

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВТОМНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ НАТУРНИХ ЗРАЗКІВ БУРИЛЬНИХ ТРУБ ЗА БАГАТОСТУПЕНЕВОГО НАВАНТАЖУВАННЯ

*В.І.Артим, І.М.Гойсан*

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 40089,  
e-mail: gstatus@mail.ru*

*Проведено натурні експериментальні дослідження втомної довговічності натурних зразків бурильних труб ТБВ 140×11 Л в умовах блокового багатоступеневого навантажування консольним згином. На основі аналізу експериментальних даних зроблено висновок про необхідність коригування лінійної гіпотези накопичення втомних пошкоджень під час оцінювання експлуатаційної надійності бурильних колон у певних умовах експлуатації. Проаналізовано механізм поширення втомних тріщин для різних схем навантажування труб.*

Ключові слова: довговічність, багатоступеневе навантаження, втомна тріщина.

*Проведены натурные экспериментальные исследования усталостной долговечности натурных образцов бурильных труб ТБВ 140×11 Л в условиях блочно-многоступенчатого нагружения консольным изгибом. На основании анализа экспериментальных данных сделан вывод о необходимости коррекции линейной гипотезы накопления усталостных повреждений при оценке эксплуатационной надежности бурильных колонн в определенных условиях эксплуатации. Проанализирован механизм распространения усталостных трещин для разных схем нагрузки труб.*

Ключевые слова: долговечность, многоступенчатое нагружение, усталостная трещина.

*The experimental model of TBV 140×11 L drilling pipes full-scale specimen fatigue endurance in the conditions of sectional multi-stage loading application bending through an angle is given. Conclusions about the necessity of hypothesis linear accumulation of fatigue damages correction are developed on the basis of experimental data analysis during the drilling strings operational reliability estimation in the conditions of certain exploitation. The analysis of fatigue cracks distribution mechanism was performed due to pipe breaks received during different charts of loading pipes.*

Keywords: the durability, the multi-stage loading, the fatigue crack.

Як свідчить практика буріння, виникнення аварійних ситуацій з елементами бурильних колон здебільшого пов'язані з їх втомним та корозійно-втомним руйнуванням [1]. Зниження аварійності бурильних колон потребує вирішення значного обсягу складних завдань, пов'язаних з оцінкою надійності та довговічності елементів бурильних колон та їх підвищення.

Питанню оцінки втомної довговічності елементів бурильних колон присвячені численні наукові праці. Їх огляд можна знайти, наприклад, у посібнику [1]. У даний час достатньо повно досліджені питання оцінки параметрів кривих втоми елементів бурильних колон. У праці [2] обґрунтовано можливість використання лінійної гіпотези підсумовування втомних пошкоджень для оцінки експлуатаційної надійності бурильної колони за роторного буріння у визначених умовах експлуатації.

Але специфікою роботи елементів бурильної колони є змінність умов навантажування під час експлуатації. Наприклад, бурильні труби спочатку можуть знаходитись на викривленій ділянці свердловини, де підлягають впливу інтенсивного навантаження, а потім працювати на ділянці з полегшеними умовами навантаження, чи навпаки. Під час ліквідації прихоплень частина бурильної колони, розміщена вище місця прихоплення, сприймає досить інтенсивне навантаження, а розміщена нижче – його уникає. Про важливість дослідження цього питання свідчать і авторські дослідження матеріа-

лу бурильних труб, що вказують на значний вплив послідовності ступенів навантаження зразків на їх тріщиностійкість [3]. Тому метою даних досліджень є оцінка впливу зміни умов навантажування елементів бурильної колони у процесі їх експлуатації на накопичення втомних пошкоджень. Для такої оцінки необхідно провести експериментальні дослідження натурних елементів колони за багатоступеневою схемою навантажування, яке б імітувало варіанти змін умов навантажування.

Авторами проведено експериментальне дослідження довговічності натурального зразка бурильної труби ТБВ 140×11 Л із замковим з'єднанням 3-147 за багатоступеневого навантажування на випробувальному стенді УКІ-7 Фізико-механічного інституту імені Г.В.Карпенка НАН України.

Силовий вузол стенда із закріпленим зразком зображено на рис. 1.

На передньому плані видно супорт токарного верстата для обточування хвостовика, що забезпечує співвісність зразка з силовою головою.

