

**Гончар В.А.,  
Каплун П.В.**

Хмельницький національний університет,  
м. Хмельницький, Україна

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
АЗОТОВАНОГО ШАРУ СТАЛІ ШХ15  
ТА ЙОГО ЗНОШУВАННЯ  
В АБРАЗИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

УДК 621.891

Представлено результати експериментальних досліджень властивостей азотованих шарів і їх зносостійкості в абразивному середовищі зразків з сталі ШХ15 після іонного азотування в тліючому розряді. Знайдені оптимальні режими іонного азотування за критеріями зносостійкості, твердості поверхні та товщини азотованого шару.

**Ключові слова:** зносостійкість, азотовані шари, тліючий розряд, абразивне середовище.

При переробці зерна методом екструзування, робочі деталі екструдера (шнек, циліндр) зазнають значних технологічних навантажень: високий тиск і температура, корозійно-абразивне середовище, що зумовлює їх невеликий термін експлуатації. Підвищення зносостійкості шнека і циліндра екструдера є перспективним напрямком дослідження.

В даний час існує багато методів підвищення зносостійкості конструктивних елементів: термічні, хіміко - термічні, напилення, наплавлення зносостійкими матеріалами тощо.

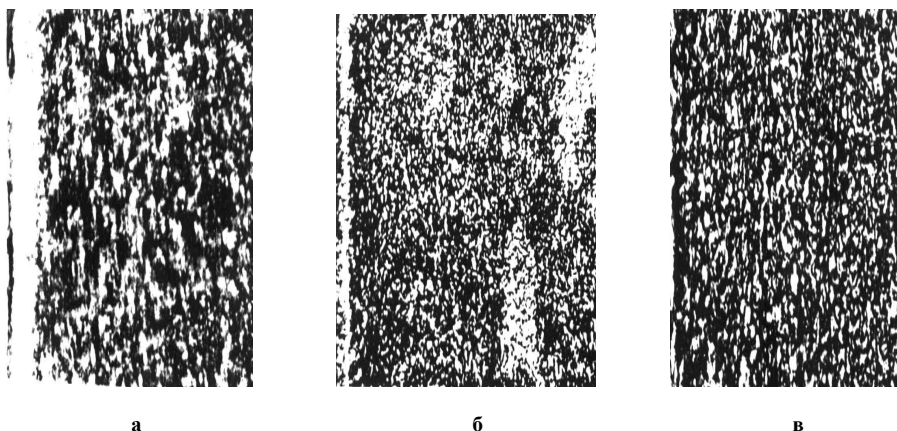
Азотування в тліючому розряді є ефективних методів зміцнення поверхні металів, який дає можливість змінювати властивості поверхневих шарів (твердість, товщину, фазовий склад, градієнт зміни властивостей по товщині) в широких межах [1, 2]. Це дозволяє оптимізувати властивості зміцненого поверхневого шару для забезпечення максимальних експлуатаційних характеристик з врахуванням реальних умов експлуатації конструкційних елементів [3]. В техніці велика кількість деталей машин і інструментів працюють в абразивному і корозійно-абразивному середовищах, що приводить до руйнування їх поверхні абразивними частинками та корозійною дією агресивного середовища. Тому важливим є забезпечення оптимального співвідношення між твердістю, пластичністю і корозійною стійкістю поверхневих шарів.

Нами розроблена технологія і обладнання для хіміко-термічної обробки деталей машин і інструментів в тліючому розряді в безводневих середовищах (суміші азоту з аргоном) [4]. Особливістю даної технології є виключення водневого окрихчення металів в процесі дифузійного насичення і підвищення пластичних характеристик поверхневих шарів за рахунок різного співвідношення фаз [5].

Модифікація поверхні сталі ШХ15 проводилася в тліючому розряді в середовищі суміші азоту з аргоном. Властивості азотованого шару керувалися 4-ма технологічними параметрами: температурою дифузійного насичення, тиском в вакуумній камері, складом насичуючого середовища і часом азотування.

Теоретичні і експериментальні дослідження [6] показали, що всі вказані вище технологічні параметри процесу азотування мають вплив на властивості азотованого шару. Тому нами досліджувався вплив кожного із технологічних факторів при азотуванні в тліючому розряді на твердість, товщину, фазовий склад і градієнт зміни властивостей по товщині азотованого шару.

