

УДК 621.891

О. В. РАДЬКО¹, А. К. СКУРАТОВСЬКИЙ², М. Я. ТКАЧ³¹Національний авіаційний університет, Україна²Національний технічний університет України «КПІ», Україна³Національний університет оборони України ім. Івана Черняховського, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ ВАКУУМНИМ ГАЗОТЕРМОЦИКЛІЧНИМ ІОННО-ПЛАЗМОВИМ АЗОТУВАННЯМ

Досліджено вплив вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування на зносостійкість сталі 40ХН. Виявлено зростання зносостійкості у 1,8...2,2 рази залежно від режиму обробки. Отримана математична модель залежності інтенсивності зношування від технологічних та експлуатаційних факторів.

Ключові слова: зносостійкість, іонно-плазмове азотування, бурильна колона, критерій, фактори.

Вступ. Одним із шляхів підвищення техніко-економічних показників буріння свердловин є зменшення кількості відмов колон бурильних труб, на ліквідацію яких витрачаються значні кошти [1]. Однією з основних причин виходу бурильних колон з ладу є зношування, якого зазнають їх елементи в процесі експлуатації [2]. У зв'язку з цим зростає актуальність проблеми зменшення зношування зовнішньої поверхні сталевих елементів бурильних колон як визначального фактора їх довговічності.

Перспективним для підвищення зносостійкості елементів бурильних колон є метод вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування в пульсуючому режимі (ВГТЦПА) [3].

Використання цього методу для зміцнення елементів бурильних колон зі сталі 40ХН показало його ефективність для підвищення корозійної стійкості та опору багатоциклової втоми [4]. Проте, наразі відсутні дані щодо параметрів технологічного процесу ВГТЦПА, які були б оптимальними з огляду на забезпечення максимальної зносостійкості зміцнених конструкційних елементів.

Постановка завдання. Метою роботи є оцінка зносостійкості зміцненого вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням шару конструкційних елементів бурильних колон зі сталі 40ХН та оптимізація цього технологічного процесу за триботехнічним критерієм – інтенсивністю зношування.

Результати дослідження та їх обговорення. З огляду на значну кількість параметрів, що визначають умови протікання технологічного процесу ВГТЦПА, для скорочення часу та матеріальних витрат на проведення експериментальних досліджень було застосовано теорію планування експерименту. При цьому задачу оптимізації технологічного процесу ВГТЦПА розглянуто як багатофакторну з врахуванням конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів. Використовуючи методи експертної оцінки та зробивши серію відсіюючих експериментів, отримано середній апріорний ранжирований ряд факторів, що впливають на технологічний процес ВГТЦПА. На підставі аналізу проведеного ранжування визначено групу факторів, що найбільше впливають на величину критерію оптимізації, за який було обрано інтенсивність зношування (Y_1). В матрицю планування у якості керованих

факторів увійшли: час дифузійного насичення (X_1), тиск реакційного газу (X_2), склад реакційного газу (X_3), температура газу (X_4) та величина температурного циклу (X_5), питома навантаження (X_6), за якого експлуатуються досліджувані сталеві елементи (табл. 1).

Таблиця 1

Фактори та рівні їх варіювання

№ з/п	Фактори	Позначення	Рівні варіювання		
1	Час дифузійного насичення, хв	X_1	90...240		
2	Тиск реакційного газу, Па	X_2	25...250		
3	Склад реакційного газу	X_3	60%Ar + + 40%N ₂	75%Ar + + 25% N ₂	90%Ar+ + 10% N ₂
4	Температура газу, °С	X_4	400	500	600
5	Величина температурного циклу, °С	X_5	25–125 (крок 25)		
6	Навантаження, МПа	X_6	2,5–25 (крок 2,5)		

Під час проведення досліджень використовували план експерименту, згеноерований на основі ЛП_т – чисел [5]. Матриця планування експерименту в кодованих значеннях наведена в табл. 2.

