

УДК 620.193:620.17

КОРОЗИЙНО-ВТОМНИЙ РІСТ ТРІЩИНИ В ЕКСПЛУАТОВАНИХ НАСОСНИХ ШТАНГАХ ЗІ СТАЛІ 20Н2М

Н. В. КРЕТ¹, Л. М. СВІРСЬКА¹, Т. П. ВЕНГРИНЮК²

¹ *Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;*

² *Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

Проаналізовано вплив модельної пластової води пониженої кислотності на циклічну тріщиностійкість сталі 20Н2М насосної штанги, експлуатованої 5,5 роки. Умовно стан металу головки штанги прийнято за вихідний і виявлено незначні відмінності базових механічних властивостей та циклічної тріщиностійкості у повітрі сталі у різних станах, однак, корозивне середовище підвищує швидкість росту втомної тріщини в експлуатованій сталі суттєвіше, ніж у вихідний. Це вказує на те, що експлуатаційна деградація сталі штанги проявляється у першу чергу в чутливості до корозивного середовища.

Ключові слова: *насосна штанга, пластова вода, швидкість росту втомної тріщини, експлуатаційна деградація.*

Вступ. Насосні штанги – особливо відповідальні конструкційні елементи у нафтовидобуванні, оскільки їх руйнування (обрив) спричиняє важкі наслідки. Вони експлуатуються у режимі багатоциклового навантаження за дії корозивно-агресивної пластової води, тому показники корозійно-втомної міцності є визначальними для забезпечення їх цілісності [1, 2]. Руйнування штанг зумовлено зародженням у часі експлуатації поверхневих втомних тріщин, на що вказує експертиза їх стану після вичерпання планового ресурсу [3–5]. Тому важливим показником роботоздатності штанг є опір росту корозійно-втомної тріщини. З іншого боку, під час тривалої експлуатації, зокрема і під циклічним навантаженням, погіршуються механічні властивості конструкційних сталей [6–11], [12, 13]. Через те необхідно враховувати можливу експлуатаційну деградацію механічних та корозійно-механічних властивостей і сталей насосних штанг.

Нижче виконано порівняльні дослідження кінетики втомного та корозійно-втомного росту тріщини в сталі з різних ділянок насосних штанг, експлуатованих за відмінних силових умов, що передбачає різну ступінь деградації металу.

Об'єкт та методи випроб. Досліджували насосні штанги діаметром основної частини 19 mm зі термічно зміцненої сталі 20Н2М після ~5,5 років експлуатації (біля $2 \cdot 10^7$ cycles), що відповідає режиму багатоциклового навантаження. Вважали, що метал деградує лише на найбільш навантаженій робочій частині штанги, тому стан зразків, вирізаних з головки, де напруження вдвічі менші, приймали умовно за вихідний (далі – вихідний та експлуатований стани). Зазначимо, що такий вибір мав перевагу, оскільки вирізали зразки з однієї штанги, але з різних її частин (головки і робочої ділянки тіла), тобто зі сталі у різних станах, що, можливо, зменшувало розкид експериментальних результатів. Вихідний та експлуатований стани сталі порівнювали за базовими механічними характеристиками, циклічною та корозійно-циклічною тріщиностійкістю.

Характеристики міцності (границі плинності $\sigma_{0,2}$ і міцності σ_B) та пластичності (відносні видовження δ і звуження ψ) визначали за розтягу циліндричних

Контактна особа: Н. В. КРЕТ, e-mail: kyryliv@ipm.lviv.ua

зразків діаметром робочої частини 5 mm та завдовжки 25 mm, ударну в'язкість – методом Шарпі (*KCV*). Корозивним середовищем слугував модельний розчин пластової води поміркованої мінералізації такого складу (mg/l): 34400 іонів Cl^- , 22200 Na^+ , 24 Mg^{+2} , 112 Ca^{+2} та 92 SO_4^{-2} , який продували CO_2 , знижуючи кислотність до pH 4,3.

