

УДК 622.276.054

ОСОБЛИВОСТІ КОРОЗІЙНО-ВТОМНОГО РУЙНУВАННЯ СТАЛЕВИХ ТА ГІБРИДНИХ НАСОСНИХ ШТАНГ

Б. В. КОПЕЙ¹, Г. В. КРЕЧКОВСЬКА^{2,3}, І. Б. КОПЕЙ¹, Б. М. БАКУН¹

¹ Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;

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

³ Національний університет "Львівська політехніка"

Виконано порівняльні експериментальні дослідження сталевих та гібридних насосних штанг на втомну витривалість за умов, максимально наближених до натурних. Встановлено закономірності зміни їх використаного ресурсу (за інкубаційним періодом до появи в них тріщин довжиною до 2 mm) від прикладених напружень та виявлено його зростання від 0,25 до 0,85 за їх збільшення від 110 до 175 МПа. У сталевих штангах частка ресурсу до зародження таких тріщин менша та змінювалася в діапазоні 0,18...0,4 зі зростанням навантажень від 100 до 150 МПа. З підвищенням навантажень, прикладених до гібридних штанг, біля сталевих головок з'являлося дедалі більше тріщин. Швидкість їх росту і в сталевих, і в композитних штангах на етапі їх докритичного росту змінювалася в діапазоні $10^{-9} \dots 10^{-8}$ m/cycle.

Ключові слова: насосні штанги, ріст втомної тріщини, сталь, композити.

Comparative experimental studies of steel and hybrid sucker rods were carried out for fatigue life in the conditions maximum close to natural ones. The regularity of the change in their used life (for to the incubation period before the detection of cracks up to 2 mm long) due to the applied stresses was established and it was shown that it increased from 0.25 to 0.85 with their increase from 110 to 175 MPa. In steel sucker rods, the percent of life before the crack appearance is smaller and can be in the range of 0.18...0.4 with increasing load from 100 to 150 MPa. As the loads applied to the hybrid rods increased, more and more cracks appeared on the steel heads. The crack growth rates in both steel and composite rods at the stage of subcritical growth changes in the range of $10^{-9} \dots 10^{-8}$ m/cycle.

Keywords: sucker rods, crack fatigue growth, steel, composites.

Вступ. Під час видобування нафти застосовують насосні штанги різних типів та конструкцій. Класичні виготовляють у вигляді суцільного нежорсткого стрижня з висадженими на обох його кінцях головками. Довжина колон з них сягає 2 km. Їх компонують з окремих штанг діаметром до 28 mm і довжиною 8 m, які з'єднують муфтами з різьбою. Елементи колони сприймають максимальні навантаження під час руху плунжера вверх, напруження в елементах залежать від глибини свердловини та діаметра насоса. Крім того, на насосні штанги впливають корозивно-активні середовища, інерційні вібраційні сили, осьові пульсівні навантаження одного знака з асиметричним циклом та знакозмінні (циклічні, спричинені поздовжнім згином внаслідок втрати тривкості) [1–5]. Все це може спричинити обрив колони, що зумовлює тривалі простої устаткування та знижує продуктивність видобування нафти. Тому залежно від умов експлуатації штанги повинні мати необхідні властивості (опір утомі, корозійну тривкість, зносотривкість, довговічність) [6]. Границя втоми у повітрі (σ_{-1}) найчастіше корелює із границею міцності сталей (σ_B), тоді як умовна границя корозійної втоми низька і не залежить від їх міцності.

Контактна особа: Г. В. КРЕЧКОВСЬКА, e-mail: krechkovskahalyna@gmail.com

Для прогнозування втомної довговічності цих штанг важливо оцінити вплив технологічних середовищ на умовну границю втоми уживаних для їх виготовлення сталей, зокрема сталі 20H2M, і порівняти ці властивості з матеріалами сучасних гібридних штанг з металевими головками та композитним стрижнем [7–11]. Вони проти традиційних сталевих штанг мають у 4 рази меншу густину ($2000/7850 \text{ kg/m}^3$), втричі нижчий модуль пружності ($50 \dots 70 \text{ GPa}$), в 20 разів менший коефіцієнт шорсткості ($0,0015/0,03$), високу корозійну тривкість, а також володіють недосяжністю пластичних деформацій. Об'єднані в колону такі штанги знижують загальну вагу, зменшують амплітудні і динамічні навантаження: підвищують у 5–6 разів тривалість безаварійної експлуатації. Водночас важливо дослідити їх здатність до експлуатації за сумісного впливу циклічних навантажень та корозивно-активних технологічних середовищ. І поки що результатів для їх узагальнення недостатньо.