Натурний зразок навантажується за допомогою відтарованих пружин стискання за м'якою схемою навантажування. Конструктивну схему навантажування наведено на рис. 2.

Обертальний момент до натурального зразка труби 9 з ніпелем 8 передається від електродвигуна 2 через пружну муфту 3, приводний вал 5, закріплений у підшипниках двох проміжних

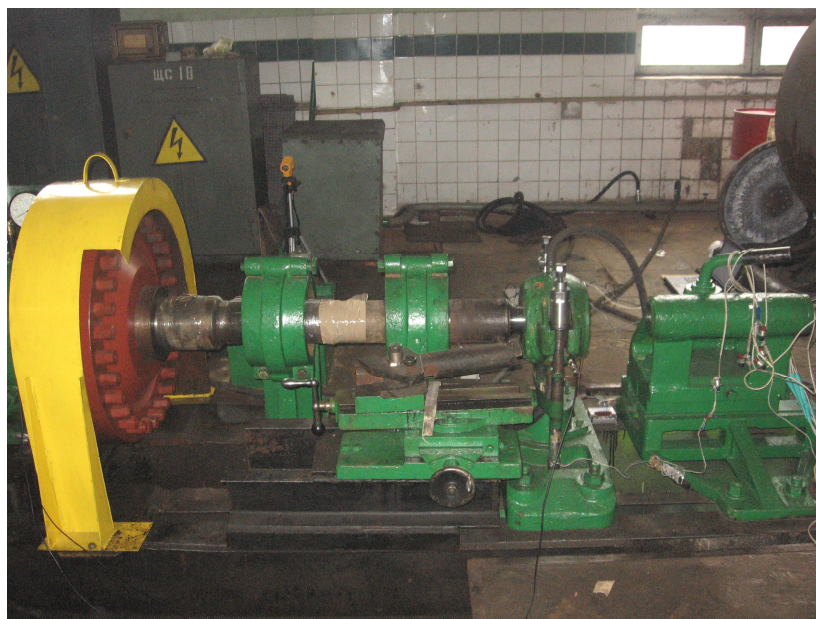
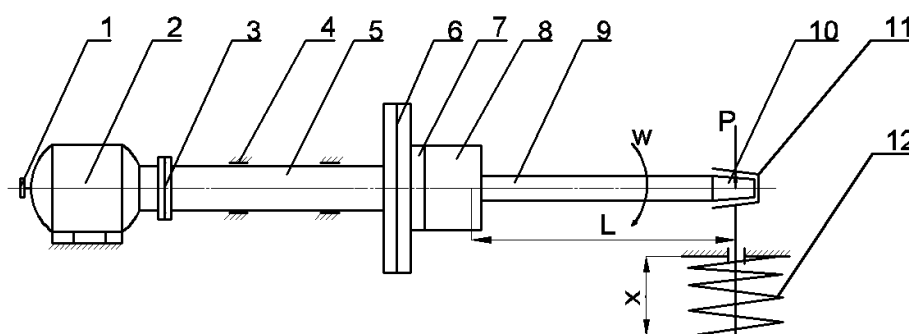


Рисунок 1 – Загальний вигляд силового вузла випробувального стенда УКІ-7



1 – лічильник кількості обертів; 2 – електродвигун; 3 – пружна муфта; 4 – проміжні опори; 5 – приводний вал; 6 – планшайба; 7 – муфта 3-147; 8 – ніпель 3-147; 9 – труба ТБВ 140 “Л”; 10 – конічний хвостовик; 11 – навантажувальна головка; 12 – пружини стиснення

Рисунок 2 – Конструктивна схема навантаження зразка

опор 4, і планшайбу 6, яка слугує маховиком обертальної системи та містить у собі приєднувальний елемент у вигляді муфти 7. Кількість обертів контролюється за допомогою лічильника обертів 1.

Зусилля  $P$  створюється чотирма пружинами стиснення 12 і передається до зразка через навантажувальну головку 11, в підшипниках якої закріплюється приварений до вільного кінця труби конічний хвостовик 10. Величина зусилля  $P$  регулюється зміною зазору  $x$  і контролюється штангенциркулем.

Закріплення зразка в планшайбі здійснюється за допомогою універсального машинного ключа. Момент згвинчування контролюється динамометром.

