

УДК 621.822.6:620.178.16

## КОНТАКТНЕ РУЙНУВАННЯ ТІЛ КОЧЕННЯ ВІДКРИТИХ ОПОР ТРИШАРОШКОВИХ БУРОВИХ ДОЛІТ У ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Є. І. КРИЖАНІВСЬКИЙ, Р. С. ЯКИМ, Л. Є. ШМАНДРОВСЬКИЙ,  
Ю. Д. ПЕТРИНА

*Національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ*

Проаналізовано утворення корозійних уражень впродовж простою бурового долота в експлуатації і низьку тріщиностійкість високоміцної сталі за дії водного середовища, які спричиняють втрату роботоздатності пари кочення бурового долота. Досліджено залежність між структурою високоміцної сталі 55СМ5ФА роликів опор доліт і її короткочасною тріщиностійкістю з урахуванням впливу на неї води, при цьому зі зниженням в'язкості руйнування сталі негативний вплив середовища на опірність поширенню тріщин посилюється. Оптимальною структурою сталі роликів є дрібнозернистий мартенсит з ~1% трооститу з твердістю HRC 56...58. Для гальмування корозійно-механічного руйнування доліт рекомендовано їх консервувати впродовж простоїв між бурінням змащуванням не тільки ніпельної частини, але і відкритих опор долота.

**Ключові слова:** *тріщиностійкість, руйнування, корозія, вода, ролики, опора, бурове долото, тріщина.*

Основною причиною виходу з ладу опор тришарошкових бурових доліт з підшипниками кочення є їх заклинювання внаслідок зносу осьових підшипників ковзання, руйнування буртів, втрати нормальних умов роботи кулькових і роликових рядів опор [1]. Однією з найтипівіших причин заклинювання шарошок є розлад великого роликового підшипника опори долота. Оскільки ведучі периферійні вінці шарошок розташовані під великими роликовими рядами, основна вантажність долота залежить від тривкості цих рядів. З іншого боку, розташування цих рядів біля основи шарошок сприяє інтенсивнішій циркуляції промивної рідини в їх середині і зношуванню обертових деталей абразивними частинками промивного чи очисного агента.

На основі стендових випроб [2] отримано залежності зносу тіл кочення від напрацювання шарошки у різних середовищах. Показано, що оксидні плівки, які утворюються під час зношування, постійно усуваються з зони тертя, виникають локальні пошкоди поверхонь, які розвиваються в тріщини. Тому важливо окремо виділяти стадію зародження корозійних пошкод на гладкій поверхні і стадію їх поширення. Зроблено [3] важливий висновок про те, що вода знижує контактну міцність сталі за адсорбційним механізмом, тобто зменшує поверхневу енергію деформованого металу. З іншого боку, враховуючи важливу роль у руйнуванні за контактного навантаження високоміцної сталі стадії поширення тріщини, треба брати до уваги можливий прояв у її вершині адсорбційного ефекту. Першими кількісно визначили зниження поверхневої енергії у вершині тріщини під впливом води В. В. Панасюк та С. Є. Ковчик [4]. У подальших дослідженнях [5] з використанням коефіцієнтів інтенсивності напружень встановили, що вода знижує опір поширенню тріщини у високоміцних сталях за короткочасного активного на-

вантаження, тобто зменшується критичний коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_{Ic}$ . Виявлено, що це не пов'язано лише зі збільшенням довжини попередньо створеної тріщини (як часто пояснювали [6]), а з проявом адсорбційного ефекту. Сьогодні роль адсорбції в механіці корозійного руйнування загальноновизнана [7].

Розглянемо можливі шляхи підвищення довговічності бурових доліт: ослаблюючи розвиток корозійних уражень – потенційних зародків тріщин контактної втоми і оптимізуючи структуру сталі.

