

УДК 620.174.24:620.178:746:22

Петрина Ю.Д.¹, д.т.н., Петрина Д.Ю.¹, к.т.н., Лукань Т.В.¹, Сидор П.Я.², к.т.н.

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

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

ЗАКОНОМІРНОСТІ ПОШИРЕННЯ ТРІЩИН В БУРИЛЬНИХ ТРУБАХ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

У даній статті значна увага приділена аналізу поширення втомних і корозійно-втомних тріщин у бурильних трубах.

Ключові слова: сталь групи міцності D, алюмінієвий сплав D16-T, зародження та поширення тріщини, маркування, кінетичні діаграми втоми.

В данной статье значительное внимание уделено анализу распространения усталостных и коррозионно-усталостных трещин в бурильных трубах.

Ключевые слова: сталь группы прочности D, алюминиевый сплав D16-T, зарождение и распространение трещины, маркировка, кинетические диаграммы усталости

In this article special attention is attended to analysis of fatigue and corrosion-fatigue cracks propagation in drilling pipes.

Keywords: steel of durability group D, aluminium alloy D16-T, initiation and propagation crack, mark, fatigue kinetic diagram.

Вирішення важливої державної проблеми забезпечення паливно-енергетичного комплексу сировиною вимагає для цієї галузі розробки і впровадження високоефективного устаткування. Особливу роль серед нього займають бурильні труби - безшовний виріб кільцевого перерізу, одержаний протягуванням. Труби з'єднуються між собою за допомогою бурильних замків, утворюючи бурильні колони.

Аварії бурильних колон при бурінні свердловин відбуваються дуже часто, при чому вони виникають неочікувано і вимагають значних затрат для ліквідації їх наслідків. Найбільш поширеними серед таких відмов є втомне та корозійно-втомне пошкодження. На долю корозійно-втомних руйнувань припадає за даними різних досліджень біля 80% [1-3]. Тому дане питання на теперішній час має велике актуальне значення та важливість із практичної точки зору.

Зразки для дослідження вирізали з бурильних труб, матеріал яких відповідав механічним властивостям сталі групи міцності D. Згідно ГОСТ631-75 названа сталь має границю міцності не менше 650 МПа, а границю плинності не менше 380 МПа, ударну в'язкість $KCU \geq 400$ кДж/м², відносне видовження становило 12...16%, а відносне звуження - $\psi \geq 40\%$.

Вивченню підлягали також легкоплавкі бурильні труби. Для їх виготовлення застосовується дюралюміній – сплав алюмінію з міддю (3,8...4,9%), магнієм (1,2...1,8%) і марганцем (0,3...0,9%). Сплав D16-T набуває таких фізико-механічних властивостей (див. табл.1) [4].

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості сплаву D16-T

Густина, кг/м ³	2,78* 10 ³
Модуль пружності, МПа	72*10 ³
Коефіцієнт лінійного розширення	22,7*10 ⁻⁶
Твердість по Брінеллю, МПа	1200
Ударна в'язкість. кДж/м ²	170
Границя міцності, МПа	470
Границя пружності, МПа	330
Відносне видовження, %	10

Практика експлуатації бурильних колон показує, що бурильні труби працюють у свердловині з тріщинами [5-7]. Згідно даних [5] період до початку утворення тріщини складав приблизно 20% ресурсу. Випробування замкових різьбових з'єднань 3-121 показало, що тріщина площею 15мм² відповідала часу відпрацювання з'єднання 27% ресурсу [6]. Вивчення фрактографій зламів свідчать про широку різновидність фронтів розвитку тріщин [6,7].

Тому останнім часом значна увага приділяється дослідженню кінетики поширення тріщин при циклічних навантаженнях. Такі оцінки проводять, як правило, на зразках балкового типу, які дають можливість безпосереднього спостереження за ростом тріщини. Циліндричні зразки не дозволяють

контролювати ріст тріщини в глибину матеріалу. Разом з тим вони широко застосовуються при втомних дослідженнях і відповідають роботі багаточисельних виробів. Тому розробка методики дослідження кінетики росту тріщини в таких зразках має велике значення. Нами розроблений спосіб вивчення кінетики поширення тріщин в циліндричних зразках при циклічному навантаженні згиним з обертанням.