Амплітуду циклічних напружень, що виникають в небезпечному перерізі буриньної труби, визначаємо за формулою

$$\sigma_a = \frac{PL}{W}, \text{ МПа}, \quad (1)$$

де:  $W = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D}$ ,  $\text{м}^3$  – момент опору небезпечного перерізу труби;

$D, d$  – зовнішній і внутрішній діаметри труби відповідно.

Тарування пружин здійснювалось повірним динамометром. Результати тарування подано на рис. 3.

Як досліджуваний елемент буриньної колони вибрано буриньні труби ТБВ 140×11 “Л”, для яких попередньо визначено параметри кривої корозійної втоми [4]. Ще однією причиною вибору саме цього елемента є наявність у нього слабкої ланки - перший виток різьби, що контактує з ніпелем, по якому здебільшого і відбувається процес руйнування. Це дає можливість проводити спостереження зони майбутнього зламу протягом усього часу проведення експерименту різноманітними технічними засобами. У нашому випадку у ході експерименту проводився постійний облік температури тіла бури-

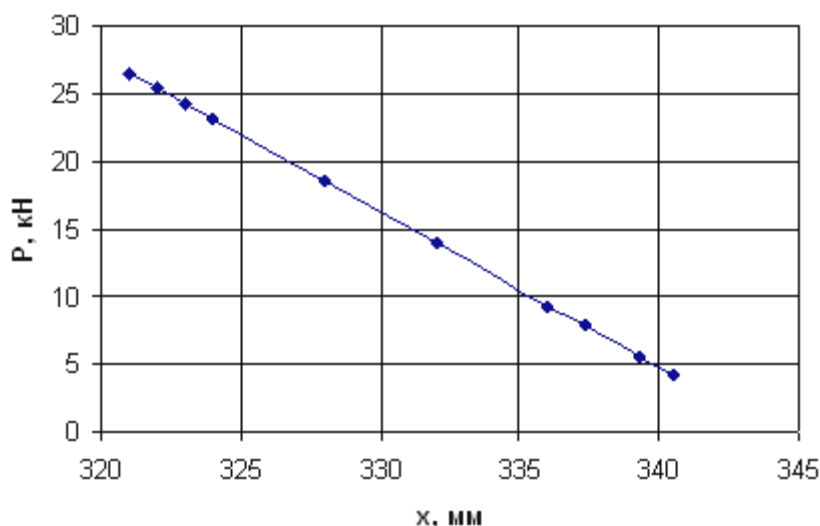


Рисунок 3 – Тарувальний графік навантаження

Таблиця 1 – Силві характеристики ступенів навантажування

Довжина пружини x, мм	Сила P, кН	Напруження у зоні зламу $\sigma_a$ , МПа	Кількість циклів до руйнування $N_i$ , $10^6$
336	9,3	47,2	58,935
332	13,95	70,8	6,319
328	18,5	93,9	1,335
324	23,15	117,5	0,388
323	24,25	123,1	0,301
322	25,45	129,2	0,231
321	26,45	134,2	0,186

льної труби в зоні ймовірного зламу за допомогою спрямованих інфрачервоних променів, тензометрія і періодична ультразвукова дефектоскопія цієї зони. Крім того, проведені раніше дослідження вказують на близькість параметрів опору труб ТБВ 140 звичайній і корозійній втоми [5], що дає змогу використовувати результати втомних досліджень для реальних експлуатаційних умов із впливом корозійного чинника.

Для розрахунків на втомну довговічність використано рівняння кривої корозійної втоми різьбового з'єднання ТБВ 140×11 “Л” [4] у вигляді  $\lg(\sigma_a) = b \lg(N) + a$ :

$$\lg(\sigma_a) = -0,172 \cdot \lg(N) + 3,0369. \quad (2)$$

За тарувальним графіком (див. рис. 3) і рівняннями (1), (2) з умови охоплення області багатоциклової втоми визначено зусилля, які будуть використовуватися як ступені навантажування.

Для бурильної труби ТБВ 140 “Л” у рівнянні (1) значення  $D = 136$  мм;  $d = 91$  мм.

Відповідно,  $W = 1,97 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>.

Результати розрахунків зведені до таблиці 1.

Дослідження втомної довговічності елемента бурильної колони проводилось за багаторівневого навантажування, що близьке до експлуатаційного під час процесу буріння.

