

**Каплун П.В.**Хмельницький національний університет,  
м. Хмельницький, Україна  
E-mail: kaplunpavel@gmail.com**ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ  
ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ПІДШИПНИКІВ  
КОЧЕННЯ ІОННИМ АЗОТУВАННЯМ**

УДК:621.726

В статі наведені результати експериментальних досліджень зносостійкості та довговічності кулькових підшипників кочення з сталі ШХ15 в мастилi при навантаженнях на кульку 150 Н після іонного азотування в безводневих середовищах за різними технологічними режимами. На основі планування експериментів одержано математична залежність впливу технологічних параметрів процесу азотування на зношування і довговічність підшипників кочення. Визначено оптимальний режим азотування за критерієм максимальної зносостійкості і довговічності підшипників.

**Ключові слова:** підшипник кочення, кулька, іонне азотування, зношування, довговічність.

**Вступ**

Підвищення зносостійкості і довговічності підшипників кочення є важливою задачею машинобудування. Найбільш поширена причина відмов підшипникових вузлів загального призначення, що працюють в автомобілях, тракторах, насосах, редукторах, станках, під'ємно-транспортному обладнанні – втомне руйнування [1, 2]. Поряд з цим не менш важливими є процеси зношування, що відбуваються в підшипниках кочення. Величина зносу доріжок і тіл кочення в процесі експлуатації безпосередньо впливають на довговічність підшипників кочення. При експлуатації важко навантажених підшипників кочення в місцях контакту кульок з кільцями на доріжці кочення діють великі контактні напруження, що приводять до виникнення пластичних деформацій на поверхні, зміни мікротвердості і утворення наклепу в поверхневих шарах матеріалу. Це негативно впливає на довговічність підшипників кочення.

Як показує аналіз досліджень [3, 4], чим нижчі фізико-механічні властивості поверхневих шарів доріжок кочення у вихідному стані, тим швидше відбувається процес пластичного деформування (вичерпується запас пластичності) і більшою є швидкість зміцнення, раніше завершуються структурні перетворення і настає межа насичення. Ця межа визначається мікротвердістю поверхні. Тому мікротвердість поверхні доріжки кочення рекомендують використовувати як деформаційний критерій руйнування металу поверхневих шарів кілець підшипників кочення і за його допомогою оцінювати довговічність останніх, не проводячи довгих ресурсних випробувань [3].

Під дією циклічного навантаження в структурі матеріалу виникають мікропластичні деформації, при вичерпанні яких утворюються мікротріщини. Вони зростають зі збільшенням кількості циклів навантаження і приводять до руйнування поверхні кочення. Стимування пластичних деформацій на доріжці кочення можна досягти збільшенням твердості матеріалу [5]. Проте слід враховувати, що зі збільшенням твердості матеріалу підвищується його крихкість і перевищення певних меж твердості на доріжці кочення приводить до зниження контактної витривалості матеріалу.

Одним із перспективних напрямків підвищення зносостійкості і довговічності підшипників кочення є зміцнення поверхні матеріалу нанесенням дифузійних покриттів методами хіміко-термічної обробки і, зокрема, методом іонного азотування в безводневих середовищах. Даний метод забезпечує утворення на поверхні дифузійних шарів різної твердості та різного фазового складу і виключає шкідливий вплив водню на міцність матеріалу [6].

**Методика досліджень**

Проводилися експериментальні дослідження зносостійкості і довговічності кулькових упорних підшипників кочення серії 8205 (сталь ШХ15) в мастилi I-20 на спеціальному стенді при навантаженні на кульку 150 Н (максимальні контактні напруження 3180 МПа). Кільця підшипників азотувалися в плазмі тліючого розряду в безводневих середовищах (сумішах азоту з аргоном) за різними технологічними режимами. Технологічні параметри процесу азотування змінювалися в широких межах (температура азотування  $T = 480 - 600$  °С; тиск в вакуумній камері  $P = 80 - 400$  Па; час дифузійного насичення  $\tau = 20 - 240$  хв; вміст аргону в суміші з азотом  $Ar = 0 - 76$  %). В процесі досліджень вимірювалися знос та мікротвердість на доріжці кочення. Для скорочення кількості експериментів при дослідженні впливу зазначених вище технологічних параметрів на зносостійкість і довговічність підшипників було застосовано метод планування експериментів – 4-х факторний план другого порядку Хартлі [7], відповідно до якого азотування проводилося за 17 режимами (табл. 1). При цьому математична залежність зносостійкості підшипників від технологічних параметрів процесу азотування описується рівнянням регресії, яке має вид:

$$\varphi(x) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{44} x_4^2 +$$

$$+ \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{14}x_1x_4 + \beta_{23}x_2x_3 + \beta_{24}x_2x_4 + \beta_{34}x_3x_4, \quad (1)$$

де  $\varphi(x)$  – функція відклику (вихідна змінна);

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$  – коефіцієнти рівняння регресії;

$x_i, x_j$  – незалежні змінні величини (фактори).

Величина зносу в підшипниках кочення являє собою суму пластичної деформації поверхні матеріалу від контактного навантаження на кульку і зношування від проковзування кульок. Дослідженнями [8] встановлено, що в упорних кулькових підшипниках серії 8205 при навантаженні на кульку 150 Н і колійній швидкості рухомого кільця 1,2 м/с коефіцієнт проковзування складає 0,036, а швидкість проковзування 0,054 м/с. Довговічність підшипників визначалася по кількості циклів навантаження до початку викришування на доріжці кочення за формулою (2):

$$N = T \cdot n \cdot z, \quad (2)$$

де  $T$  – час випробувань в хв.;

$n$  – частота обертання підшипника;

$z$  – кількість кульок в підшипнику.

### Результати досліджень

Дослідження показали (табл. 1), що інтенсивність зношування підшипників після різних режимів азотування змінювалася в широких межах від  $6,52 \cdot 10^{-11}$  до  $22,29 \cdot 10^{-11}$ . При цьому мікротвердість, товщина та фазовий склад азотованих шарів теж змінювалися в широких межах. В залежності від їх величини та співвідношення ми одержували різну довговічність підшипників, що змінювалася від  $22,5 \cdot 10^6$  до  $29,9 \cdot 10^6$  циклів. Це свідчить про те, що властивості азотованого шару можна оптимізувати для одержання максимальної зносостійкості і довговічності підшипників кочення.

Таблиця 1

**Вплив технологічних режимів іонного азотування на товщину  $h_n$  і мікротвердість  $H_{100}$  азотованого шару сталі ШХ15 та інтенсивність зношування упорних підшипників в мастилi при навантаженні на кульку 150 Н**

№ режиму азотування	Значення факторів режиму азотування				$h_n$ , мкм	$H_{100}$ , МПа	Інтенсивність зносу, $I \cdot 10^{-11}$	Довговічність $N \cdot 10^6$
	$T$ , °C	$P$ , Па	$\tau$ , хв.	об. % Ar				
1	570	320	185	57	317	8248	9,080	28,48
2	510	320	185	57	230	7828	14,424	25,49
3	570	160	185	19	306	9110	8,564	28,77
4	510	160	185	19	218	7450	17,139	25,02
5	570	320	75	19	248	9105	17,280	24,98
6	510	320	75	19	162	7970	22,291	22,60
7	570	160	75	57	216	8660	10,788	27,95
8	510	160	75	57	171	7115	19,697	23,85
9	480	240	130	38	158	6680	16,959	25,11
10	600	240	130	38	312	9060	6,525	29,90
11	540	80	130	38	188	7440	14,013	26,46
12	540	400	130	38	280	9190	16,966	25,10
13	540	240	20	38	120	8249	14,875	26,06
14	540	240	240	38	300	8591	11,377	27,67
15	540	240	130	0	277	8374	22,098	22,74
16	540	240	130	76	233	7902	16,456	25,34
17	540	240	130	38	276	8780	11,887	27,44

На основі експериментальних даних одержана емпірична залежність (3) інтенсивності зношування упорних підшипників кочення із сталі ШХ15 від технологічних параметрів процесу іонного азотування.