Матеріали та методи випроб. Вивчали особливості корозійно-втомного руйнування зразків довжиною $\sim 250 \text{ mm}$, відрізаних від головки сталевих насосних штанг. Зразки досліджували за циклічного навантаження круговим консольним згином частотою 15 Hz в агресивному сірководневому середовищі та для порівняння – у повітрі [12]. Корозійні випробування виконували в камері з 3%-им водним розчином NaCl , який періодично (один раз на добу) насичували сірководнем до граничної концентрації ($\sim 2,5 \text{ g/l}$). Крім того, за втомною довговічністю у пластовій воді порівняли зразки зі сталевих та гібридних штанг. Стрижні виготовляли методом пултрузії з використанням композиту на основі епоксидної матриці та двох армувальних наповнювачів – скловолокон у його оболонці та вуглецевих волокон в осерді.

Під час вивчення швидкості росту втомних тріщин зразки зі штанг циклічно навантажували напруженнями $80 \dots 175 \text{ MPa}$, а довжину тріщини контролювали ехо-імпульсним методом за допомогою дефектоскопа ДУК-6В. Випробовували штанги трьох діаметрів ($19; 22 \text{ і } 25 \text{ mm}$) зі сталі 20H2M, хімічний склад якої не виходив за допустимі межі галузевих вимог ($\text{mass\%: } 0,19 \dots 0,23 \text{ C; } 0,24 \dots 0,33 \text{ Si; } 0,45 \dots 0,62 \text{ Mn; } 1,65 \dots 1,83 \text{ Ni; } 0,031 \text{ S; } 0,033 \text{ P; } 0,21 \text{ Cr; } 0,22 \dots 0,27 \text{ Mo; } 0,18 \text{ Cu}$). Її механічні характеристики відповідали регламентованим для такого класу матеріалів значенням, зокрема $KCU = 0,75 \dots 0,81 \text{ MJ/m}^2$, $\sigma_B = 875 \dots 885 \text{ MPa}$, $\sigma_{0,2} = 682 \dots 708 \text{ MPa}$, $\delta = 9,7 \dots 10,2\%$, $\psi = 48,8 \dots 50,3\%$. Для порівняння швидкості росту тріщин, окрім сталевих, досліджували також зразки з гібридних штанг діаметром $19 \text{ і } 22 \text{ mm}$.

Результати та їх аналіз. Уживані на практиці ультразвукові засоби контролю насосних штанг не виявляють дефекти глибиною до $1 \dots 2 \text{ mm}$. Тому штанги з меншими технологічними або експлуатаційними пошкодженнями, як правило, не відбраковують і використовують під час монтажу колони. Такі дефекти відчутно не впливають на довговічність штанг, тоді як більші ($2 \dots 3 \text{ mm}$ і вище) можуть змінювати їх ресурс.

За результатами втомних випробувань в агресивних середовищах зразків з насосних штанг з технологічними чи експлуатаційними дефектами вдалося обґрунтувати розміри небезпечних з них, а отже, точніше відбраковувати штанги з пошкодженнями закритичних розмірів. За залежностями швидкості росту тріщини в зразках із штанг діаметром 22 mm від кількості циклів навантаження дійшли висновку, що їх критичний стан за спуртом швидкості росту тріщини досягався, коли її довжина по периметру штанги і глибина досягали, відповідно, $15 \dots 16$ та $4,5 \dots 5,6 \text{ mm}$ (рис. 1). Ці довжини зафіксували за розмаху напружень 100 MPa , які сумірні з експлуатаційними навантаженнями штанг. Для штанг інших типорозмірів критична глибина тріщини, яка передусє спонтанному руйнуванню зразків,

становила 3...4 mm, 4...5 і 5...6 mm для штанг діаметрами 16; 19 і 25 mm, відповідно.