Змінюючи технологічні параметри процесу азотування, можна змінювати властивості азотованого шару в широких межах, одержуючи на поверхні нітридну зону різного фазового складу, різної товщини або азотовані шари без нітридної зони (рис. 1).



**Рис. 1 – Мікроструктура сталі ШХ15 (x500) після азотованого в тліючому розряді в безводневих середовищах:  
а, б – з нітридною зоною різною товщиною;  
в – без нітридної зони**

Для забезпечення максимальної зносостійкості пар тертя в абразивному середовищі необхідно щоб поверхневі шари мали високу твердість і максимальну товщину. Теоретичними і експериментальними дослідженнями процесу іонного азотування металів [3, 6, 7] показано, що для сталі ШХ15 висока твердість досягається при температурах 560 - 580 °С, а максимальна товщина азотованого шару отримується при протяжності процесу дифузійного насичення 6 - 8 год.

Тому з метою скорочення кількості експериментів при дослідженні властивостей азотованого шару та процесу зношування азотованих зразків було використано двох факторний рототабельний план другого порядку [8]. В процесі досліджень змінювалися такі фактори: склад насичуючого середовища в межах 29 - 71 %, тиск у вакуумній камері в межах – 55 - 225 Па. Тривалість азотування та температура фіксувалися, і становили відповідно 240 хв та 570 °С відповідно.

Для отримання моделі (параметра оптимізації) використовувався алгебраїчний поліном другого порядку [8]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2, \quad (1)$$

де  $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$  – коефіцієнти регресії;

$x_1, x_2$  – змінні фактори.

Для запису умов експерименту і обробки експериментальних даних рівні факторів кодувалися. Прийняті такі змінні фактори:

- тиск в вакуумній камері –  $x_1$ ;
- об'ємний вміст аргону в суміші з азотом –  $x_2$ .

При кодуванні значень  $x_1$  і  $x_2$  верхній рівень позначають +1, нижній –1, а нульовий 0. Кодування фактора  $x_i$  визначається виразом:

$$x_i = \frac{Z_i - Z_{0i}}{\varepsilon_i}, \quad (2)$$

де  $i$  – номер фактора;

$Z_i$  – натуральне значення  $i$ -го фактора;

$Z_{0i}$  – натуральне значення нульового рівня  $i$ -го фактора;

$\varepsilon_i$  – інтервал зміни  $i$ -го фактора.

Експериментальні дослідження проводились на рівнях та з інтервалами, які наведені в табл. 1. Матриця плану для композиційного рототабельного планування другого порядку і результати експериментальних досліджень наведені в табл. 2.

Таблиця 1

Рівні та інтервали зміни факторів

Позначення	Фактори	Рівні варіювання					Інтервал варіювання $\varepsilon$
		- 1,414	- 1	0	+ 1	+ 1,414	
$Z_1$	Тиск, Па	55	80	140	200	225	60
$Z_2$	Об'ємний вміст аргону, %	29	35	50	65	71	15

Таблиця 2

Робоча матриця та результати експериментальних досліджень

Номер режиму азотування	Робоча матриця		Мікротвердість $H_{100}$ , МПа	Товщина азотованого шару, мкм
	$P$ , Па	Ar, %		
$1$	$2$	$3$	$4$	$5$
1	200	65	7651,5	225,0
2	200	35	9292,4	307,1
3	80	65	8736,0	133,3
4	80	35	10110,4	190,0
5	140	71	7861,6	168,0
6	140	29	9972,3	265,2
7	225	50	8307,9	285,1
8	55	50	9655,6	137,2
9	140	50	9113,0	223,0

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5
10	140	50	9113,0	223,0
11	140	50	9113,0	223,0
12	140	50	9113,0	223,0
13	140	50	9113,0	223,0

На основі результатів експериментальних досліджень відповідно до двох факторного рототабельного плану отримані емпіричні математичні залежності товщини азотованого шару (3) і твердості поверхні (4) сталі ШХ15 від вмісту аргону в насичуючому середовищі та тиску, при постійних значеннях двох інших параметрів технологічного процесу азотування ( $\tau = 240$  хв, і температурі  $570$  °С). На основі цих математичних залежностей одержані графіки (рис. 2, 3).

