipes and sewage networks) // Suchasne promy'slove ta cy'vil'ne budivny'ctvo. -2019.-Tom15.-#1.-S. 23-34.
9. *Meshkov Yu.Ya.* O vozmozhnosti' ustojchy'vogornavnovesy'ya ostрых treshhy'n pry' y'x zarozhdeny'y' v metallax (On the possibility of stable rock balance of sharp cracks during their genesis in metals) // Metallofy'zy'ka. -1989.—Vyp.23.-S. 5-12.
10. *Py'sarenko G.S., Stry'zhalo V.A.* Ekspery'mental'nye metody v mexany'ke deformy'ruemogo tverdogo tela (Experimental methods in the mechanics of a deformable solid) // Ky'ev:Naukova dumka. -1986.-262 s.
11. *T. Kawakubo, M. Hishida.* Elastic-Plastic Fracture Mechanics Analysis on Environmentally Accelerated Cracking of Stainless Steel in High Temperature Water// Journal of Engineering Materials and Technology.- 2005. –Vol.107.-pp. 240-245.
12. *Metody'ka z vy'znachennya parametriv trishhy'nostijkosti ASTM E399-78 (dlya kompaktny'x zrazkiv i zrazkiv z central'ny'm nadrizom) (ASTM E399-78 method for determining crack resistance parameters (for compact samples and samples with a central notch)) // Journal of Engineering Materials and Technology.- 2005. –Vol.107.-pp. 107-116.*

*Макаренко Ю.В., Савенко В.І., Горlach О.М., Задорожнікова І.В., Чигиринець О.Е.,
Победа С.С.*

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ РОСТУ ТРІЩИН ПІД ДІЄЮ СТАТИЧНИХ І ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ В КОРОЗІЙНО-АГРЕСИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ NACE

Розроблений аналітичний метод розрахунку і прогнозування статичної водневої втомленості трубних сталей, призначених для експлуатації в корозійно-агресивних середовищах з вмістом сірководню. Математичні розрахунки добре корелюють з експериментальними результатами (відхилення не перевищують 5-7%), що допускається в інженерних прогнозних розрахунках. Експериментальним шляхом досліджено швидкість росту тріщин в сталях 06Г2БА; побудовані графіки кривих росту тріщин і криві "навантаження-подовження" для компактних зразків із економічно модифікованої сталі 06Г2БА з низькою швидкістю деформації (ЕНШД) в середовищі NACE і на повітрі під змінними напруженнями. Вперше побудовані криві статичної і циклічної втомленості для трубних сталей 09Г2С і 17Г1С при випробуванні в середовищі NACE, що дозволяє розраховувати і спрогнозувати їх безаварійний залишковий робочий ресурс. Вперше досліджено прискорений навколишнім середовищем ріст тріщини для трубної модифікованої сталі 06Г2БА в середовищі NACE та виконані розрахунки ресурсу трубних сталей на основі механіки пружно-пластичного руйнування. Доказано експериментальними металографічними і механічними дослідженнями, що з ростом наводнення, яке відбувається в процесі тривалого терміну експлуатації трубної сталі 06Г2БА, різко зростає (в 2-3 рази) циклічна міцність, що сприяє подовженню робочого (безаварійного) ресурсу трубопроводів.

Ключові слова: труба, деформація, руйнування, тріщиностійкість, тріщини, пори, неметалеві вclusions.

*Makarenko Yu.V., Savenko V.I., Gorlach O.M., Zadorozhnikova I.V., Chygyrynets' O.E.,
Pobeda S.S.*

RESEARCH OF THE KINETICS OF CRACK GROWTH UNDER THE ACTION OF STATIC AND CYCLIC LOADS OF PIPE STEEL IN A NACE CORROSION-AGGRESSIVE ENVIRONMENT

An analytical method for calculating and forecasting static hydrogen fatigue of pipe steels intended for operation in corrosive-aggressive environments containing hydrogen sulfide has been developed. Mathematical calculations correlate well with experimental results (deviations do not exceed 5-7%), which is allowed in engineering predictive calculations. The rate of crack growth in 06G2BA steels was investigated experimentally; graphs of crack growth curves and "load-elongation" curves for compact samples of economically modified steel 06G2BA with a low rate of deformation (ENSHD) in the NACE environment and in air under variable stresses are constructed. For the first time, static and cyclic fatigue curves for pipe steels 09G2C and 17G1C were constructed when tested in the NACE environment, which allows to calculate and predict their failure-free residual working life. For the first time, environment-accelerated crack growth for pipe-modified steel 06G2BA in the NACE environment was investigated, and calculations of the service life of pipe steels based on the mechanics of elastic-plastic failure were performed. It has been proven by experimental metallographic and mechanical studies that with the increase in flooding, which occurs during the long service life of the 06G2BA pipe steel, the cyclic strength increases sharply (by 2-3 times), which contributes to the extension of the working (failure-free) resource of the pipelines.

Key words: pipe, deformation, destruction, crack resistance, cracks, pores, non-metallic inclusions.

УДК 669.14 : 620.191.33

Макаренко Ю.В., Савенко В.І., Горlach О.М., Задорожнікова І.В., Чигиринець О.Е., Победа С.С.
Дослідження кінетики росту тріщин під дією статичних і циклічних навантажень трубних сталей в корозійно-агресивному середовищі NACE // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2023. – Вип. 110. – С. 520-532.

Табл. 1. Іл. 7. Бібліогр. 12 назв.

UDC 669.14 : 620.191.33

Макаренко Ю.В., Савенко В.І., Горlach О.М., Zadorozhnikova I.V., Chygyrynets' O.E., Pobeda S.S.
Research of the kinetics of crack growth under the action of static and cyclic loads of pipe steel in a NACE corrosion-aggressive environment // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific – Technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2023. – Issue 110. – P. 520-532.

Tabl. 1. Fig. 7. Ref. 12.

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): магістерка університету Манітобо (м. Вінніпег, Канада) *МАКАРЕНКО Юлія Валеріївна*

Тел.: +38(066) 747-67-90

E-mail: green555tree@gmail.com

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор кафедри організації і управління будівництвом Київського національного університету будівництва і архітектури *САВЕНКО Володимир Іванович*

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, просп. Повітрофлотський, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Тел.: +38(097)-970-66-59

E-mail: savenkoknuba@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1490-6730>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): аспірант Київського національного університету будівництва і архітектури *ГОРЛАЧ Олександр Миколайович*

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, просп. Повітрофлотський, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Тел.: +38(044) 245 48 51

E-mail: savenkoknuba@gmail.com

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва та цивільної інженерії Луцького національного технічного університету, дійсний член Української академії наук, член-кореспондент Академії будівництва України *ЗАДОРЖНИКОВА Ірина Вікторівна*

Адреса робоча: вул. Львівська, 75, м. Луцьк Волинська обл. 43018, Україна

Тел.: +38(067)-1653389

E-mail: i.zadorozhnikov@lutsk-ntu.com.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3652-7528>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): доктор хімічних наук, професор кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» *Чигиринець Олена Едуардівна*

Адреса робоча: КПІ ім. Ігоря Сікорського, пр. Перемоги, 37, корп. 4, Київ 03056

Тел.: +38(044)-204-83-89

E-mail: o.chygyrynets@kpi.ua

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): аспірант Київського національного університету будівництва і архітектури *ПОБЕДА Сергій Сергійович*

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, просп. Повітрофлотський, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Тел.: +38(044) 245 48 51

E-mail: pobeda.s.s101@gmail.com