

ВПЛИВ НАВОДНЮВАННЯ ТА ПОПЕРЕДНЬОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ НА ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ ТРУБОПРОВОДІВ

Ю.Д.Петрина, О.О.Онишук, Д.Ю.Петрина, І.М.Стоцький

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42264,

e-mail: public@ifdtung.if.ua

Исследовано совместное влияние наводняемости и предварительного пластического деформирования (ППД) на трещиностойкость при статических и циклических нагрузках трубопроводной стали 17Г1С-У. При отсутствии наводняемости ППД стали незначительно понижает ее кратковременную трещиностойкость и существенно повышает благодаря закрытию трещин сопротивление их росту в припоровом участке. Наводняемость материала резко уменьшает кратковременную трещиностойкость стали и интенсифицирует рост усталостных трещин, особенно в среднеамплитудном участке низкочастотного нагружения. Максимально понижается статическая и циклическая трещиностойкость стали в результате совместного влияния ППД и наводняемости.

Технічна діагностика відповідальних конструкцій, що експлуатуються в умовах спільної дії статичних і циклічних навантажень та корозійно-агресивних середовищ, є актуальною науково-технічною проблемою, зокрема, для визначення ресурсу об'єктів тривалої експлуатації. Численними дослідженнями доведено, що процеси руйнування магістральних нафтогазопроводів під впливом спільної дії механічних навантажень та корозійних робочих середовищ зумовлені рядом фізико-хімічних локалізованих процесів утворення та розвитку у матеріалі тріщиноподібних дефектів [1]. При цьому поряд з місцями підвищеної концентрації напружень (отвори, вирізи, щілини та інші технологічні та конструктивні концентратори напружень) ці процеси часто виникають і на гладких деформованих поверхнях, що зумовлено гетерогенністю їх фізико-хімічного стану. Це підтверджено, зокрема, останніми статистичними даними про відмови магістральних нафтогазопроводів [2], а саме: у 50...80-ти відсотках випадків виходу з ладу нафтогазопроводів (залежно від часу експлуатації) зумовлено первинними корозійно-механічними пошкодженнями та утворенням і подальшим розвитком тріщиноподібних дефектів. Не слід нехтувати можливістю перевантажень (наприклад, при зсувах ґрунтів), які призводять до пластичної деформації матеріалу в окремих зонах трубопроводу, що також сприяє виникненню тріщин. Це вказує на важливість врахування впливу попереднього пластичного деформування на статичну та циклічну тріщиностійкість трубопроводів. З іншого боку, необхідно рахуватися і з можливим наводнюванням матеріалу в робочих середовищах, передусім у місцях концентрації напружень, що може додатково негативно вплинути на короточасну та втомну тріщиностійкість і

The synergistic effect of hydrogenation and plastic predeformation (PPD) on the fracture toughness and fatigue crack growth resistance in the 0,17 – 1 Mn – 1Si steel was studied. In the nonhydrogenated state, PPD of steel slightly decreases its fracture toughness and increases considerably the fatigue crack growth resistance in the near threshold region of $da/dN - \Delta K$ diagram. Crack closure is responsible for the latter effect. Hydrogenation of the material drastically decreases the fracture toughness and intensifies the fatigue crack growth, especially in the middle region of $da/dN - \Delta K$ diagram. The synergistic effect of PPD and hydrogenation of the investigated steel causes the maximum decrease of crack growth resistance, both under static and cyclic loading.

тим самим на стійкість трубопроводу. У зв'язку з цим визначення характеристик тріщиностійкості в деформованих конструкційних металах у взаємозв'язку з механізмами дії робочого середовища є актуальним науковим та прикладним завданням. Дана праця спрямована на вивчення спільного впливу наводнюваності та попереднього пластичного деформування розтягом на опір ростові тріщин у сталях 17Г1С-У, яка широко застосовується для виготовлення труб.

