

УДК 620.191.33: 620.193

Є.І. Крижанівський, О.Ю. Витязь, Р.С. Грабовський

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ОЦІНКА УМОВ РУЙНУВАННЯ ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТОВАНИХ ТРУБ БУРИЛЬНИХ КОЛОН ПРИ СПУСКО-ПІДЙІМАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЯХ

Здійснено експериментальну оцінку силового критерію руйнування металу тривало експлуатованих бурильних труб. Визначено умови, за яких при спуско-підйімальних операціях можливе руйнування тривало експлуатованих бурильних труб, що містить зовнішню або внутрішню поперечну кільцеву тріщину. Встановлено взаємозв'язок критичних зовнішньої або внутрішньої поперечних кільцевих тріщин у бурильних трубах із вагою бурильної колони. Показано, що внутрішні поперечні кільцеві тріщини при спуско-підйімальних операціях бурильних колон на глибинах понад 3 км є більш небезпечними, ніж зовнішні від зовнішніх, тоді як в інтервалі глибин від 1 км до 3 км більш небезпечними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини.

Ключові слова: критичний коефіцієнт інтенсивності напружень, критичний розмір зовнішньої або внутрішньої поперечної кільцевої тріщини, характеристична глибина зовнішньої або внутрішньої поперечної кільцевої тріщини.

Форм. 11. Табл. 4. Рис. 10. Літ. 15.

Е.И. Крыжановский, О.Ю. Витязь, Р.С. Грабовский

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ РАЗРУШЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРОВАННЫХ ТРУБ БУРИЛЬНЫХ КОЛОНН ПРИ СПУСКО-ПОДЪЕМНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

Проведена экспериментальная оценка силового критерия разрушения металла длительно эксплуатируемых бурильных труб. Определены условия, при которых при спуско-подъемных операциях возможны разрушения длительно эксплуатируемых бурильных труб, содержащих наружную или внутреннюю поперечную кольцевую трещину. Установлена взаимосвязь между фактом возникновения критических внешних (или внутренних) поперечных кольцевых трещин в бурильных трубах и весом бурильной колонны. Показано, что внутренние поперечные кольцевые трещины при спуско-подъемных операциях бурильных колонн на глубинах свыше 3 км являются более опасными, чем внешние, тогда как в интервале глубин от 1 км до 3 км более опасными являются внешние поперечные кольцевые трещины.

Ключевые слова: критический коэффициент интенсивности напряжений, критический размер внешней или внутренней поперечной кольцевой трещины, характеристическая глубина внешней или внутренней поперечной кольцевой трещины.

Ye.I. Kryzhanivskyi, O.Y. Vytyaz, R.S. Hrabovskyi

ESTIMATION OF COLLAPSE CONDITIONS OF LONG-TERM OPERATED DRILL PIPES DURING TRIPPING

An experimental assessment of the force criterion for metal failure of long-term drill pipes operation was carried out. Defined were the conditions under which during tripping the collapse of long-term operated drill pipes is possible when they contain an external or internal circular cross crack. The interrelation of critical external or internal circular cross crack in drill pipes to the drilling string weight was established.

It was shown that the internal cross cracks during drilling string tripping at depths exceeding 3000 m are more dangerous than the external ones, whereas within a range of 1000-3000 m the external circular cross cracks are more dangerous.

Key words: critical factor of stress intensity, critical size of the external or internal circular cross cracks, typical depth of external or internal circular cross crack.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день проблеми, пов'язані із збільшенням обсягів видобування нафти та газу в Україні є стратегічними, оскільки забезпечення держави власними енергоресурсами є надзвичайно важливим компонентом її національної безпеки. В Україні видобуток нафти становить 10-12%, а природного газу – 46-48% від загальнодержавних потреб [13]. Для збільшення обсягів видобування вуглеводневих ресурсів необхідно переходити до буріння глибоких та надглибоких свердловин, оскільки на великій глибині (близько 6,5-7 тисяч метрів) на території Дніпрово-Донецької западини і Карпатської нафтогазової провінції виявлено величезні запаси нафти і газу. Проте, як свідчить практика [4, 8], буріння на таких глибинах в ускладнених умовах призводить до суттєвого збільшення кількості аварій, пов'язаних з виходом з ладу елементів бурових колон. Так, в інтервалі буріння 2500-4500 м кількість відмов зростає у 4,8-5 разів, а в інтервалі 4500-5000 м – в 9,8 рази.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На практиці фіксуються випадки руйнування бурильної колони при бурінні свердловин [1, 2, 8]. При цьому значна частина випадків руйнування тіла труби (38%) трапляються на зварних стиках, в трубній різьбі або по тілу труби в поперечному

напрямі. Очевидно, що характер такого руйнування визначається доміантним впливом відповідних силових факторів, тобто величиною, напрямом та характером експлуатаційних навантажень, що виникають у процесі спуско-підймальних операцій.

У переважній більшості випадків неконтрольоване поперечне руйнування тіла труби викликане дією значних втомних та статичних навантажень, високими робочими тисками та критичними розмірами зовнішньої або внутрішньої поперечної кільцевої тріщини, що зароджується та розвивається в місцях концентраторів напружень через пошкодження роторними клинами або наявності в металі труби неоднорідностей структури (неметалевих включень, раковин, закатів та волосин) [1], а також у разі порушення технології спуско-підймальних операцій, наприклад підймання на одному стропі [2]. Причиною поломок бурильних труб по тілу можуть бути також і корозійні виразки та мікротріщини на внутрішній або зовнішній поверхні, які також призводять до поширення тріщин. Крім того, поперечне руйнування спостерігається також біля зварених у стик труб у зоні зварювання або в зоні термічного впливу [8]. Під час роторного буріння найбільш часто трапляється поперечне руйнування тіла труби в з'єднанні по потовщеному кінці, що становить 60-70 % від загальної кількості аварій.

