

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ВУГЛЕПЛАСТИКОВИХ ТА ГІБРИДНИХ НАСОСНИХ ШТАНГ

Б.В. Копей, Юй Шуанжуй, А.Б. Стефанишин

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727101,
e-mail: kopeyb@ukr.net*

Розглядаються перспективи застосування вуглепластикових та гібридних насосних штанг при видобуванні нафти з глибоких свердловин. Проведено оцінку втомної міцності гібридних насосних штанг порівняно із склопластиковими насосними штангами при циклічному розтягу та згині. Отримані результати представляють практичний інтерес для оцінки запасів міцності штангових колон і можуть бути використані для прогнозування ресурсу за багатоциклової втоми.

Ключові слова: склопластик, гібридна насосна штанга, циклічний розтяг, напруження, границя міцності, циклічний згин.

Рассматриваются перспективы применения углепластиковых и гибридных насосных штанг при добыче нефти из глубоких скважин. Проведена оценка усталостной прочности гибридных насосных штанг по сравнению с стеклопластиковыми насосными штангами при циклическом растяжении и изгибе. Полученные результаты представляют практический интерес для оценки запасов прочности штанговых колонн и могут быть использованы для прогнозирования ресурса при многоцикловой усталости.

Ключевые слова: стеклопластик, гибридная насосная штанга, циклическое растяжение, напряжение, предел прочности, циклический изгиб.

The research deals with the prospects for the use of carbon-plastic and hybrid sucker rods during oil production from deep wells. The evaluation of the fatigue strength of hybrid sucker rods as compared with fiberglass rods during cyclic stretching and bending is conducted. The obtained results represent a practical interest in the assessment of the rod columns strength and can be used to predict the resource during the multi-cycle fatigue.

Key words: fiberglass, hybrid sucker rod, cyclic stretching, stress, ultimate strength, cyclic bending.

Вступ

Під час видобування нафти штанговими насосами застосовують велику кількість типів та конструкцій насосних штанг [1-3]. Класичні штанги виготовляються із суцільного стрижня з висадженими на кінцях головками. В процесі експлуатації насосні штанги працюють в умовах складного напружено-деформаційного стану (розтягування, вигинання і стиснення). Дія силового навантаження на штанги посилюється внаслідок корозійного впливу агресивного середовища, що зрештою призводить до утворення різного роду дефектів, в тому числі корозійно-втомних тріщин, зношування тіла штанги через їх контактування з насосно-компресорними трубами під час зворотно-поступального руху, вибоїн, виразок корозійного походження і т.п. [2] Останніми роками знаходять використання склопластикові, вуглепластикові та гібридні насосні штанги. Гібридні штанги мають вуглеволокнисте осердя та оболонку із скловолокна.

Стан проблеми та постановка задачі досліджень

Вуглецеве волокно є штучним волокном, що складається з вуглецю і є формою графіту, в якій атоми вуглецю вишикувані в тонкі довгі графітові волокна. Вуглецеві волокна є дуже жорсткими стосовно їх маси і використовуються, зокрема, для конструкцій, виготовлених з композитних матеріалів, в яких вуглецеві волокна пов'язані з матричним (сполучним) матеріалом, яким часто використовується епоксидна смола. Вуглецеве волокно є типом гідратцелю-

лозного (чи віскозного) або штучного волокна – пан-акрилонітрилового волокна, яке є вуглецем майже в чистому вигляді. Цей матеріал виготовляється методом піролізу, тобто розкладання молекул сполуки під впливом високої температури без окислення та горіння. Кожне полотно за будовою кристалічної ґратки близьке до графіту, проте створює лише плоскі просторові структури. Безліч графітових полотен, переплітаючись, утворюють волокно. Вуглеволокном невірно називають також будь-який композитний матеріал, до складу якого входять вуглецеві нитки; найбільш відомим і важливим з них є пластик, посилений вуглеволокном (англ. *CFRP*, Carbon Fiber Reinforced Plastic). Вуглеволокно отримують складною термічною обробкою (400—3000 С) поліакрилонітрилу.