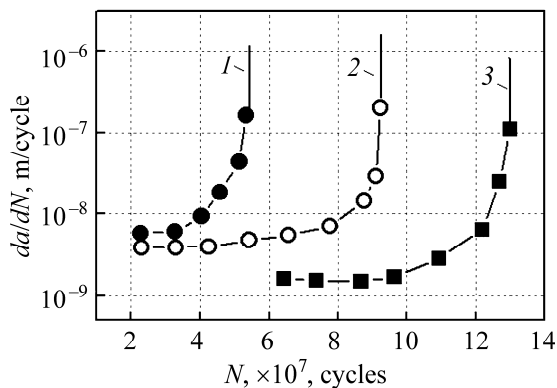


Рис. 1. Залежності швидкості росту втомних тріщин da/dN від кількості циклів навантаження N зразків із насосних штанг діаметром 22 mm зі сталі 20H2M без (1, 2) та після їх попереднього зміцнення металевими щітками (3), отримані в середовищі зі сірководнем (1, 3) та 3%-му водному розчині NaCl (2) за напружень $\sigma_a = \pm 100$ (1, 2) та 150 (3) МПа.

Fig. 1. Dependences of corrosion-fatigue crack growth rates da/dN on the number of load cycles N in sucker rods with a diameter of 22 mm of 20H2M steel (1, 2) and after their surface hardening by metal brushing (3), obtained in environment with hydrogen sulfide (1, 3) and in 3% aqueous NaCl solution (2); at the stress levels $\sigma_a = \pm 100$ (1, 2) and 150 (3) MPa.

За результатами досліджень обґрунтували критичні розміри тріщин у штангах різних типорозмірів, які можна виявити наявними засобами контролю під час перекомпонування насосних колон. І хоча дефекти меншої глибини ці методи не фіксують, але запас довговічності, зумовлений розвитком пошкоджень, менших за 1...2 mm (до критичного розміру), дає змогу гарантувати безпечну їх експлуатацію.

Встановили, що на етапі стабільного (докритичного) поширення швидкість росту da/dN корозійно-втомних тріщин у зразках зі штанги діаметром 22 mm змінювалася лінійно і її можна описати рівняннями лінійної регресії (рис. 2). Зокрема, за випробувань зразка у середовищі (3% NaCl + H₂S) за напружень $\sigma_a = \pm 100$ МПа швидкість

$$da/dN = 9,7 \cdot 10^{-9} \cdot N/N_f + 2,04 \cdot 10^{-10} \text{ (m/cycle)}. \quad (1)$$

Тоді як у 3%-му водному розчині NaCl за такого ж розмаху напружень

$$da/dN = 5,6 \cdot 10^{-9} \cdot N/N_f + 8,47 \cdot 10^{-10} \text{ (m/cycle)}. \quad (2)$$

Для зразка зі штанги, поверхню якого додатково обробили металевою щіткою, випробуваного у середовищі (3% NaCl + H₂S) за вищого розмаху напружень $\sigma_a = \pm 150$ МПа

$$da/dN = 2,3 \cdot 10^{-9} \cdot N/N_f + 2,02 \cdot 10^{-10} \text{ (m/cycle)}. \quad (3)$$

У всіх цих виразах значення N і N_f відповідають кількості циклів навантаження зразка в поточний момент і в момент його руйнування.

Важливо зауважити, що обробленням металевими щітками вдалося суттєво підвищити відносну довговічність зразків вже на етапі докритичного росту тріщини. Причому його позитивний ефект проявляється навіть за вищого розмаху навантажень ($\sigma_a = \pm 150$ МПа проти ± 100 для зразків із необробленою поверхнею). Зокрема, частка відносної довговічності N/N_f для цих двох варіантів досягала відповідно 0,75 і 0,9 від повного ресурсу штанги N_f .

Рис. 2. Залежність швидкості корозійно-втомного росту тріщини da/dN у зразках із насосних штанг діаметром 22 mm зі сталі 20H2M від їх відносної довговічності N/N_f з лінійними ділянками зміни швидкості їх поширення на етапі докритичного росту, описаними рівняннями (1)–(3), та критичними значеннями відносної довговічності $(N/N_f)_c$ для кожної з аналізованих систем метал–середовище: $\square$ – $(N/N_f)_{c1}$; $\bullet$ – $(N/N_f)_{c2}$; $\circ$ – $(N/N_f)_{c3}$ (криві 1–3 розшифровані в підписі до рис. 1).

