

## КОНТАКТНА ВИТРИВАЛІСТЬ ЦЕМЕНТОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ОПОР Р-К-Р ТРИШАРОШКОВИХ БУРОВИХ ДОЛІТ

Р.С. Яким

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 43024,  
e-mail: public@nung.edu.ua

Встановлено і експериментально обґрунтовано, що механізм руйнування цементованих бігових доріжок цапф лап насамперед залежить від якісних показників плавок сталі 19ХГНМА-В та фізико-механічних параметрів, отриманих при хіміко-термічному зміцненні деталей. Це досягається, з одного боку, регламентованим хімічним складом, прогартовуванням, ударною в'язкістю, границею плинності, та іншими фізико-механічними показниками плавки сталі у стані поставки. З другого боку, необхідне прийняття оптимальних параметрів термообробки і їх якісним дотриманням з метою отримання плавних градієнтів твердості та пошарової концентрації вуглецю від поверхні до серцевини. Такі заходи дозволяють отримувати високу контактну витривалість і очікувати суттєве підвищення довговічності опор доліт.

Ключові слова: опора, довговічність, долото, термообробка, контактна міцність.

Установлено и экспериментально обосновано, что механизм разрушения цементированных беговых дорожек цапф лап в первую очередь зависит от качественных показателей плавок стали 19ХГНМА-В и физико-механических параметров, полученных при химико-термическом упрочнении деталей. Это осуществляется, с одной стороны, регламентированным химическим составом, прокаливанием, ударной вязкостью, границей текучести, и другими физико-механическими показателями плавки стали в состоянии поставки. С другой стороны, необходимо принятие оптимальных параметров термообработки и их качественное поддержание с целью получения плавных градиентов твердости, послойной концентрации углерода от поверхности к сердцевине. Такие мероприятия позволяют получать высокую контактную прочность и ожидать существенное повышение долговечности опор долот.

Ключевые слова: опора, долговечность, долото, термообработка, контактная прочность.

It's determined and experimentally proved, that the way of destruction of arm pins carburized races mainly depends on qualitative indices of 19ХГНМА-В steel melting and physico-mechanical parameters got in the process of chemical and heat strengthening of components. On the one hand it's realized by means of regulated chemical composition, hardening, toughness, yield limit and other physico-mechanical indices of steel melting in the feed position. On the other hand it's necessary to choose optimal parameters of heat treatment and follow them in order to getting of hardness quiet gradients and layer-by-layer carbon concentration from surface to heart. Such measures allow to get high contact strength, and expect essential increase of durability of rock bits bearings.

Keywords: bearing, durability, rock bit, heat treatment, contact strength.

Сучасні тришарашкові бурові долота з підшипниками кочення часто недопрацюють через відмови опор кочення. Однією з вагомих причин таких відмов є низька контактна витривалість цементованих поверхонь опор кочення. Зважаючи на те, що особливого пошкодження і руйнування зазнає навантажена сторона цапфи лапи, вивчення таких явищ має важливе практичне значення і є актуальним для розкриття шляхів підвищення довговічності опор доліт.

Вивченню явищ контактної руйнування і шляхів підвищення цементованих деталей опор Р-К-Р тришарашкових бурових доліт присвячено роботи [1-3] та ін. Проте явища пошкодження і руйнування, які спостерігаються на сталі 19ХГНМА-В, вимагають докладного вивчення взаємозв'язку між фізико-механічними показниками, параметрами зміцнення та механізмом руйнування цементованого шару.

Практика виготовлення деталей тришарашкових бурових доліт свідчить, що міцність їх серцевини повинна знаходитись в межах 1200-1400МПа (HRC29-42), її оптимальною мікроструктурою повинен бути маловуглецевий мартенсит або нижній бейніт. Наявність і зростання включень залишкового аустеніту та карбідів у структурі цементованого шару і серцевини

призводить до зниження опору до контактної втоми сталі. Збільшення  $\sigma_B$  серцевини сприяє підвищенню контактної міцності доліт. Цим вимогам відповідають фізико-механічні властивості сталей 15НЗМА і 14ХНЗМА. Сталь 19ХГНМА, яка сьогодні використовується для масового випуску лап доліт, цим вимогам не відповідає. Її застосування пояснюється лише тим, що вона дає найменші деформації та викривлення деталей при ХТО. Контактне руйнування опор кочення з цієї сталі може розвиватися за двома відомими схемами [4, 5]. В одному випадку виникає підповерхнева тріщина, зумовлена перепадом залишкових напружень в ділянці переходу „зміцнений шар – серцевина”. У другому випадку фізико-механічні та конструкторські (шорсткість, однорідність товщини цементованого шару) параметри можуть сприяти виникненню поверхневих тріщиноподібних дефектів під дією значних контактних напружень в опорі та дії зовнішнього агресивного середовища.