Типові властивості НТ-вуглеволокон	
Густина	1800 кг/м ³
Перетин волокна	7 мкм
Міцність вздовж волокон	3530 МПа
Повздовжній модуль Юнга	230 ГПа
Усадка	1,5 %
Типові властивості UMS -вуглеволокон	
Густина	1800 кг/м ³
Перетин волокна	7 мкм
Міцність вздовж волокон	4560 МПа
Повздовжній модуль Юнга	395 ГПа
Усадка	1,1 %

Способи отримання вуглеволокна

Існує декілька способів отримання вуглеволокна:

- хімічне осідання вуглецю на намотуваний ролінг (наприклад, скловолокно);
- вирощування волоконноподібних кристалів (графіту) в світловій дузі;
- утворення органічних волокон в реакторі.

Найпоширенішим є останній спосіб. Спочатку з хімічних розчинів отримують поліакрилонітрильну нитку білого кольору. При високій температурній обробці вона переробляється у вуглецеве волокно – поліакрилонітрид, нагрівається до 260 °С, оксидується, і кетонні молекулярні з'єднання стабілізуються. Потім оксидований матеріал нагрівається до 1300 °С в інертному газі. При цьому відбувається обвуглення матеріалу (карбонізація) і відторгнення неуглецевих з'єднань – так звана суха дисципліяція. Таким чином отримують HF-волокна, які після цього хімічно обробляються для використання в композитних сполуках. З волокон виготовляють тканину. Далі в результаті декількох технічних стадій переробки вуглеволокна перетворюють в препреги, з яких отримують вуглепластик. Якщо потрібне волокно ще більшої міцності, то HF-волокно проходить ще один ступінь перетворення – графітизацію в інертному газі при температурі 2000-3000 °С. Найміцніше вуглеволокно – УНМ, проходить додатково ще декілька ступенів графітування в інертному газі при тій же температурі з подальшим фінішем. Цей процес є дуже енергомістким і складним, тому вуглеволокно набагато дорожче за скловолокно.

Застосування вуглецевого волокна

Вуглецеві волокна згортаються в нитку. Нитки переплітають у вуглецеві тканини, полотна, стрічки різного плетіння. Ці матеріали застосовуються для створення вуглепластів (вуглепластиків) і інших композиційних матеріалів, наприклад, як армуючий матеріал для вуглепластику на основі епоксидних смол. Також вуглецеві волокна використовуються як хороший фільтруючий матеріал і для створення електронагрівальних елементів. Вуглецеве волокно в комбінації з епоксидною смолою часто застосовується для армування ділянок, де необхідна підвищена міцність та жорсткість, і при правильному підході дає добрі результати. За своєю міцністю на розрив вуглеволокно поступається кевлару, проте значно перевершує його при роботі на стиск. Одночасно вуглецеве волокно має дуже низьку стійкість до ударних навантажень. Для компенсації недоліків того й іншого, ці матеріали часто застосовують у вигляді «гібрида». Як і у випадку з кевларом, вуглеволокно є крихким, тож вимагає для свого захисту іншого матеріалу типу склотканини. Крім малої міцності при ударних навантаженнях, вуглеволокно погано переносить навантаження на зсув, крім того його слід захищати від абразивних впливів. Хоча з вуглеволокна можна виготовити тканину в звичайному або «гібридному» вигляді і використовувати її для об-

клеювання корпусу, слід мати на увазі, що вуглецеві волокна в процесі переплетення втрачають міцність. Якщо ставиться мета домогтися від матеріалу максимальної міцності, вуглеволокна повинні бути абсолютно прямими, без звивин і згинів. Таким чином, з урахуванням високої вартості вуглеволокна (воно дорожче від кевлара) марною тратою є використання його в будь-якому тканому вигляді, де порушена прямолінійна орієнтація ниток. Існують деякі розбіжні судження з приводу смол, придатних для застосування з вуглеволокном. З чисто технічної точки зору, поліефірні, вінілефірні і епоксидні смоли добре просочують даний матеріал, проте дехто вважає, що для досягнення якнайкращих результатів необхідно застосовувати еластичніші смоли типу вінілефірних або епоксидних. Стосовно міцності клейового з'єднання, коли йдеться про застосування вуглеволокна для покриття матеріалу-основи, якнайкращим варіантом будуть епоксидні смоли. Матеріали з вуглеволокна мають чорний колір і залишаються привабливими після просочення смолою. Тому вуглеволокно часто використовують і для поліпшення зовнішнього вигляду виробу, наприклад, для виготовлення корпусів приладових панелей або глушників тощо.