Таким чином, аналіз раптових відмов, пов'язаних з бурильною колоною, дає підстави виокремити низку чинників, поєднання впливів від яких у більшості випадків і створює умови для виникнення аварійних ситуацій:

- умови навантаження;
- технічні та експлуатаційні концентратори напружень.

Забезпечення надійної та безпечної експлуатації бурильних колон вимагає підвищеної уваги при оцінці та врахуванні вищезгаданих чинників і прийнятті відповідного інженерного (управлінського) рішення.

Оскільки в процесі спуско-підймальних операцій, спричинених впливом статичних навантажень (ваги колони), найбільш поширеним є руйнування бурильної колони в поперечному перерізі шляхом відриву, то важливим є визначення параметрів руйнування.

У зв'язку з цим розрахунково-експериментальна оцінка умов, при яких потенційно можливе поперечне руйнування елементів бурильної колони, є актуальною науково-технічною проблемою.

Метою дослідження є оцінка умов руйнування тривало експлуатованих бурильних труб із наявними зовнішніми або внутрішніми поперечними кільцевими тріщинами при спуско-підймальних операціях в інтервалі буріння 1000-6000 м, ґрунтуючись на підходах механіки руйнування.

Основні результати дослідження. Об'єкт та методична процедура розрахунків та досліджень. Утворення на зовнішній або внутрішній поверхні як бурильної труби, так і елементів їх різьбових з'єднань корозійно-втомних тріщин є причиною виникнення небезпечного стану, що в окремих випадках [3, 7, 9] спричинює їх руйнування. Згідно з даними діагностичного контролю такі тріщини зароджуються на дні корозійних виразок, технологічних рисок, біля концентраторів напружень (наприклад, впадина першого витка як зовнішньої, так і внутрішньої різьби замкового з'єднання) або в зоні термічного впливу бурильних труб із привареними замками. Спочатку вони набувають півеліптичної форми (a/c) з розмірами півосей a та c , однак, розвиваючись в процесі експлуатації, утворюють кільцеві тріщини глибиною (a/t).

У сучасній інженерній практиці характеристики тріщиностійкості металів розглядають як найбільш адекватну основу для оцінювання залишкового ресурсу та умов руйнування елементів конструкцій у експлуатаційних середовищах. У зв'язку з цим методична процедура для оцінки умов руйнування бурильних труб полягає, по-перше, у адекватному виборі відповідної розрахункової схеми, яка описує умови, за яких можливе руйнування бурильних колон, по-друге, у одержанні експериментальних даних, які відображають умови руйнування експлуатованого металу бурильних труб.

Відомо [9], що руйнування елемента конструкції з наявною тріщиною виникає тоді, коли біля вершини тріщини в межах достатньо великої області напруження перевищує граничне значення. Оскільки коефіцієнт інтенсивності напружень K_I характеризує поле напружень, то критерій граничної рівноваги тіла з тріщиною можна записати так:

$$K_I = K_{IC} \quad (1)$$

Величина K_{IC} характеризує опір твердого тіла поширенню в ньому тріщини і визначає тріщиностійкість при плоскій деформації за статичного навантаження елемента конструкції.

Важливою є також оцінка міцності та ризику руйнування елемента конструкції на основі показника "опірності елемента конструкції росту тріщини". Глибина тріщини $(a/t)^*$, при якій різко зростає швидкість (dK_I/da) зміни коефіцієнта інтенсивності напружень K_I [9], системи "метал конструкції – середовище" є характерним параметром, під час досягнення якого різко зростає ймовірність її руйнування. У цьому випадку будується безрозмірна залежність типу

$$\frac{\sqrt{t}}{\sigma} \frac{dK_I}{da} = F\left(\frac{a}{t}\right), \quad (2)$$

де σ – прикладене зовнішнє навантаження, t – товщина елемента конструкції у місці руйнування.

Характеристична глибина тріщини $(a/t)^*$ визначається за методикою [9]. Поточні значення $dK_I/da = F(a/t)$ (рис. 1) підраховують з кроком $a/t = 0,01$ та визначають три точки, в околі яких виконувались умови:

$$\begin{aligned} (dK_I/da)_{i+1} - (dK_I/da)_i &= 0,01 \rightarrow (a/t)_1 \rightarrow 1; \\ (dK_I/da)_{i+1} - (dK_I/da)_i &= 0,10 \rightarrow (a/t)_2 \rightarrow 2; \\ (dK_I/da)_{i+1} - (dK_I/da)_i &= 1,00 \rightarrow (a/t)_3 \rightarrow 3. \end{aligned} \quad (3)$$

За аргументами цих точок визначають координати точок L $(0,5 \cdot [(a/t)_1 + (a/t)_2], (dK/da)_L)$ та M $(0,5 \cdot [(a/t)_2 + (a/t)_3], (dK/da)_M)$. У визначених точка L і M (див. рис. 1) проводять дотичні. Аргументом точки перетину цих дотичних є значення глибини критичного дефекту $(a/t)^*$, при якому різко зростає швидкість зміни (dK_I/da) коефіцієнта інтенсивності напружень K_I .