До сьогодні залишаються актуальними описані в [1] параметри термообробки на отримання структури і фізико-механічних властивостей низки марок сталей для деталей бурових доліт. Показано, що долотна сталь, яка працює

в умовах значних контактних навантажень, дії значних температур та агресивних середовищ вибою, повинна вибиратися за критерієм тріщиностійкості  $K_{IC}$ , отриманим випробовуванням компактних зразків на позacentровий розтяг. Оцінку придатності сталі для виготовлення деталей доліт рекомендується здійснювати за хімічним складом в стані поставки та структурі, отриманій на спеціально виготовлених і зміцнених згідно регламентованих термічних параметрів зразках. Вирішальним у виборі сталі повинен бути також показник зносостійкості та тріщиностійкості в умовах дії високих температур.

Низка провідних західних фірм дотримується сформульованих в [2] умов щодо вибору сталей для виготовлення доліт. Зокрема, після цементації поверхневий шар повинен містити понад 0,7% вуглецю, а твердість зміцненої сталі повинна складати приблизно HRC65. Сталь повинна мати також високу міцність та в'язкість серцевини, забезпечувати структурну однорідність. Для поверхонь опор кочення зміцнена сталь повинна забезпечувати твердість цементованого шару приблизно HRC60-64, а у серцевині твердість повинна бути у межах HRC25-40.

Вуглець по-різному впливає на контактну витривалість цементованого шару. Максимуму контактна витривалість досягає поблизу евтектоїдного вмісту вуглецю [3] (в шарі з концентрацією вуглецю 0,55...1,1% глибиною 1,8 мм евтектоїдний вміст вуглецю складає 0,62%). Проте помічено, що при цьому досить сильно деформуються бігова доріжка і прилегли до неї шари сталі. Через такі порушення геометрії поверхні практично не реалізується вплив високого опору утворенню піттингів для збільшення працездатності деталей при значних контактних напруженнях. Відмінність вмісту вуглецю біля поверхні і в об'ємі цементованої сталі створює напруження стиску, що збільшуються зі зростанням концентрації вуглецю в цементованому шарі. В шарі з концентрацією понад 0,9% вуглецю карбіді починають розташовуватись по границях колишніх аустенітних зерен, поступово їх оконтурюючи. Це веде до зниження контактної витривалості цементованого шару з концентрацією вуглецю 1%.

Контактна витривалість цапф лап в навантаженої зоні може бути підвищена за рахунок встановлення оптимальних значень фізико-механічних, конструкторських параметрів бігових доріжок опор. З цієї метою встановлено, що твердість поверхні деталей імпортих доліт становить HRC62-65. Стендові випробовування вітчизняних шарошкових бурових доліт з твердістю поверхонь бігових доріжок опори HRC62-64 засвідчили також вищі значення контактної витривалості [6]. Однак для досягнення такої твердості існують проблеми економічного характеру, оскільки тривалість ХТО зростає. Наприклад, підвищення концентрації вуглецю на повній глибині цементованого шару в шарошках 0,25%С і 0,30%С цапфах лап до рівня 0,35-0,45%С збільшує тривалість цементації в середньому на 3 год.

У роботі [7] стверджується, що значення твердості на повній глибині дифузійного шару повинно бути на рівні HRC58. Існує також думка [8], що це значення повинно бути на рівні HRC50.

Проведений аналіз цементованих шарошок і лап доліт провідних зарубіжних фірм показав таке [6]:

Фірма „Glinik” забезпечує на цапфі лапи твердість малої бігової доріжки HRC64-64,5, на великій біговій доріжці – HRC63-64. На бігових доріжках шарошки твердість HRC63-65;

Фірма „Sandvic” забезпечує на цапфі лапи твердість великої бігової доріжки HRC61-62. В шарошці бігові доріжки на глибині 0,35мм мають твердість HRC59,5;

Фірма „Baker Hughes” забезпечує на цапфі лапи твердість малої бігової доріжки HRC63-64,5, на великій біговій доріжці – HRC63-64. На бігових доріжках шарошки твердість складає HRC61-63;

Білгородський завод гірничого машинобудування формує на цапфі лапи твердість великої бігової доріжки HRC63-64. На бігових доріжках шарошки твердість складає HRC60-61.

