

УДК 539.431:662.276

ПІДВИЩЕННЯ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ НАСОСНИХ ШТАНГ ОБРОБКОЮ СПЕЦІАЛЬНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

Б. В. КОПЕЙ¹, О. І. ЗВІРКО², Т. П. ВЕНГРИНЮК¹,
З. В. СЛОБОДЯН², І. П. ШТОЙКО²

¹ Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Проаналізовано причини експлуатаційної втрати цілісності сталених насосних штанг внаслідок втомного руйнування їх основної частини, зумовленого розвитком поверхневих тріщин. Для підвищення довговічності штанг запропоновано використовувати спеціальне рідке технологічне середовище, яке гальмує ріст втомних тріщин, штучно створюючи ефект їх закриття. Виконано напівнатурні експерименти тривало експлуатованих штанг зі сталей 35ХМ та 20Н2М на багатоциклову втому. Виявлено, з одного боку, суттєвий негативний вплив на втомну витривалість 3% розчину NaCl, а з іншого – значний позитивний ефект технологічного середовища, який проявився у підвищенні втомної міцності штанг не тільки в корозійному середовищі, але й у повітрі. Для практичної реалізації методу в польових умовах розроблено конструкцію камери, яка кріпиться на штанзі та охоплює її частину.

Ключові слова: насосні штанги, втомна міцність, штучний ефект закриття втомних тріщин, зупинка тріщин.

Вступ. Насосні штанги експлуатуються за складних умов: дії циклічних навантажень, корозійно-активного середовища, високих тисків, підвищених температур тощо. Пов'язані з цим часті їх обриви спричиняють значні витрати коштів та часу на ловильні роботи та спускально-підймальні операції. Тому важливо розробити методи підвищення їхнього ресурсу.

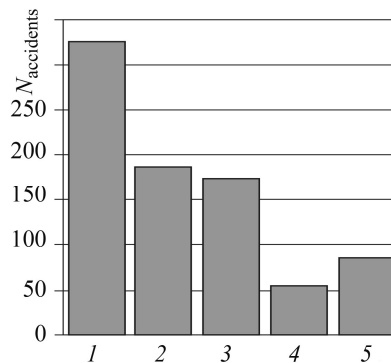
Причини обривів штанг аналізували за останні п'ять років на підприємствах нафтогазовидобувного управління "Долина нафтогаз" і поділили їх на п'ять категорій: по тілу, різьбі, штоку, муфті, а також відгвинчування штанг (рис. 1). Оскільки найчастіше аварії виникали через руйнування тіла штанг, особливо важливо підвищити його втомну міцність. Для цього існують різні підходи [1], один з яких може базуватися на гальмуванні росту втомних тріщин, які зароджуються на поверхні тіла штанг після тривалої експлуатації. Раніше розроблені такі способи, засновані на штучному створенні ефекту закриття тріщини як чинника зниження ефективного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) [2–4], який є рушійною силою її втомного росту [5, 6].

Недавно для штучного створення ефекту закриття тріщини в конструкційних сталях запропоновано використовувати спеціальне рідке технологічне середовище (ТС), яке, проникаючи в устя тріщини, спричиняє інтенсивне формування у ньому твердих продуктів взаємодії з металом, які й запобігають змиканню її берегів [7]. Особливістю розробленого способу є можливість гальмувати ріст втомної тріщини аж до повної зупинки, навіть за високих її швидкостей, які відповідають верхній частині кінетичної діаграми втомного руйнування [8, 9].

Контактна особа: Б. В. КОПЕЙ, e-mail: kopeyb@ukr.net

Рис. 1. Гістограма причин обривів насосних штанг: 1 – по тілу; 2 – по різьбі; 3 – по штоку; 4 – по муфті; 5 – відгвинчування штанг.

Fig. 1. Histogram of causes of pump rods rupture: 1 – a body; 2 – a thread; 3 – a polished rod; 4 – a coupling; 5 – rod unscrewing.



Це дослідження спрямоване на в'яснення ефективності запропонованого ТС для подовження ресурсу тривало експлуатованих насосних штанг.

Об'єкт досліджень та експериментальні методики. Використовували насосні штанги діаметром основної частини 19 mm із термічно зміцнених сталей 35ХМ та 20Н2М, які попередньо експлуатувалися у свердловині не менше п'яти з половиною років (біля 20 mln cycles) і отримали, ймовірно, експлуатаційні втомні пошкодження [10]. Механічні характеристики сталей (границі міцності σ_B та плинності $\sigma_{0,2}$, відносні звуження ψ та видовження δ , твердість) наведені у таблиці.