$$I = (16 - 2,8x_1 - 1,8x_2 - 5,0x_3 - 5,3x_4 - 0,14x_1^2 + 6,6x_2^2 + 3,8x_3^2 + 7,5x_4^2 + 6,1x_1x_2 - 5,3x_1x_3 - 0,5x_1x_4 + 7,7x_2x_3 - 11,9x_2x_4 - 1,9x_3x_4) \cdot 10^{-11}, \quad (3)$$

де  $x_1 = \frac{(T-540)}{60}$ ;  $x_2 = \frac{(P-240)}{160}$ ;  $x_3 = \frac{(\tau-130)}{110}$ ;  $x_4 = \frac{(Ar-38)}{38}$ .

Використовуючи рівняння (3), на рис. 1 наведені залежності інтенсивності зношування упорних підшипників кочення в залежності від технологічних параметрів процесу іонного азотування з якого видно, що технологічні параметри мають великий вплив на інтенсивність зношування, змінюючи її в широких межах. Це дозволяє оптимізувати процес дифузійного насичення за критерієм максимальної зносостійкості і довговічності підшипників. Визначено оптимальний режим іонного азотування ( $T = 600^\circ\text{C}$ ;  $P = 200$  Па;  $\tau = 240$  хв.; середовище 43 %  $\text{N}_2 + 57$  %  $\text{Ar}$ ), що забезпечив мінімальну інтенсивність зношування  $I = 3,45 \cdot 10^{-11}$  та найвищу довговічність  $31,4 \cdot 10^6$  циклів.