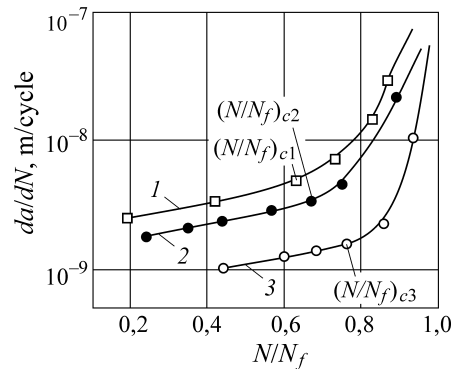


Fig. 2. Dependence of the rate of corrosion-fatigue crack growth da/dN in samples with sucker rods of a diameter of 22 mm made of 20H2M steel on their relative durability N/N_f with selected linear sections of the change of their propagation rate at the stage of subcritical growth, described by the corresponding Eqs. (1)–(3) and the critical values of the relative durability $(N/N_f)_c$ for each of the analyzed metal–environment systems: $\square$ – $(N/N_f)_{c1}$; $\bullet$ – $(N/N_f)_{c2}$; $\circ$ – $(N/N_f)_{c3}$ (curve 1–3 are explained in the caption to Fig. 1).

Визначили також довговічність насосних штанг за запропонованим підходом і розраховували їх повний і залишковий ресурси. Аналіз швидкості росту корозійно-втомної тріщини за розмаху напружень $\sigma_a = \pm 100$ МПа у зразку, випробуваному в 3%-му розчині NaCl, насиченому сірководнем, засвідчив, що на стадії її докритичного росту ймовірність неруйнування зразка досягає 75...80%. Причому ця стадія перевершує позначку 50%-ої ймовірності неруйнування $P(N)$ (рис. 3). Водночас критична стадія неконтрольованого поширення тріщини найчастіше досягається, коли ймовірність $P(N)$ стає меншою за 0,4...0,45 (а ймовірність руйнування зростає відповідно до 0,55...0,6).

Рис. 3. Зони різної ймовірності неруйнування $P(N)$ зразка із насосної штанги діаметром 22 mm зі сталі 20H2M упродовж бази випробувань на залежності швидкості росту втомної тріщини da/dN від їх кількості циклів навантаження N : N_i , N_{sc} , N_c – кількість циклів навантаження до зародження тріщин та їх докритичного і критичного росту, відповідно.

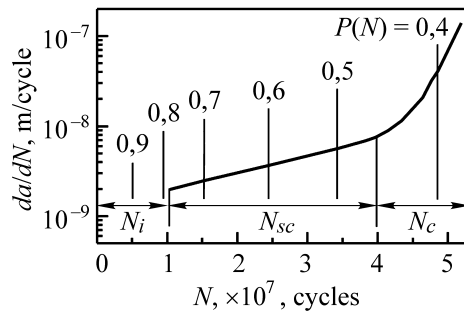


Fig. 3. Zones of different probability of non-fracture $P(N)$ of a specimen of a sucker rods with a diameter of 22 mm made of 20H2M steel during the test base are highlighted in the graphical dependence of the fatigue crack growth rate da/dN on the number of load cycles N of these specimens: N_i , N_{sc} , N_c – the number of load cycles before the initiation of cracks and their subcritical and critical growth, respectively.

Останнім часом насосні штанги для видобування нафти виготовляють з полімерних композитів (склопластикових, вуглепластикових та гібридних), щоб послабити негативний вплив складників технологічних середовищ на втомну довговічність [2, 6]. Проте накопичений за результатами експлуатаційних та лабораторних досліджень сталевих штанг досвід неможливо апіорі перенести і поширити для прогнозування залишкового ресурсу штанг зі сучасніших матеріалів

за різних режимів їх навантаження. Для цього потрібні окремі дослідження, щоб підтвердити чи спростувати закономірності, отримані для металевих штанг.