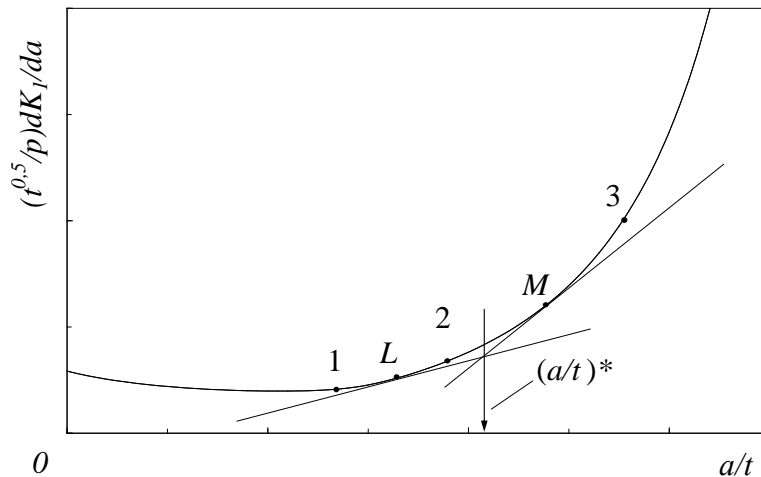


Рис. 1. - Загальна схема визначення характеристичної глибини поперечної кільцевої тріщини $(a/t)^*$ [9]

Під час експериментального визначення умов руйнування необхідно врахувати той факт, що руйнування металу бурильних труб шляхом розвитку поперечних замкнених тріщин відбувається в умовах плоского напруженого стану. В цьому випадку руйнування металу бурильних колон необхідно оцінювати за енергетичним [11] критерієм: тріщина починає рости, якщо інтенсивність енергії J , що звільнилася, досягає критичної величини J_c .

$$J_* = J_c. \quad (4)$$

Використаємо методику [10], яка дослідним шляхом дозволяє визначити критичну тріщиностійкість J_c металу бурильних колон на основі експериментально одержаної діаграми руйнування зразків "зусилля-прогин". Значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Jc} обчислимо за співвідношенням [6]

$$K_{Jc} = \sqrt{\frac{J_c \cdot E}{(1 - \mu^2)}}, \quad (5)$$

де J_{Jc} – критична тріщиностійкість; E – модуль Юнга ($E = 10^{11}$ Па);
 μ – коефіцієнт Пуассона (для низьколегованих сталей $\mu = 0,3$).

Визначення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Jc} металу тривало експлуатованих бурильних труб. Матеріалом дослідження є фрагменти двох бурильних труб ТБПВ з умовним діаметром 127 мм, які понад 17 років використовувалися для буріння свердловин нафтогазових родовищ Західної України. Хімічний склад досліджуваних сталей наведено в табл. 1.

Таблиця 1.

Хімічний склад досліджуваних сталей бурильних труб								
Сталь 36Г2С								
Масова частка елементів, %								
C	Mn	Si	V	Cu	Al	Ni	S_{max}	P_{max}
0,38	1,52	0,92	0,09	0,13	0,04	0,09	0,018	0,016
Сталь 45								
Масова частка елементів, %								
C	Mn	Si	V	Cu	Al	Ni	S_{max}	P_{max}
0,47	0,82	0,26	0,10	0,09	0,15	0,07	0,016	0,018

Механічні характеристики тривало експлуатованих сталей бурильних труб (див. табл. 2) визначались за стандартною процедурою [14] випробувань п'ятикратних циліндричних зразків на розтяг (рис. 2).

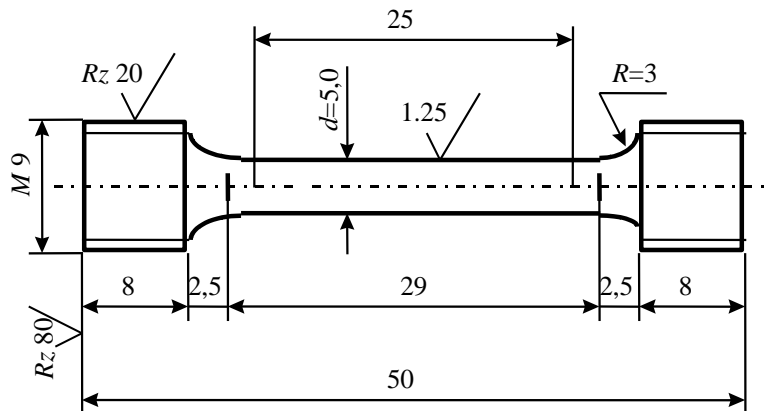


Рис. 2. - Зразок для визначення стандартних механічних характеристик міцності та пластичності досліджуваних сталей [14]

Таблиця 2.

