

УДК 622.276.53

## КОРОЗІЙНО-ВТОМНА ВИТРИВАЛІСТЬ НАСОСНИХ ШТАНГ ІЗ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИМИ ПОКРИТТЯМИ

Г. В. КРЕЧКОВСЬКА<sup>1,2</sup>, Я. Т. ФЕДОРОВИЧ<sup>3</sup>, Б. В. КОПЕЙ<sup>3</sup>,  
І. Б. КОПЕЙ<sup>3</sup>, Т. П. ВЕНГРИНЮК<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>2</sup> Національний університет "Львівська політехніка";

<sup>3</sup> Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Подано результати випробувань на втому зразків із натурних насосних штанг зі сталі 15Х2ГМФ у різних агресивних середовищах і порівняно зі зразками, виготовленими зі сталей 20Н2М, 15Х2НМФ та 15Н3МА. Показано, що границя обмеженої витривалості випробуваних штанг зі сталі 15Х2ГМФ у пластовій воді на 22 та 12% нижча, ніж у сталей 20Н2М та 15Х2НМФ, відповідно, а в середовищі, що імітує дію H<sub>2</sub>S, нижча на 36 та 35%. Розроблено та апробовано метод комплексного поверхневого зміцнення насосних штанг, в якому поєднано дробоструменеву обробку та нанесення металополімерних покриттів. Показано високу ефективність останніх.

**Ключові слова:** насосна штанга, напруження, корозивне середовище, втома, металополімерні покриття.

The results of fatigue tests of samples from full-scale sucker rods made of 15Kh2HMF steel in various corrosive environments are presented and compared with specimens made of 20N2M, 15Kh2NMF and 15N3MA steels. It is shown that limited endurance limit of the tested rods of 15Kh2HMF steel in formation water is by 22 and 12% lower than that of 20N2M and 15Kh2NMF steels, respectively, and in an environment simulating the action of H<sub>2</sub>S, it is lower by 36 and 35%. The method of complex surface strengthening sucker rods has been developed and tested, which combines shot blasting and application of metal-polymer coatings. High efficiency of the latter is shown.

**Keywords:** sucker rod, stress, corrosive medium, fatigue, metallopolymer coatings.

**Вступ.** Насосні штанги працюють за впливу змінних навантажень та корозивних середовищ, що визначає їхню корозійну тривкість [1–6]. Тому важливо проаналізувати їх поведінку у пластових водах різних нафтових родовищ. Досліджувати необхідно як у лабораторних, так і в промислових умовах. Попри певні обмеження лабораторних досліджень за їх результатами все ж можна судити про властивості різних сталей штанг за випробувань у агресивних середовищах. Промислові дослідження дають можливість отримати показники роботоздатності насосних штанг завдяки їх експлуатації у свердловинах з різними середовищами.

Випробування в середовищах впливає на зародження та поширення втомних тріщин [7–12]. Проте дані про поведінку сталей 15Х2ГМФ, 20Н2М, 15Х2НМФ та 15Н3МА у різних середовищах практично відсутні. Також важливо проаналізувати можливість підвищення втомних показників роботоздатності цих сталей після нанесення покриттів [13], зокрема металополімерних.

**Матеріали та методи досліджень.** Виконано втомні випробування зразків із насосних штанг зі сталей 15Х2ГМФ (wt%: 0,16 С; 0,27 Si; 0,65 Mn; 2,06 Cr; 0,99 Ni; 0,015 S; 0,013 P; 0,24 Mo; 0,11 V; 0,15 Cu), 20Н2М, 15Х2НМФ та 15Н3МА у різ-

них корозивних середовищах. Для визначення границі обмеженої витривалості металу дослідили зразки із нових насосних штанг  $\varnothing$  19 mm без поверхневої обробки. Довжина зразків 420 mm. На одному з кінців зразка зроблено виточку завдовжки 20 mm та діаметром 16 mm, щоб закріплювати в підшипник для випробувань. Навантажували консольним згином з обертанням [14] за частоти 15,8 Hz. Випробовували у дистильованій воді, 3%-му водному розчині NaCl, пластовій воді зі свердловин НГДУ “Долинанафтогаз” (мінералізація – 106596 mg/l, pH 7,08: аніони (mg/l) – 63968 Cl<sup>-</sup>, 207 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 293 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, решта CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>; катіони (mg/l) – 37512 (K<sup>2+</sup> + Na<sup>+</sup>), 4008 Ca<sup>2+</sup>, 608 Mg<sup>2+</sup>, 50 Fe<sub>Σ</sub>) та сірководеньвмісному середовищі (3%-ий розчин NaCl, насичений H<sub>2</sub>S до граничної концентрації 2500...3000 mg/l), розчин змінювали в камері раз на добу.

