

УДК 622.276.53

ВТОМНА МІЦНІСТЬ ГІБРИДНИХ НАСОСНИХ ШТАНГ*Б. В. КОПЕЙ, А. Б. СТЕФАНИШИН, Т. П. ВЕНГРИНЮК**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

Розглянуто особливості втомного руйнування гібридних насосних штанг для видобування нафти з вуглеволокнистим осердям та оболонкою зі скловолокна за різних схем циклічного навантаження (розтягом і згином). Встановлено, що за умов згину втомна міцність штанг нижча в ~5 разів, а їх руйнування чи випробування тривалістю 10^7 cycles супроводжується інтенсивним утворенням повздовжніх тріщин розшарування. Наведено характеристики тріщиноутворення залежно від рівня циклічного навантаження. Порівняння за втомною міцністю гібридних та склопластикових штанг свідчить про перевагу гібридного матеріалу.

Ключові слова: *склопластик, вуглепластик, гібридна насосна штанга, циклічний розтяг, циклічний згин, втомна міцність, тріщини розшарування.*

Вступ. Під час видобування нафти помпами застосовують штанги різних типів та конструкцій [1–3], які працюють в умовах складного напружено-деформаційного стану (розтягу, стиску і вигинання). Дія силового навантаження на штанги посилюється корозивним впливом робочих середовищ, що призводить до утворення різного роду дефектів, в тому числі втомних тріщин, зносу тіла штанги в результаті її контакту з насосно-компресорними трубами, вибоїн, виразок корозійного походження тощо [2, 3]. Класичні штанги виготовляють зі суцільного сталевого стрижня з головками на кінцях. Останнім часом використовують корозійнотривкі полімерні композитні (склопластикові, вуглепластикові та гібридні) штанги. Для них важливий також високий опір циклічному навантаженню, особливо з урахуванням деформації згином.

Вивчали втомне руйнування гібридних штанг (вуглепластикове осердя зі склопластиковою оболонкою) діаметром 19 mm і завдовжки до 320 mm. Використали два види механічного навантаження: циклічний розтяг і обертовий консольний згин. У першому випадку штанги випробовували за навантаження частотою 5 Hz та коефіцієнтом асиметрії $R = 0,5$. У другому – на стенді ЗКШ-25 [1], де штанги, зі сторони головки консольно кріпили у тримачі, а з іншого боку навантажували для досягнення необхідного рівня напружень в місці переходу від головки до циліндричної частини штанги. Частота циклічного навантаження 15,8 Hz.

Результати досліджень. Криві втомної міцності “прикладене напруження σ –кількість циклів до руйнування N ” штанг за циклічного розтягу свідчать про їх високий опір втомному руйнуванню (рис. 1a). За обмеженої довговічності 10^5 cycles руйнівне напруження перевищує 1 GPa.

Водночас апроксимація до такої ж довговічності кривої багатоциклової втоми (рис. 1b, крива 2), побудованої на основі випроб консольним обертовим згином, показує ~180 МПа. Такі суттєві відмінності у руйнівних напруженнях за різних схем механічного навантаження є свідченням того, що досліджувані гібридні штанги не в змозі витримувати високі навантаження згином. Однак зазначимо, що вони виявляють ліпші властивості порівняно зі склопластиковими штангами

(рис. 1а), демонструючи на базі 10^7 cycles у 1,5 рази більшу умовну границю витривалості (120 МПа проти 80 МПа).

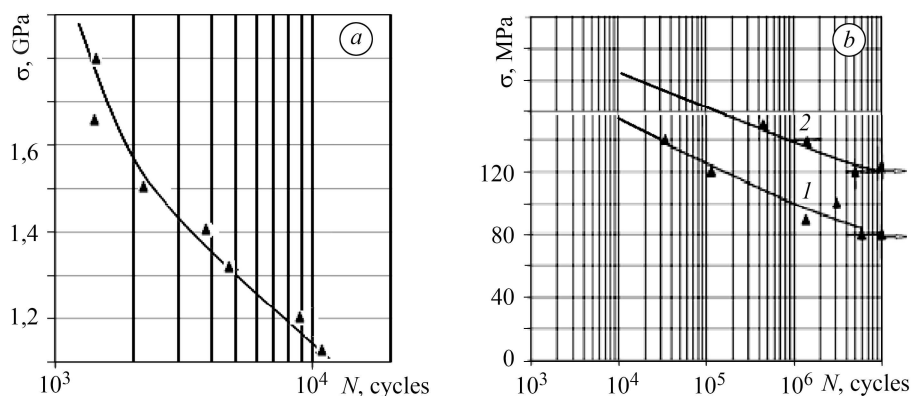


Рис. 1. Криві малоциклової для гібридних (а) та багатоциклової (б) втомної міцності для склопластикових (1) та гібридних (2) насосних штанг.

Fig. 1. Curves of low-cycle for hybrid (a) and high-cycle (b) fatigue strength of fiberglass (1) and hybrid (2) sucker rods.