Отже, ХТО деталей шарошкових доліт повинна формувати високу твердість – у межах HRC60-65 [6]. Необхідно зауважити, що градієнт твердості повинен відповідати плавному спаду від поверхні до серцевини деталей. З цієї метою необхідно особливо ретельно контролювати процес термообробки кожної плавки сталі. Особливо це стосується сталей вакуумно-дугової виплавки, у яких виникають труднощі зі здатністю до регламентованого прогартовування, а також отримання стабільної мікротвердості в стані поставки прокату.

Оскільки найбільше навантаження в опорі Р-К-Р припадає на великий роликний підшипник кочення, то завданням даного дослідження є розкриття механізму та встановлення основних причин руйнування цементованих поверхонь бігової доріжки такого підшипника на цапфі лапи.

Для вирішення поставленого завдання було здійснено аналіз елементів опор тришарошкових бурових доліт 244,5 ОК-ПГВ-Д26 і 250,8 ТКЗ-ПГВ-Д27 як в процесі стендових випробовувань секцій і доліт з їх розбиранням та оцінюванням стану елементів опор, так і повністю відпрацьованих доліт у стендових та реальних умовах. З метою встановлення механізму руйнування і взаємозв'язку між характером руйнування цементованого шару і параметрами зміцнення взято типові дві плавки сталі 19ХГНМА-В і встановлено їх хімічний склад та фізико-механічні властивості (табл. 1). Далі, згідно серійної типової технології на ВАТ „ДДЗ” – сьогодні ТОВ „УНІБУРТЕХ” – деталі піддавали зміцненню з такими відмінностями: 1) плавка № 11 – друге гартування 1083К, відпуск 468К; 2) плавка №11 – друге гартування 1123К, відпуск 433К; 3) плавка №22 – підстуджування азотом при цементації, друге гартування 1083К, відпуск 438К; 4) плавка №22 друге гартування 1123К, відпуск 372К.

**Таблиця 1 – Хімічний склад, прогартування та основні фізико-механічні властивості типових плавок сталі 19ХГНМА-В**

Відсотковий вміст хімічних елементів у плавці	Плавка		
	№11	№22	
C	0,20	0,20	
Si	0,21	0,26	
Mn	0,84	0,80	
Cr	0,45	1,47	
Ni	0,57	0,62	
Mo	0,28	0,21	
P	0,012	0,012	
S	0,006	0,007	
Cu	0,17	0,17	
V	0,050	0,00	
W	0,01	0,01	
Al	0,020	0,28	
Ca p	0,02	0,02	
Прогартування, HRC на глибині	6,5мм	39	39
	30мм	21	23
Границя витривалості $\sigma_B$ , МПа	970	104	
Границя плинності $\sigma_{0,2}$ , МПа	770	815	
Відносне звуження $\psi$ , %	66	64	
Відносне видовження $\delta$ , %	18	16	
Ударна в'язкість $KUC$ , Дж/см <sup>2</sup>	19,5	17,5	