Для свердловин глибиною 2500-3000 метрів одним з варіантів насосної штанги може бути гібридна насосна штанга, яка складається з односпрямованого вуглецевого волоконного осердя (ВВ), обгорнутого оболонкою зі скловолокна (СВ), та епоксидної матриці. ВВ серцевина та СВ оболонкові частини складають відповідно 44 та 56% від об'єму композиту, карбонові та скловолоконні об'ємні частки для серцевини та оболонки складають ~ 69%. Епоксидна матриця формується для перехідної високої температури скла ($T_c=205^\circ\text{C}$).

Гібридні штанги випробовували як в промислових умовах на свердловинах в Китаю, так і на лабораторних стендах в Китаї та Україні.

Основний текст

Для визначення працездатності та порівняння склопластикових і гібридних насосних штанг в умовах дії навантажень циклічного розтягу та згину використано методику натурних випробувань на втому. Досліджено згинальну втомну поведінку та опір втомі при асиметричному осьовому циклічному розтягу гібридних втомних композиційних стрижнів. Пошкодження оцінювали, контролюючи втрату жорсткості залежно від кількості циклів, а згинальну втомну міцність визначали за появою тріщин і руйнування. Методика акустичної емісії і мікроскопічне дослідження використовувалися для характеристики прогресування пошкодження і механізмів руйнування. Число циклів до руйнування залежало від прикладеного рівня напруження; двопараметричний аналіз Вейбула використовувався для визначення ймовірності відмови; згідно з кривою напруження – число циклів $\sigma-N$. В промислових умовах на свердловинах в Китаю пошкодження було ініційоване і розповсюджувалося в результаті розтріскуван-

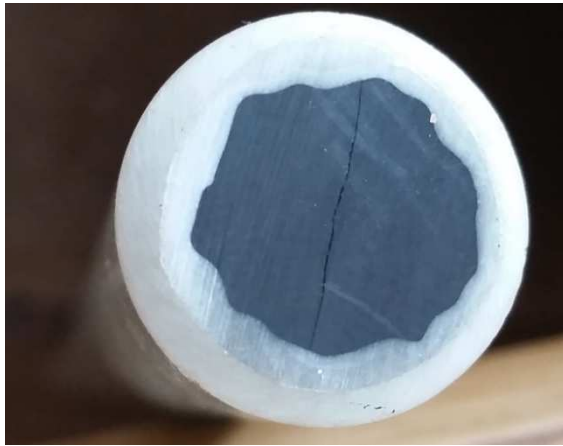
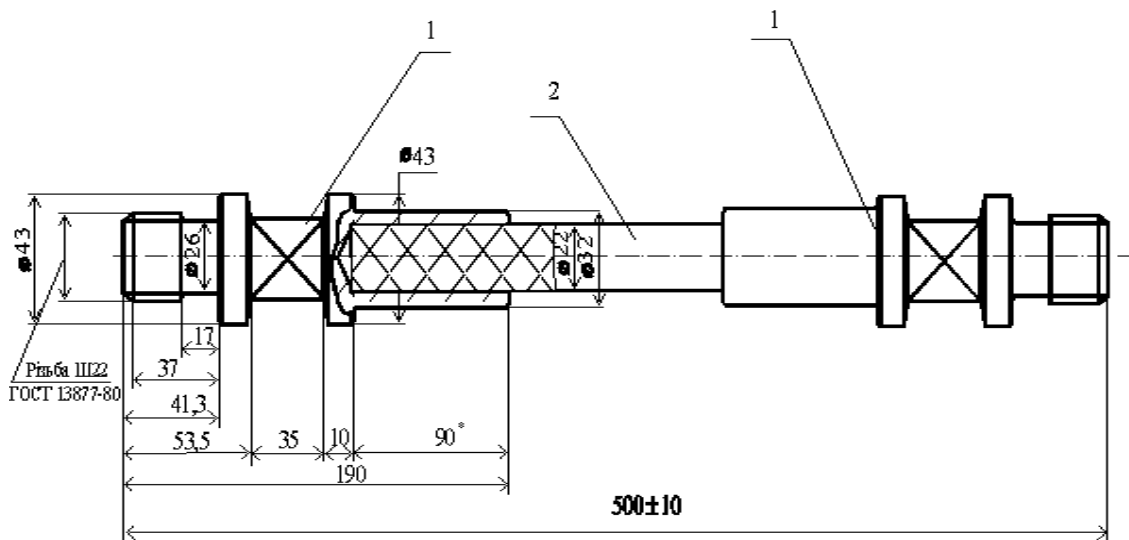