Для зразка №1 імітувалась експлуатація труби в бурильній колоні на інтенсивно навантаженій ділянці і напруження ступенів для зразка №1 охоплювало діапазон довговічності від 140 тис. до 569 тис. циклів.

Для зразків №2 і 3 діапазон збільшили до повного охоплення багатоциклової втоми, а саме, від  $1 \times 10^5$  до  $1,5 \times 10^7$  циклів.

Для зразка №2 розміщення ступенів навантажування імітувало експлуатацію труби з умови поступового збільшення інтенсивності навантажування із короткочасними витримками за циклічного низькоамплітудного навантаження.

Для зразка №3 розміщення ступенів навантажування імітувало експлуатацію труби з умови поступового зменшення інтенсивності навантаження з короткочасними ступенями навантаження для зупинки фронту тріщини.

Результати експерименту зведені до таблиці 2.

Експеримент проводили до повної поламки зразків.

Дослідження втомної довговічності елементів бурильних колон потребує і аналізу механізму поширення втомних тріщин. Злами труб (рис. 4) дозволяють отримати інформацію щодо розвитку та розповсюдження втомних тріщин за багаторівневого навантажування, яке більш чітко відповідає реальним умовам експлуатації бурильних труб.

Таблиця 2 – Схеми ступенів навантажування і результати досліджень довговічності зразків

№ зразка	№ ступені	Напруження $\sigma_a$ , МПа	Кількість циклів $n_i$ , тис.	Накопичене пошкодження $d_i$	Примітка
1	1	117,5	212	0,546	
	2	93,9	73	0,055	
	3	117,5	139	0,358	
	4	129,2	50	0,217	
	Усього:			474	1,176
2	1	70,8	77	0,012	
	2	93,9	64	0,048	Відкрутився зразок
	3	70,8	65	0,0102	
	4	93,9	105	0,079	
	5	70,8	31	0,005	
	6	47,2	63	0,001	Маркування
	7	70,8	37	0,006	
	8	93,9	100	0,075	
	9	117,5	238	0,613	
	10	47,2	28	0,0005	Маркування
	11	117,5	92	0,237	
	12	47,2	13	0,0002	Маркування
	13	117,5	23	0,059	
	14	134,2	69	0,37	
Усього:			1005	1,5159	
3	1	129,2	70	0,303	
	2	123,1	70	0,233	
	3	93,9	30	0,022	Маркування
	4	117,5	50	0,129	
	5	70,8	30	0,005	Маркування
	6	117,5	40	0,103	
	7	47,2	110	0,002	
	8	70,8	15	0,0024	
Усього:			415	0,7994	

Для зразка №1 характерною є кільцева тріщина, яка нерівномірно зростала з багатьох осередків (рис. 4, а).

Злам же зразка № 2 засвідчує півеліпсоїдний фронт тріщини з одним осередком (рис. 4, б). Хоча довговічність даного зразка вища, небезпека такого зруйнування в умовах експлуатації є більшою з причини значно меншої відносної площі перерізу зони поширення тріщини та її чіткої локалізації.

На нашу думку, зміна механізму поширення тріщини з кільцевої на півеліпсоїдну пояснюється не зміною схеми багатоступеневого навантажування, а високим ексцентриситетом тіла труби зразка № 2. Методика випробовувань зразка передбачає обточування хвостовика труби на конус безпосередньо після його закріплення в планшайбі за допомогою токарного різця, встановленого в супорті токарного верстата (див. рис. 1). Але й цим неможливо уникнути динамічного дисбалансу труби. За такої схеми навантажування установки ексцентриситет призвів до посиленого одностороннього

"биття" труби в навантажувальній головці і, відповідно, до збільшення напружень на локальній ділянці. Це підтверджується розміщенням тріщини саме на лінії найбільшого ексцентриситету. Посилене биття призвело навіть до аварійного відкручування труби (див. табл. 2).

Особливістю зламу зразка № 3 є надзвичайно мала зона доламу (рис. 4, в). Це пояснюється схемою навантажування даного зразка, яка передбачала поступове зниження амплітуди навантаження. Тріщина кільцева, але, на відміну від зразка № 1, достатньо рівномірна і згладжена, хоча й починалася з одного осередку (нижня права ділянка зламу). На даній ділянці спостерігаються маркувальні лінії зупинки тріщини, які свідчать про зміну фронту росту тріщини.