Механічні характеристики сталей бурильних труб [авторська розробка]						
Сталь	Група міцності	Тривалість експлуатації, рік	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
36Г2С	Л	23	790,0	605,0	12,5	27,0
45	К	17	685,0	462,5	12,0	34,5



Рис. 3. - Загальний вигляд зразка (а) та площі деформованої поверхні зразка (б) після експерименту з дослідження умов спонтанного руйнування тривало експлуатованих бурильних труб

Оцінку умов, за яких відбувається руйнування металу труб бурильної колони, здійснювали за методикою [10, 12], експериментально визначаючи величину J_{Ic} . Для цього вирізали по п'ять зразків з фрагментів бурильної труби групи міцності "Л" розміром 200,0×10,0×8,0 мм та з фрагментів бурильної труби групи міцності "К" розміром 200,0×10,0×8,4 мм. При цьому оцінювали роботу А (рис. 4), витрачену на деформування зразка з наведеною тріщиною l_{cep} (рис. 3, а) як елемента конструкції, при якій він втрачає свої несучі властивості, віднесену до нетто площі деформованої поверхні зразка S (рис. 3, б)

$$J_{Ic} = \frac{A}{S_f} \tag{6}$$

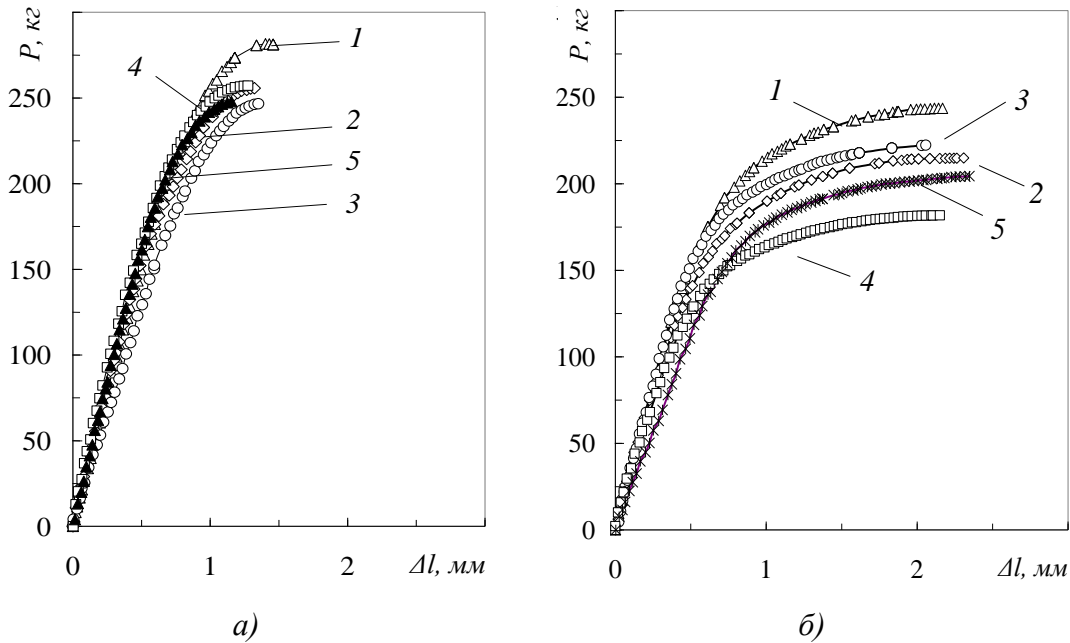


Рис. 4. - Діаграма деформування $P - \Delta l$ зразків з фрагментів бурильних труб:
 а) – група міцності Л ($D = 126,0$ мм, $d = 110,0$ мм);
 б) – група міцності К ($D = 126,0$ мм, $d = 109,2$ мм)

Характеристики критичної тріщиностійкості (табл. 3) у роботі подавали як критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{Jc} і обчислювали за допомогою рівняння (5).

Таблиця 3.

Значення критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень K_{Jc}

Труба	Група міцності	K_{Jc} , МПа $\sqrt{м}$					K_{Jc}^{cep} МПа $\sqrt{м}$
		105,8	98,8	99,9	96,9	93,6	
36Г2С	Л	105,8	98,8	99,9	96,9	93,6	99,0
45	К	130,8	129,2	130,1	130,0	133,7	130,8

Оцінка міцності та ризику руйнування елементів експлуатованих бурильних колон. В процесі експлуатації бурильних колон, методами неруйнівного контролю виявляються тріщини глибиною близько 2 мм, причому час утворення цих тріщин у замкових з'єднаннях становить 10-20% їх ресурсу [5]. Руйнування замкового різьбового з'єднання бурильних труб під час спуско-підймальних операцій є доволі поширеним випадком раптових відмов бурильних колон (~28,3%) [7]. Причиною руйнування труб є зародження та розвиток зовнішньої або внутрішньої кільцевої тріщини.

Оцінку умов руйнування елементів експлуатованих бурильних колон із зовнішньою або внутрішньою замкненою коловою тріщиною, що перебуває під дією осьового навантаження проведемо із застосуванням відповідних аналітичних залежностей [9] для визначення параметрів коефіцієнтів інтенсивності напружень K_I та швидкості їх зміни dK_I/da . Одержані розрахункові дані порівняємо із результатами розрахунково-експериментальних випробувань оцінки руйнування експлуатованого металу труб бурильної колони. Причому, основними параметрами, що дозволяють визначити умови руйнування елементів бурильної колони, є:

– глибина наявної в бурильній трубі внутрішньої або зовнішньої кільцевої поперечної тріщини a_c ;

– вага бурильної колони Q^* .

Розглянемо випадки руйнування двох тривало експлуатованих бурильних труб груп міцності "Л" ($D=126$ мм, $t=8,0$ мм) та "К" ($D=126$ мм, $t=8,4$ мм), що містить зовнішню або внутрішню замкнену колову тріщину, що перебуває під дією осьового навантаження.