Тому, щоб обґрунтувати роботоздатність композитних насосних штанг, слід оцінити їх втомну довговічність. Використовуючи експериментальні результати, побудували криві втомної витривалості зразків зі сталевих і склопластикових насосних штанг, випробуваних у пластовій воді за різної ймовірності їх неруйнування $P(N)$ (рис. 4).

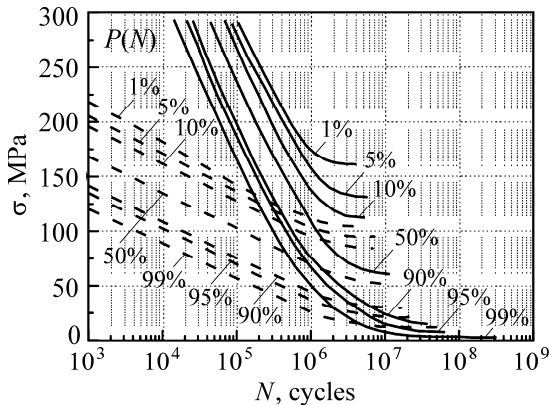


Рис. 4. Криві втоми σ - N , які відповідають різній ймовірності неруйнування $P(N)$ насосних штанг діаметром 22 mm зі сталі 20H2M (суцільні лінії) та композиційного матеріалу (штрихові), навантажених круговим консольним згином у пластовій воді. Цифри біля кривих – ймовірність неруйнування.

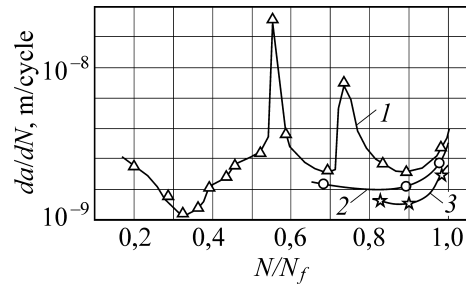
Fig. 4. Fatigue curves σ - N corresponding to different probability of non-fracture $P(N)$ of pump rods with a diameter of 22 mm made of 20H2M steel (solid lines) and composite material (dashed lines) under circular cantilever bending into formation water. The numbers near the curves characterize the probability of non-fracture of the sucker rods.

Зрозуміло, що за високих напружень сталеві штанги переважають композитні. За ймовірності $P(N) = 50\%$ ця тенденція зберігається також за напружень, сумірних з експлуатаційними (100 МПа). Але за нижчих (близьких до порога втоми) композитні за кількістю циклів навантаження до досягнення рівноцінної ймовірності їх неруйнування дещо ліпші. За напружень в околі умовної границі втоми вони не руйнувалися навіть за бази випробувань $5 \cdot 10^7$ cycles. Лише в окремих випадках на їх поверхні фіксували повздовжні тріщини, які трактували як розшарування через деструкцію зовнішнього шару композиту зі склопластиковим наповнювачем під дією циклічних навантажень. Оскільки втомна витривалість цих штанг у нафтовій емульсії на 15...25% вища, ніж у пластовій мінералізованій воді [2], то можна сподіватися на ще кращі їх показники під час нафтовидобування.

Аналізували ріст втомних тріщин у гібридних насосних штангах за довговічністю та швидкістю поширення (рис. 5). Наприклад, довговічність штанг діаметром 19 mm під час випробувань на втому за циклічних напружень згину 140 МПа становить $1,504 \cdot 10^7$ cycles, а за 170 МПа – лише дещо зменшилась до $1,459 \cdot 10^7$. За напружень 175 МПа перед остаточним доламом тріщини були коротшими, ніж за напружень 140 МПа, і поширювались досить повільно на стадії зародження, проте далі їх ріст суттєво пришвидшувався. За напружень 140 МПа на етапі доламу у зовнішньому шарі штанг візуалізувались довгі тріщини, швидкість росту яких вища, ніж за напружень 175 МПа. На завершальній стадії руйнування штанг за високих напружень швидкість росту тріщин стрімко зростає. За вищих навантажень біля їх сталеві головки зароджується більше тріщин (до 13 шт.), ніж за низьких (2 шт.). Інкубаційний період розвитку втомної тріщини зростає зі збільшенням напружень. Виявилось, що через розсіювання втомних характеристик штанг швидкість росту тріщин за напружень 110 МПа змінювалася нерівномірніше, ніж за напружень 140 і 175 МПа.