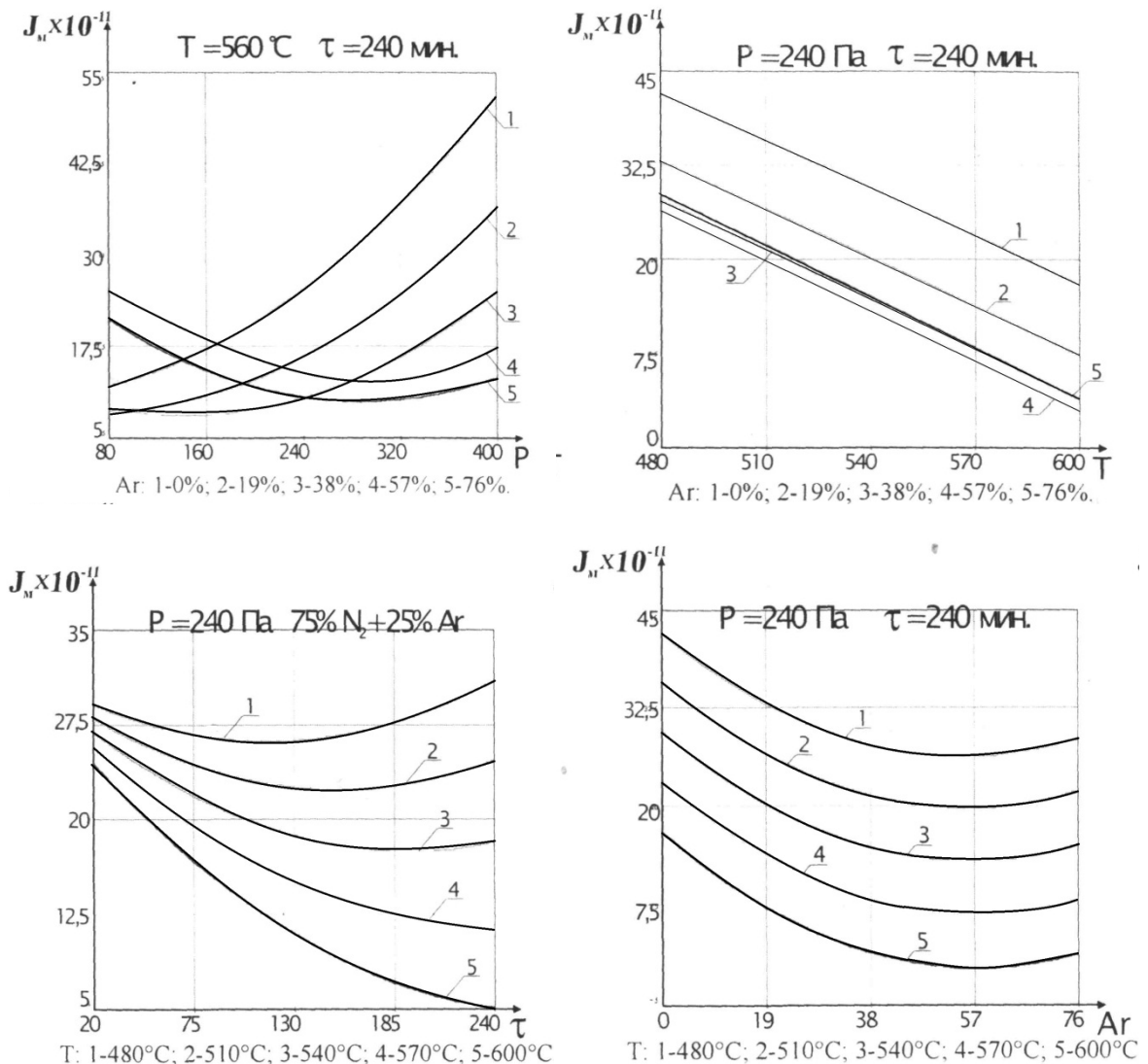


Рис. 1 – Залежність інтенсивності зношування сталі ШХ15 в маслі І-20 від технологічних параметрів іонного азотування в безводневому середовищі при навантаженні на кульку 150 Н

На основі проведених нами фактографічних досліджень встановлено, що руйнування поверхні кочення зразків з покриттями при їх багатоциклового випробуванні на тертя кочення з проковзуванням відбувається викришення і відшарування частинок матеріалу поверхневого шару. В результаті утворюють раковини глибиною від 150 до 160 мкм (рис. 2).

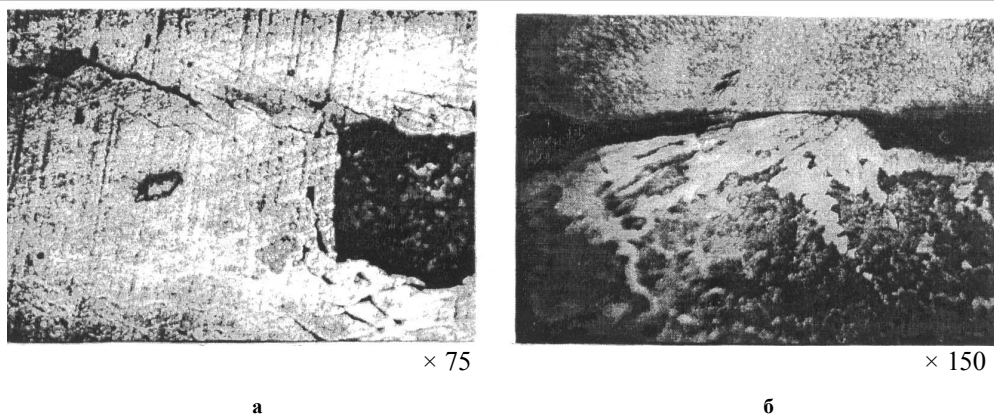


Рис. 2 – Характер зношування азотованої за режимом 1 (табл. 1) сталі ШХ15 після випробувань на тертя кочення при навантаженні на кульку 150 Н:

а – доріжка кочення;  
б – поперечний переріз

У зв'язку з цим поверхня кочення швидко руйнується і стає непридатною до подальшої експлуатації (катастрофічне руйнування). Під дією великих навантажень величина зносу від пластичної деформації є переважаючою в сумарному зношуванні при коченні з проковзуванням. Руйнування доріжки кочення відбувається у результаті втоми поверхневих шарів композиції “покриття-основа” під дією циклічного навантажень з великою частотою.