Таблиця 2

План експерименту в натуральних координатах

№ з/п	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
1	170	140	75%Ar+25%N ₂	773	75	12,5
2	130	190	60%Ar+40%N ₂	873	50	20
3	200	80	90%Ar+10%N ₂	673	100	7,5
4	110	170	90%Ar+10%N ₂	873	75	5
5	190	50	75%Ar+25%N ₂	773	50	17,5
6	150	100	75%Ar+25%N ₂	673	125	22,5
7	220	220	60%Ar+40%N ₂	773	50	10
8	100	230	90%Ar+10%N ₂	673	25	2,5
9	180	120	60%Ar+40%N ₂	873	100	15
10	140	70	90%Ar+10%N ₂	773	75	20
11	210	180	75%Ar+25%N ₂	673	125	10
12	120	90	60%Ar+40%N ₂	873	75	5
13	190	200	90%Ar+10%N ₂	673	25	17,5
14	160	130	60%Ar+40%N ₂	773	100	25
15	230	40	75%Ar+25%N ₂	873	50	12,5
16	90	150	75%Ar+25%N ₂	673	75	7,5

Поверхнєве зміцнення зразків зі сталі 40ХН здійснювалося на установці ВПА-1, яка розроблена в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України та має автоматизовану систему контролю та управління технологічним процесом [6]. Режими поверхневого зміцнення: тиск реакційного газу – 25...250 Па; температура процесу – 400, 500 та 600 °С; величина температурного

циклу – 25...250 °С; час обробки – 90...240 хв.; склад реакційного газу – 40%N₂ + 60%Ar; 25%N₂ + 75%Ar; 10%N₂ + 90%Ar.

Триботехнічні характеристики іонноазотованих шарів визначали на машині тертя [7] за таких умов: мастильне середовище – мастило ЦИАТИМ-201; питоме навантаження – 2,5...25 МПа; швидкість ковзання – 0,4; 1,0 м/с. Шорсткість поверхонь зразків відповідала $R_a = 0,3...0,4$ мкм, а роликів-контртіл зі сталі 40ХН – $R_a = 0,5$ мкм. Контакт пари тертя відбувався за схемою «диск-колодка» (рис. 1). Для цього робочі поверхні зразків виконувалися у формі угнутого циліндра діаметром 40 мм. Для порівняльної оцінки зносостійкості матеріалів у вказаних умовах заміряли коефіцієнт тертя та розраховували вагову інтенсивність зношування I у кг/см² на 1000 м шляху тертя.

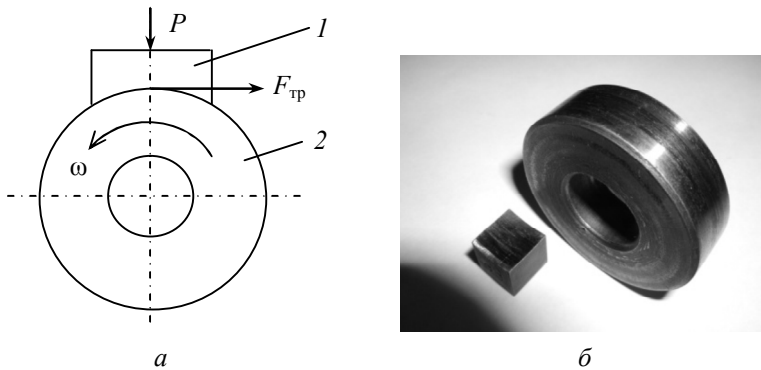


Рис. 1. Пара тертя «диск-колодка»: а – схема контакту пари тертя «диск-колодка»:

1- зразок; 2 - ролик-контртіло; б – загальний вигляд зміщеного зразка та ролика-контртіла після випробувань

В результаті проведення експериментальних досліджень поверхневих шарів зразків зі сталі 40ХН згідно з планом експерименту встановлено (рис. 2, 3), що значення інтенсивності зношування залежно від режимів технологічного процесу ВГТЦПА зростають у 1,8...2,2 разу порівняно з інтенсивністю зношування термооброблених зразків (табл. 3).