$$h_{(мкм)} = 224,5 + 52,3x_1 - 34,3x_2 - 6,4x_1x_2 - 6x_1^2 - 5,8x_2^2, \quad (3)$$

$$H_{100} = 9171,9 - 476,5x_1 - 746,3x_2 - 66,6x_1x_2 - 68,6x_1^2 - 205,8x_2^2. \quad (4)$$

З рис. 2 видно, що товщина та твердість поверхні азотованого шару змінюються зі збільшенням вмісту аргону в насичуючому середовищі. Максимальні значення цих величин досягаються при оптимальних значеннях вмісту аргону в насичуючому середовищі. Зокрема, максимальна товщина азотованого шару утворюється в межах 22 - 27 %, а максимальна твердість – при 15 - 20 % об'ємного вмісту аргону в насичуючому середовищі.

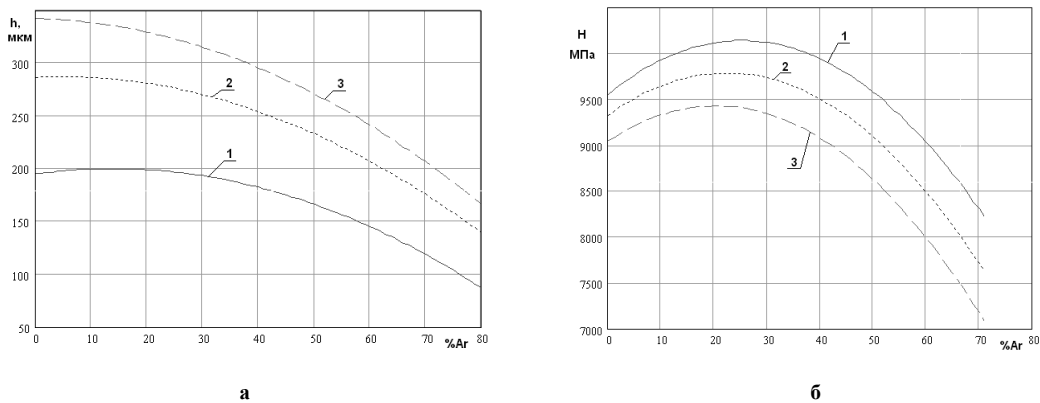


Рис. 2 – Залежність товщини азотованого шару (а) і твердості поверхні (б) сталі ШХ15 від вмісту аргону в насичуючому середовищі при різних тисках: 1 – 80 Па; 2 – 150 Па; 3 – 200 Па

На рис. 3 наведені залежності товщини і твердості поверхні азотованого шару від тиску в вакуумній камері при різних вмістах аргону.

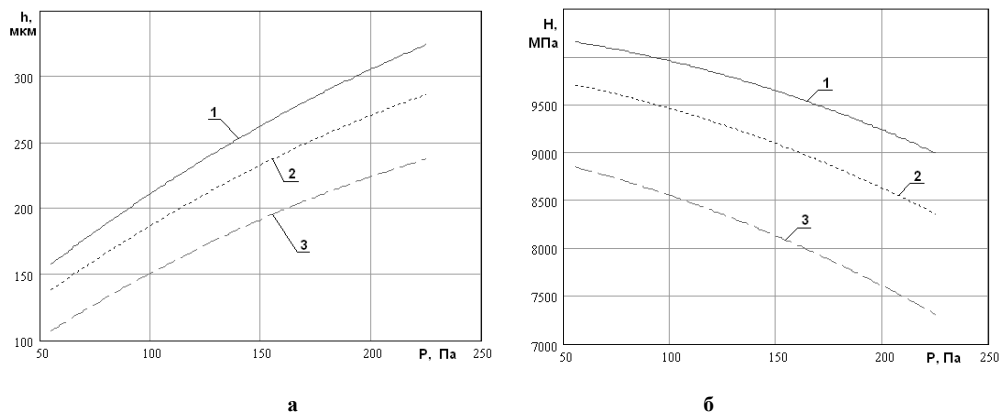


Рис. 3 – Залежність товщини азотованого шару (а), твердості поверхні (б) сталі ШХ15 від тиску в вакуумній камері в процесі дифузійного насичення при різних кількостях аргону в насичуючому середовищі: 1 – 35 % Ar; 2 – 50 % Ar; 3 – 65 % Ar