Під час досліджень на втомну довговічність труб ТБВ 140 Л проводились записи температури зони майбутнього зламу зразка труби в залежності від часу проведення експерименту за допомогою пірометра FLUKE 574.



а - №1; б - №2; в - №3

**Рисунок 4 – Загальний вигляд зламів зразків труб**

Досліджуючи зразок №1, на дисплеї пірометра спостерігали два стрибки температури. Різниця максимальних та мінімальних значень температури становила відповідно 4,5 і 8,5°C. Оброблені з допомогою комп'ютерного устаткування дані зображено на рис. 5, а, б. На нашу думку, миттєве підвищення температури пояснюється швидким вивільненням енергії руйнування під час стрибкоподібного об'єднання втомних тріщин, що поширювались від окремих осередків руйнування.

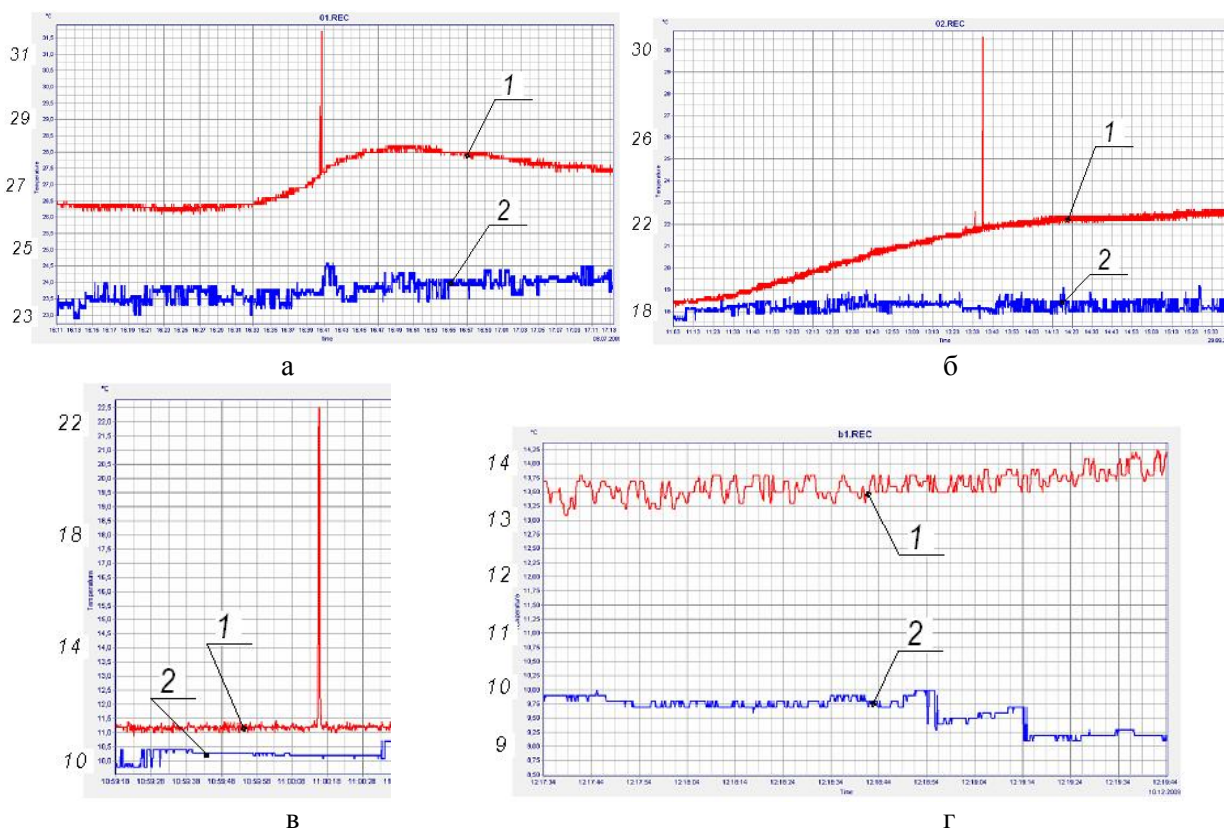
Для зразка № 2 спостерігався тільки один суттєвий стрибок температури. Різниця максимальної та мінімальної позначок температури складала приблизно 11,25°C (рис. 5, в). Даний стрибок відбувся за прискореного розвитку втомної тріщини перед остаточним руйнуванням (доламом), що підтверджується проведенням ультразвукової дефектоскопії з допомогою дефектоскопа ДІО-562 (рис. 6).