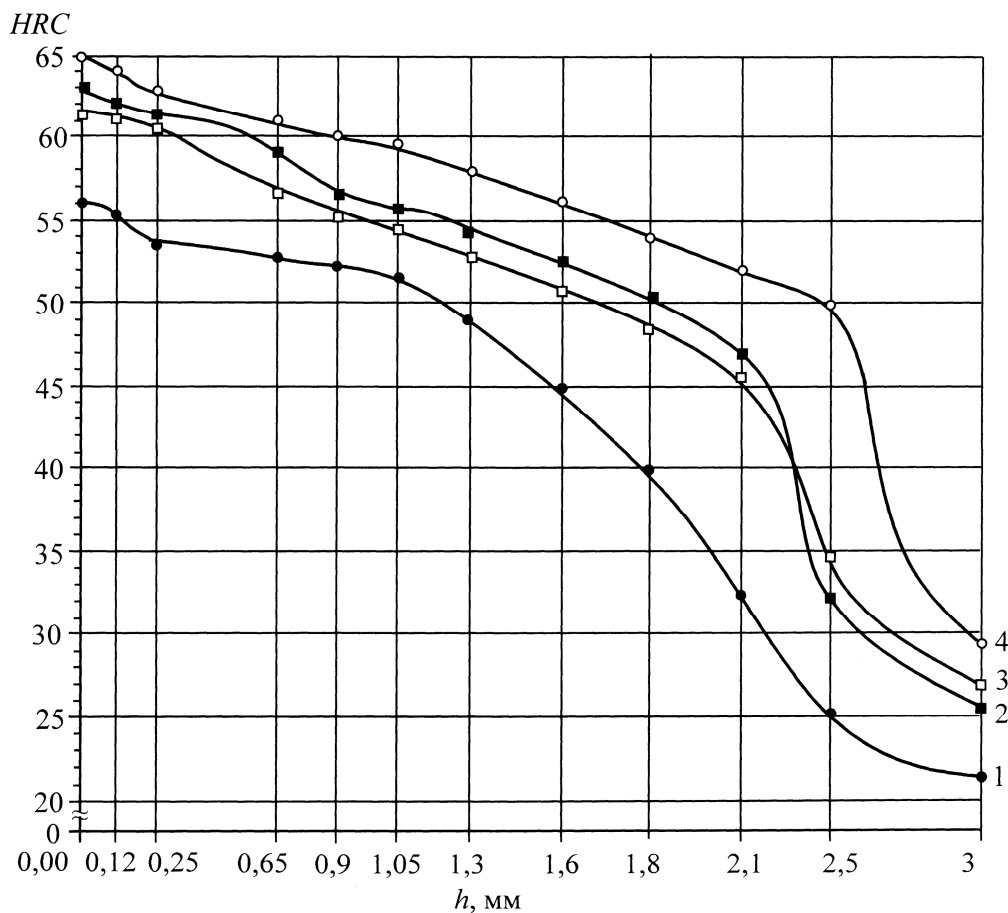
Концентрацію вуглецю в шарах цементованих зразків визначали згідно стандартної методики за допомогою аналізатора АН-7529. За глибину цементованого шару приймали заевтектійну, евтектійну і половину перехідної зони «цементований шар – серцевина». Цементацию в ендотермічному середовищі проводили в печі Irsen – Carb-o-Prof – III, що забезпечує комп'ютеризований контроль і керування технологічним процесом. Фізико-механічні властивості досліджуваних сталей визначали на зразках-свідках згідно стандартних методик. Твердість вимірювали за стандартною методикою на темплетях з досліджуваних опор за допомогою ПМТ-3. Мікроструктурні дослідження проводили згідно стандартної методики за допомогою мікроскопу ММ-2Р з використанням цифрової камери КЦ-13. Виявлення мікроструктури здійснювалось травленням поверхні шліфа в 4% спиртовому розчині азотної кислоти.

Встановлено градієнти твердості (рис. 1) та концентрації вуглецю (рис. 2) від поверхні цементованого шару до серцевини для досліджуваних чотирьох варіантів ХТО плавок сталі 19ХГНМА-В. Мікроструктура у всіх випадках була типовою: серцевина – сорбітоподібний перліт, перехідна зона – тростосорбіт, а цементований шар – середньоголковий мартенсит 1-2 бали + залишковий аустеніт + карбідні включення. Одночасно у випадках ХТО за режимами №1 в цементованому шарі залишковий аустеніт був оцінений в 3-4 бали, карбідні включення – 2-3 бали. При режимі ХТО № 2 виявлено залишковий аустеніт 2-3 бали, карбідні 3-4

бали, одиничні включення карбідів до 5 бали. ХТО за режимом № 3 дав залишковий аустеніт 2-3 бали, карбідні 1-2 бали, а ХТО згідно режиму №4 – залишковий аустеніт 1-2 бали, карбідні 3-4 бали. При цьому найвища твердість отримана при обробці за режимом №4, а найнижча – за режимом №1. Твердості отримані за режимами №2 і 3 є співмірними. Однак режим № 3 дозволяє отримати найбільш плавний градієнт твердості та перехід від цементованого шару до серцевини поміж порівнюваними варіантами. Аналіз градієнту пошарової концентрації вуглецю також вказує на найкращі показники, що отримуються при ХТО за режимом №3. Тут вдалося отримати не тільки найкращу плавність переходу від цементованого шару, а й уникнути негативного явища знеуглечення, яке властиве при цементации досліджуваної сталі. Справді, практика підстуджування атмосфери печі на останньому циклі цементации і жорсткий контроль вуглецевого потенціалу, що описані в [6], дозволяють усунути негативні явища деформації деталей і знеуглечення цементованих шарів. Отже, можна попередньо очікувати і різні характери пошкодження цементованих бігових доріжок цапф лап, оброблених за описаними режимами ХТО. З цією метою проведено якісний аналіз відпрацьованих опор доліт.