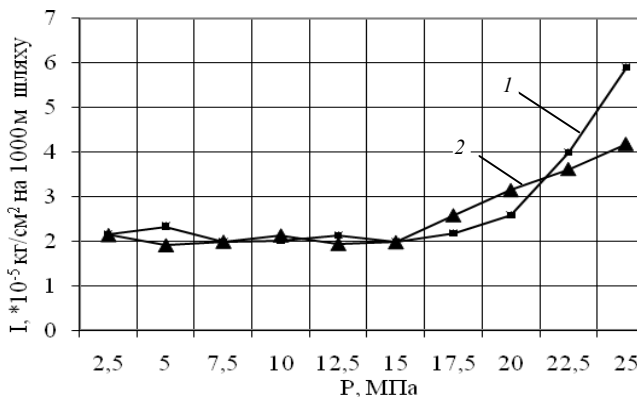


Рис. 2. Залежність інтенсивності зношування термообробленого (ТО) зразка (гартування при 790...820 °С у оливі, відпускання при 500...540 °С) від питомого навантаження P : 1 – $V = 0,4$ м/с; 2 – $V = 1,0$ м/с

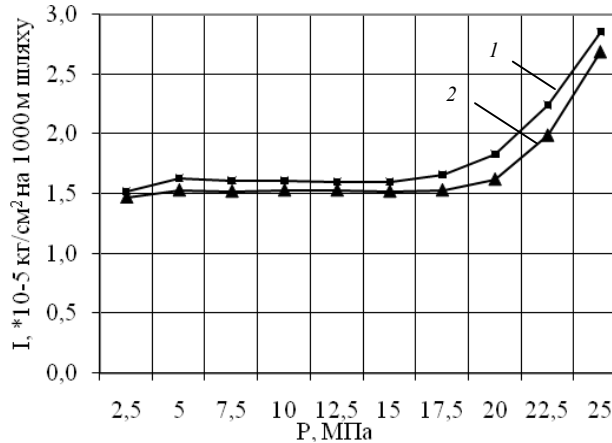


Рис. 3. Залежність інтенсивності зношування попередньо ТО та зміцненого ВГТЦПА ($t = 230$ хв; $P = 40$ Па; $75\%Ar + 25\%N_2$; $T = 600$ °С; $\Delta T = 50$ °С) зразка від питомого навантаження P : 1 – $V = 0,4$ м/с; 2 – $V = 1,0$ м/с

Таблиця 3

Результати триботехнічних випробувань

№ режиму обробки	Інтенсивність зношування, $I \cdot 10^{-5}$ кг·см ⁻² на 1000 м шляху	
	Y_{21}	Y_{22}
1	1,47	1,41
2	1,56	1,60
3	1,43	1,40
4	1,27	1,29
5	1,43	1,44
6	1,99	2,03
7	2,26	2,23
8	1,35	1,32
9	1,40	1,41
10	1,67	1,71
11	1,37	1,35
12	1,33	1,30
13	1,53	1,50
14	2,50	2,53
15	1,53	1,49
16	1,52	1,55

Після проведення статистичного аналізу результатів експерименту за допомогою пакета прикладних програм ПРІАМ (планування, регресія і аналіз моделей) [4] побудована регресійна модель залежності критерію оптимізації – інтенсивності зношування Y – від технологічних та експлуатаційних факторів:

$$Y_I = 1,61058 + 0,494431z_1z_6 - 0,376419z_4u_6 - 0,273589z_4 - 0,281322z_3z_6 + 0,124359z_6 - 0,141168z_1z_5;$$

$$\text{де } x_1 = 0,0142815(X_I - 160,604);$$

$$z_1 = 1,64458(x_1^2 - 0,0191164x_1 - 0,372824);$$

$$u_1 = 3,31219(x_1^3 - 0,0582365x_1^2 - 0,654433x_1 + 0,145849);$$

$$x_3 = X_3 - 1;$$

$$z_3 = 1,6(x_3^3 - 0,625);$$

$$x_4 = 0,009412(X_4 - 766,75);$$

$$z_4 = 1,64632(x_4^4 - 0,0907563x_4 - 0,605536);$$

$$x_5 = 0,0227556(X_5 - 74,8047);$$

$$z_5 = 1,55962(x_5^5 - 0,0132701x_5 - 0,354272);$$

$$u_5 = 3,1495(x_5^5 - 0,00418042x_5^5 - 0,675089x_5 - 0,00322023);$$

$$x_6 = 0,098507(X_6 - 13,4424);$$

$$z_6 = 1,66877(x_6^6 - 0,0706331x_6 - 0,349593);$$

$$u_6 = 3,23485(x_6^3 - 0,0766846x_6^2 - 0,623196x_6 - 0,00211555).$$

Перевірка отриманих моделей за відповідними критеріями [4] показала їх адекватність, інформативність та стійкість.