З рис. 3 видно, що товщина азотованого шару зростає зростає зі збільшенням тиску у вакуумній камері. Це обумовлено збільшенням азотного потенціалу в насичуючому середовищі при збільшенні тиску. Твердість азотованого шару, навпаки, зменшується при збільшенні тиску. Це обумовлено тим, що зі збільшенням тиску збільшується кількість аргону і процес розпилення переважає над процесом адсорбції реактивного газу.

Технологічні параметри процесу азотування мають великий вплив на фазовий склад поверхневого шару і розподіл твердості по його товщині.

При різних режимах азотування на поверхні утворюються різні фази:  $\epsilon$ ,  $\gamma'$  та  $\alpha_{(FeN)}$ . Їх співвідношення впливає на твердість і корозійну стійкість поверхневого шару. Наявність твердої  $\epsilon$ -фази ( $Me_{2-3}N$ ) сприяє підвищенню корозійної стійкості поверхні. Дослідження показують [5] показують, що при азотуванні в тліючому розряді в безводневих середовищах на поверхні можуть бути всі три фази в різному співвідношенні. Вміст  $\epsilon$ -фази збільшується зі збільшенням температури і підвищенням тиску в вакуумній камері.

На рис. 4 наведені графіки зміни твердості по товщині азотованого шару при різних режимах азотування. З рис. 4 і табл. 2 видно, що змінюючи режими азотування можна змінювати градієнт твердості по товщині в значних межах. Це має великий вплив на експлуатаційні характеристики конструкційних елементів.

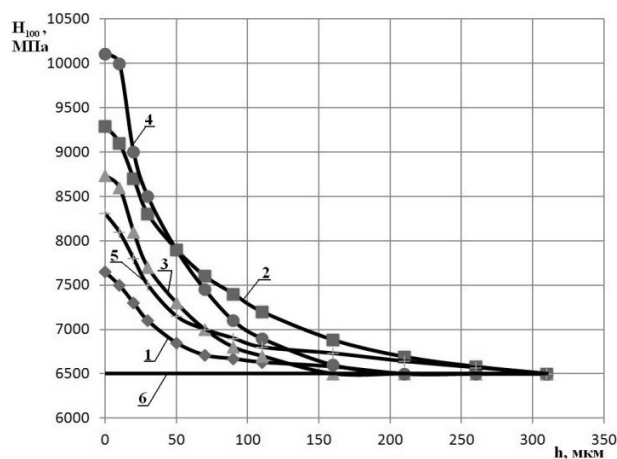


Рис. 4 – Розподіл твердості по товщині азотованого шару в залежності від режимів азотування (табл. 2):  
1 - 4 – відповідні режими азотування; 5 – режим №7; 6 – гартування

Таблиця 4

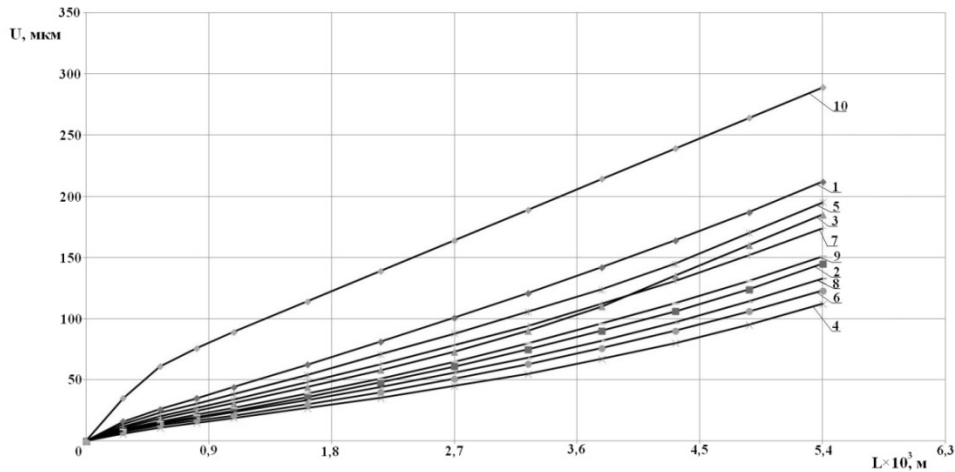
**Кінетика зношування сталі ШХ15 після гартування та іонного азотування  
в тліючому розряді за різними режимами**