Випробовували дану сталь в нормалізованому стані (заводський технологічний процес). Це забезпечило межу міцності $\sigma_B = 600$ МПа, межу текучості $\sigma_T = 425$ МПа та відносне видовження $\delta = 26\%$. Товщину призматичних зразків 12×130 мм вибрано 2 мм, що давало змогу максимально наводнювати матеріал по їх товщині в умовах катодної поляризації за кімнатної температури. Зразки для випробувань на тріщиностійкість пластично деформували, рівномірно розтягаючи до $\varepsilon = 5\%$, а частину – в недеформованому стані – залишали для порівняння. Посередині зразків нарізали концентратор з радіусом заокруглення 0,1 мм завглибшки 1 мм, який зменшував переріз по висоті.

Наводнювали зразки з краєвим концентратором напружень і виведеною з нього втомною тріщиною. Використовували електролітичний спосіб наводнювання шляхом його катодної поляризації. На рис. 1 представлено схему електрохімічної камери для електролітичного наводнювання зразків. Джерелом струму служить випрямляч, зразок виступає катодом, а платинова спіраль – анодом. Специфіка наводнювання залежала від виду механічних випробувань. У випадку досліджень короточасної тріщиностійкості зразки із попередньо наведеною трі-

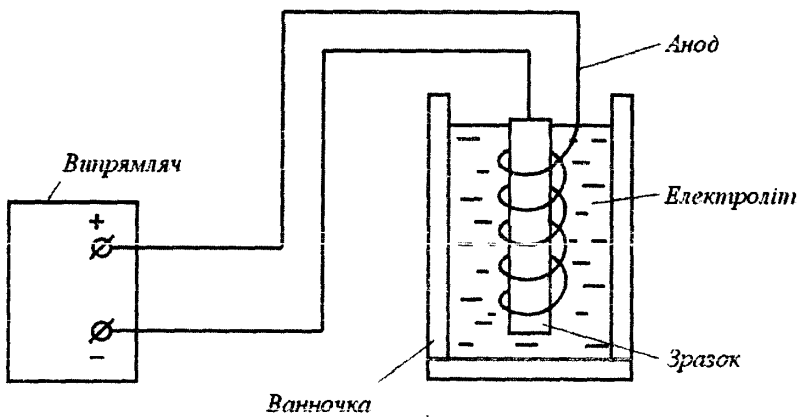


Рисунок 1 — Схема електролітичної камери для наводнювання зразків

Таблиця 1 — В'язкість руйнування сталі 17Г1С-У

$K_C (K_{IC}), МПа\sqrt{м}$			
Вихідний стан	Після наводнювання	Після ППД	Після наводнювання і ППД
122	57	103	32

щиною впродовж 3 годин піддавали катодній поляризації у розчині NaOH з рН=12,5 за густини струму 0,01 А/м². Такий вибір електроліту замість широко вживаного розчину сірчаної кислоти зумовлений тим, щоб запобігти можливому корозійному роз'їданню гострої втомної тріщини. Останнє позначилось би на механічних умовах в зоні передруйнування і спотворило б результати випробувань на тріщиностійкість. Велика тривалість наводнювання за поміркованої густини струму сприяла, з одного боку, глибшому проникненню водню в метал, а з іншого — запобігла пошкодженню металу, властивому катодній поляризації за високої густини струму. Крім того, подальше збільшення тривалості наводнювання не спричиняло додаткового впливу на тріщиностійкість сталі. Безпосередньо після закінчення наводнювання зразки навантажували активним розтягом, дотримуючись вимог стосовно проведення експериментів на короточасну тріщиностійкість [3]. Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_C визначали, аналізуючи діаграму „сила розтягу F – розкриття берегів тріщини δ ”.

Опір ростові втомних тріщин у зразках оцінювали під час віднульового циклу навантаження консольним згином із частотою у діапазоні 0,3...10 Гц. Такі низькочастотні втомні випробування були проведені у зв'язку з тим, що доведена неможливість їх заміни поширеними випробуваннями з частотою 50 Гц в присутності робочих середовищ, оскільки в даному випадку руйнування контролюється не тільки рівнем навантаження, але й часом хімічної, фізичної та фізико-хімічної дії середовища [1]. Так, в діапазоні $\sigma_a = 60...280$ МПа збільшення частоти навантаження від 0,8 до 50 Гц спричи-

нює зростання довговічності сталі трубопроводу у морській воді в 5...6,7 разів. Довжину тріщини заміряли на обох бічних поверхнях зразка за допомогою пересувного мікроскопа МБС-11. Закриття тріщини встановлювали методом податливості [4]. У результаті обчислювали номінальний ΔK і ефективний ΔK_{eff} розмах коефіцієнта інтенсивності напружень. Діаграми втомного руйнування $da/dN - \Delta K$ та $da/dN - \Delta K_{eff}$ будували, керуючись методичними рекомендаціями [3, 4].