Розроблено метод комплексного поверхневого зміцнення насосних штанг, який полягає в дробоструменевій обробці тіла штанги з подальшим нанесенням анодного металізаційного та захисного протикорозійного покриття. Мета цієї обробки – нейтралізація дії концентратів напружень (мікротріщин, виразок, мікронадрізів), зміцнення поверхні тіла штанг, створення залишкових напружень стиску та підготовка її для подальшого нанесення цинкового покриття. Ефективність забезпечили оптимальними параметрами режиму. Важливими є склад і розмір дробу, тривалість обробки і тиск у системі, діаметр і форма сопла, відстань сопла до оброблюваної поверхні штанги. Найпридатнішим для дробоструменевій обробки поверхні штанг виявився дріб середніх фракцій з розміром 1,5...2,5 mm (40...50%) з колотого чавуну або кулястий (50...60%). Після поверхневого зміцнення насосних штанг на їх поверхню наносили багатофункціональні покриття. Металофторопластове покриття, отримане методом електростатичного осадження на шар цинку полімерного фторопластового порошку, оплавлюється за контакту з нагрітою штангою і полімеризується впродовж 1,5...2 h за температури 250...290°C. Нанесення цинку методом металізації здійснювали за допомогою електрометалізатора ЕМ-10, використовуючи зварювальний перетворювач з вихідними параметрами  $U = 40$  V,  $I = 120...300$  A,  $P = 30$  kW, і поліаміду ПП-12 на нагріту штангу з полімеризацією. Цинкове і епоксидне покриття типу ПЕП-534 наносили аналогічно.

**Результати випроб.** Дослідили насосні штанги  $\varnothing$  19 mm зі сталі 15Х2ГМФ на корозійну втому (рис. 1). Виявили, що за навантаження циклічним згином довговічність зразків з нових насосних штанг зменшується. За бази випробувань  $N = 2 \cdot 10^7$  cycles границя обмеженої витривалості сталі у дистильованій воді становила  $\sigma_{-1c} = 72$  МПа, у 3%-му водному розчині NaCl – 55 МПа, у пластовій воді – 53 МПа (рис. 1) і 30 МПа в змодельованому сірководневому середовищі. Найбільше зниження виявили у сірководеньвмісному середовищі через його схильність до дисоціації, внаслідок чого сталі інтенсивно наводнювалися, що і є основною причиною зниження їх витривалості за багатоциклової втоми.

Аналогічні випробування на корозійну втому виконали на зразках із насосних штанг зі сталей 20Н2М, 15Х2НМФ та 15Н3МА. Досліджували у пластовій воді та середовищі, насиченому H<sub>2</sub>S. Встановили, що за випробування в пластовій воді сталь 15Н3МА має найвищу (220 МПа) границю обмеженої витривалості (рис. 2). Зі зменшенням вмісту нікелю у сталях їх втомна міцність знижувалася і становила для 20Н2М – 68, 15Х2НМФ – 60, 15Х2ГМФ – 53 МПа. Втомна міцність аналізованих сталей стала ще нижчою за випробувань у середовищі H<sub>2</sub>S. Дослідження на корозійну втому зразків із насосних штанг зі сталі 15Х2ГМФ показали, що їх границя обмеженої витривалості у пластовій воді на 22 та 12% нижча, ніж у сталей 20Н2М та 15Х2НМФ, відповідно, а в середовищі, насиченому H<sub>2</sub>S, менша на 36 та 35%. Штанги зі сталі 15Х2ГМФ не рекомендовано експлуатувати без зміцнення (поверхневим пластичним деформуванням) та відпо-

відного захисту (покриттям протикорозійними лаками, емалями, застосуванням інгібіторів корозії) у середовищах, насичених сірководнем.