Циклічну тріщиностійкість визначали на балкових зразках розмірами $8 \times 18 \times 140$ mm з боковим концентратором, які навантажували консольним згиним з частотою 5 Hz у повітрі і 1 Hz у корозивному середовищі за асиметрії циклу $R = 0,1$. Бокові поверхні зразків полірували алмазними пастами різної зернистості. Довжину тріщини a періодично, після певної кількості циклів навантаження N , заміряли з похибкою до 0,01 mm на бічних поверхнях зразків, застосовуючи оптичний мікроскоп зі системою контролю мікропереміщення. За результатами замірів будували кінетичні діаграми руйнування в координатах швидкість втомного росту тріщини da/dN – розмах коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) ΔK , за якими визначали пороговий розмах КІН ΔK_{th} у повітрі. Для металографічних досліджень використали оптичний мікроскоп Neofot-21.

Результати та їх аналіз. Сталі в обох станах властива типова для нормалізованих низьковуглецевих сталей такого класу структура з чітко окресленими межами зерен з поліедричною морфологією (рис. 1). Зауважимо, що середній розмір зерна фериту у вихідному стані (метал головки штанги) був дещо більший, ніж у експлуатованому (85 та 65 μm відповідно), що могло бути наслідком рекристалізації деформованого металу. Очевидно, на це вплинуло високотемпературне висаджування головки. Сталі робочої частини штанги властивий менший розмір зерна, що слід розглядати як позитивний чинник, особливо з огляду на її втомну міцність [14].

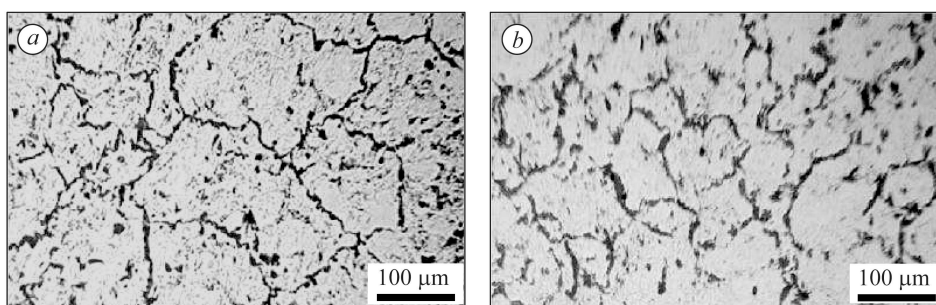


Рис. 1. Мікроструктура сталі 20H2M у вихідному (а) та експлуатованому (b) станах.

Fig. 1. Microstructure of the 20H2M steel in as-received (a) and operated (b) states.

Виявили також, що схильність до травлення меж зерен експлуатованого металу суттєво вища, ніж вихідного, що є ознакою більшої густини дефектів уздовж меж зерен. Крім того, у структурі експлуатованої сталі зафіксували велику кількість пор, а подекуди – навіть їх ланцюжки вздовж меж зерен, які вважали ознакою її деградації (пошкодженості). Таким чином, сталь робочої частини штанги мала перевагу проти сталі головки, оскільки позбавлена рекристалізаційного росту зерен, однак, в часі тривалої експлуатації зазнала міжзеренного пошкодження.

Встановили (див. таблицю), що внаслідок експлуатації штанг за незмінної границі міцності суттєво підвищилася границя плинності сталі та дещо знизилася характеристики пластичності та ударної в'язкості. Значне зростання $\sigma_{0,2}$ (від 805 до 940 МПа) можна пояснити не тільки циклічним деформаційним зміцненням металу впродовж експлуатації, але й зерномежовою пошкодженістю, яка утруднює безперервність процесів ковзання за переходу від зерна до зерна.

Механічні властивості сталі 20Н2М

Стан	σ_B	$\sigma_{0,2}$	ψ	δ	KCV, J/cm ²
	МПа		%		
Вихідний	1005	805	55	16	67
Експлуатований	1010	940	54	14	62

Співвідношення характеристик міцності $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ найчастіше використовують для оцінювання запасу пластичності сталей, тобто як показник її здатності пластично деформуватися до утворення шийки [15]. У вихідному стані

такий запас, як правило, вищий, а після експлуатації зменшується, що і підтверджено випробами деградованої частини штанги (див. таблицю). Отже, є підстави вважати, що виявлені відмінності у властивостях сталі різних станів зумовлені саме експлуатаційною деградацією, при цьому дещо більший розмір зерен у вихідному стані мав би сприяти окрихчуванню металу.