Встановлено, що використання певних режимів випробувань (малоциклова втома при частоті навантаження ~ 50 цикл/хв) забезпечує постійний кільцевий осесиметричний розвиток втомної тріщини в глибину. При цьому використовували маркування, яке здійснювали шляхом навантаження зразків пониженим навантаженням через певні проміжки часу. Це дає можливість отримати у втомних зломах тонкого і чіткого маркувального кільця. Понижене навантаження складало 0,2...0,3 від основного. Величину навантаження маркування та число циклів його прикладання встановлюють експериментально для кожного матеріалу та розміру зразка. Такі рекомендації використані нами при втомних випробуваннях циліндричних зразків у присутності рідких робочих середовищах.

Ефективність запропонованої методики перевіряли на термічно обробленій трубній сталі групи міцності Д (гартування від 840°C , відпуск при 450°C). Циліндричний зразок з кільцевим концентратором підлягав круговому згину на модернізованій випробувальній машині НУ-5 при частоті навантаження 49об/хв. Та згинаючому моменті в робочому перерізі зразка $M=50\text{Нм}$. Зовнішній діаметр зразків 10мм, а діаметр нетто-січення по кільцевому концентратору 9мм.

При втомних випробуваннях в присутності рідкого середовища на середній частині зразка, яка включає концентратор, закріплювали герметичний резервуар, наповнений робочим середовищем, в якості якого застосовували 3%-ний розчин NaCl у водопровідній воді.

Перед випробуваннями складали програму переривистого навантаження зразка, яка дала би можливість установити залежність між глибиною тріщини та числом циклів. Маркування проводили при згинаючому моменті в робочому перерізі зразка $M=15\text{Нм}$ протягом 4500 циклів. Це не викликало суттєвого втомного пошкодження і забезпечувало отримання чіткого і тонкого маркувального кільця (рис 1).



Рис.1. Вид зламу маркувального зразка.

В окремих випадках маркувальні кільця виявлялися тільки за допомогою інструментального мікроскопу, на якому вимірювали глибину тріщини. Потім до зразка знову прикладали основне навантаження і продовжували випробування до наступного перериву відповідно наміченій програмі.

Результати випробувань представлені на рис.2.

Щоб оцінити вклад часу зародження та поширення тріщини в загальну довговічність зразків за період зародження тріщини прийняли умовно число циклів тренування, необхідне для утворення втомної тріщини певної невеликої глибини. 3%-ний розчин NaCl у водопровідній воді зменшує як період зародження тріщини, так і період її поширення. Під дією рідких робочих середовищ тривалість періоду поширення тріщини змінюється більш радикально порівняно з періодом зародження. Ріст тріщини під дією середовища полегшується, а мікробудова зламу має більш крихкий характер, що свідчить про зменшення ефективної енергії утворення нових поверхонь розділу.

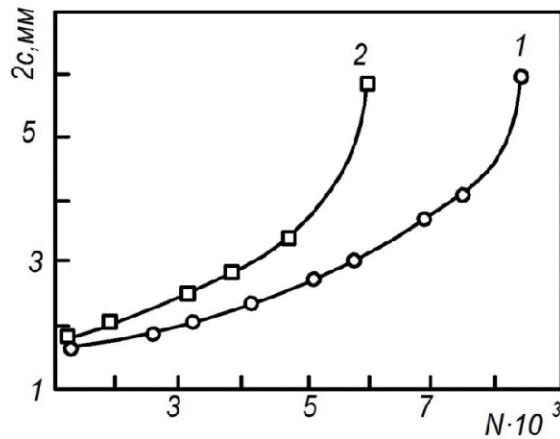


Рис.2. Залежність між глибиною тріщини $2c$ і числом циклів навантаження N при випробуваннях на повітрі (1) і 3%-ному розчині NaCl (2) у водопровідній воді.

Дюралюмінієві сплави завдяки ряду переваг (мала питома вага, висока міцність, корозійна стійкість) отримали все більш широке застосування в різних областях техніки, в тому числі у виробництві бурильних труб. Тому останнім часом значно зростає кількість досліджень з вивчення їх механічних властивостей. Що торкається тріщиностійкості дюралюмінієвих сплавів, то таких даних ще зовсім мало і вони часто суперечливі.