Встановлено, що долота після простоїв у бурінні (від декількох діб і більше) мають загальну проходку суттєво нижчу проти тих, що експлуатувалися без тривалої перерви. Вони виходили з ладу через заклинювання опори внаслідок катастрофічних руйнувань бігових доріжок і тіл кочення. Також виявлено, що значна частина роликів периферійного підшипника розколена. Зазначимо, що згідно з технологією експлуатації і зберігання долота на час простою консервують змащуванням ніпельної частини, що усуває можливість корозійного ураження змащеної поверхні за цей період. Тому можна припустити, що пришвидшена втрата роботоздатності долота зумовлена корозійними пошкодженнями на незахищених елементах пари кочення саме впродовж простоїв, а позбавитися прояву цього чинника можна змащуванням і цих поверхонь, наприклад, зануренням у мастило очищеного після експлуатації всього долота.

Виконано в наближених до експлуатаційних умов стендові випробування тришарошкових доліт 250,8 ТКЗ-ПГВ-Д27Б на металевому вибої зі сталі 20 за осьового навантаження 220...250 kN та частоти обертання долота 60...75 rev/min з подальшим аналізом контактних поверхонь опори на пошкодженість. Опори промивали технічною водою. Три долота (умовно №№ 1; 2 і 3) відпрацювали на стендах по 20 h, після чого, як і в реальних умовах, їх ніпельну частину змащували антикорозійним мастилом. Після простою доліт відповідно 5; 10 і 30 діб їх повторно випробували на стендах і в результаті вони додатково відпрацювали до втрати роботоздатності 40; 36 і 25 h відповідно. Зауважимо, що опори в долоті № 1 і 2 заклинилися через поступове наростання крутного моменту і підклинювання, а в долоті № 3 – раптово, що пов'язано з крихким руйнуванням бурта кулькового замкового підшипника і розколюванням роликів великого периферійного підшипника.

Встановлено, що основною причиною виходу з ладу поверхонь опор відпрацьованих доліт є контактне руйнування бігових доріжок (рис. 1), тіл кочення, а також крихке руйнування бортів та тіл кочення – роликів (рис. 2). При цьому чітко виражена закономірність інтенсивнішої пошкодженості роликів, які довше простоювали між стендовими випробуваннями і, відповідно, мали менший ресурс роботоздатності на другій стадії випробувань. Це вказує, з одного боку, на зв'язок між розвитком корозійних уражень впродовж простою і часом подальших стендових випробувань до виходу пари кочення з ладу, а з іншого – на важливість протикорозійного захисту змащуванням поверхонь пари кочення впродовж простою долота.

Можна запропонувати таку схему розвитку пошкоджуваності аж до заклинювання опор: спочатку на поверхні роликів виникають корозивні пітинги, ріст яких посилюється впродовж простою між випробуваннями на стенді. Під дією контактної взаємодії у присутності води вони поглиблюються і стають джерелом множинного розтріскування з подальшим об'єднанням у значні локальні руйнування відколюванням окремих частинок. Через це втрачається плавність ходу шарошок, зростає навантаження в опорі долота, що активізує ріст цих тріщин та інтенсифікує відколювання, тобто руйнування набирає автокаталітичного характеру. Тріщиностійкість матеріалу тут особливо важлива, а корозивне середовище не лише сприяє утворенню дефектів (концентраторів напружень) на поверхнях, що контактують, але і знижує тріщиностійкість.

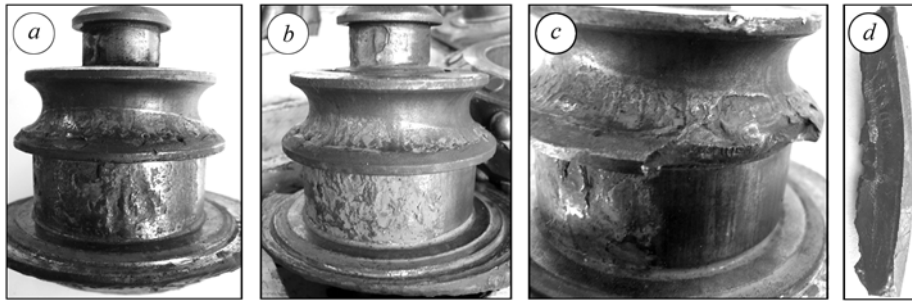


Рис. 1. Контактне руйнування цапф лап тришарошкових доліт 250,8 ТКЗ-ПГВ-Д27Б: *a* – цапфа долота № 1; *b* – № 2; *c* – № 3; *d* – фрагмент відколеного бурта цапфи долота № 3.