азотування № режиму	Знос, мкм											
	Час випробувань, хв											
	15	30	45	60	90	120	150	180	210	240	270	300
	Шлях тертя $L \times 10^3$ , м											
	0,27	0,54	0,81	1,1	1,6	2,2	2,7	3,3	3,8	4,3	4,9	5,4
1	16	26	35	44	62,5	81,3	101	121	142	164	187	212
2	9	15	19,8	24,9	36	48	61	75	90	106	124	145
3	11	18,2	24,6	31	44	58	73	90	110	135	160	185
4	6	11	15	19	27	35,4	45	55	67	80	95	112
5	14	23	30,7	38,4	54	71	88	105,7	124	145	170	195
6	7,5	13	17	21	30	40	51	63	76	90	106	123
7	12	20,1	27	34	48,3	63	78,3	94,2	112	131	152	174
8	8,3	14	19	23,6	33,7	44	56	68,2	82	97	114	133
9	10	16	21,6	27,3	39	51	65	80	96	112,6	131	151
10	9,79	16,4	22	27,2	40	52	66	81	97	112	132	152
11	10,1	15,6	21	26,8	38,1	50,3	65,7	79	95	111	130	150
12	10,21	16	21,1	27	39,2	51,6	65	79,6	96	113,1	130,8	150,6

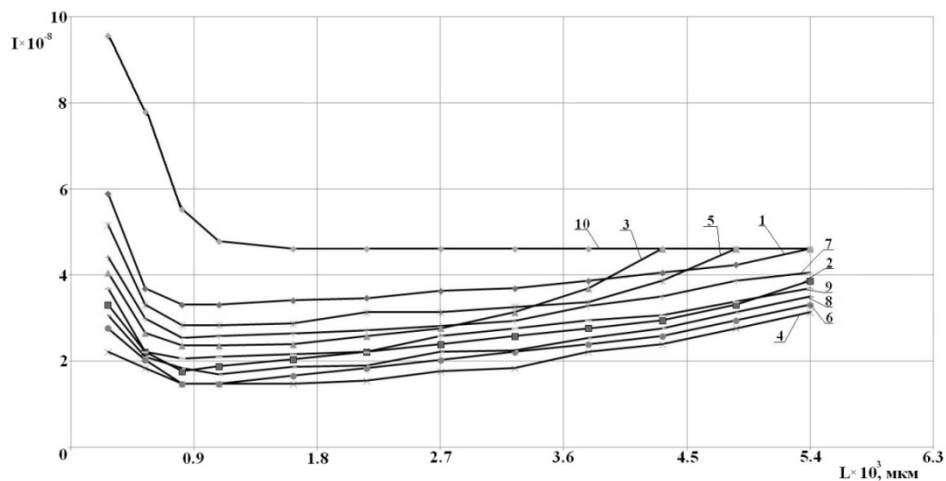
13	9,7	16,1	21,8	26,9	38,7	51	64,1	80,3	96,3	112,2	131,1	151,3
Гартований	35	61	76	89	114	139	164	189	214	239	264	289

В табл. 4 та рис. 5 наведені результати експериментальних досліджень зносостійкості зразків з сталі ШХ15 після різних режимів азотування (табл. 2) в середовищі модельного розчину на машинах торцевого тертя при питомому навантаженні 0,5 МПа і швидкості ковзання 1,37 м/с. [9].

З табл. 4 та рис. 5, а видно, що зносостійкість зразків після азотування за різними режимами різна і значно перевищує зносостійкість гартованого зразка. Найвищу зносостійкість мали зразки, що азотувалися за режимом 4. Величина зносу після шляху тертя  $5,4 \times 10^3$  м зразків, що азотувалися за режимом 4, в 2,5 рази менша в порівнянні з гартованими зразками. Як видно з рис. 5, б, що по мірі зношування азотованого шару інтенсивність зношування азотованих зразків поступово наближається до інтенсивності зношування гартованої сталі. Це обумовлено зміною твердості по товщині азотованого шару.