Вплив експлуатації на циклічну тріщиностійкість сталі у повітрі спостерігали тільки на припороговій ділянці кінетичної діаграми втомного руйнування (рис. 2), що спричинило деяке зниження порога ΔK_{th} від 7,3 до 6,2 МПа·м^{1/2}. Водночас середня ділянка Періса виявилася практично нечутливою до деградації.

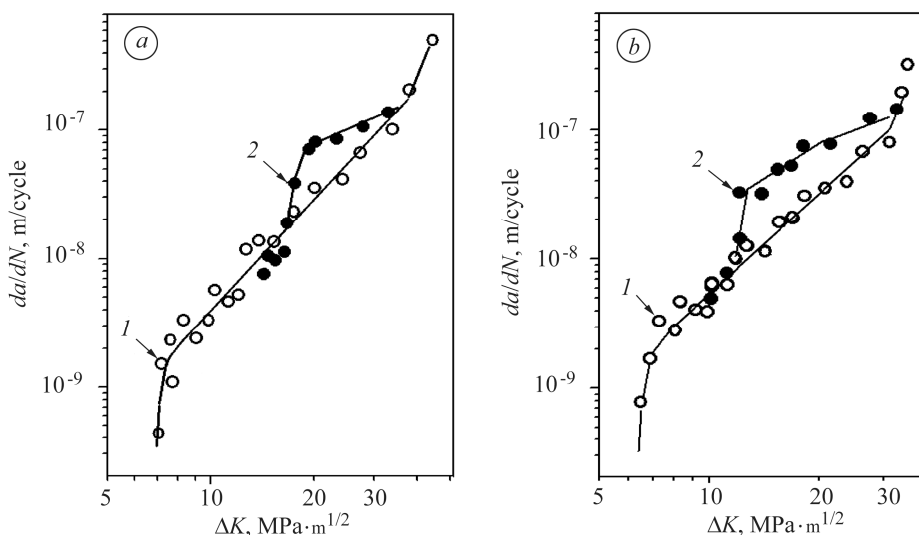


Рис. 2. Кінетичні діаграми втомного росту тріщини в сталі 20Н2М у вихідному (а) та експлуатованому (б) станах у повітрі (1) і в корозивному середовищі (2).

Fig. 2. Kinetic diagrams of fatigue crack growth in the 20H2M steel in as received (a) and operated (b) states in air (1) and corrosion environment (2).

Низькочастотні випробування у корозивному середовищі виконали лише для середньоамплітудної ділянки кінетичної діаграми, оскільки загалом водне середовище підвищує опір росту тріщини в таких сталях за низьких, особливо припорогових, значень ΔK , сповільнюючи її ріст та підвищуючи поріг втоми через прояв чинників її корозійного затуплення та посилення ефекту закриття [16]. Виявили, що сталь в обох станах чутлива до дії корозивного середовища (вважали, що швидкість росту втомної тріщини у повітрі нечутлива до частоти циклічного навантаження у діапазоні 1...5 Hz), яке пришвидшує ріст тріщини дещо інтенсивніше в експлуатованій сталі і, що важливо, за нижчих значень ΔK .

Такий вплив корозивного середовища на втомний ріст тріщини пов'язують з інтенсифікацією руйнування сталі за механізмом корозійного розтріскування, що свідчить про важливу роль статичного навантаження. Однак не слід повністю ігнорувати роль циклічного навантаження у пришвидшенні росту тріщини за меха-

нізмом корозійно-статичного руйнування, яке, з одного боку, загострює вершину тріщини, підвищуючи концентрацію напружень, а з іншого – пошкоджує в кожному циклі навантаження (за високого значення ΔK) захисні плівки, посилюючи агресивність середовища.