Для зразка №3 спостерігали незначне коливання зростаючої температури тіла труби в зоні ймовірного зламу. Різниця максимальної та мінімальної позначок температури складала в середньому 0,6°C (рис. 5, г). Періодична ультразвукова дефектоскопія зони руйнування вказала на стабільне підростання втомних тріщин (рис. 6).

Накопичене пошкодження обчислювали за рівнянням  $d = \sum \frac{n_i}{N_i}$ , де  $n_i$  – кількість циклів навантаження (табл. 2),  $N_i$  – кількість циклів до руйнування, розрахована за рівнянням (2) (табл. 1). Усі зразки показали різну довговічність. Так, за лінійною гіпотезою накопичення втомного пошкодження Майнера, для зразка № 1 відносна довговічність  $d=1,18$ , для зразка № 2 – 1,52, для зразка № 3 – 0,8.

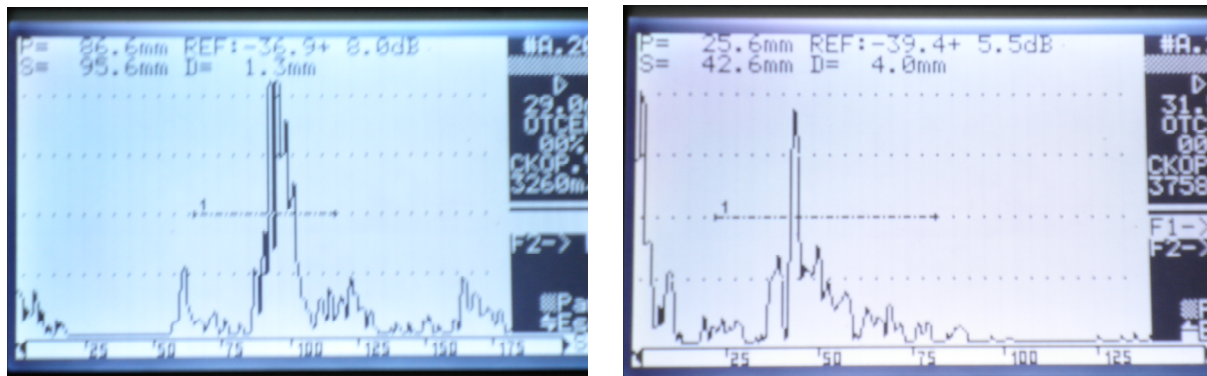
Таким чином, за результатами експерименту зроблено висновок про вплив послідовності ступенів навантаження на втомну довговічність труби. Так, найменшу довговічність отримано за схеми навантажування з послідовним зменшенням інтенсивності навантаження, – навіть до рівня довговічності 15 млн. циклів (зразок № 3), середню – за постійної роботи в ускладнених умовах (зразок № 1), найбільшу – за схеми навантажування з послідовним збільшенням інтенсивності навантаження, навіть не зважаючи на додаткові напруження від "биття" і наявність півеліпсоїдної тріщини (зразок № 2).

Спостережене явище різниці довговічностей труб пояснюється тим, що кінетика накопичення втомних пошкоджень для матеріалів



а, б – зразок №1; в – зразок №2; г – зразок №3;  
1 – температура зони зламу; 2 – температура повітря робочого середовища