Аналізом встановлено декілька характерних особливостей втрати працездатності цементованих бігових доріжок цапф лап, що відбуваються в навантаженій частині (рис. 3, 4, 5). Для розуміння і правильного трактування таких руйнувань виходили з того, що процес зносу є специфічним проявом механічної втоми підповерхневих шарів сталі при терті. При цьому природа фрикційної втоми підповерхневих шарів сталі вважається суттєвою не тільки якісно, але і в більшій мірі кількісно відрізняється від природи об'ємної втоми сталі. Разом з тим, Г.С.Писаренко вказує [9], що відсутність надійних моделей для аналізу руйнування у зоні фрикційного контакту при пружно-пластичному деформуванні змушує керуватися даними, отриманими при вивченні природи об'ємної втоми сталі. Тому для випадку низької твердості та міцності поверхневих шарів бігової доріжки механізм руйнування може розглядатися як результат малоциклової пластичної втоми (рис. 3), продуктом зносу якого є луски товщиною 1-10мкм і довжиною до 5мкм та більше. У результаті бігові доріжки швидко втрачають початкові розміри через значну втрату металу у навантаженій зоні. Такий механізм пошкодження і руйнування зафіксований на бігових доріжках цапф лап, оброблених за режимом № 1, який дає низьку міцність цементованого шару.

На те, що руйнування цементованих деталей відбувається не через руйнування цементованого шару, а через низьку міцність шарів, що прилягають до шару, вказує А.И.Петрусевич [4]. У такому випадку глибинні контактні напруження спричинюють значні пластичні деформації, які накопичуються в деяких найбільш напружених ділянках у процесі дії циклічних



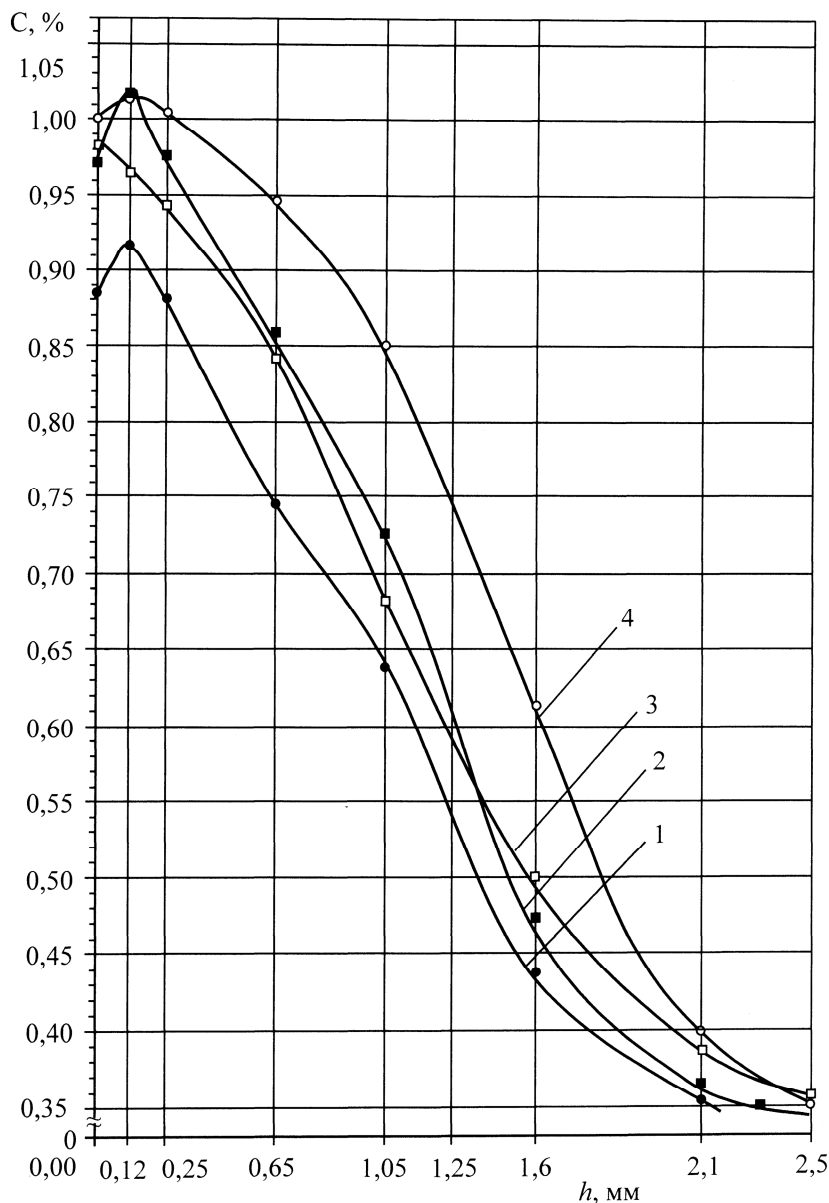
1 – плавка № 11 (друге гартування 1083К, відпуск 468К);  
 2 – плавка № 11 (друге гартування 1123К, відпуск 433К);  
 3 – плавка № 22 (підстуджування азотом при цементації, друге гартування 1083К, відпуск 438К);  
 4 – плавка № 22 (друге гартування 1123К, відпуск 372К)