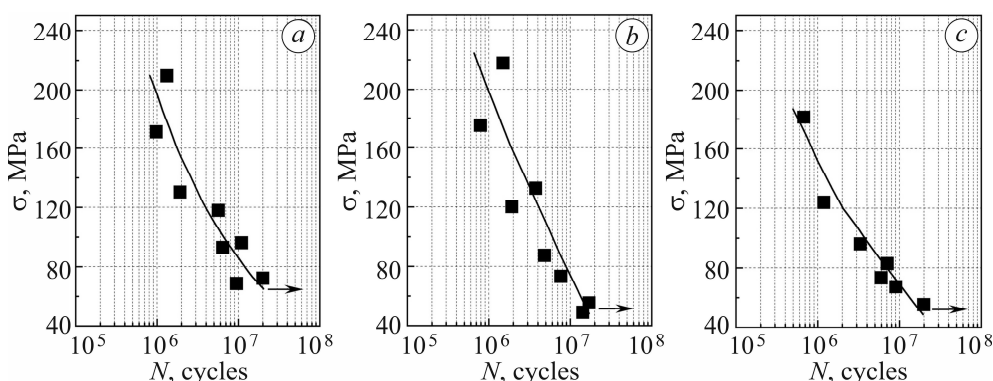


Рис. 1. Криві корозійної втоми зразків із насосних штанг  $\varnothing 19$  mm зі сталі 15X2ГМФ за випробувань у дистильованій воді (а), 3%-му водному розчині NaCl (b) та пластовій воді (с).

Fig. 1. Corrosion fatigue curves of sucker rod samples with a diameter of 19 mm made of 15Kh2HMF steel when tested in distilled water (a), in 3% aqueous NaCl solution (b) and in formation water (c).

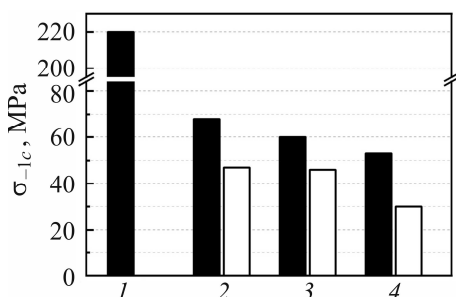


Рис. 2. Умовна границя корозійної втоми  $\sigma_{-1c}$  зразків з неексплуатованих насосних штанг зі сталей 15N3MA (1), 20N2M (2), 15X2HMF (3) та 15X2ГМФ (4) у корозивних середовищах (■ – пластова вода, □ – 3%-ий водний розчин NaCl, насичений H<sub>2</sub>S).

Fig. 2. Conventional fatigue strength  $\sigma_{-1c}$  during alternating bending of initial sucker rods samples of 15N3MA (1), 20N2M (2), 15Kh2HMF (3) and 15Kh2HMF (4) steels in corrosive environments (■ – formation water, □ – 3% NaCl aqueous solution saturated with H<sub>2</sub>S).

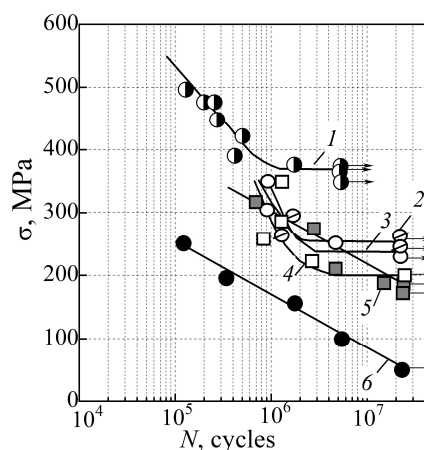
Оскільки середовища, в яких розчинені гази CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S і хлориди, сприяють пошкодженню штанг, то необхідно використовувати покриття для їх захисту. Для цього розроблено метод комплексного поверхневого зміцнення, який полягає в дробоструменевій обробці тіла штанги з подальшим нанесенням анодного металізаційного та захисного протикорозійного покриття. Механізм поверхневого зміцнення полягає у створенні міцного та хімічно стійкого поверхневого шару, а також залишкових напружень стиску у ньому. Після поверхневого зміцнення насосних штанг на їх поверхню наносили багатофункціональні покриття. Металізаційний анодний шар бере на себе функції захисту основного металу, зменшуючи його наводнювання та гальмуючи корозійно-втомне руйнування [14]. Якщо обробка дробом чи металевими обертовими щітками підвищує опір втоми насосних штанг зі сталі 20N2M в 3–4 рази [15], то вже сукупність поверхневого пластичного деформування та металізації цинком, збільшує обмежену границю витривалості в 4–5 разів. Проте, згідно з промисловими та лабораторними спостереженнями, металізоване покриття за впливу корозивного середовища поступово розчиняється, утворюючи продукти окиснення цинку у вигляді білих пластівце-