Використаному модельному розчину пластової води з пониженим рН властиві наводнювальні властивості, особливо у вершині тріщини. Тому можна очікувати, що пришвидшення її втомного росту за механізмом корозійного розтріскування супроводжуватиметься водневим окрихченням, яке реалізується для дослідженої сталі через міжзеренне руйнування. Цьому сприятиме, очевидно, експлуатаційна міжзеренна пошкодженість сталі, притаманна саме тілу штанги.

Порівнюючи механічні і корозійно-механічні властивості різних ділянок штанги, вважали, що метал головки через удвічі менші експлуатаційні напруження розтягом не деградував. Якщо ж припустити, що під час експлуатації погіршується і стан металу і головки, то можна дійти висновку про інтенсивнішу деградацію тіла штанги.

ВИСНОВКИ

Виявлено деякі відмінності у мікроструктурі сталі 20H2M робочої частини та головки насосної штанги (середній розмір зерна відповідно 65 і 85 μm), а також у мікропошкодженості вздовж меж зерен сталі робочої частини штанги. Це дало підстави умовно вважати стан металу головки за вихідний і порівнювати його зі станом експлуатаційно деградованої сталі робочої частини штанги. Випроби зразків на розтяг та ударну в'язкість засвідчили лише тенденцію до зниження характеристик пластичності та опору крихкому руйнуванню сталі в результаті експлуатації. Водночас модельне середовище пластової води з рН 4,3 суттєво пришвидшило втомний ріст тріщини в експлуатованій сталі за значень ΔK , які відповідають середній ділянці кінетичної діаграми втомного руйнування. Це характеризує схильність сталі до корозійного розтріскування в умовах циклічного навантаження і вказує на вищу чутливість показників корозійно-втомного росту тріщини до експлуатаційної деградації металу, ніж показників пластичності та опору крихкому руйнуванню.

РЕЗЮМЕ. Проанализировано влияние модельной пластовой воды пониженной кислотности на циклическую трещиностойкость стали 20H2M насосной штанги, эксплуатируемой 5,5 лет. Состояние металла головки штанги условно принято за исходное и выявлены незначительные различия базовых механических свойств и циклической трещиностойкости на воздухе стали в различных состояниях. Однако в коррозионной среде скорость роста усталостной трещины в эксплуатируемой стали существенно выше, чем в исходной. Это указывает на то, что эксплуатационная деградация стали штанги проявляется в первую очередь в чувствительности к коррозионной среде.

Ключевые слова: *насосная штанга, пластовая вода, скорость роста усталостной трещины, эксплуатационная деградация.*

SUMMARY. The influence of model acid reservoir water on the cyclic fracture toughness of 20H2M steel of the sucker rod being operated for 5.5 years was analyzed. The metal state of the sucker rod head was considered as the initial one, and slight differences in the basic mechanical properties and cyclic fracture toughness in air for steel in different states were showed, however, acceleration of fatigue crack growth rate under corrosion environment action in the operated steel was significantly higher than that in the steel in the initial state. This indicates that operational degradation of the rod steel is manifested primarily in the sensitivity to the action of corrosion environment.

Keywords: *sucker rod, reservoir water, fatigue crack growth rate, operational degradation.*

1. *Tension-tension fatigue of hybrid composite rods / N. Kar, Y. Hu, E. Barjasteh, and S. Nutt // Composites P. B. Eng. – 2012. – 43, № 5. – P. 2115–2124.*