Визначали вплив ТС на циклічну тріщиностійкість сталі 35ХМ у діапазоні середніх швидкостей росту тріщин da/dN згідно з методичними рекомендаціями [11] та на багатоциклову втомну міцність штанг (напівнатурні випробування). Для вивчення кінетики втомного росту тріщин використовували балкові зразки $10 \times 16 \times 180$ mm, які навантажували консольним згином за асиметрії циклу навантаження $R = 0,5$ та частоти $f = 10$ Hz. Бокові поверхні зразків полірували алмазними пастами різної зернистості. Довжину тріщини a заміряли з похибкою до 0,01 mm на бічних поверхнях зразків, застосовуючи оптичний мікроскоп зі системою мікропереміщення. Далі будували кінетичні діаграми втомного росту тріщин в координатах da/dN –розмах КІН ΔK . Додатково під час випробувань у ТС визначали ефект закриття втомних тріщин [12], використовуючи метод податливості [8, 9], та ефективний КІН ΔK_{eff} . Для цього застосували спеціальний тензометр переміщень з голкоподібними ніжками, який кріпили на зразку по обидва боки від вершини тріщини на віддалі 4 mm за допомогою пружних елементів.

Випробовували на втомну міцність за схемою консольного обертового згину з побудовою кривих багатоциклової втоми “напруження σ –кількість циклів до руйнування N ”. Для цього від штанги з одного боку відрізали головку і навантажували наважками на установці ЗКШ-25 (рис. 2) [13] з частотою 950 min^{-1} (~ 16 Hz).

Для досліджень штанги у ТС сконструювали циліндричну камеру з полімерного матеріалу з гумовим ущільненням, яка охоплювала значну її робочу частину (~ 250 mm), починаючи від галтелі головки, де напруження від консольного згину були найбільшими, і тому там очікували руйнування. Камеру насували на штангу аж до галтелі з протилежного кінця.

Механічні властивості сталей

Сталь	σ_B	$\sigma_{0,2}$	ψ	δ	HB
	MPa		%		
20Н2М	750	650	56	18	192
35ХМ	588	382	56	21	200

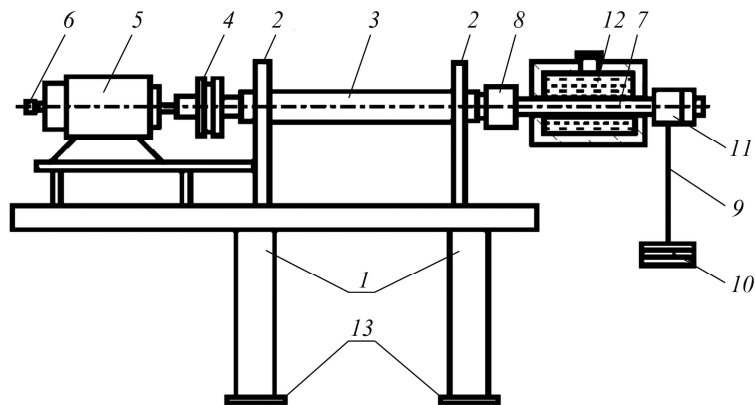


Рис. 2. Схема установки для втомних випробувань насосних штанг за обертового згину:
 1 – рама; 2 – стійки; 3 – вал; 4 – муфта; 5 – електродвигун; 6 – лічильник циклів навантаження; 7 – зразок; 8 – перехідна муфта; 9 – вісь; 10 – наважки; 12 – камера; 13 – подушки амортизації.

Fig. 2. Scheme of the equipment for fatigue tests of pump rods under revolving bending:
 1 – frame; 2 – supports; 3 – shaft; 4 – coupling; 5 – electric motor;
 6 – loading cycles counter; 7 – specimen; 8 – adapter; 9 – axis;
 10 – weights; 12 – chamber; 13 – cushion pads.

Результати та їх аналіз. Кінетику росту втомної тріщини у повітрі (рис. 3, крива 1) описує прямолінійна ділянка діаграми $da/dN-\Delta K$, яка є типовою для вуглецевих і низьколегованих сталей. За швидкості $da/dN \sim 10^{-8}$ м/цикл у тріщину подавали ТС і спостерігали за її сповільненням аж до повної зупинки за короткий час (крива 2).