Рисунок 1 – Поперечний зріз гібридної насосної штанги з тріщиною, яка утворилася у вуглепластиковій серцевині (ліворуч) та розшарування склопластикової оболонки гібридної насосної штанги, яке утворилося після експлуатації в свердловині (праворуч) на промислах в Китаї



1 – сталева головка, 2 – тіло з ПКМ

Рисунок 2 – Зразки для випробування на втомну міцність склопластикових та гібридних (знизу) насосних штанг

ня матриці і руйнування в зв'язці скляних волокон в оболонці та утворення тріщин в вуглецевому осерді (рис. 1).

Для дослідження втомної міцності було використано зразки склопластикових штанг китайського виробництва діаметром 22 мм та гібридних штанг (осердя з вуглепластика зі склопластиковою оболонкою) діаметром 19 мм і

довжиною до 320 мм (рис. 2). Зразки досліджувалися при різному навантаженні та напруженнях згину на стенді ЗКШ-25 при консольному згині з обертанням частотою $n=950 \text{ хв}^{-1}$. Проведені випробування відрізків гібридних насосних штанг на малоциклову втому при асиметричному навантаженні на стенді Instron 8500 (рис. 3, 4).



Рисунок 3 – Стенд Instron 8500 для випробування на втомну міцність гібридних насосних штанг при асиметричному циклічному розтязі

Для проведення експериментальних досліджень на стенді ЗКШ-25 було проведено розрахунок ваги вантажу при заданому напруженні згину. Напруження згину визначатиметься так:

$$\sigma = \frac{M_{зг}}{W}, \quad (1)$$

де $M_{зг} = (P_B + P_{шт}) L$ – момент згину;

$$W = \frac{\pi d_{шт}^3}{32} - \text{осьовий момент опору.}$$

Відповідно напруження згину рівне:

$$\sigma = \frac{(P_B + P_{шт}) L 32}{\pi d_{шт}^3}. \quad (2)$$

Звідси вага вантажу –

$$P_B = \frac{\sigma \pi d_{шт}^3 - 32 L P_{шт}}{32 L}. \quad (3)$$

Дослідження зародження втомних тріщин труб було проведено на стенді ЗКШ-25 при трьох різних напруженнях згину. Відтак розраховано вагу вантажу для створення змінного навантаження на зразок.

Зразок №1 – при напруженні згину $\sigma = 120$ МПа.

$$P_B = \frac{120 \cdot 10^6 \cdot 3,14 (19 \cdot 10^{-3})^3 - 32 \cdot 0,26 \cdot 20}{32 \cdot 0,26} = 290 \text{ Н}. \quad (4)$$

Після відпрацювання 7,34 млн. циклів при заданих умовах утворилося три тріщини: $l_1 = 35$ мм, $l_2 = 32$ мм, $l_3 = 18$ мм $l_4 = 5$ мм (рис. 5). Про-