2. *Копей Б. В., Стефанишин А. Б., Венгриянок Т. П.* Втомна міцність гібридних насосних штанг // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 5. – С. 117–120.
(*Kopei B. V., Stefanyshyn A. B., Venhrynyuk T. P.* Fatigue strength of hybrid pump rods // Materials Science. – 2019. – **54**, № 5. – P. 739–742.)
3. *Копей Б. В., Копей В. Б., Копей І. Б.* Насосні штанги свердловинних установок для видобування нафти. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 406 с.
4. *Failure analysis of a sucker rod fracture in an oilfield / H. Ding, A.B. Zhang, D. T. Qi, H. B. Li, P. L. Ge, G. Q. Qi, N. Ding, Z. Q. Bai, and L. Fan // Eng. Failure Analysis. – 2020. – 109, Article No. 104300. – 8 p.*
5. *Підвищення втомної міцності насосних штанг обробкою спеціальним середовищем / Б. В. Копей, О. І. Звірко, Т. П. Венгриянок, З. В. Слободян, І. П. Штойко // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2020. – 56, № 1. – С. 118–123.*
6. *Мешков Ю. Я., Шиян А. В., Звірко О. І.* Оцінювання експлуатаційної деградації сталей газопроводів за критерієм механічної стабільності // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – **50**, № 6. – С. 55–59.
(*Meshkov, Yu. Ya., Shuyan, A. V., Zvirko, O. I.* Evaluation of the in-service degradation of steels of gas pipelines according to the criterion of mechanical stability // Materials Science. – 2015. – **50**, № 6. – P. 830–835.)
7. *Effect of long term operation on degradation of material of main gas pipelines / P. Maruschak, R. Bishchak, I. Konovalenko, A. Menou, J. Brezinová // Mater. Sci. Forum. – 2014. – 782. – P. 279–283.*
8. *Харченко Є. В., Поліщук Л. К., Звірко О. І.* Оцінювання експлуатаційної деградації профільної сталі стріли буртоукладника // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – **49**, № 4. – С. 77–82.
(*Kharchenko E. V., Polishchuk L. K., Zvirko O. I.* Estimation of the in-service degradation of steel shapes for the boom of a clamp-forming machine // Materials Science. – 2014. – **49**, № 4. – P. 501–507.)
9. *Prediction of the residual lifetime of gas pipelines considering the effect of soil corrosion and material degradation / I. Shtoyko, J. Toribio, V. Kharin, and M. Hredil // Proc. Struct. Integrity. – 2019. – 16. – P. 148–152.*
10. *Krechkovs'ka H. V., Tsyurul'nyk O. T., Student O. Z.* In-service degradation of mechanical characteristics of pipe steels in gas mains // Strength of Mat. – 2019. – **51**, № 3. – P. 406–417.
11. *Никифорчин Г. М., Студент О. З.* Вплив водню на формування порогів втоми конструкційних сталей // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – **37**, № 2. – С. 97–106.
(*Nykyforchyn H. M., Student O. Z.* Influence of hydrogen of the formation of fatigue thresholds in structural steels // Materials Science. – 2001. – **37**, № 2. – С. 252–263.)
12. *Поліщук Л. К., Харченко Г. В., Звірко О. І.* Корозійно-циклічна тріщиностійкість сталі стріли буртоукладника // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – **51**, № 2. – С. 77–82.
(*Polishchuk L. K., Kharchenko H. V., Zvirko O. I.* Corrosion-fatigue crack-growth resistance of steel of the boom of a clamp-forming machine // Materials Science. – Vol. **51**, № 2. – P. 229–234.)
13. *Немчук О. О.* Особливості діагностування технічного стану сталей портового перевантажувального обладнання // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 6. – С. 116–118.
(*Nemchuk O. O.* Specific features of the diagnostics of technical state of steels of the port reloading equipment // Materials Science. – 2018. – **53**, № 6. – P. 875–878.)
14. *Kage M., Miller K. J., Smith R. A.* Fatigue crack initiation and propagation in a low-carbon steel of two different grain sizes // Fatigue and Fract. of Eng. Mat. and Struct. – 1992. – **15**, № 8. – P. 763–774.
15. *Метод лабораторної деградації конструкційних сталей / О. Т. Цирульник, Н. В. Крет, В. А. Волошин, О. І. Звірко // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – 53, № 5. – С. 85–93.*
(*A procedure of laboratory degradation of structural steels / O. T. Tsyurulnyk, N. V. Kret, V. A. Voloshyn, O. I. Zvirko // Materials Science. – 2018. – 53, № 5. – P. 674–683.*)
16. *Назарчук З. Т., Никифорчин Г. М.* Структурна та корозійна механіка руйнування як складові фізико-хімічної механіки матеріалів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 1. – С. 17–30.
(*Nazarchuk Z. T. and Nykyforchyn H. M.* Structural and corrosion fracture mechanics as components of the physicochemical mechanics of materials // Materials Science. – 2018. – **54**, № 1. – P. 7–21.)

Одержано 27.01.2020