Дослідження втомних характеристик сплаву Д16-Т проводили на циліндричних зразках, вирізаних з листа вздовж і поперек напрямку прокатки (рис 3а), а також виготовлених з кованого прутка. Вибір циліндричних зразків був обумовлений їх відповідністю конфігурації бурильних труб.

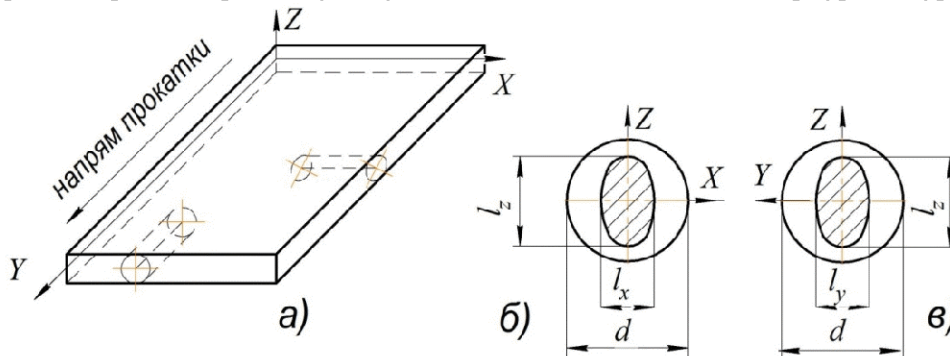


Рис.3. Схема вирізки зразків з листового матеріалу (а) і види зламів зразків, вирізаних вздовж (б) і поперек (в) листа.

Методика вивчення кінетики поширення втомних тріщин була така, як і для сталі групи міцності Д. Методику маркування уточняли для випадку випробувань дюралюмінієвого сплаву Д16-Т.

Амплітудні значення коефіцієнтів інтенсивності напружень ΔK підраховували за методикою [8].

Число циклів навантаження N , необхідне для руйнування зразків, виготовлених з дюралюмінію, залежить від напрямку вирізки зразків, від робочого середовища (див. таблицю 2).

Таблиця 2

Залежність числа циклів до руйнування від характеру вирізки зразків і середовища випробувань

Середовище	Вирізка поперек листа	Вирізка вздовж листа	Зразки з кованого прутка
	Число циклів до руйнування		
Повітря	10200	2210	4330
3%-ний розчин NaCl у воді	8500	1770	3820

Встановлено, що довговічність зразків з тріщинами вздовж волокна більш як в 4 рази вища, ніж у зразків з тріщинами поперек волокна. Таким чином, тут зафіксовано явище так званої «зворотної» анізотропії, на відміну від прямої, характерної для сталей [9]. Довговічність зразків, виготовлених з кованого прутка, також була вище (приблизно в 2 рази), ніж у зразків, вирізаних в повздовжньому

напрямку листа. Наявність 3%-ного розчину NaCl у вершині концентратора приводить до деякого зниження довговічності N.

Заслугує уваги вивчення впливу робочого середовища і анізотропії матеріалу на кінетику поширення тріщини. Таке дослідження проведено для трьох головних осей листа (рис.4а): X - в напрямку, паралельному ширині листа; Y - в напрямку, паралельному довжині листа, Z - в напрямку, перпендикулярному площині листа.