Оцінка умов руйнування бурильних труби із зовнішньою поперечною кільцевою тріщиною, що перебуває під дією осьового навантаження. Для визначення умов, за яких можливе руйнування експлуатованих бурильних труб груп міцності "Л" та "К", що містять зовнішню поперечну кільцеву тріщину глибиною (a/t), розглянемо розрахункову схему, зображену на рис. 5.

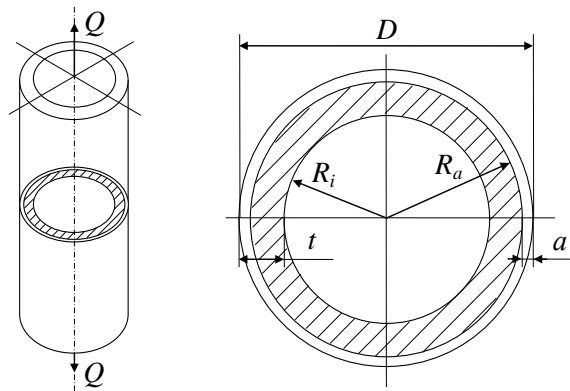


Рис. 5. - Пустотілий циліндр із зовнішньою поперечною кільцевою тріщиною під дією осьового навантаження [9, 15]

При підрахунку значень коефіцієнта інтенсивності напружень K_I вздовж фронту зовнішньої поперечної кільцевої тріщини (рис. 5) використаємо залежність [15]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \frac{F}{\sqrt{Y}} \quad (7)$$

$$\text{де } F = \frac{1 - R_{ia}^2}{\left[1 - (1 - R_{ia}) \frac{a}{t}\right]^2 - R_{ia}^2}, \quad Y = 0,8 + (1 - R_{ia}) \frac{a}{t} \left[\frac{H}{1 - (1 - R_{ia}) \frac{a}{t}} \right],$$

$$R_{ia} = \frac{R_i}{R_i + t}, \quad H = 4 + 1,08 \frac{R_{ia}}{(1 - R_{ia}) \left(1 - \frac{a}{t}\right)}.$$

Критичну глибину зовнішньої поперечної кільцевої тріщини a_c визначали із залежності (7) за умови $K_I = K_{Jc}$, враховуючи задану глибину свердловини, тобто вагу бурової колони (Q)

$$a_c = \frac{K_{Jc} Y}{\pi \sigma^2 F^2}, \quad (8)$$

де $\sigma = \frac{Q}{S_f^*}$, S_f^* – площа руйнування.

Крім того, практичний інтерес становить визначення характеристичної глибини втомної тріщини $(a/t)^*$, при якій різко зростає швидкість зміни коефіцієнта інтенсивності напружень K_I , а отже, і ризик руйнування дефектної бурильної труби під час спуско-підйомальних операцій.

Величину швидкості зміни (dK_I/da) коефіцієнта інтенсивності напружень K_I визначимо, використовуючи залежність [15]

$$\frac{dK}{da} = 0,5\sigma \sqrt{\frac{\pi}{a}} \frac{F}{\sqrt{Y}} + \sigma \sqrt{\frac{\pi a}{Y}} \frac{dF}{da} - 0,5\sigma \sqrt{\pi a} \frac{F}{Y^{1,5}} \frac{dY}{da} \quad (9)$$

$$\text{де } \frac{dF}{da} = \frac{2(R_{ia} - 1) \left[\frac{a(R_{ia} - 1)}{t} + 1 \right] (R_{ia}^2 - 1)}{t \left\{ \left[1 - (1 - R_{ia}) \frac{a}{t} \right]^2 - R_{ia}^2 \right\}}, \quad \frac{dH}{da} = 1,08 \frac{R_{ia}}{t(1 - R_{ia}) \left(1 - \frac{a}{t}\right)^2}$$

$$\frac{dY}{da} = \frac{(1 - R_{ia})}{t \left[1 - (1 - R_{ia}) \frac{a}{t} \right]} \left\{ H + a \frac{dH}{da} + \frac{Ha(1 - R_{ia})}{t \left[1 - (1 - R_{ia}) \frac{a}{t} \right]} \right\}.$$

Розглянемо випадок руйнування експлуатованих бурильних труб груп міцності "Л" ($D = 126$ мм, $t = 8,0$ мм) та "К" ($D = 126$ мм, $t = 8,4$ мм).

Для цих випадків побудуємо відповідну безрозмірну залежність типу (2).

Для розглядуваних випадків (рис. 6) відносна глибина критичного дефекту практично збігається і становить $(a/t)^* = 0,535$.

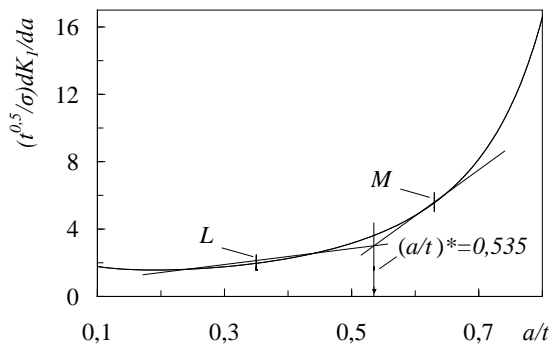


Рис. 6. - Оцінювання небезпеки глибини зовнішньої поперечної кільцевої тріщини у експлуатованих бурильних трубах груп міцності "Л" та "К" під дією осьового навантаження