Fig. 1. Contact fracture of arms pilot pins of 250.8 ТКЗ-ПГВ-Д27Б three cone rock bits: *a* – pilot pin of rock bits № 1; *b* – № 2; *c* – № 3; *d* – fragment of the splitted off pilot pin flange of rock bits № 3.

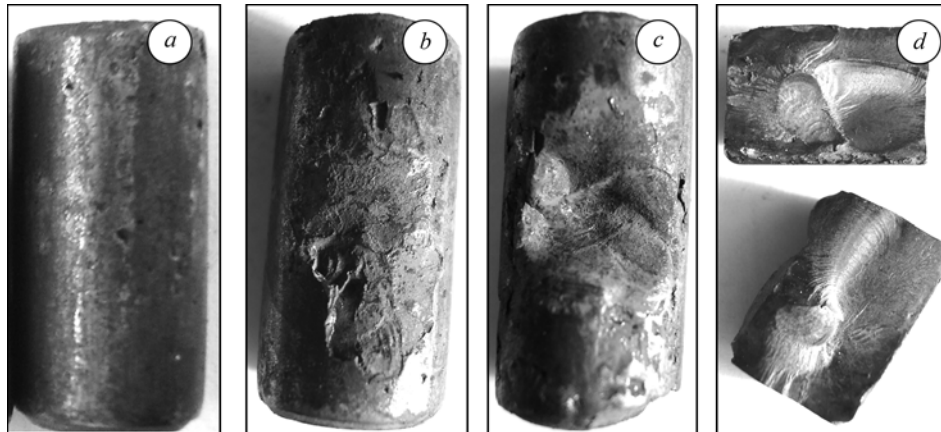


Рис. 2. Типові контактні руйнування і розтріскування роликів, що працювали у водному середовищі: *a* – ролики долота № 1; *b* – № 2; *c*, *d* – № 3.

Fig. 2. The typical contact fracture and cracking of rollers which worked in the water medium: *a* – rollers of rock bit № 1; *b* – № 2; *c*, *d* – № 3.

Сталь 55СМ5ФА випробовували на тріщиностійкість  $K_{Ic}$ , розтягуючи за різних швидкостей переміщення активного тримача (0,06 і 0,6 mm/s) циліндричні зразки робочим діаметром 10 mm з кільцевою тріщиною глибиною  $\sim 1,5$  mm, яку створювали малоцикловим навантаженням за відомою методикою [8]. Вплив води характеризували коефіцієнтом  $\beta = K_{Ic}^c / K_{Ic}$ , де  $K_{Ic}^c$  – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень. Сталь досліджували у різних структурних станах, змінюючи температуру відпуску після гартування, що вплинуло на твердість матеріалу в діапазоні HRC 54...63.

Тріщиностійкість сталі знижується зі збільшенням її твердості (рис. 3, крива 1). За звичайної швидкості навантаження (0,06 mm/s) опірність поширенню тріщини за дії води відчутно падає, що можна пояснити проявом адсорбційного ефекту води в її вершині. З підвищенням швидкості навантаження в 10 разів (0,6 mm/s) помітної дії водного середовища на в'язкість руйнування не виявлено. Це, очевидно, пов'язано з недостатньою змочуваністю поверхні вершини тріщин за швидкісного її розкриття впродовж нетривалого активного навантаження.

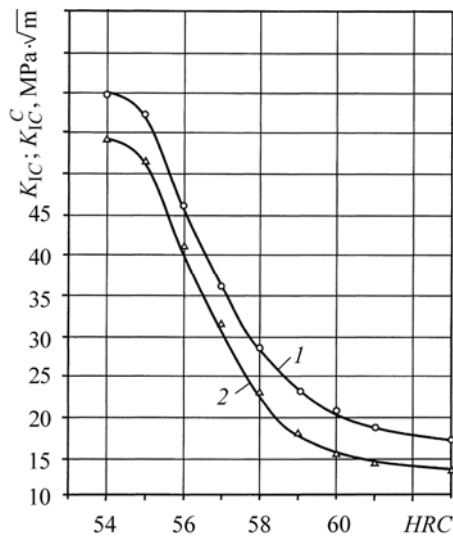


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Тріщиностійкість сталі 55СМ5ΦА у повітрі (крива 1) і воді (крива 2) залежно від її твердості.