Враховуючи можливість десорбції водню в процесі випробувань на повітрі, зразки наводнювали за 3 години до початку, а також упродовж дослідів. Для цього використовували електрохімічну комірку, яка охоплювала робочу частину зразка з тріщиною і уможлилювала візуальне стеження за її ростом. Електроліт і густина струму катодної поляризації ті ж, що й у випробуваннях на короточасну тріщиностійкість.

Спочатку проводили випробування на короточасну тріщиностійкість. Мала товщина зразків не давала змоги реалізувати умови плоскої деформації. Діаграми навантаження $F - \delta$ у верхній своїй частині суттєво відхилялися від лінійності, а їх аналіз [3] свідчив про значну пластичну деформацію у вершині тріщини, яка передувала її підростанню. Винятком були лише попередньо деформовані, а пізніше наводнювані зразки. Для них діаграми $F - \delta$ залишалися лінійними аж до моменту руйнування зразка, вказуючи на коректність застосування підходів лінійної механіки руйнування. Тоді вдалося оцінити критичне значення K_{IC} .

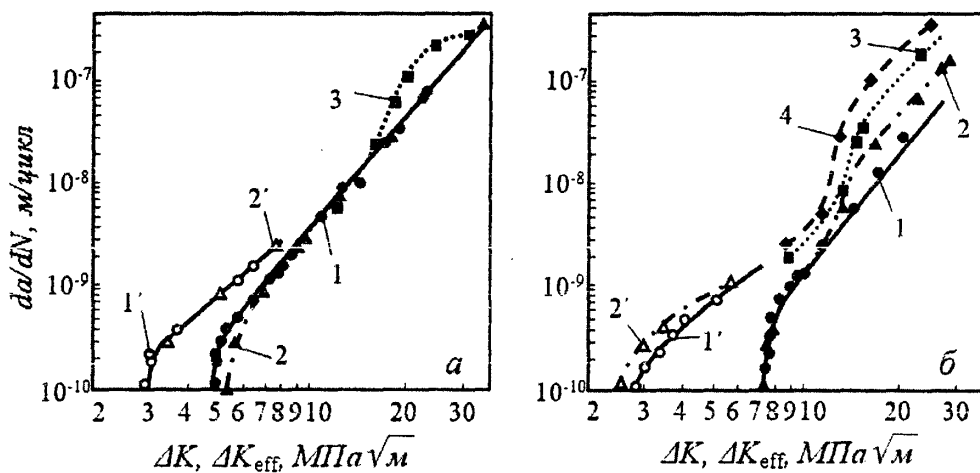


Рисунок 2 — Залежності $da/dN - \Delta K$ (1-4) та $da/dN - \Delta K_{eff}$ (1',2') для ненаводнюваної (1, 1') і наводнюваної (2, 2',3, 4) сталі у вихідному стані (а) та після попередньої пластичної деформації (б): 1, 1',2, 2'—частота навантаження 10Гц; 3 — 1Гц; 4 — 0,3Гц

Значення K_C для чотирьох варіантів обробки сталі наведені в таблиці. Порівняльний аналіз цих значень свідчить, що попереднє пластичне деформування розтягом дещо знизило її короточасну тріщиностійкість (від 122 до 103 $MPa\sqrt{m}$). Ці результати узгоджуються з висновком, що чутливість параметра K_C (K_{IC}) до попередньої пластичної деформації в умовах рівномірного розтягу залежить від здатності матеріалу у вихідному стані до деформаційного зміцнення, яке характеризується відношенням σ_B/σ_T . Що більше це відношення, тим інтенсивніше знижується короточасна тріщиностійкість матеріалу. У нашому випадку сталь має посереднє зміцнення ($\sigma_B/\sigma_T=1,4$), що й зумовило порівняно невеликий вплив попередньої пластичної деформації на параметр K_C (спад на 15,6%).