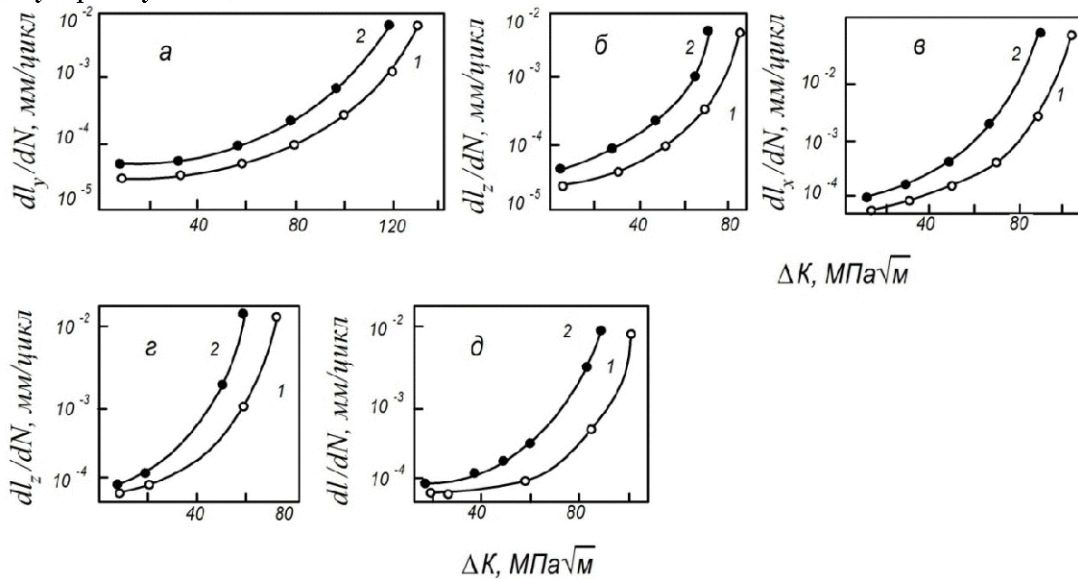


Рис.4. Кінетичні діаграми втомні зразків (сплав Д16-Т), вирізаних в поперечному (а, б) і повздовжньому (в, г) напрямках листа, а також виготовлених з кованого прутка (д): 1- випробування на повітрі; 2- випробування в 3%-ному розчині NaCl у водопровідній воді.

Відзначимо, що контури поширення тріщин і зони доламу зразків, вирізаних з листа, мали еліпсоподібну форму (рис 3б і 3в). в той же час при випробуванні зразків, виготовлених з кованого прутка, отримували чіткі маркувальні кільця та зони доламу в вигляді круга.

Глибину втомних тріщин у зразках, вирізаних вздовж листа, визначали в напрямках X і Z (рис. 3б), а у зразків, вирізаних поперек листа, - в напрямках Y і Z (рис. 3в). Як випливає з рисунка, критичні глибини втомних тріщин в першому випадку дорівнюють відповідно $l_x=d-e_x$ і $l_z=d-e_z$, а в другому $l_y=d-e_y$ і $l_z=d-e_z$. Результати випробувань показані на рис.4. Їх аналіз свідчить про те, що зразки, вирізані поперек напрямку листа, мають максимальний опір поширенню тріщини. Тріщиностійкість зразків, вирізаних вздовж листа, найнижча. У всіх випадках при випробуваннях у 3%-ному розчині NaCl у водопровідній воді ріст тріщини полегшується, що свідчить про зменшення ефективної енергії утворення нових поверхонь розділу при втомі.

Інформаційні джерела

1. Крижанівський Є.І. Попередження втомних руйнувань бурильних колон/ Є.І. Крижанівський//Нафтова і газова промисловість.-1992.-№2.-с.27-28.
2. Некоторые вопросы аварийности бурильных труб/А.Ш.Янтурин, Г.С. Осин, Ю.А. Подалов, В.Л. Папировский// Э.И. Машины и нефтяное оборудование.-М., 1984. Вып.10.-с.12-15.
3. Работоспособность бурильных труб в условиях Прикарпатья/И.С. Андрийчук, В.Г.Пелех, Г.П.Бандурин, Б.ДГ. Щербан//Нефтяная и газовая промышленность.-1982.-№3.-с.17-19.
4. Баграмов Р.А. Буровые машины и комплексы/Р.А. Баграмов.-М.:Недра,1988.-501с.
5. Josten M.W. Study jokows how to predict accumulated drill pipes fatigue/M.W.Josten, J.Shute, R.A. Ferguson//World oil.-1985.-vol.201.-№5.-P.65-70.
6. Исследование кинетики усталостного повреждения крупных резьбовых соединений/В.М. Івасив, М.В. Лисканич, В.А. Турчин, Д.И. Хома// Прикладная механика.-1985.-Т.21.-№10.-с.11-17.
7. Ляпков А.А. Долговечность бурильных труб с усталостными трещинами/А.А. Ляпков// Разведка и охрана недр.-1982.-№5.-с.34-36.
8. ГОСТ25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.-М.: Издательство стандартов, 1985.-62с.
9. Степнов М.Н. Усталость лёгких конструкционных сплавов/М.Н. Степнов, Е.В. Гиацинтов.-М.:Машиностроение, 1973.-315с.