**Рисунок 1 – Градієнти твердості від поверхні цементованого шару до серцевини в ділянці великої роликової бігової доріжки опор Р-К-Р бурових доліт, отримані на плавках сталі 19ХГНМА-В**

контактних напружень. У результаті відбувається перерозподіл напружень між цементованим шаром і прилягаючими до нього шарами, твердий шар перевантажується і в ньому може виникнути тріщина, яка прогресує з ростом циклів навантаження (рис. 4). Необхідно зауважити, що такий процес є малоцикловим, тобто у даному випадку маємо передчасний вихід з ладу робочої поверхні, що веде до утворення в опорі значних фрагментів зносу і їх подрібнення. У результаті різко падає плавність руху шарошок чи їх раптове зупинення через заклинювання опори. Пошкодження і руйнування цементованого шару на повну його глибину отримували при ХТО за режимом № 4. Тут спостерігається різкий перепад як концентрації вуглецю, так і твердості в ділянці переходу «цементований шар – серцевина».

Необхідно зауважити, що проламування цементованого шару є причиною звичайного руйнування від контактної втоми у ділянках, де товщина зміцненого шару є низькою, наприклад, через низьку прогартуваність сталі чи надмірне зняття поверхневого шару шліфуванням.

За умов високої твердості і міцності поверхневих шарів бігової доріжки та плавним переходом міцнісних характеристик по глибині зміцненого шару руйнування бігових доріжок відбувається шляхом утворення піттингів і локального втомного контактного руйнування поверхні бігової доріжки, утвореного ростом системи тріщин від підповерхневого дефекту в цементованому шарі (рис. 5, 6). Такий характер руйнування властивий цементованим біговим доріжкам цапф лап обробленим згідно режимів №2 і №3. Разом з тим відомо, що середовище, в першу чергу, знеміцнює поверхневий шар деталі. При довговічностях  $5 \cdot 10^4 - 10^7$  циклів розвиток тріщини починається з дефекту на поверхні зразка. При  $10^7 - 5 \cdot 10^7$  циклів розвиток тріщини починається з дефекту чи включення під поверхнею і понад  $5 \cdot 10^7$  розвиток тріщини починається під поверхнею за відсутності видимого дефекту. При цьому часто джерело руйнування має специфічний вигляд під назвою «рибне око» [10-12]. В центрі такого пошкодження можна виявити підвищений вміст карбідної фази, що свідчить про наявність у цьому місці локальної крихкої ділянки цементованого



1 – плавка №11 (друге гартування 1083К, відпуск 468К);

2 – плавка №11 (друге гартування 1123К, відпуск 433К);

3 – плавка №22 (підступджування азотом при цементації, друге гартування 1083К, відпуск 438К;

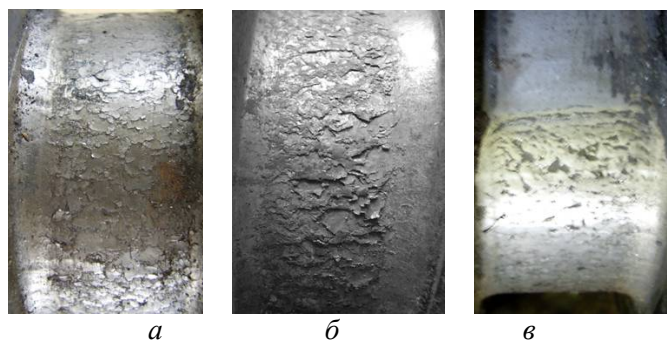
4 – плавка №22 (друге гартування 1123К, відпуск 372К)

**Рисунок 2 – Градієнти концентрації вмісту вуглецю від поверхні цементованого шару до серцевини в ділянці великої роликівої бігової доріжки опор Р-К-Р бурових доліт, отримані на плавках сталі 19ХГНМА-В**

шару від карбідних включень чи інших неоднорідностей структури шару.