Попереднє електролітичне наводнювання суттєво знизило короточасну тріщиностійкість сталі. Її значення (57 $MPa\sqrt{m}$) порівняно з K_C сталі у вихідному стані (122 $MPa\sqrt{m}$) зменшилось більш як удвічі. Ще більше падіння K_C (від 103 до 32 $MPa\sqrt{m}$) зафіксовано в попередньо деформованих зразках, незважаючи на і так нижчу тріщиностійкість деформованої сталі проти вихідного стану. Якщо ж брати до уваги сумарний вплив попереднього пластичного деформування та наводнювання, то ці чинники практично в чотири рази зменшують короточасну тріщиностійкість сталі трубопроводу. Крім того, перехід від руйнування в умовах плоского напруженого стану до руйнування за плоскої деформації свідчить про сильну окрихувальну дію попереднього пластичного деформування і водню.

Попередня пластична деформація розтягом позитивно впливає на опір ростові втомних тріщин (рис. 2). Цей ефект зростає зі знижен-

ням навантаження: пороговий розмах ΔK_{th} збільшився у півтора рази порівняно з ΔK_{th} для вихідного стану матеріалу, а за високих ΔK , близьких до циклічної в'язкості руйнування, вплив попередньої пластичної деформації зникає.

Попередньо оцінено швидкості втомного росту тріщин у сталі вихідного стану в розчині луку, але без накладання катодної поляризації. Вони не виявили змін у кінетиці руйнування порівняно з випробуваннями на повітрі, тобто дане середовище не впливає на втомний ріст тріщин. Це дає змогу надалі пов'язувати можливий вплив на циклічну тріщиностійкість сталі розчину луку в умовах катодної поляризації саме з наводнюванням матеріалу.

Дослідження зростання втомних тріщин за катодної поляризації виявили різкий вплив наводнювання і за характером, і за інтенсивністю. Він залежить від частоти та розмаху циклічного навантаження, а також стану матеріалу (вихідний чи після попередньої пластичної деформації). Наводнювання вихідного матеріалу (див. рис. 2, а) мало позначається на кінетиці руйнування, хоч припороговий ріст тріщин дещо сповільнюється в разі високої частоти і пришвидшується за більших ΔK і нижчої частоти навантаження.

Попередньо деформований матеріал виявився набагато чутливішим до наводнювання (рис. 2,б). Звертає на себе увагу сильна частотна залежність кінетики руйнування під підвищеним навантаженням: нижчій частоті відповідає більша швидкість росту тріщини. Зареєстрований різкий стрибок швидкості в середньо-амплітудній ділянці діаграм відбиває, очевидно, схильність матеріалу до водневого розтріскування під циклічним навантаженням.

Розмах ΔK , який відповідає стрімкому пришвидшенню, залежить від частоти навантаження і мінімальний (~13 $MPa\sqrt{m}$) за найменшої частоти 0,3 Гц (крива 4). За припорого-

вих ΔK наводнювання не впливає негативно, якщо частота циклічного навантаження висока.

Оцінивши закриття втомних тріщин, яке властиве насамперед низьким значенням ΔK , установили його істотний вплив на кінетику руйнування досліджуваної сталі у вихідному стані (рис. 2,а, криві 1,1'). Так, ефективний пороговий розмах $\Delta K_{th\text{ eff}} \sim 3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ проти номінального $\Delta K_{th} \sim 5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Попередня пластична деформація практично не відбивається на швидкості втомного росту тріщини за даного ефективного розмаху ΔK_{eff} . Звідси випливає, що відповідальне за позитивний вплив попередньої пластичної деформації на циклічну тріщиностійкість сталі саме закриття тріщини.