подібних плям. В окремих місцях покриття відшаровується і поверхня штанги є без анодного захисту. Для поліпшення властивостей штанг необхідно нанести покриття, яке запобігало би розчиненню металу в агресивних середовищах та зменшувало б їх зношування внаслідок тертя з внутрішньою поверхнею насосно-компресорних труб, і водночас знижувало би ймовірність відкладання на штангах парафіну, смол, солей. Такими багатофункціональними властивостями володіють полімерні і лакофарбові покриття.

Проаналізували ефективність металополімерних покриттів на зразках діаметром 5 mm, вирізаних з насосних штанг зі сталі 20Н2М в стані нормалізації. Оброблення дробом, нанесення цинку і поліаміду ПП-12 підвищує границю витривалості від 50 до 250 МПа за бази випробувань  $5 \cdot 10^7$  cycles, цинкове і епоксидне покриття типу ПЕП-534 менш ефективне – умовна границя витривалості зросла до 230 МПа (рис. 3). Незважаючи на те, що границя витривалості зразків у повітрі становить 375 МПа, цього показника не вдалося досягти на зразках із металополімерними покриттями.

Рис. 3. Криві втоми (1) та корозійної втоми (2–6) сталі 20Н2М: 1, 6 – без поверхневого зміцнення; 2–4 – з металополімерними покриттями із поліаміду ПП-12 (2), епоксидної смоли ПЕП-534 (3), фторопласту Ф-2М (4) та металізаційним цинковим (5) покриттям у середовищі 3% NaCl, насиченому  $H_2S$ .

Fig. 3. Fatigue (1) and corrosion fatigue (2–6) curves of 20N2M steel: 1, 6 – non-reinforced; 2–4 – metal-polymer coatings made of polyamide PP-12 (2), epoxy PEP-534 (3), fluoroplastic F-2M (4) and metallized zinc (5) tested in 3% NaCl aqueous solution saturated with  $H_2S$ .



Лабораторні випробовування підтвердили також високу ефективність металофторопластового покриття для насосних штанг зі сталі 20Н2М. Встановили, що їх обмежена границя витривалості підвищується від 50 до 200 МПа за бази випробувань  $5 \cdot 10^7$  cycles. Це трохи менше, ніж границі витривалості зразків із металополімерними (поліамідним і епоксидним) покриттями, проте вище, ніж з металізаційним цинковим покриттям ( $\sigma_{-1c} = 180$  МПа).

### ВИСНОВКИ

Умовна границя обмеженої витривалості сталі 15Н2ГМФ у пластовій воді та імітаційному середовищі, яким моделювали вплив  $H_2S$ , відповідно на 22 та 36% нижча, порівняно зі сталлю 20Н2М, та на 12 та 35% менша, ніж у сталі 15Х2НМФ. Залишкові напруження стиску, сформовані за комплексного поверхневого зміцнення, нівелюються під час експлуатації за сумісного впливу корозивного середовища і тривалих циклічних навантажень. Ефективність металополімерних покриттів на зразках  $\varnothing 5$  mm, вирізаних з насосних штанг зі сталі 20Н2М у стані нормалізації, досить висока. Обдув дробом, нанесення цинку і поліаміду ПП-12 підвищує границю витривалості від 50 до 250 МПа за бази випробувань  $5 \cdot 10^7$  cycles, цинкове і епоксидне покриття типу ПЕП-534 менш ефективне – умовна границя витривалості зросла до 230 МПа. Гірші показники має цинкофторопластове покриття – 200 МПа, але воно краще, ніж металізаційне цинкове.