На основі отриманих результатів за допомогою побудови відповідних геометричних поверхонь (сімейства графіків часткових рівнянь регресії) одержано наочне уявлення про графічний образ функції відгуку. По горизонталі обирали змінну, залежність відгуку від якої бажали дослідити. Опорною обирали змінну, що або входить у взаємодію з раніше обраною, або має важливе значення при дослідженні. Решту змінних фіксували на визначених рівнях (як приклад, рис. 4-6).

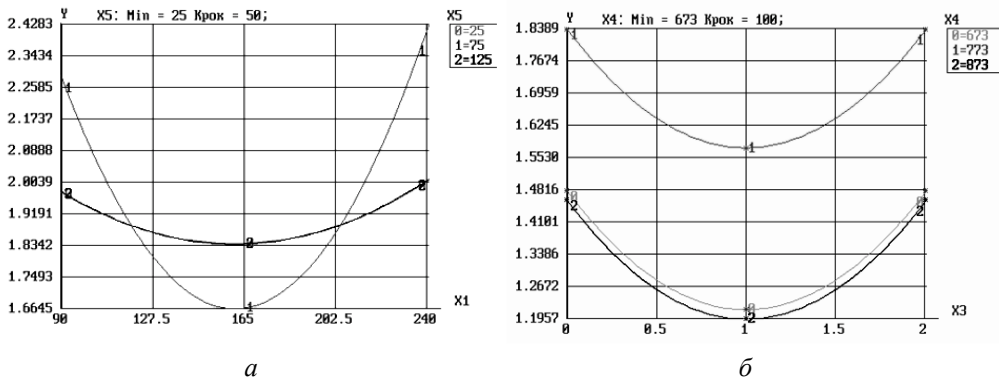


Рис. 4. Графічне відображення часткових рівнянь регресії:

$$a - Y = f(X_1, X_5); \quad б - Y = f(X_3, X_4)$$

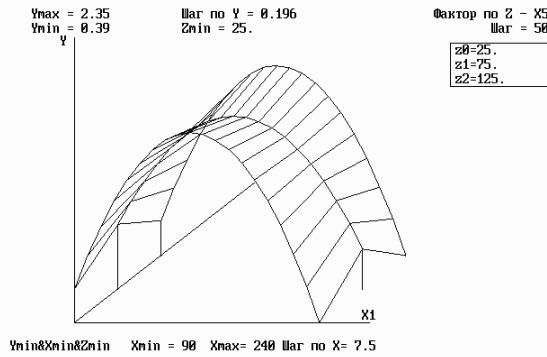


Рис. 5. Графік дослідження поверхні відгуку $Y = f(X_1, X_5)$ в тривимірному просторі

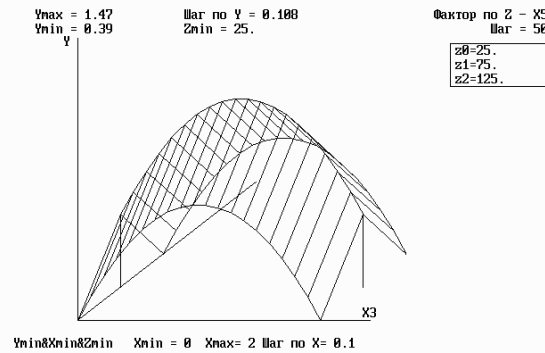


Рис. 6. Графік дослідження поверхні відгуку $Y = f(X_3, X_5)$ в тривимірному просторі

Візуальний аналіз графіків дозволяє провести детальний аналіз впливу факторів на значення функції відгуку та визначити ті значення факторів, які протягом всього часу впливу здійснюють найбільший чи найменший ефект.

Висновки. В результаті проведених досліджень встановлено, що поверхневе зміцнення сталі 40ХН за допомогою методу ВГТЦПА дозволяє підвищити її зносостійкість у 1,8...2,2 рази залежно від режиму обробки.