Fig. 3. Crack growth resistance of 55СМ5ΦА steel in air (curve 1) and water (curve 2) in dependence on its hardness.

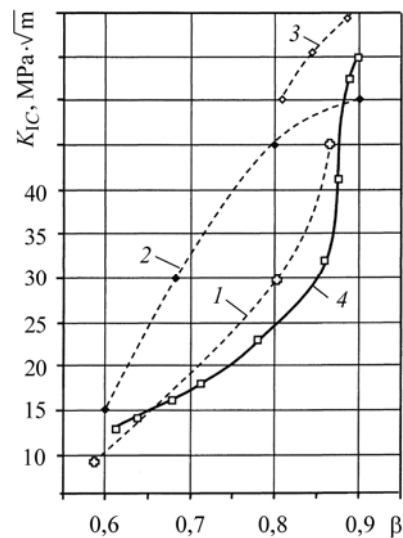


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Зв'язок між коефіцієнтом впливу середовища  $\beta$  і тріщиностійкістю  $K_{Ic}$  для різних структур сталі 55СМ5ΦА: 1 – мартенсит (М); 2 – троостит (Т); 3 – сорбіт (С); 4 – М+1%Т.

Fig. 4. Correlation between environment influence factor,  $\beta$ , and crack growth resistance,  $K_{Ic}$ , for different structures of 55СМ5ΦА steel:  
1 – martensite (M); 2 – troostite (T); 3 – sorbite (C); 4 – M+1%T.

Зазначимо, що за твердості HRC 60 і вище в'язкість руйнування у воді спадає до 10 МПа і нижче. Це практично граничні для сталей значення показника  $K_{Ic}$ , які близькі до значень порогових коефіцієнтів інтенсивності напружень  $K_{Isc}$  (8...10 МПа) і  $\Delta K_{thc}$  (2,5...3,5 МПа) відповідно за випроб оцценолегованих мартенситних сталей на корозійне розтріскування і корозійну втому у водних середовищах [5]. Це свідчить про вузький діапазон між критичним  $K_{Ic}^C$  і пороговими  $K_{Isc}$ ,  $\Delta K_{thc}$  показниками корозійного руйнування і, відповідно, про мінімізацію ролі стадії субкритичного росту тріщини під контактним навантаженням. Таким чином, для аналізу ролі тріщиностійкості в процесах контактного руйнування можна не користуватися складними методиками оцінювання субкритичного росту тріщини, а обмежитися порівняно простими випробами на в'язкість руйнування, враховуючи вплив середовища на зниження короточасної статичної тріщиностійкості.

Характеристика такої ролі коефіцієнтом  $\beta$  (рис. 4) засвідчує, що саме станам сталі з мінімальними значеннями  $K_{Ic}$  властиве значне (до 40%) зниження короточасної тріщиностійкості за дії води ( $\beta \sim 0,6$ ). Якщо ж порівнювати різні структурні стани для однакових низьких значень  $K_{Ic}$ , то найвразливішими до впливу середовища є сталі зі структурою трооститу та низьковідпущеного мартенситу з твердістю вище HRC 60. Тобто твердість (чи міцність) є недостатньою характеристикою чутливості сталі до дії корозивного середовища, і тут необхідно враховувати і структурний чинник. Про це свідчить відмінність у характері кривих в'язкості руйнування сталі 55СМ5ΦА, термообробленої на мартенситну структуру (рис. 4, крива 1) і структуру мартенситну з 1% трооститу (рис. 3, крива 4). Тобто короточасна тріщиностійкість сталі 55СМ5ΦА, термообробленої відповідно до

технічних вимог на структуру мартенситу з 1...3% трооститу, за дії води буде, очевидно, суттєво різна.