Рис. 5. Залежність швидкості росту тріщин у гібридних насосних штангах за напружень 110 (крива 1), 140 (2) та 175 (3) МПа від частки виробленого ресурсу.

Fig. 5. Dependence of crack growth rate in hybrid sucker rods at stresses 110 (curve 1), 140 (2) and 175 (3) МПа on the fraction of produced life.



ВИСНОВКИ

Сталеві та композитні гібридні насосні штанги проаналізовано за втомною витривалістю в умовах, наближених до натурних. Отримано експериментальні результати про їх ресурс (за інкубаційним періодом до виникнення в них тріщин довжиною до 2 mm) та встановлено, що частка використаного ними ресурсу зростає від 0,25 до 0,85 зі збільшенням напружень від 110 до 175 МПа. У сталевих штангах частка ресурсу до появи таких тріщин менша та змінюється в діапазоні 0,18...0,4 зі зростанням навантаження від 100 до 150 МПа. За втомного навантаження біля сталевих головок гібридних штанг зароджувалося щораз більше тріщин. Швидкість росту тріщин і в сталевих, і в композитних штангах на етапі їх докритичного росту змінюється в діапазоні $10^{-9} \dots 10^{-8}$ m/cycle.

1. Kret N. V., Svirskaya L. M., and Venhrynyuk T. P. Corrosion-fatigue crack propagation in exploited pump rods made of 20N2M steel // *Materials Science*. – 2020. – **56**, № 2. – P. 279–283.
2. Eyassu Woldesenbet Enhancement of Composite Sucker Rods for Use in the Oil Industry // *ETCE2002/OT-29*. – 2002. – **152**. – P. 581–587.
3. Effects of elevated temperature, hydraulic pressure and fatigue loading on the property evolution of a carbon/glass fiber hybrid rod / Chenggao Li, Rui Guo, Guijun Xian, and Hui Li // *Polymer Testing*. – 2020. – **90**. – P. 106761.
4. Brewer Melanie, Su Chaohui, and Gault Steve. Fiberglass Sucker Rod Cost-Effectiveness: A Case Study from the Permian Basin // *ALCE-2022*. – 2022. – P. 182012.
5. Kryzhanivskyi 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. – C. 92–97.
6. Tension-tension fatigue of hybrid composite rods / N. K. Kar, Y. Hu, E. Barjasteh, and S. R. Nutt // *Composites Part B: Engin.* – 2012. – **43**, № 5. – P. 2115–2124.
7. Kopei B. V., Stefanyshyn A. B., and Venhrynyuk T. P. Fatigue strength of hybrid pump rods // *Materials Science*. – 2019. – **54**, № 5. – P. 739–742.
8. Peculiarities of fatigue cracks growth in steel and composite sucker rods / H. Krechkovska, B. Kopey, B. Bakun, and I. Kopey // *Book of abstracts. ECF23, 2022*. – 2022. – P. 451.
9. Sutherland H. J. and Mandell J. F. The effect of mean stress on damage predictions for spectral loading of fiberglass composite coupons // *EWEA, Special Topic Conf. 2004: The Science of Making Torque from the Wind, Delft, April 19–21*. – 2004. – P. 546–555.
10. Regularities of growth of fatigue cracks in hybrid pumping rods / B. V. Kopei, H. V. Krechkovska, V. P. Nisenskyi, and B. M. Bakun // *Materials Science*. – 2021. – **57**, № 4. – P. 549–556.
11. Mechanical property evolution and service life prediction of pultruded carbon/glass hybrid rod exposed in harsh oil-well condition / Chenggao Li, Xiaoli Yin, Yunjia Wang, Zhonghui Zhang, Yancong Liu, and Guijun Xian // *Composite Struct.* – 2020. – **246**. – P. 112418.
12. Konei B. B., Konei B. B., Konei I. B. Насосні штанги свердловинних установок для видобування нафти. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 406 с.

Одержано 15.04.2022