Зразки після випроб підлягали фрактографічному аналізу (див. таблицю). На їхній зовнішній поверхні за напружень в діапазоні 120...160 МПа спостерігали повздовжні тріщини значної довжини l . Зовні вони нагадували корозійно-механічні тріщини на трубах нафтогазопроводів [4, 5], які зазвичай були результатом експлуатаційної деградації матеріалу [6–8]. Зі зменшенням напруження σ кількість тріщин загалом зростала. 140 МПа і вище достатньо для руйнування гібридних штанг у місці переходу від сталеві головки до циліндричної частини, де напруження від консольного згину максимальні (рис. 2а). Спочатку відбувається розшарування волокон у склопластиковій оболонці. Її міцність послаблюється і навантаження вуглепластикового осердя зростає. Далі обриваються вуглеволокна і руйнування поширюється на все осердя. Кінцевий обрив гібридної штанги локалізується в місці з'єднання сталеві головки з гібридним стрижнем.

Результати випроб гібридних штанг обертовим консольним згином

σ , МПа	$N \times 10^6$, cycles	К-сть тріщин	l , mm	Стан зразка
120	7,34	3	32; 30; 5	Незруйнований
120	>10,0	4	35; 30; 10; 6	Незруйнований
140	1,437	6	21; 20; 17; 15; 12; 10	Зруйнований
150	0,421	3	17; 10; 10	Зруйнований
160	0,081	6	12; 11; 10; 8; 7; 5	Зруйнований

За нижчого напруження штанга не руйнувалася попри тріщину значної довжини (рис. 2б). Якщо за критерій робоздатності штанги прийняти її цілісність попри пошкодження, то вона може витримувати напруження згину до 120 МПа. Такий підхід раціональний, оскільки тріщини утворювалися на межі скловолокно–вуглеволокно і таке пошкодження не поширювалося на серцевину вуглеволокна, тому механічні властивості в основному зберігалися.

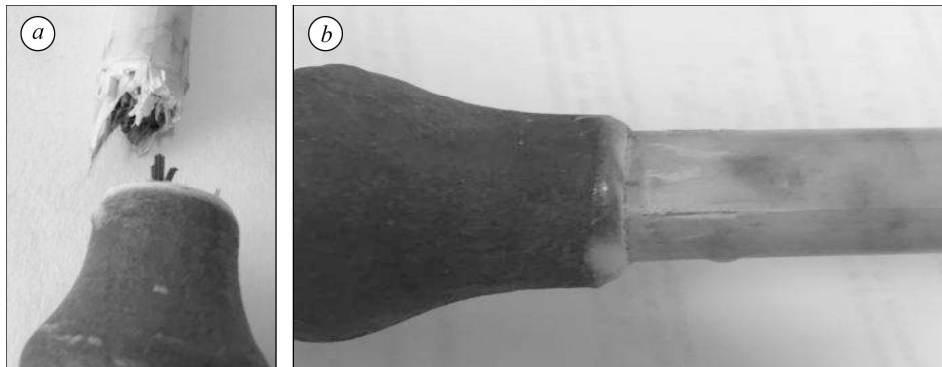


Рис. 2. Характер руйнування гібридної штанги (а) та її вигляд з повздовжнім розшаруванням (з довжиною тріщини до 32 mm) після витримування бази випроб (b).

Fig. 2. Fracture character of hybrid rod (a) and its general view with longitudinal delamination (with a crack length of 32 mm) after standing tests (b).

На основі аналізу кривих втомної міцності (див. рис. 1b) отримали функцію залежності σ від N для склопластикових та гібридних насосних штанг. У першому випадку за апроксимації $R^2 = 0,8931$ функція має вигляд: $\sigma = 372,2 \cdot N^{-0,096}$. Для другого за апроксимації $R^2 = 0,914$: $\sigma = 100,7 \cdot N^{-0,09}$.

На основі цих результатів побудована графічна залежність $L-\sigma$ (рис. 3) з порівнянням зі склопластиковими штангами.

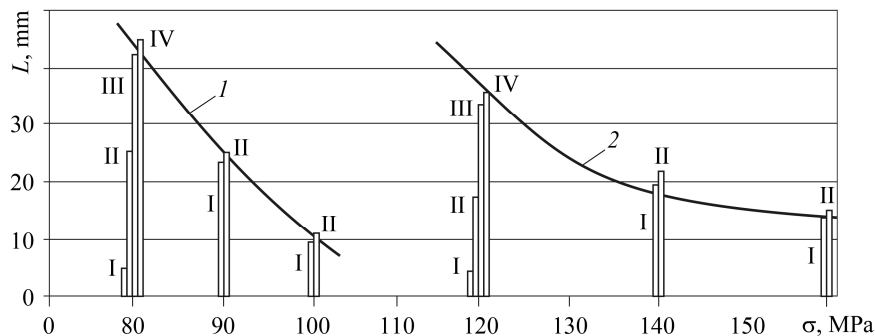


Рис. 3. Залежність довжини L тріщин від напруження згином склопластикових (1) та гібридних (2) насосних штанг: I-IV – найдовші тріщини.