Процес зношування при багатоциклового навантаженні в процесі кочення поділяється на три стадії: 1 – припрацювання; 2 – накопичення пошкоджень; 3 – руйнування. В азотованих шарах загартованої сталі ШХ15 у початковий період (до  $0,01 \cdot 10^6$  циклів, стадія припрацювання) відбувається перебудова структури поверхні азотованого шару, що приводить до часткового (до 15 %) пониження твердості. При подальшому циклічному навантаженні відбувається ущільнення структури поверхневого шару і підвищення його мікротвердості до максимального значення (стадія накопичення пошкоджень), що на 10 - 15 % перевищує мікротвердість поверхні до початку випробувань. Така мікротвердість зберігається на протязі значної кількості циклів навантаження. На стадії руйнування мікротвердість на доріжці кочення значно знижується (табл. 2).

Таблиця 2

**Кінетика зношування сталі ШХ15 без термообробки та з різними покриттями при випробуваннях на тертя кочення (навантаженні на кульку 150 Н)**

№ п/п	Кількість циклів, $N \cdot 10^6$	Сталь без термообробки		Сталь азотована режим 2		Сталь азотована режим 1 + оксидування 30 хв.	
		Знос $U$ , мкм	Мікротвердість доріжки кочення $H_{100}$ , МПа	Знос $U$ , мкм	Мікротвердість доріжки кочення $H_{100}$ , МПа	Знос $U$ , мкм	Мікротвердість доріжки кочення $H_{100}$ , МПа
1	0	0	3440	0	7860	0	6140
2	0,01	17	3350	10	6500	9	5100
3	0,05	22	3240	15	7580	13	6500
4	0,1	30	3450	17	7600	15	6200
5	0,2	41	3550	18	7550	16	6600
6	0,3	42	3800	19	7860	17	6900
7	0,4	43	3880	20	8100	19	6850
8	0,5	44	3640	21	8150	20	6860
9	0,6	45	3500	22	8400	21	6870
10	0,7	46	3450	23	8720	21,5	7060
11	0,8	Руйнування, пітинг		24	7880	22	7500
12	0,9			25	7800	22,5	7050
13	1,0			Руйнування, пітинг		23	6640
14	1,1					23,5	6530
						Руйнування, пітинг	

Слід відзначити, що на величину пластичної деформації при дії нормального навантаження великий вплив має твердість основи, на яку опирається азотований шар. При малій твердості основи і великому навантаженні на тіла кочення різко збільшується пластична деформація поверхні кочення, що обумовлює швидке руйнування азотованого шару. Це підтверджується при азотуванні сталей без попередньої термічної обробки. Загартовані сталі при азотування одержують високотемпературний відпуск, при якому зменшується твердість серцевини, що приводить до зменшення ефекту від азотування. Зокрема, мікротвердість серцевини загартованої сталі ШХ15 після іонного азотування при температурі 570 °С зменшилася з 7100 МПа до 5900 МПа. Це обумовило збільшення пластичної деформації і інтенсивності зношування на доріжці кочення при певних режимах азотування (з малою товщиною та малою твердістю азотованого шару) в порівнянні з загартованою сталлю. Зменшення зносу та збільшення довговічності сталі ШХ15 після оксидазотування (табл. 2) пояснюється тим, що на твердий азотований шар нанесено тонка оксидна плівка меншої твердості, яка сприяла зменшенню контактних напружень за рахунок збільшення площадки контакту [6].

На величину пластичної деформації та на величину і швидкість зміни мікротвердості на поверхні суттєво впливають фізико-механічні характеристики покриття (товщина, мікротвердість, градієнт мікротвердості по глибині та фазовий склад азотованого шару). Ці кінетичні показники зменшуються з підвищенням мікротвердості та товщини покриття і зменшенням градієнта твердості по глибині. Відомо, що з підвищенням твердості збільшується крихкість. Тому для кожного виду покриттів є оптимальне співвідношення твердості і пластичності, при якому не відбувається крихкого руйнування при коченні в конкретних умовах експлуатації. Нашими дослідженнями встановлено, що для азотованих дифузійних покриттів при випробуванні в середовищі мастила таке співвідношення досягається при мікротвердості поверхневого шару 7600 - 7800 МПа і відсутності моношару крихкої  $\epsilon$ - фази. Оптимальний технологічний режим азотування, що забезпечив максимальну зносостійкість досліджуваних підшипників кочення, дав такі властивості азотованого шару: мікротвердість поверхні 7800 МПа, товщину 350 мкм, фазовий склад: 28%  $\epsilon$ -фази + 54%  $\gamma'$  + 18%  $\alpha_{Fe}$ .