З іншого боку, для забезпечення конструктивної міцності пари кочення необхідні не тільки висока тріщиностійкість, але і твердість контактуючих поверхонь, тобто треба шукати оптимальний структурний стан сталі, який би задовольняв вимогам як до твердості, так і до тріщиностійкості в умовах дії водного середовища. Такому стану відповідає сталь з HRC 58, коли ще зберігається висока твердість за вдвічі більшої тріщиностійкості порівняно з отриманими мінімальними значеннями. Це структура відпущеного дрібнозернистого мартенситу з 1% трооститу (рис. 5a) з тріщиностійкістю сталі, яка відповідає границі крихко-в'язкого руйнування. Звідси очікується певна частка в'язкого високоенергоємного руйнування роликів в експлуатаційних умовах, що повинно позитивно вплинути на їх роботоздатність. Водночас за структури мартенситу з 3% трооститу (рис. 5b) і вище вплив води на тріщиностійкість посилюється. Структури мартенситу з різною часткою трооститу чітко ідентифікуються металографічно (рис. 5) і це можна використовувати, контролюючи стан металу на стадії виготовлення чи придбання деталі. Необхідно зауважити, що за вмісту карбідних включень у структурі мартенситу більше одного бала в'язкість руйнування сталі також суттєво знижується. Це добре узгоджується з отриманими раніше даними для хромистих сталей різного структурного стану, але з різним вмістом вуглецю [8]. У нашому випадку під час стендових випроб на контактну витривалість опор з роликівими рядами виявлено, що через наявність 2–3 балів карбідів у структурі сталі ролика удвічі підвищується швидкість утворення пітинга та прогресує його викришування не тільки по твірній, але й фрагментів у його основі. Тому, оцінюючи якість мікроструктури сталі роликів, необхідно враховувати не тільки її дрібнозернистість, однорідність і наявність трооститу, а також вміст карбідів, який не повинен перевищувати одного бала.

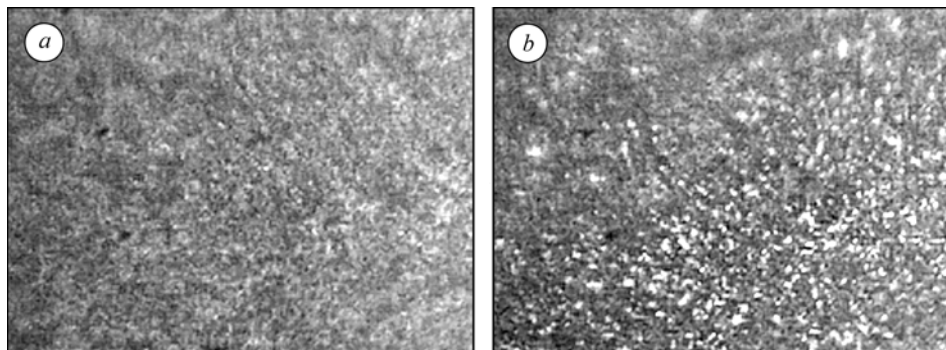


Рис. 5. Мікроструктура роликів зі сталі 55СМ5ФА:  
*a* – мартенсит + 1% трооститу; *b* – мартенсит + 2...3% трооститу.  $\times 500$ .

Fig. 5. Microstructure of 55СМ5ФА steel rollers ( $\times 500$ ):  
*a* – martensite + 1% troostite; *b* – martensite + 2...3% troostite.  $\times 500$ .

Результати експериментальних досліджень вибору оптимальної мікроструктури сталі узгоджуються зі стендовими випробами пар кочення. Ролики з максимальною твердістю виявляли значну схильність до крихкого руйнування, що унеможливорює використання сталі в такому стані. В той же час твердість роликів менше HRC 56 була занижена через інтенсивне їх зношування. Це свідчить про вузький діапазон твердості HRC 56...58 сталі, придатний для практичних рекомендацій до технології виготовлення роликів підшипників. Зазначимо, що для дотримання такого діапазону необхідний відповідний контроль режимів термічного оброблення. Разом з цим впровадженням контролю структури і твердості

роликів перед складанням опор доліт вдалося усунути пластичну деформацію чи передчасне крихке руйнування тіл кочення.