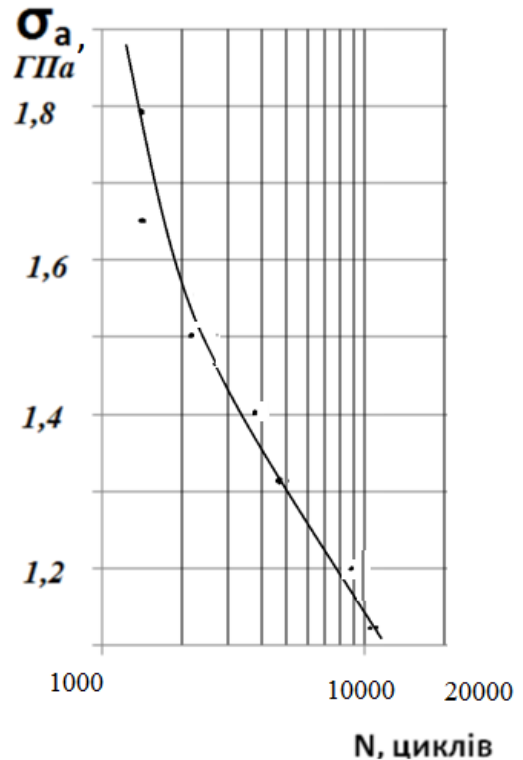


Рисунок 4 – Криві випробування на втомну міцність гібридних насосних штанг за асиметричного циклічного розтягу при коефіцієнті асиметрії $R=0,5$

ведено залікування тріщин першого зразка бандажем із скловолкна (довжиною $l=50$ см, шириною $b=10$ см – 6 шарів по контуру штанги в місці виникнення тріщин) та сполучного - епоксидної смоли. В процесі проведення повторного випробування даний зразок успішно пропрацював 9,4 млн. циклів без поломки (рис. 6).

Зразок №2 – при напруженні згину $\sigma = 140$ МПа. Після відпрацювання 1,4372 млн. циклів при заданих умовах утворилося дві тріщини: $l_1=22$ мм, $l_2=20$ мм.

Зразок №3 – при напруженні згину $\sigma = 160$ МПа. Після відпрацювання 0,0812 млн. циклів при заданих умовах утворилося дві тріщини: $l_1=15$ мм, $l_2=13$ мм.

Отримані дані зведено в таблицю 1.

На основі отриманих результатів дослідів можна зробити такі висновки.

При напруженні в 140, і 160 МПа випробувальний зразок гібридної насосної штанги зламався в місці з'єднання сталеві головки з тілом штанги, витримавши при цьому 1,4372 і 0,0812 млн. циклів відповідно. Це свідчить про те, що дані гібридні насосні штанги не в змозі витримувати високі напруження згину.

При напруженні згину в 120 МПа досліджувальний зразок пройшов 7,34 млн. циклів відповідно і не зламався, проте з'явилися численні втомні тріщини. Такі результати свідчать про те, що дані штанги можуть з легкістю витримувати напруження згину до 120 МПа.



Рисунок 5 – Загальний вигляд зразка гібридної штанги (зліва) з повздожнім розшаруванням (з тріщиною довжиною до 32мм) та склопластикових штанг (справа) після розвитку тріщини і кінцевої поломки (внизу) після випробувань на втому при згині



Рисунок 6 – Загальний вигляд зразка гібридної штанги з повздожнім розшаруванням (з тріщиною довжиною до 32 мм) та склопластиковим бандажем для випробувань на втому при згині

Отже, втома при згині починається тільки тоді, коли гібридна штанга піддається прогину, що перевищує 42 % міцності на вигин. Пошкодження досягло точки насичення уздовж контакту скловолокно/вуглеволокно через концентрацію напружень, яка виникла між двома матеріальними системами, що призвело до асимптотичної поведінки втрати жорсткості. Оскільки пошкодження не поширювалося на ядро вуглеволокна, статичні механічні властивості збереглися до ~85% межі міцності або більше.

Згідно з отриманими результатами побудовано діаграми втомної міцності гібридних насосних штанг при циклічному згині порівняно із склопластиковими насосними штангами (рис. 7).

При дослідженні відпрацьованих зразків гібридних штанг були виявлені і дефекти, відображені на рис. 8, 9.

На основі випробувань побудовано графічну залежність (рис. 10).