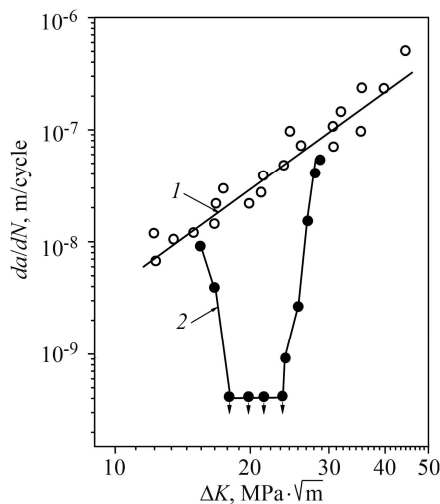


Рис. 3. Залежності $da/dN-\Delta K$ під час росту тріщини в сталі 35XM у повітрі (1) і ТС (2).

Fig. 3. Dependences $da/dN-\Delta K$ under crack growth in 35XM steel in air (1) and technological environment (TE) (2).

Замірюючи закриття тріщини, виявили, що коефіцієнт закриття $U = \Delta K_{\text{eff}}/\Delta K > 0,8$, тому значення ΔK_{eff} різко впало (стало менше, ніж $4 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$) і наблизилось до порогового, що й спричинило зупинку росту тріщини. Тоді періодично підвищували рівень ΔK (не більш ніж на 10%), поки тріщина знову не почала поширюватися при $\Delta K = 23 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$. Такий рівень ΔK і відповідну швидкість росту тріщини у повітрі ($\sim 10^{-7}$ м/цикл) можна вважати критичними для цієї сталі за асиметрії циклу навантаження $R = 0,5$ та частоти $f = 10 \text{ Hz}$. Далі, зі збільшенням навантаження, тріщина стрімко поширювалась і при $\Delta K \sim 35 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ кінетика її росту була такою ж, як у повітрі.

Зазначимо, що ефективність гальмування росту втомної тріщини таким способом суттєво залежить від частоти циклічного навантаження f [8, 9], зменшуючись з її ростом. Оскільки в експлуатаційних умовах штанги навантажують за значно нижчої частоти, то можна очікувати і

суттєво більшого ефекту підвищення їх довговічності.

Виявили (рис. 4) суттєве зниження втомної міцності обох сталей в корозійному середовищі. Зафіксували, що ТС у 2,5–3 рази підвищує границю втоми проти 3%-го розчину NaCl [14]. Зауважили, що за різної міцності сталей границя витривалості у повітрі та умовна границя витривалості у корозійному середовищі (відповідно ~ 200 та 100 МПа) не залежать від їх стану. Однак крива витривалості 3 для ТС знаходиться в області вищої довговічності, навіть якщо порівнювати з випробами у повітрі. Тобто не тільки усувається вплив агресивного середовища на втомну міцність, але й проявляється зміцнювальний механічний ефект.

Враховуючи наведені результати, можна припустити, що втомна міцність гладких зразків-штанг у ТС підвищується через гальмування росту втомних тріщин, які зароджуються з поверхні, внаслідок штучного створення ефекту їх закриття.

Однак за вищих напружень вже утворюватимуться і підповерхневі тріщини, які не зазнають впливу ТС. Тоді можна очікувати, що за виходу їх на поверхню ефект від застосування ТС залежатиме від рівня ΔK і відповідної швидкості росту тріщини в момент її виходу на поверхню. Якщо досягаються значення, вищі за критичні, то вплив ТС може бути не настільки визначальним, щоб загальмувати ріст тріщини і надалі підвищувати втомну міцність штанги.

Конструкція камери для практичної реалізації методу. Реально штанга навантажується розтягом, тому ризик експлуатаційного обриву по її тілу стосується всієї робочої частини. Однак експертиза руйнувань свідчить, що штанги руйнуються в основному ближче до головки. Тому не обов'язково захищати всю її робочу частину, а тільки цю. Цим вимогам відповідала спеціальна конструкція камери (рис. 5). Основа камери – циліндричний корпус діаметром ~ 32 mm та довжиною біля 250 mm, виготовлений з корозійно інертного поліуретану, який встановлюють з одного боку на галтель штанги 1, а з іншого – на її тіло, не виходячи за поперечні габаритні розміри штанги. Це важливо, оскільки тоді не виникає труднощів з її монтаженням. На кожному штангу таких камер дві, кожна з яких охоплює частини тіла штанги з найбільшим ризиком руйнування.