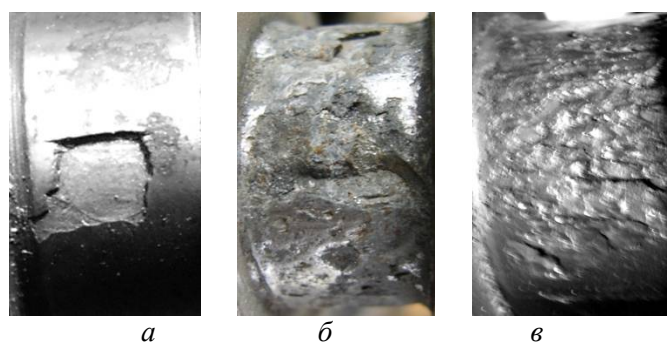
Необхідно зауважити, що зі зменшенням рівня напружень зростає розсіювання довговічності, при цьому довговічність перестає відповідати нормальному закону розподілу [13]. Водночас відомо, що при накладанні на основне низькочастотне знакозмінне навантаження високочастотного в зоні руйнування проходять неоднорідні процеси зміцнення і знеміцнення. За даних умов процес руйнування навантажених деталей характеризується не утворенням однієї магістральної тріщини, а цілої мережі тріщин, що, в свою чергу, призводить до процесів прискорення чи уповільнення руйнуван-

ня. Відтак на практиці маємо ту чи іншу інтенсивність руйнування бігових доріжок, яку можна прогнозувати за наявністю і величиною в цементованому шарі карбідів та інших включень, дефектів, які суттєво прискорюють процес руйнування (рис. 6). Так, бігові доріжки цапф лап, оброблених згідно режиму № 2, руйнувалися значно пізніше, показуючи вищу контактну витривалість на протидію бігових доріжок цапф лап, оброблених за режимом № 3. Причиною такого стану є наявність більших карбідних включень і пошарова неоднорідність міцності цементованого шару, виявляючи його підвищену локальну крихкість.



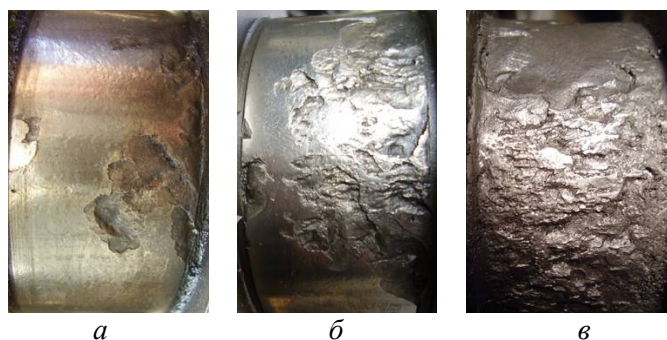
*а – творення лускоподібної поверхні,  
б – пластична деформація і розвальцьовування поверхневих шарів,  
г – катастрофічний знос і пластична деформація*

**Рисунок 3 – Характер руйнування при низькій твердості і міцності поверхневих шарів бігової доріжки цапфи лапи**



*а – локальні викришування цементованого шару на повну глибину шару,  
б – об'єднання локальних сколювань на глибину цементованого шару,  
в – повне викришування цементованого шару і катастрофічне руйнування оголеної м'якої серцевини*

**Рисунок 4 – Характер руйнування при високій твердості і міцності поверхневих шарів та несприятливим різким перепадом міцнісних характеристик по глибині зміцненого шару бігової доріжки цапфи лапи**



*а – утворення піттингів і їх об'єднання в локальні контактні руйнування,  
б – об'єднання локальних контактних руйнувань з відшаруванням цементованого шару,  
в – катастрофічне руйнування цементованого шару*

**Рисунок 5 – Характер руйнування при високій твердості і міцності поверхневих шарів бігової доріжки цапфи лапи та плавним переходом міцнісних характеристик по глибині зміцненого шару (цементований шар містить карбіди 3-4, і 5 балів)**

Отже, встановлено і експериментально обґрунтовано, що механізм руйнування цементованих бігових доріжок цапф лап в першу чергу залежить від якісних показників плавок сталі 19ХГНМА-В та фізико-механічних параметрів, отриманих при хіміко-термічному зміцненні деталей. З цією метою необхідно добирати пла-

вки сталі, які забезпечують при їх зміцненні високі показники в'язкості і пластичності цементованого шару та серцевини при одночасному забезпеченні їх показників міцності. Це досягається, з одного боку, регламентованим хімічним складом, прогартовуванням, ударною в'язкістю, границею плинності та іншими фізи-

ко-механічними показниками плавки сталі у стані поставки. З другого боку, необхідне прийняття оптимальних параметрів термообробки і їх якісним дотриманням з метою отримання плавних градієнтів твердості та пошарової концентрації вуглецю від поверхні до серцевини. Такі заходи дозволяють отримувати високу контактну витривалість і очікувати суттєве підвищення довговічності опор доліт.