Висновки

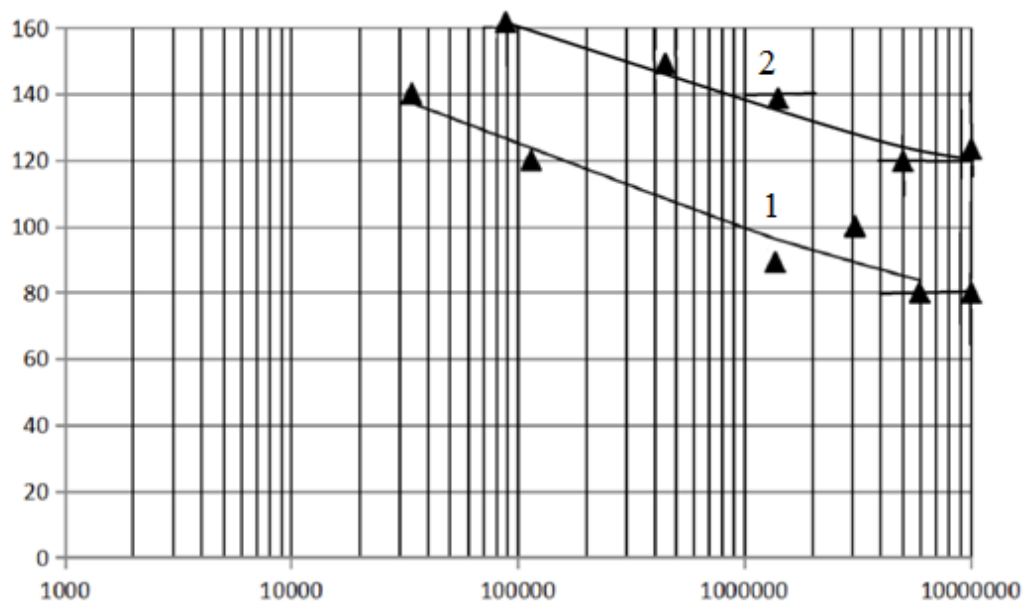
Виявлено, що межа витривалості гібридних штанг при циклічному згині є майже в 1,5 рази вищою, ніж відповідна межа втоми склопластикових насосних штанг.

В гібридних насосних штангах втомні тріщини зароджуються і розвиваються при напруженні вище 120 МПа, тоді як в склопластикових – при напруженнях 80 МПа і вище.

Умовна межа втоми гібридних штанг при базі випробувань 10 тис. циклів за асиметричного випробування розтягом приблизно в 5 разів вища, ніж при випробуванні на циклічний згин.

Таблиця 1 – Результати досліджень згідно з розрахунком та втомними випробуваннями

Зразок №	Напруження згину σ , МПа	Вага вантажу Рв, Н	К-сть відпрацьованих циклів до появи тріщин, млн.	К-сть тріщин	Параметри тріщини l, мм	Примітки
1	120	290	7,34	4	35 32 18 5	Зразок не зламався
2	140	350	1,4372	6	20 22	
3	160	394,2	0,0812	2	13 15	

 σ , МПа

N, циклів

Рисунок 7 – Діаграми втомної міцності склопластикових (крива 1) та гібридних (крива 2) насосних штанг при циклічному згині