1. *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 number 104300. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104300
2. *Вплив позацентрового розтягу на корозійно-втомну витривалість насосних штанг* / Г. В. Кречковська, Я. Т. Федорович, Б. В. Копей, В. В. Михайлюк // *Фіз-хім. механіка матеріалів*. – 2024. – **60**, № 4. – С. 121–128.
3. *A comprehensive review of sucker rod pumps' components, diagnostics, mathematical models, and common failures and mitigations* / S. Fakher, A. Khlaifat, M. Enamul Hossain, H. Nameer // *J. of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2021. – **11**, № 10. – P. 1–25. DOI: 10.1007/s13202-021-01270-7
4. *Research on fatigue damage of sucker rod based on damage mechanics* / Rui Fen Zhou, Ming Xi Feng, Min Zheng Jiang, and Kang Xing Dong // *Appl. Mech. and Mater.* – 2014. – **633–634**. – P. 1117–1123. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.1117
5. *Karpuz-Pickell P., Roderick R., and Don-Nan*. From failure to success: a metallurgical story on sucker rod pump barrels // *Eng., Mater. Sci.* – 2015. – Article number 189860124.
6. *Status and prospect of remanufacturing technology for tubing and sucker rods* / He Liu, Tao Li, Wei-ye Han, Qiang Chen, Shouzhi Huang, Eryang Ming, and Qiang Sun // *Eng. Management Reports*. – 2016. – **3**, № 3. – P. 258–263. DOI: 10.15302/J-FEM-2016031
7. *Low-frequency corrosion fatigue test study of sucker rods under high-salinity well fluids in deep CBM wells* / F. Zhang, C. Jing, J. Li, B. Wang, M. Ma, T. Yi, and H. Hu // *Processes*. – 2024. – **12**, № 1. – Article number 267435469. DOI: 10.3390/pr12010060
8. *Analysis of corrosion fatigue steel strength of pump rods for oil wells* / Y. Vynnykov, H. Muhlis, M. Kharchenko, A. Aniskin, S. Manhura, and A. Manhura // *Mining of Mineral Deposits*. – 2022. – **16**, № 3. – P. 31–37. DOI: 10.33271/mining16.03.031
9. *Kryzhanivs'kyi E. I., Hoisan I. M., and Student O. Z*. Specific features of the growth of fatigue cracks in 36G2S steel of drill pipes after the recovery heat treatment // *Materials Science*. – 2014. – **50**, № 1. – С. 92–97. DOI: 10.1007/s11003-014-9695-6
10. *Tension-tension fatigue of hybrid composite rods* / N. K. Kar, Y. Hu, E. Barjasteh, and S. R. Nutt // *Composites. Part B: Eng.* – 2012. – **43**, № 5. – P. 2115–2124. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.03.006
11. *Research on fatigue life calculation of sucker rod* / Y. Lin, D. Zhang, F. Luo, and T. Shi // *Pet. Drill. Prod. Technol.* – 2005. – **27**. – P. 66–69.
12. *Influence factors on corrosion fatigue life of sucker rods used in coalbed methane well* / D. J. Li, W. Wang, B. Pang, W. Lin, W. Z. Li, L. Ji, and Y. R. Feng // *Trans. Mater. Heat Treat.* – 2017. – **38**. – P. 121–127.
13. *Ryan R. A*. Controlling rod body corrosion failures with spray-metal plastic-coated sucker rods // *Permian Basin Oil and Gas Recovery Conf.* – 1988. – Article number SPE-17299-MS. DOI: 10.2118/17299-MS
14. *Нафтогазове обладнання: в 15 т. / За заг. ред. Б. В. Копея*. Т. 15: Оцінка ефективності та підвищення довговічності насосних штанг / Б. В. Копей, Я. Т. Федорович, В. В. Михайлюк. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2023. – 313 с.
15. *Specific features of corrosion-fatigue fracture of steel and hybrid pump rods* / B. V. Kopei, H. V. Krechkovska, I. B. Kopei, and B. M. Bakun // *Materials Science*. – 2023. – **58**, № 6. – P. 768–773. DOI: 10.1007/s11003-023-00728-9

Одержано 31.07.2024