### ВИСНОВОК

Проаналізовано чинники втрати роботоздатності пари кочення бурового долота, серед яких виділено утворення корозійних уражень впродовж простою в експлуатації і низьку тріщиностійкість високоміцної сталі за дії води. Корозійних уражень під час простою можна уникнути консервацією поверхонь, що контактують. Попри те, що сталі 55СМ5ФА зі структурою мартенситу властива низька в'язкість руйнування, вода суттєво (до 40%) її знижує. Оскільки для виготовлення роликів опор бурових доліт необхідна високоміцна зносотривка сталь, оптимальний структурний стан металу слід вибирати з умови поєднання задовільних рівнів як зносотривкості, так і тріщиностійкості. Рекомендовано сталь 55СМ5ФА зі структурою дрібнозернистого мартенситу з 1% трооститу та твердістю HRC 56...58.

*РЕЗЮМЕ.* Оценены коррозионные повреждения во время простоя бурового долота в эксплуатации и выявлено низкую трещиностойкость высокопрочной стали при воздействии водной среды как факторов потери работоспособности пары качения долота. Исследована зависимость между структурой высокопрочной стали 55СМ5ФА роликов опор долот и ее кратковременной трещиностойкостью с учетом влияния на нее воды. Установлено, что с понижением вязкости разрушения стали отрицательное влияние среды на сопротивление развитию трещины усиливается. Оптимальной структурой стали роликов является мелкозернистый мартенсит с 1% троостита с твердостью HRC 56...58. Для ослабления коррозионно-механического разрушения долот рекомендуется их консервация во время простоев в бурении смазкой не только ниппельной части, но и открытых опор долота.

*SUMMARY.* Formation of corrosion damages during shutdowns in the boring process and low crack growth resistance of high-strength steel under action of aqueous environment as a factor of workability loss of rock bits rolling pairs have been considered. The dependence between the structure of 55СМ5ФА high-strength steel of rollers of rock bits bearings and its crack growth resistance with account of the effect of water is investigated. It is shown that the negative effect of environment on crack growth resistance increases with the decrease of steel fracture toughness. The optimal structure of rollers is fine-grain martensite with troostite of 1% and HRC 56...58 hardness. For weakening of the corrosive-mechanical fracture of rock bits it is recommended to conserve them during shutdowns in the boring process by lubrication of not only a nipple part but also of the open bearings of bits.

1. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. пос. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 10: Міцність та довговічність нафтогазового обладнання / В. І. Похмурський, Є. І. Крижанівський, В. М. Івасів та ін.: Під ред. В. І. Похмурського і Є. І. Крижанівського. – Львів–Івано-Франківськ: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України; Івано-Франківський нац. техн. ун-т нафти і газу, 2006. – 1193 с.*
2. *Пичугин В. Ф. Повышение износостойкости узлов трения бурового оборудования и инструмента на основе эффекта безызносности // Долговечность трущихся деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – Вып. 3. – С. 177–194.*
3. *Чайковский Б. П. Снижение контактной долговечности сталей 55СМФА и ШХ15 под воздействием сред // Физ.-хим. механика материалов. – 1979. – № 3. – С. 112–113.*
4. *Панасюк В. В., Ковчик С. Е. Влияние поверхностно-активной среды на поверхностную энергию хрупкого тела // Докл. АН СССР. – 1963. – 146, № 1. – С. 82–85.*
5. *Романив О. Н., Никифорчин Г. Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 296 с.*
6. *Джонсон Г. Влияние среды на разрушение высокопрочных материалов. Т. 3: Разрушение: Пер. с англ. под ред. Е. М. Морозова. – М.: Мир, 1976. – С. 729–775.*
7. *Фізико-хімічна механіка матеріалів / Під ред. В. В. Панасюка. – Львів: НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка, 2010. – 448 с.*
8. *Петрина Ю. Д. Розробка науково-прикладних основ підвищення довговічності бурових доліт шляхом раціонального використання матеріалів: дис. д-ра техн. наук. – Івано-Франківськ, 1996. – 356 с.*

*Одержано 09.06.2010*