а



б

**Рис. 5 – Залежність зносу (а) та інтенсивності зношування (б) сталі ШХ15 після гартування та азотування за різними режимами: 1 - 9 – режими азотування; 10 – гартування**

На основі експериментальних досліджень з застосуванням двохфакторного рототабельного плану одержані математична залежність (5) зносу від технологічних параметрів режиму азотування.

$$U_{(мкм)} = 152,0 + 14,8x_1 - 30,1x_2 - 1,5x_1x_2 + 3x_1^2 + 3,9x_2^2. \quad (5)$$

На основі рівняння (5) побудовані графіки (рис. 6) залежності зносу від технологічних параметрів режиму азотування. З графіків видно, що знос зростає при збільшенні тиску та вмісту аргону

в насичуючому середовищі. Це пояснюється зміною властивостей азотованого шару в залежності від даних параметрів (рис. 2 - 3).

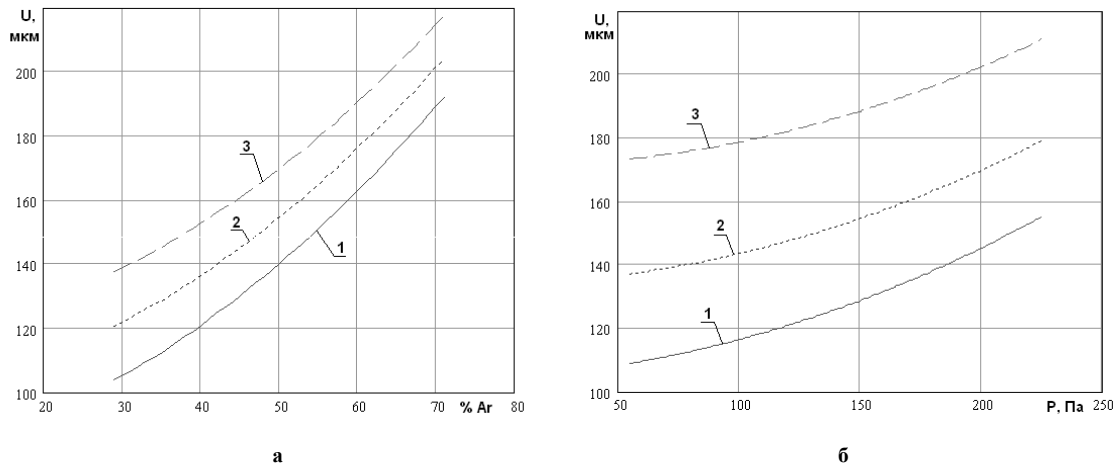


Рис. 6 – Залежність зносу сталі ШХ 15 від вмісту аргону (а) і тиску (б) в насичуючому середовищі (N<sub>2</sub>+Ar):

а – при тиску 1 – 80 Па; 2 – 150 Па; 3 – 200 Па;

б – при 1 – 35 % Ar; 2 – 50 % Ar; 3 – 65 % Ar

Таким чином, проведені дослідження властивостей азотованого шару при азотуванні в тліючому розряді в безводневих середовищах та його зношування в модельному розчині сталі ШХ15 показали, що їх можна змінювати в широких межах з допомогою технологічних параметрів процесу азотування і оптимізувати за критеріями максимальних значень: зносостійкості, твердості поверхні та товщини азотованого шару.