Наводнювання матеріалу у вихідному стані по суті не змінює швидкості припорогового втомного росту тріщин за високочастотного навантаження (рис. 2,а, крива 1'), якщо результати зобразити залежно від ефективного розмаху ΔK_{eff} . Тобто, наявність водню не позначається на здатності матеріалу попереду вершини тріщини протидіяти деформуванню та руйнуванню. А спостережений раніше деякий позитивний вплив наводнювання на швидкість росту тріщин, коли $\Delta K > \Delta K_{th}$ (рис. 2,а, криві 1,2), зумовлений зростанням закриття втомної тріщини. Треба мати на увазі, що наводнювання матеріалу може по-різному впливати на закриття тріщини залежно від того, в якому наводнювальному середовищі відбувається ріст тріщини. Так, в газоподібному водень переважно зменшує закриття через відсутність оксидів [5]. З іншого боку, в корозійному середовищі можливе і посилення закриття тріщини внаслідок збільшення шорсткості її берегів [6].

Наводнювання попередньо деформованого матеріалу несуттєво зсунуло припорогову ділянку діаграми $da/dN - \Delta K_{\text{eff}}$ в бік вищих швидкостей росту тріщини (рис. 2,б, криві 1',2'), тобто дещо полегшує руйнування. В результаті зазначена раніше відсутність такого впливу на ріст тріщин біля порогу ΔK_{th} спричинена деяким зростанням ефекту закриття тріщини. Таким чином, пластично деформований матеріал схильний до водневого окрихчення навіть в умовах високочастотного навантаження в припороговій ділянці діаграми, що нівелюється інтенсифікацією закриття тріщини, тобто ослабленням деформування матеріалу біля її вершини. За підвищених ΔK , коли з закриттям можна не рахуватися, водневе окрихчення виражене яскравіше. Крім того, тут чітко виявляється схильність наводненого матеріалу до водневого розтріскування.

Отже, попередня пластична деформація досліджуваної сталі трубопроводів незначно знижує її короткочасну тріщиностійкість за відсутності наводнювання і підвищує опір утомного росту тріщин за низької асиметрії циклічного навантаження. Через це не слід очікувати суттєвого негативного впливу можливих по-

одиноких перевантажень на тримкість та довговічність виробу на стадії росту тріщин. Інакше, якщо брати до уваги можливе наводнювання матеріалу в робочому середовищі, воно здатне істотно підвищити швидкість росту втомної тріщини. Проте найбільшого зменшення конструктивної міцності наводненого матеріалу можна сподіватися в місцях концентрації напружень, раніше пластично деформованих. Тут значний градієнт напружень пришвидшує дифузійно водню в зону передруйнування, де досягається така його концентрація, котра набагато перевищує середній вміст. Попередня пластична деформація робить матеріал сильно чутливим до водневого розтріскування, що особливо небезпечно в умовах довготривалого статичного навантаження. З урахуванням цього чинника стійкість трубопроводів, якщо припустити в них тріщиноподібні дефекти, може зменшитись у декілька разів, а довговічність на стадії стабільного підростання втомної тріщини – на порядки.

Література

1. Крижанівський Є.І., Побережний Л.Я. Низькочастотна корозійна втома сталі морських трубопроводів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец. випуск № 3. Проблеми корозії і протикорозійного захисту матеріалів. – 2002. – Т.2. – С. 794-797.
2. Технічний та екологічний ризики при експлуатації магістральних нафтопроводів / Я.М.Семчук, Г.М.Кривенко, Л.Т.Гораль, Р.М.Говдяк // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2001. – №1. – С. 68-70.
3. РД-50-260-81. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 56 с.
4. Yamera S. Ya. Test method for determination of crack growth rate and crack extension resistance under cyclic loading. – Lviv: Karpenko Physico-Mechanical Institute, 1994.–79 p.
5. Suresh S., Zamiski G.F., Ritchie R.O. Oxide-induced crack closure: an explanation for near threshold corrosion fatigue crack growth behavior // Metal.Trans. – 1981. – 12A. – №8. – P.1435-1443.
6. Ritchie R.O., Suresh S. Some considerations on fatigue crack closure at near-threshold stress intensities due to fracture surface morphology // bid. – 1982. – 13A. – №5. – P. 937-940.