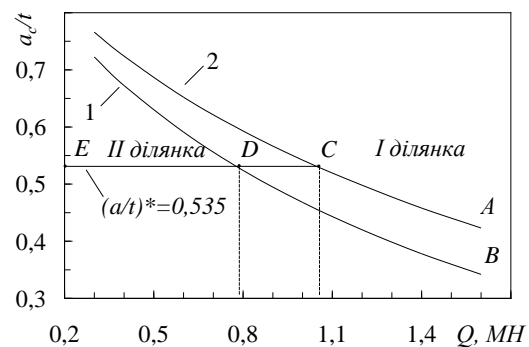


Рис. 7. - Взаємозв'язок глибини критичної зовнішньої поперечної кільцевої тріщини у стінці бурильних труб груп міцності "Л" (1) та "К" (2) та ваги бурильної колони (Q)

Однак, враховуючи особливості руйнування металу бурильних труб груп міцності "Л" та групи міцності "К" та використовуючи залежність (4), встановимо взаємозв'язок між критичною глибиною замкненої втомної тріщини a_c/t та вагою бурильної колони Q , що визначається глибиною свердловини.

Представлені графічно (рис. 7) результати обчислень дають підстави зробити висновок, що для металу бурильних труб групи міцності "Л" під час спуско-підйомальних операцій на глибині від 3,0 км до 6 км ($0,79 \text{ МН} \leq Q \leq 1,6 \text{ МН}$) критичними є зовнішні поперечні замкнені кільцеві тріщини в діапазоні $4,3 \text{ мм} \geq a_c \geq 2,7 \text{ мм}$ (рис. 7, ділянка I, крива 1, BD), тоді як на глибинах від 1 км до 3 км небезпечними є втомні тріщини глибиною $a^* = 4,3 \text{ мм}$ (рис. 7, ділянка II, DE). Для металу бурильних труб групи міцності "К" під час спуско-підйомальних операцій на глибинах від 4 км до 6 км ($1,05 \text{ МН} \leq Q \leq 1,6 \text{ МН}$) критичними є зовнішні поперечні замкнені кільцеві тріщини в діапазоні $4,5 \text{ мм} \geq a_c \geq 3,55 \text{ мм}$ (рис. 7, ділянка I, крива 2, AC), тоді як на глибинах від 1 км до 4 км небезпечними є втомні тріщини глибиною $a^* = 4,5 \text{ мм}$ (рис. 7, ділянка II, CE).

Оцінка умов руйнування бурильних труб із внутрішньою поперечною кільцевою тріщиною під дією осьового навантаження. **Визначимо умови, за яких можливе руйнування бурильних труб груп міцності "Л" і "К", що містять внутрішню поперечну корозійно-втомну тріщину (рис. 8) глибиною $(a/t)^*$. У вершині такої тріщини [15] величина коефіцієнта інтенсивності напружень K_I визначається залежністю**

$$K_I = \sigma \frac{F}{\sqrt{1 - \frac{a}{t}}} \sqrt{\pi a}, \quad (10)$$

при цьому швидкість зміни (dK_I/da) коефіцієнта інтенсивності напружень K_I рівна

$$\frac{dK_{Ia}}{da} = \sigma \frac{dF}{da} \frac{\sqrt{\pi a}}{\sqrt{1 - \frac{a}{t}}} + \frac{\sigma F}{2t} \frac{\sqrt{\pi a}}{\left(1 - \frac{a}{t}\right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{2} \frac{\sigma F}{\sqrt{1 - \frac{a}{t}}} \sqrt{\frac{\pi}{a}}, \quad (11)$$

де функція F та швидкість її зміни dF/da визначаються функціональними рядами, які залежить від співвідношення R_i/R_a [15] ($R_a = R_i + a$).

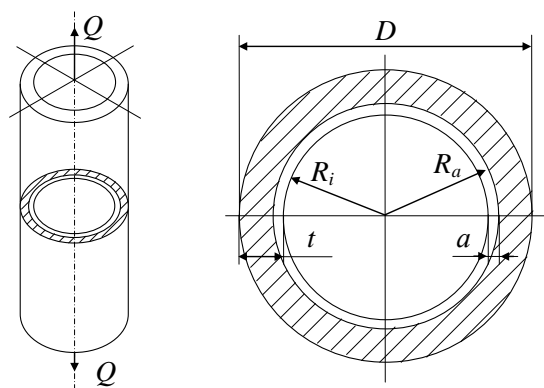


Рис. 8. - Пустотілий циліндр із внутрішньою поперечною кільцевою тріщиною під дією осьового навантаження [9, 15]

Встановимо характеристичну глибину внутрішньої замкненої кільцевої тріщини $(a/t)^*$ для досліджуваних елементів експлуатованих бурильних труб груп міцності "Л" ($D = 126 \text{ мм}$, $t = 8,0 \text{ мм}$) та "К" ($D = 126 \text{ мм}$, $t = 8,4 \text{ мм}$). Для цього побудуємо безрозмірну

залежність типу $\frac{\sqrt{t}}{\sigma} \frac{dK_I}{da} = F\left(\frac{a}{t}\right)$ (рис. 8), та визначимо місця із різким зростанням швидкості зміни (dK_I/da) коефіцієнта інтенсивності напружень K_I під час спуско-підйомальних операцій бурильних труб. За описаною вище методикою [9] визначимо координати точок L $(0,5 \cdot [(a/t)_1 + (a/t)_2])$ $(dK/da)_L$ та M $(0,5 \cdot [(a/t)_2 + (a/t)_3])$ $(dK/da)_M$.