**Рисунок 5 – Температурні записи, отримані з допомогою пірметра FLUKE 574**



**Рисунок 6 – Результати ультразвукової дефектоскопії**

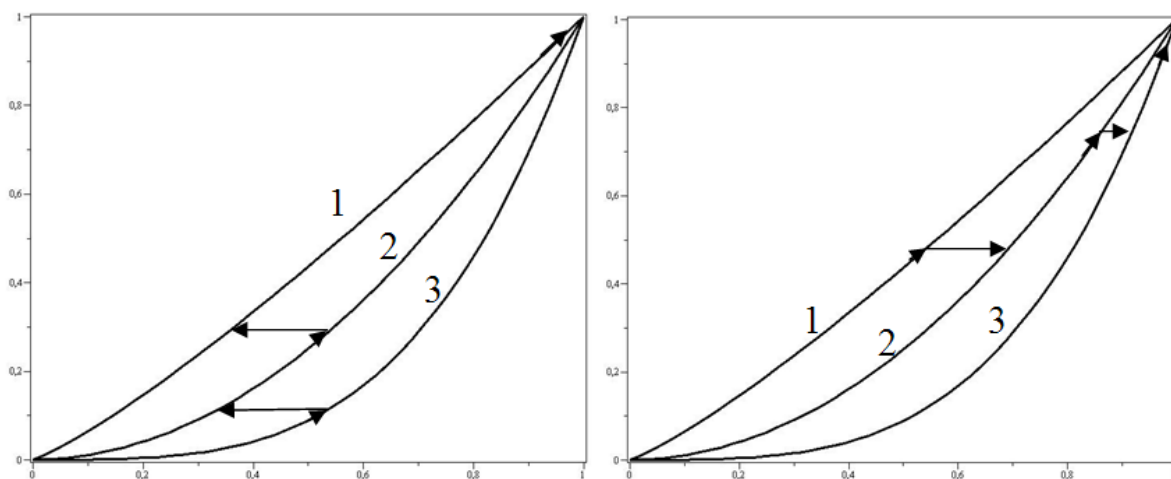
елементів бурильної колони, як і для усіх сталей [6], залежить від рівня навантаженості. Принципову картину видно на рис. 7, де безрозмірними координатами є відпрацьований ресурс вздовж осі x і відносне накопичене пошкодження вздовж осі y.

Як бачимо з рис. 7, а, за поступового збільшення навантаження відбувається гальмування процесу пошкодження. Так, за наведеним на рисунку прикладом загальна довговічність буде 1,35 і складається з 0,55 на рівні 3, 0,2 на рівні 2 і 0,6 на рівні 1. По іншому відбувається процес втомного пошкодження за поступового зменшення навантаження (рис. 7, б). Загальна довговічність складатиме всього 0,8: 0,55 – на рівні 1; 0,15 – на рівні 2 і 0,1 – на рівні 3. Ще

меншу довговічність отримали б за умови швидшого переходу на нижчий рівень (рис. 7, б). Відпрацьовання бурильних труб здебільшого відбувається за схемою рис. 7, б (зразок № 3).

Таким чином, проведені дослідження на втомну довговічність бурильних труб вказують на значні резерви підвищення експлуатаційної надійності і ефективності використання елементів бурильної колони за умови врахування послідовності рівнів їх навантаженості.

Майбутні дослідження будуть спрямовані на вплив багатоступеневого навантажування на мікроефективність зародження та підростання втомних тріщин за допомогою проведення електронно-фрактографічного аналізу зламів бурильних труб.



а – поступове збільшення навантаження (зразок №2);  
 б – поступове зменшення навантаження (зразок №3);  
 1 – високе навантаження; 2 – середнє навантаження; 3 – низьке навантаження

**Рисунок 7 – Схема впливу рівня навантаження на кінетику втомного пошкодження**

### Література

1 Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1988. – Т.10: Міцність та довговічність нафтогазового обладнання; під ред. В.І.Похмурського, Є.І.Крижанівського. – Львів–Івано-Франківськ: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2006. – 1193 с.

2 Дослідження кінетики втомного пошкодження матеріалу буриньних труб в умовах блокового навантажування / В.М.Івасів, Я.Т.Федорович, В.І.Артим та ін. // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2003. – № 1. – С.39-43.

3 Розрахунок втомної довговічності замкового з'єднання буриньних труб 3-147 при багатоступеневому навантажуванні / В.М.Івасів, В.І.Артим, М.М.Яворський та ін.// Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 2. – С. 116-120.

4 Янышевский М.Я. Прогнозирование усталостной долговечности буриньных колонн: автореф. дисс.на соиск. науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.05.12 "Машины нефтяной и газовой промышленности" / М.Я. Янышевский. – Москва, 1989. – 24 с.

5 Пришляк А.М. Исследование выносливости буриньных труб и некоторые методы повышения их работоспособности: автореф. дисс. канд. тех. наук: спец. 05.05.12 "Машины нефтяной и газовой промышленности" / А.М.Пришляк. – Москва, 1976. – 18 с.

6 Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
 11.02.10  
 Рекомендована до друку професором  
 Івасівим В.М.*