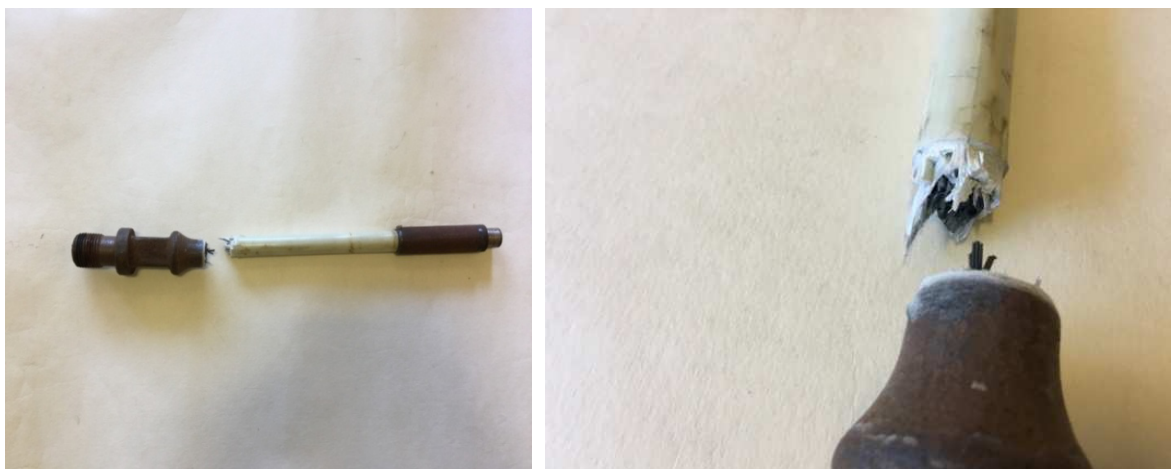


Рисунок 8 – Характерні дефекти і вид зламів відпрацьованих зразків



Рисунок 9 – Злам гібридної насосної штанги

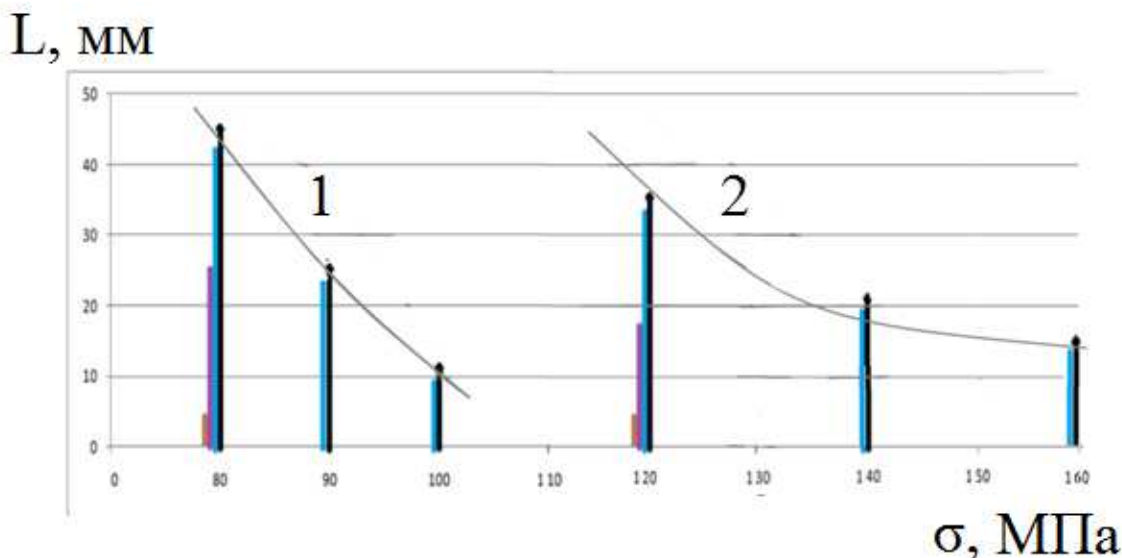


Рисунок 10 – Графік залежності кількості та довжин тріщин від напруження згину в склопластикових (1) та гібридних (2) насосних штангах

Література

1 Копей Б.В. Насосні штанги і труби з полімерних композитів: проектування, розрахунок, випробування / [Копей Б.В., Максимук О.В., Щербина Н.М. та ін.]. – Львів: ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, 2003. – 352 с.

2 Копей Б.В. Насосні штанги свердловинних установок для видобування нафти: Монографія / [Копей Б.В., Копей В.Б., Копей І.Б.]. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 406 с.

3 Копей Б.В. Методи прогнозування ресурсу насосних штанг / [Копей Б.В., Стеліга І.І., Копей В.Б.]. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 1999. – № 36. – С.24. – Серія: Нафтогазпромислове обладнання

Стаття надійшла до редакційної колегії
11.09.17

Рекомендована до друку
професором **Мойсишиним В.М.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром техн. наук **Хоминцем З.Д.**
(ТОВ «ЕМПІ-сервіс», м. Івано-Франківськ)