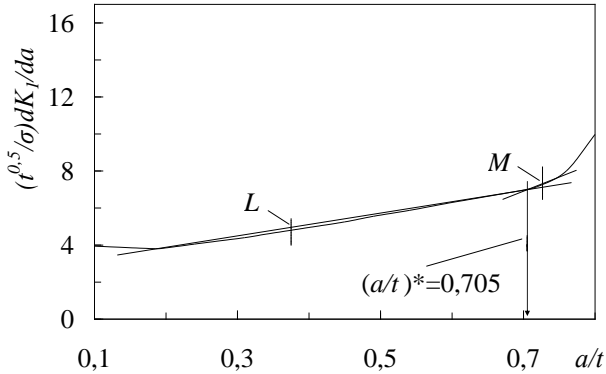


Рис. 9. - Оцінювання небезпеки глибини внутрішньої поперечної кільцевої тріщини у експлуатованих бурильних трубах груп міцності "Л" та "К" під дією осьового навантаження

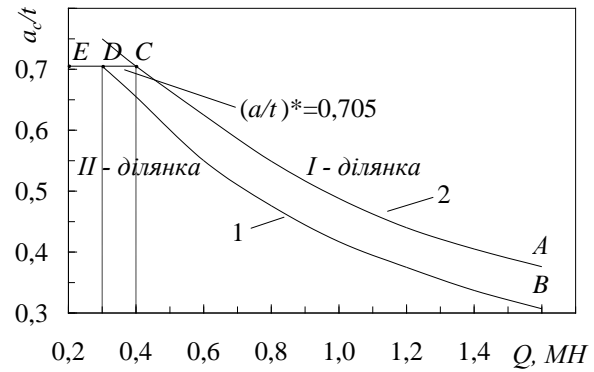


Рис. 10. Взаємозв'язок глибини критичної внутрішньої поперечної кільцевої тріщини, наявної у стінці бурильних труб груп міцності "Л" (1) та "К" (2) та ваги бурильної колони (Q)

Характеристична глибина внутрішньої замкненої втомної тріщини для досліджуваної нами експлуатованої бурильної труби групи міцності "Л" рівна $a^* = 5,6$ мм, а експлуатованої бурильної труби групи міцності "К" рівна $a^* = 5,9$ мм.

Встановимо взаємозв'язок між критичними глибинами внутрішньої замкненої втомної тріщини a_c/t для досліджуваних бурильних труб та вагою бурильної колони Q , що визначається глибиною свердловини.

Результати обчислень (рис. 10) дають підстави зробити висновок, що під час спуско-підйомальних операцій для бурильної труби груп міцності "Л" на глибинах від 1,2 км до 6 км ($0,30 \text{ MN} \leq Q \leq 1,60 \text{ MN}$) критичними для металу бурильних труб є внутрішні поперечні замкнені кільцеві тріщини в діапазоні $5,6 \text{ мм} \geq a_c \geq 2,4 \text{ мм}$ (рис. 10, ділянка I, крива 1, BD), а для бурильної труби груп міцності "К" на глибинах від 1,5 км до 6 км ($0,46 \text{ MN} \leq Q \leq 1,60 \text{ MN}$) критичними для металу бурильних труб є внутрішні втомні тріщини в діапазоні $5,9 \text{ мм} \geq a_c \geq 3,2 \text{ мм}$ (рис. 10, ділянка I, крива 2, CA). Тоді як на глибинах від 1 км до глибини 1,2 км для бурильної труби груп міцності "Л" небезпечними є внутрішні втомні тріщини довжиною $a^* = 5,6$ мм (рис. 10, ділянка II, DE), а для бурильної труби груп міцності "К" на глибинах від 1 км до 1,5 км небезпечними є внутрішні втомні тріщини глибиною $a^* = 5,9$ мм (рис. 10, ділянка II, CE).

Одержані результати дозволяють інтерпретувати суттєве збільшення кількості аварій елементів бурильної колон при спуско-підйомальних операцій, описаних в роботах [1, 2, 8].

Аналіз результатів проведених розрахунково-експериментальних досліджень Свідчить, що для оцінки умов руйнування тривало експлуатованих бурильних труб груп міцності "Л" та "К", що містять замкнені кільцеві тріщини необхідно, по-перше, враховувати характер розміщення замкненої кільцевої тріщини (зовнішня чи внутрішня), по-друге, враховувати групу міцності бурової труби, по-третє на малих глибинах необхідно враховувати показник "опірності елемента конструкції росту тріщини", а на глибинах від 1,2 км до 3 км – для труб, що містять зовнішню (ділянки AC та BD на рис. 7) або внутрішню (ділянки AC та BD на рис. 10) замкнену кільцеву тріщину – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{Jc} як характеристику силового критерію руйнування металу труб бурильної колони.

Таким чином, під час спуско-підймальних операцій визначальним чинником, що призводить до суттєвого збільшення кількості аварій тривало експлуатованих бурильних колон при бурінні на таких глибинах понад 3 км, є втрата металу бурильних труб опірності розвитку тріщин, тобто їх тріщиностійкості. Причому (див. табл. 4), більш небезпечними на цих глибинах є внутрішні замкнені кільцеві тріщини, тоді як на глибинах від 1 км до 3 км більш небезпечними є зовнішні замкнені кільцеві тріщини, оскільки визначальним чинником ту є характеристична глибина втомної тріщини a^* .

Таблиця 4.