**Рисунок 6 – Характерний вигляд локального втомного контактної руйнування поверхні бігової доріжки, утвореного ростом системи тріщин від підповерхневого дефекту в цементованому шарі  $\times 10\mu$**

Надалі для підвищення працездатності опор необхідно розв'язати проблему стійкості до контактної руйнування торцевих поверхонь тертя ковзання.

### Література

1 Elevated temperature toughness and fatigue testing of steels for geothermal Applications: Final Report: BNL Contract № 492267-S, Number of registration: October, 1981, TR 81-97 / R.A. Cutler, E.C. Goodman, R.R. Hendricks (Terra Tek, Inc.), W.C. Leslie (University of Michigan) – [Submitted to: Brookhaven National Laboratory, Attn: Dr. Daniel Van Rooyen]. – New York: Terratek, 1981. – 140 p. (University research park, Salt lake City, Utah).

2 Drilling Engineering Workbook: A Distributed Learning Course [Baker Hughes INTEQ]. – USA, Houston: Training & Development, 1995. – 410. (Confidential 80270H Rev. B. December 1995).

3 Влияние углерода на контактную выносливость цементируемой и высокоуглеродистой сталей / [Б.Б. Винокур, Р.А. Кондратюк, Р.А. Хруник и др.] // Физико-химическая механика материалов. – 1986. – №2. – С. 96-98.

4 Петрусевич А.И. Контактная прочность деталей машин / А.И. Петрусевич. – М.: Машиностроение, 1970. – 64 с

5 Влияние внешних факторов на контактную прочность при качении / [С.В. Пинегин, И.А. Шевелев, В.М. Гудченко и др.]. – М.: Машиностроение, 1972. – 100 с.

6 Яким Р.С. Теорія і практика забезпечення якості та експлуатаційних показників цементованих деталей шарошkových бурових доліт: монографія / Р.С. Яким, Ю.Д. Петрина. – Івано-Франківськ: Видавництво ІФНТУНГ, 2011. – 189 с.

7 Дрозд М.С. Влияние глубины цементированного (нитроцементированного) слоя и твердости сердцевины зубьев шестерен на контактную прочность / М.С. Дрозд, Е.И. Тескер. // Вестник машиностроения. – 1976. – №3. – С.76–78.

8 Козловский И.С. Химико-термическая обработка шестерен / И.С. Козловский. – М.: Машиностроение, 1970. – 230 с.

9 Писаренко Г.С. Актуальные вопросы прочности в современном машиностроении / Г.С. Писаренко. – К.: Наукова думка, 1992. – 192 с.

10 Деев Н.А. Исследование феноменологии и механизма усталостного разрушения низкоотпущенных высокопрочных сталей: дис. кандидата техн. наук: 05.16.01 / Деев Николай Александрович. – Львов, 1976. – 128 с.

11 Chai G. On the formation of subsurface non-defect fatigue crack origin in „fish eye” / G. Chai // Proceedings of Third International Conference on Very high cycle fatigue. Ritsumeikan University, Kusatsu. – Japan. – 2004. – p.24-31.

12 Shiozawa K. Subsurface crack initiation and propagation mechanism of high-strength steel in very cycle fatigue regime” / Kazuaki Shiozawa, Seiichi Nishino, Yuuichi Morii // Proceedings of Third International Conference on Very high cycle fatigue. Ritsumeikan University, Kusatsu, – Japan. – 2004. – p.85-92

13 Harlow D. Gary. Crack growth based probability modelin of S-N response / D.Gary Harlow, Robert P.Wei, Tatsuo Sakai, Noriyasu Oguma // Proceedings of Third International Conference on Very high cycle fatigue. Ritsumeikan University, Kusatsu. – Japan. – 2004. – p.542-552.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
12.05.11*

*Рекомендована до друку професором  
Петриною Ю.Д.*