### Висновки

Таким чином проведені дослідження показали, що іонне азотування в безводневих середовищах суттєво зменшує інтенсивність зношування і в 1,25 рази підвищує довговічність підшипників кочення з сталі ШХ15 при азотуванні за оптимальним технологічним режимом в порівнянні з традиційною технологією їх виготовлення. Для забезпечення більшої довговічності підшипників кочення необхідно щоб азотований шар мав велику товщину, оптимальний фазовий склад та лягав на основу великої твердості.

### Література

1. Галахов М.А. Расчет подшипниковых узлов / М.А Галахов, А.Н. Бурмистров // М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
2. Спришевский А.И. Подшипники качения // М.: Машиностроение, 1968. – 632 с.
3. Зайцев О.В. Структурно-кинетические закономерности микропластических деформаций при поверхностных слоях деталей подшипников качения в условиях изнашивания. // "Трение и износ". – 1986. – №3. – С. 414-421.
4. Троценко В.Т. Усталость и не упругость металлов. – К.: Наукова думка, 1971. – 268 с.
5. Трубин Г.К. Контактная усталость материалов для зубчатых колес / Госнаучтехиздат машиностроительной литературы. – Москва. – 1962. – 403 с.
6. Каплун В.Г. Ионное азотирование в безводородных средах / В.Г. Каплун П.В. Каплун // Хмельницький, ХНУ. – 2015. – 344 с.
7. Красовский Г.И. Планирование эксперимента // Минск: Изд. БГУ, 1982. – 302 с.
8. Каплун П.В. Швидкості проковзування в упорних підшипниках кочення / П. В. Каплун, Я.Т. Кіницький, А.Г. Кузьменко // Журнал "Вісник Технологічного університету Поділля". – 2001. – №1. – С. 110-115.

Поступила в редакцію 29.04.2016

**Kaplun P. V. Advance of wear resistance and durability of rolling bearings after ion nitriding.**

The experimental results of wear resistance and durability of the bearings in oil after the ion nitriding in different modes. The bearings are made of steel ShKh15 brand. Stress on bearing ball was equal to 150 N. The equations depending on the wear resistance and durability of the bearings on the technological parameters of ion nitriding process. Detected the optimal technology mode.

**Keywords:** rolling bearings, ion nitriding, resistance and durability of the bearings.

**References**

1. Galahov M.A., Burmistrov A.N. Raschet podshipnikovyih uzlov. M.: Mashinostroenie, 1988. 272 s.
2. Sprishevskiy A.I. Podshipniki kacheniya. M.: Mashinostroenie, 1968. 632 s.
3. Zaytsev O.V. Strukturno-kineticheskie zakonomernosti mikroplasticheskikh deformatsiy pripoverhnostnyih sloev detaley podshipnikov kacheniya v usloviyah iznashivaniya. "Trenie i iznos", 1986, 7, №3. S.414-421.
4. Troschenko V.T. Ustalost i ne uprugost metallov. K.: Naukova dumka, 1971, 268 s.
5. Trubin G.K. Kontaknaya ustalost materialov dlya zubchatyih koles./Gosnauchtehizdat mashinostroitelnoy literatury, Moskva, 1962, 403s.
6. Kaplun V.G., Kaplun P.V. Ionnoe azotirovanie v bezvodnorodnyih sredah. Hmel'niyskiy HNU. 2015. 344s.
7. Krasovskiy G.I. Planirovanie eksperimenta. Minsk: Izd. BGU, 1982, 302 s.
8. Kaplun P.V., Kinitskiy YA.T., Kuzmenko A.G. SHvidkosti prokovzuvannya v upornih pidshipnikah kochennya. Jurnal "Visnik Tehnologichnogo universitetu Podillya". 2001, №1. S.110-115.