### Література

1. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Арзамасов Б. Н., Братухин А. Г., Елисеев Ю. С., Панайоти Т. А. – М.: Изд-во МГТУ им Н. 3. Баумана, 1999. – 400 с.
2. Лахтин Ю.М. Азотирование стали / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган. – М.: Машиностроение, 1976. – 256 с.
3. Каплун В.Г. Прогрессивные технологии упрочнения конструктивных элементов / В.Г. Каплун, П.В. Каплун // В кн. «Современные технологии в машиностроении». – Харьков НТУ «ХПИ», 2007. – С. 388- 403.
4. Каплун В.Г. Енерго і ресурсозберігальна екологічно чиста технологія і обладнання для зміцнення деталей машин /В.Г. Каплун, І.М. Пастух // Машиностроение. – 2002. – №2. – С. 49-51.
5. Каплун В.Г. Особенности формирования диффузионных слоев при ионном азотировании в безводородных средах / Физическая инженерия поверхности. – Харьков. – 2003. – Т.1. – № 2. – С. 141-146.
6. Пастух И.М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. – Харьков: НЕЦ ХФТИ. – 2006. – 364 с.
7. Каплун П.В. Вплив покриттів на зносостійкість і довговічність підшипників кочення: автореф. дис. канд. тех. наук / Київ 2004.–С. 20.
8. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента / В.Б. Тихомиров. – М.: Легкая индустрия, 1974. – 262 с.
9. Гончар В.А. Методика дослідження зносостійкості шнека екструдера для переробки фуражного зерна з добавками мінералу сапоніту // Проблеми трибології. – 2008. – № 4. – С. 19-21.

Поступила в редакцію 07.12.2012

Gonchar V.A., Kaplun P.V. **Studying the properties of the nitrated layer steel ШХ 15 and its wear in abrasive environments.**

Experimental study of the properties of the surface layer of steel SHH15 after ion nitriding among the mixture of nitrogen and argon in their different ratios for different technological regimes. Investigated thickness, hardness, wear resistance and phase composition of the nitrated layers. Studies were conducted on the durability of the machine mechanical friction at specific load 0,5 MPa and slip speed 1,32 m / s in the environment model abrasive solution. On the basis of the plan of experiments investigated the analytical properties depending on the technological parameters of the process of ion nitriding. Constructed graphic dependence of the nitrated layer thickness and hardness of the surface of the technological parameters of the process of ion nitriding. The kinetics of the process of wear of the nitrated layers in the model abrasive solution. Conducted comparing the intensity of wear steel SHH15 after quenching and ion nitriding. An optimization study properties of the nitrated layer by setting the maximum hardness of the surface, the thickness of the hardened layer and its durability. Found optimum conditions of ion nitriding steel SHH15 for each of the studied characteristics. Established that the wear resistance of steel SHH15 after ion nitriding 2,5 times higher compared to its durability after quenching.

**Key words:** wearproofness, nitrated layers, smouldering digit, abrasive environment.

### References

1. Arzamasov B. N., Bratuhin A. G., Eliseev J. S., Panajoti T. A. Ionnaja himiko-termicheseskaja obrabotka splavov. M., Izd-vo MGTU im. N. Z. Baumana, 1999, 400 p.
2. Lahtin J.M., Kogan J.D. Azotirovanie stali. M., Mashinostroenie, 1976, 256 p.
3. Kaplun V.G., Kaplun P.V. Progressivnye tehnologii uprochnenija konstruktivnih elementov. Sovremenn'ie tehnologii v mashinostroenii, Har'kov NTU «HPI», 2007, pp. 388- 403.
4. Kaplun V.G., Pastuh I.M. Energo i resursozberigal'na ekologichno chista tehnologija i obladannja dlja zmicennja detalej mashin. Mashinostroenie, 2002, No 2., pp. 49-51.
5. Kaplun V.G. Osobnosti formirovanija diffuzionn'ih sloev pri ionnom azotirovanii v bezvodnorodn'ih sredah. Fizicheskaja inzhenerija poverhnosti, Har'kov, 2003. T.1. No 2, pp. 141-146.
6. Pastuh I.M. Teorija i praktika bezvodородного азотирования в тлеуем разряде. Har'kov, NEC HFTI, 2006, 364 p.
7. Kaplun P.V. Vpliv pokrittiv na znosostijkist' i dovgovichnist' pidshipnikiv kochennja. Avtoref. dis. kand. teh. nauk, Kiïv, 2004. 20 p.
8. Tihomirov V. B. Planirovanie i analiz zksperimenta, M., Legkaja industrija, 1974, 262 p.
9. Gonchar V.A. Metodika doslidzhennja znosostijkosti shneka ekstrudera dlja pererobki furazhnogo zerna z dobavkami mineralu saponitu, Problems of Tribology, 2008, No 4, pp. 19-21.