Використання методу ВГТЦПА дозволить підвищити ресурс елементів бурильної колони, а також прогнозувати їх довговічність. Застосування створених моделей на виробництві дозволить уникнути витрат часу, людських та матеріальних ресурсів на проведення додаткових експериментів при зміні умов експлуатації або вимог до властивостей оброблених деталей.

Список літератури

1. Янишевський А. Я. Прогнозування зносу та залишкового ресурсу елементів бурильної колони : автореф. дис... канд. наук / Янишевський Андрій Ярославович — Івано-Франківськ, 2008. — 14 с.
2. Файн Г. М. Проектирование и эксплуатация бурильных колонн для глубоких скважин / Г. М. Файн, А. С. Неймарк. — М.: Недра, 1985. — 237 с. — 13 с.
3. Оптимизация технологи нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости / [Б. А. Ляшенко, Е. К. Соловых, В. И. Мирненко, А. В. Рутковский, М. И. Черновол]; под ред. В. В. Харченка. — К.: Ин-т пробл. прочности им. Г. С. Писаренка НАН Украины, 2010. — 193 с.

4. Підвищення довговічності елементів бурильної колони методом дифузійного насичення при вакуумному газотермоциклічному іонному азотуванні в імпульсному режимі / В. І. Мірненко, Б. О. Чернов, О. В. Радько, М. Я. Ткач // Сборник научных трудов ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения». – 2013. – В. 16. – С. 136-142.

5. Лапач С. Н. Статистические методы в фармакологии и маркетинге фармацевтического рынка / Лапач С. Н., Пасечник М. Ф., Чубенко А. В. – К.: ЗАТ «Укрспецмонтажпроект», 1999. – 312 с.

6. Автоматизована система контролю та управління технологічним процесом імпульсного іонного азотування / Мірненко В. І., Рутковський А. В., Кошовник В. А., Радько О. В. // Збірник наукових праць ДНДІА. – 2006. – № 9. – С. 297-302.

7. Пат. 24695 Україна МПК (2206) G01N3/56. Машина тертя / Скуратовський А. К.; заявник та патентовласник Нац. техн. ун-т України «Київський політехнічний інститут». – № у 200702330; заявл. 03.03.2007; опубл. 10.07.2007, Бюл. № 10. – 4 с.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2014

О. В. РАДЬКО, А. К. СКУРАТОВСКИЙ, М. Я. ТКАЧ

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ ВАКУУМНЫМ ГАЗОТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИМ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ АЗОТИРОВАНИЕМ

Исследовано влияние вакуумного газотермоциклического ионно-плазменного азотирования на износостойкость стали 40 ХН. Выявлен рост износостойкости в 1,8 ... 2,2 раза в зависимости от режима обработки. Получена математическая модель зависимости интенсивности износа от технологических и эксплуатационных факторов.

Ключевые слова: износостойкость, ионно-плазменное азотирование, бурильная колонна, критерий, факторы.

О. V. RADKO, A. K. SKURATOVSKYI, M. Y. TKACH

IMPROVING THE DURABILITY OF THE DRILL STRING ELEMENTS BY GASTHERMOCYCLIC VACUUM ION-PLASMA NITRIDING

The influence of gasthermocyclic vacuum ion-plasma nitriding on the wear resistance of 40XH steel are investigated. Increase the wear resistance was found in 1.8...2.2 times, depending on the mode of treatment. A mathematical model of the wear rate depending on the technological and operational factors are received.

The gasthermocyclic vacuum ion-plasma nitriding using will improve the life of the drill string elements and predict their longevity. The use of created models in manufacturing will avoid time-consuming, human and material resources to carry out additional experiments by changing conditions or requirements to machined parts properties.

Keywords: wear resistance, ion-plasma nitriding, the drill string, criterion, factors.

Радько Олег Віталійович – к.т.н., доцент кафедри машинознавства, Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна, radlviv@ukr.net.

Скуратовський Анатолій Кирилович – к.т.н., доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна.

Ткач Микола Ярославович – начальник навчальної лабораторії кафедри, Національний університет оборони України ім. Івана Черняховського, м. Київ, Україна.