Fig. 3. Dependence of crack length L on bending stresses for the fiberglass (1) and the hybrid (2) sucker rods: I-IV – the longest cracks.

Функція залежності $L-\sigma$ склопластикових штанг за апроксимації $R^2 = 0,8284$ має вигляд: $L = 13 \cdot \sigma^{-6,222}$.

ВИСНОВКИ

Визначено втомні характеристики штанг з полімерних композитів за згину та осового розтягу. Напруження до руйнування гібридних штанг на базі 10^7 циклів в ~ 5 разів вище за осового асиметричного розтягу, ніж за обертового згину. Отримано аналітичні вирази для визначення кількості та довжини тріщин залежно від напруження згином. Гібридним штангам властиві у 1,5 рази вищі характеристики витривалості порівняно зі склопластиковими, а відповідно і більший ресурс за циклічного згину.

РЕЗЮМЕ Рассмотрены особенности усталостного разрушения гибридных насосных штанг для добычи нефти с углеволокнистым сердечником и оболочкой из стекловолокна

при различных схемах циклической нагрузки (растяжением и изгибом). Установлено, что в условиях изгиба усталостная прочность штанг ниже в ~5 раз, а их разрушение или испытание продолжительностью 10^7 cycles сопровождается интенсивным образованием продольных трещин расслоения. Приведены характеристики трещинообразования в зависимости от уровня циклической нагрузки. Сравнение усталостной прочности гибридных и стеклопластиковых штанг свидетельствует о преимуществе гибридного материала.

SUMMARY. The features of the fatigue fracture of hybrid sucker rods for the oil production with a carbon-fiber core and a glass fiber shell under various cyclic loading schemes, tension and bending, are considered. It is established that under bending conditions the fatigue strength of hybrid rod is lower about ~5 times, and their destruction or an achievement of a test base of 10^7 cycles is accompanied by the intense formation of longitudinal delaminating cracks. The characteristics of crack formation depending on the level of cyclic loading are given. Comparison of the fatigue strength of hybrid and fiberglass sucker rods indicates an advantage of the hybrid material.

1. *Насосні штанги і труби з полімерних композитів: проектування, розрахунок, випробування* / Б. В. Копей, О. В. Максимук, Н. М. Щербина, В. В. Розгонюк, В. Б. Копей. – Львів: ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, 2003. – 352 с.
2. *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*. – 2012. – **48**, № 6. – P. 739–742.)
3. *Tension-tension* fatigue of hybrid composite rods / N. Kar, Y. Hu, E. Barjasteh, and S. Nutt // *Composites. Part. B. Engineering*. – 2012. – **43**, № 5. – P. 2115–2124.
4. *Крижанівський Є. І., Грабовський Р. С., Мандрик О. М.* Оцінювання робоздатності нафтогазопроводів тривалої експлуатації за параметрами їх дефектності // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – **49**, № 1. – С. 105–110.
(*Kryzhaniv's'kyi E. I., Hrabovs'kyi R. S., Mandryk O. M.* Estimation of the serviceability of oil and gas pipelines after long-term operation according to the parameters of their defectiveness // *Materials Science*. – 2013. – **49**, № 1. – P. 117–123.)
5. *Оцінка залишкового ресурсу труби нафтопроводу зі зовнішньою поверхневою корозійно-механічною тріщиною за ламінарного потоку нафти і багаторазових гідроударів* / О. Є. Андрейків, Г. М. Никифорчин, І. П. Штойко, А. Р. Лисик // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 2. – С. 80–88.
(*Andreikiv O. E., Nykyforchyn H. M., Shtoiiko I. P., Lysyk A. R.* Evaluation of the residual life of a pipe of oil pipeline with an external surface stress-corrosion crack for a laminar flow of oil with repeated hydraulic shocks // *Materials Science*. – 2017. – **53**, № 2. – P. 216–225.)
6. *Корозія та корозійно-механічне руйнування сталі резервуара сирої нафти* / Д. Ю. Петрина, В. М. Гоголь, Ю. Д. Петрина, О. І. Звірко, Ю. М. Никифорчин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – **51**, № 5. – С. 68–74.
(*Corrosion and corrosion-mechanical fracture of the steel of crude-oil tanks* / D. Yu. Petryna, V. M. Hohoľ, Yu. D. Petryna, O. I. Zvirko, Yu. M. Nykyforchyn // *Materials Science*. – 2016. – **51**, № 5. – P. 666–672.)
7. *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*. – 2017. – **53**, № 5. – P. 6574–683.)
8. *Звірко О. І.* Електрохімічні методи оцінювання деградації конструкційних сталей тривалої експлуатації // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 4. – С. 26–131.
(*Zvirko O. I.* Electrochemical methods for the evaluation of the degradation of structural steels intended for long-term operation // *Materials Science*. – 2017. – **52**, № 4. – P. 588–594.)

Одержано 24.05.2018