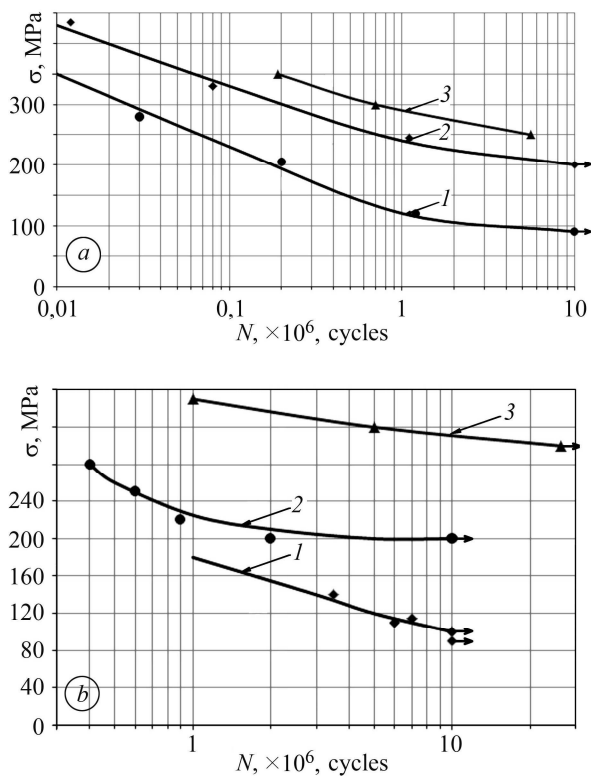


Рис. 4. Криві втомної міцності сталей 20H2M (а) і 35XM (б) під час випроб у повітрі (1), 3% NaCl (2) і за використання ТС (3).

Fig. 4. Fatigue strength curves for steels 20H2M (a) and 35XM (b) under tests in air (1), in 3% NaCl solution (2) and TE (3).

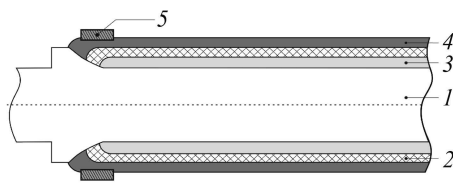


Рис. 5. Схема конструкції камери для ТС:

1 – тіло штанги; 2 – ущільнення;
3 – ТС; 4 – камера; 5 – хомут.

Fig. 5. Scheme of chamber construction

for TE: 1 – rod body; 2 – packing;
3 – TE; 4 – chamber; 5 – clamp.

Для монтажу корпус камери поділили на дві рівні частини по діаметру, а для забезпечення герметичності між нею і тілом штанги по боках встановили вузькі гумові ущільнення, які через податливий поліуретановий корпус затискаються хомутиками. Тоді зона між ущільненнями вільна для заповнення ТС, а саме ця ділянка тіла штанги найвразливіша до втомного руйнування.

ВИСНОВКИ

Статистика обривів свідчить, що найчастіше насосні штанги руйнуються по тілу, тому особливо актуально саме їх захистити від корозійно-втомного руйнування. Для цього запропоновано використовувати спеціальне технологічне середовище, яке, штучно створюючи ефект закриття тріщини, гальмує за певних умов їх ріст до повної зупинки. Це підтвердили результати досліджень сталі 35ХМ насосних штанг. З іншого боку, напівнатурні експерименти на втомну міцність штанг зі сталей 35ХМ і 20Н2М з побудовою кривих багатоциклової втоми виявили, що, застосовуючи такий метод, вдається не тільки позбутися впливу агресивного середовища, але й суттєво зміцнити штангу порівняно з випробами у повітрі, що, очевидно, пов'язано саме з гальмуванням росту втомних тріщин. Розроблено конструкцію камери для технологічного середовища, яка охоплює частину штанги, для її зміцнення в польових умовах.

РЕЗЮМЕ. Проанализированы причины эксплуатационной потери целостности стальных насосных штанг вследствие усталостного разрушения их основной части, обусловленного развитием поверхностных трещин. Для повышения долговечности штанг предложено использовать специальную жидкую технологическую среду, которая тормозит рост усталостных трещин, создавая искусственный эффект их закрытия. Проведены полунатурные эксперименты длительно эксплуатируемых штанг из сталей 35ХМ и 20Н2М на многоцикловую усталость. Выявлено, с одной стороны, существенное отрицательное влияние на усталостную выносливость 3% раствора NaCl, а с другой – значительный положительный эффект технологической среды, проявившийся в существенном повышении усталостной прочности штанг в сравнении с испытаниями не только в коррозионной среде, но и на воздухе. Для практической реализации метода в полевых условиях разработана конструкция камеры, которая крепится на штанге и охватывает ее часть.

Ключевые слова: насосные штанги, усталостная прочность, искусственный эффект закрытия усталостных трещин, остановка трещин.