Значення критичних (характеристичних) кільцевих тріщин $a_c, (a^*)$

H, км	Критична зовнішня поперечна кільцева тріщина $a_c, (a^*)$, мм		Критична внутрішня поперечна кільцева тріщина $a_c (a^*)$, мм	
	група міцності "Л"	група міцності "К"	група міцності "Л"	група міцності "К"
1	5,9, (4,3)	6,5, (4,5)	5,7, (5,6)	6,4, (5,9)
2	5,1, (4,3)	5,8, (4,5)	4,9	5,6
3	4,2~(4,3)	5,0, (4,5)	3,8	4,6
4	3,6	4,4~(4,5)	3,2	4,0
5	3,2	4,0	2,8	3,5
6	2,8	3,6	2,5	3,2

Висновки

1. Запропоновано експериментально-розрахункову процедуру для оцінки умов критичного руйнування при спуско-підймальних операціях тривало експлуатованих бурильних труб, що містять зовнішню або внутрішню поперечну кільцеву тріщину.

2. Здійснено експериментальну оцінку критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{JC} металу тривало експлуатованих бурильних труб для груп міцності "Л" та "К".

3. Встановлено, що руйнування тривало експлуатованих бурових труб груп міцності "Л" та "К" із зовнішньою поперечною кільцевою тріщиною на глибині понад 3-4 км (у залежності від групи міцності) визначається критичною тріщиностійкістю металу труб, а в інтервалі від 1 км до 3-4 км – показником "опірності елемента конструкції росту тріщини". Для бурильних труб із внутрішньою поперечною кільцевою тріщиною на глибині від 1,2-1,5 км до 6 км (у залежності від групи міцності) визначається тріщиностійкістю металу труб, а в інтервалі від 1 км до 1,2-1,5 км - показником "опірності елемента конструкції росту тріщини".

4. Оцінка умов критичного руйнування при спуско-підймальних операціях рівно навантажених бурильних труб засвідчує, що внутрішні поперечні кільцеві тріщини є більш небезпечними від зовнішніх на глибинах понад 3 км, тоді як в інтервалі глибин від 1 км до 3 км більш небезпечними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини.

5. Одержані результати можна застосовувати для інтерпретації технічного діагностування тривало експлуатованих труб бурильних колон.

Список використаних джерел:

1. Артим В.І. Аналіз корозійно-втомних руйнувань елементів бурильної колони / В.І. Артим, І.І. Яциняк, В.В. Гриців [та ін.] // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2012. – № 2 (43). – С. 197-202.
2. Івасів В.М. Аналіз причин руйнування елементів бурильної колони / В.М. Івасів, Я.С. Гринджук, Л.Р. Юрич // Технологічний аудит і резерви виробництва. – 2014. – №6/4 (20). – С. 15 - 17.
3. Карпаш О.М. Методи та засоби забезпечення роботоздатності трубних колон: автореф. дис. докт. тех. наук. – Івано-Франківськ, 1996. – 47 с.
4. Козаченко Н.И. Вопросы надежности бурильных колонн / Н.И. Козаченко // Обзор техн. и технол. геол. развед. работ, орг. производства. – М. : ВИЭМС, 1978. – 37 с.
5. Копей Б.В. Науково-технологічні методи комплексного підвищення ресурсу деталей свердловинного нафтогазового обладнання: автореф. дис. докт. тех. наук. – Івано-Франківськ, 1996. – 46 с.
6. Крижанівський С.І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: наук.-техн. посіб. у 3-х томах / С.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин / за заг. ред. В.В. Панасюка. – Івано-Франківськ-Львів: Івано-Франківський націон. техн. ун-т нафти і газу, 2012. – Т. 3. – 434 с.
7. Крыжановский Е.И. Исследование и повышение сопротивления усталости бурильных колонн при вращательном бурении скважин: дисс. докт. тех. наук. – М., 1990. – 480 с.

8. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посіб. / за заг. ред. В.В. Панасюка. – Том 10: Міцність та довговічність нафтогазового обладнання / В.І. Похмурський, Є.І. Крижанівський, В.М. Івасів та ін. – Львів - Івано-Франківськ: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України; Івано-Франківський націон. техн. ун-т нафти і газу, 2006. – 1193 с.

9. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посіб. / за заг. ред. В.В. Панасюка. – Том 13: Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень / І.М. Дмитрах, Л. Тот, О.Л. Білий, А.М. Сиротюк. – Львів : СПОЛОМ, 2012. – 316 с.

10. Оцінка умов руйнування трубопроводів тривалої експлуатації / Р.С. Грабовський, О.М. Лепак, М.П. Мазур [та ін.] // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2015. – №1 (38). – С. 46-53.

11. Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов / Панасюк В.В. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.

12. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. ГОСТ 25.506-85 – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 62 с.

13. Річний звіт НАК «Нафтогаз України» – 2014. – 198 с.

14. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. Механические испытания. Конструкционная прочность: у 2 т. / Я. Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – Т. 2. – с. 368.

15. Harris D.O. Stress Intensity Factor for Hollow Circumferentially Notched Round Bars // 89, Trans. ASME: J. of Basic Engineering. – 1967. – 89. – P. 103-106.

Рецензенти:

Доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу **Мандрик О.М.**

Доктор технічних наук, ст.наук. співр., ст. наук. співроб. відділу фізичних основ руйнування та міцності матеріалів в агресивних середовищах Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України **Сиротюк А.М.**

Стаття надійшла до редакції 08.09.2016.