SUMMARY. The causes of operating loss of steel sucker rods integrity due to fatigue fracture of their main part associated with surface crack propagation are analysed. To increase the lifetime of rods it is proposed to use a special liquid technological medium, which retards fatigue cracks growth creating artificial crack closure effect. Scaled-down experiments on high cycle fatigue of long-term operated rods made of 35ХМ and 20Н2М steels were carried out. It was revealed, on the one hand, the considerable negative influence on fatigue durability of 3% NaCl solution, and on the other – the significant positive effect of technological environment. The substantial increase of fatigue durability of rods in comparing to the tests carried out not only in corrosion environment but also in air was observed. For practical realization of the method in field conditions the construction of chamber fixed on a rod and covering its part was developed.

Keywords: sucker rods, fatigue durability, artificial effect of fatigue cracks closing, arrest of cracks.

1. *Копей Б. В., Стефанишин А. Б., Венгрюнок Т. П.* Втомна міцність гібридних насосних штанг // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 5. – С. 117–120.
(*Kopei B. V., Stefanyshyn A. B., and Venhrynyuk T. P.* Fatigue strength of hybrid pump rods // *Materials Science*. – 2019. – **54**, № 5. – P. 739–742.)
2. *Новый* способ повышения циклической трещиностойкости деталей конструкций / Г. Н. Никифорчин, О. Н. Романив, Б. Н. Андрусив, В. Г. Здановский, А. В. Василик, Б. И. Чемеринский // Физ.-хим. механика материалов. – 1985. – **21**, № 2. – С. 92–93.
(*A new method of increasing the cyclic crack resistance of structural parts / G. N. Nikiforchin, O. N. Romaniv, B. N. Andrusiv, B. G. Zdanovskii, A. A. Vasilik, B. I. Chemerinskii* // *Soviet Materials Science*. – 1985. – **21**, № 2. – P. 191–193.)
3. *Венгрюнок Т. П.* Гальмування втомних тріщин нанесенням на газопроводи під тиском ремонтного покриття // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – **48**, № 6. – С. 45–48.
(*Venhrynyuk T. P.* Fatigue crack retardation by the application of repair coatings to gas pipelines under pressure // *Materials Science*. – 2013. – **48**, № 6. – P. 739–742.)
4. *Tagawa T. and Aoki H.* Fatigue crack retardation by silicon carbide powder paste infiltration under different cyclic stress conditions // *Welding Int.* – 2016. – **30**, № 12. – P. 899–907.
5. *Романив О. Н., Никифорчин Г. Н., Андрусив Б. Н.* Эффект закрытия трещин и оценка циклической трещиностойкости конструкционных сплавов // Физ.-хим. механика материалов. – 1983. – **19**, № 3. – С. 47–61.
(*Romaniv O. N., Nikiforchin G. N., Andrusiv B. N.* Effect of crack closure and evaluation of the cyclic crack resistance of constructional alloys // *Soviet Materials Science*. – 1983. – **19**, № 3. – P. 212–225.)
6. *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.)
7. *Патент* України № 128514. Спосіб гальмування росту втомної тріщини / Г. М. Никифорчин, З. В. Слободян, Я. М. Хабурський, В. М. Пустовой, О. І. Звірко, Н. В. Крет. – Опубл. 25.09.2018; Бюл. № 18.
8. *Khaburskyi Ya. and Nykyforchyn H.* Chemical method of fatigue and corrosion fatigue crack growth arrest in steels by metal treatment with the special technological environment // *Proc. Struct. Integrity*. – 2018. – **13**. – P. 1651–1656.
9. *Effective* method for fatigue crack arrest in structural steels based on artificial creation of crack closure effect / Ya. Khaburskyi, Z. Slobodyan, M. Hredil, H. Nykyforchyn // *Int. J. of Fatigue*. – 2019. – **127**. – P. 217–221.
10. *Окрушко Е. И.* Дефектоскопия глубиннонасосных штанг. – М.: Недра, 1983. – 108 с.
11. *Yarema S. Ya.* The method for determination of crack growth rate and crack extension resistance under cyclic loading. – Lviv: National Academy of Sciences of Ukraine, Karpenko Physico-Mechanical Institute, 1994. – 80 p.
12. *Elber W.* The significance of fatigue crack closure. Damage tolerance in aircraft structures. – ASTM STP 486. – Philadelphia: ASTM, 1971. – P. 230–242.
13. *Копей Б. В., Кузьмін О. О., Онищук С. Ю.* Обладнання для попередження відкладень асфальтосмолистих речовин, парафіну та піску: Т. 3: Нафтогазове обладнання. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2014. – 216 с.
14. *Копей Б. В., Копей В. Б., Копей І. Б.* Насосні штанги свердловинних установок для видобування нафти. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 406 с.

Одержано 16.09.2019