

**ЗНОСОСТІЙКІСТЬ СТАЛІ 45 В КОРОЗІЙНО-АБРАЗИВНОМУ  
СЕРЕДОВИЩІ ПІСЛЯ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ**

*Представлено результати експериментальних досліджень властивостей азотованих шарів і їх зносостійкості в абразивному середовищі зразків зі сталі 45 після іонного азотування в тліючому розряді. Знайдені оптимальні режими іонного азотування за критеріями зносостійкості, твердості поверхні та товщини азотованого шару.*

*Ключові слова: знос, азотування, екструдер, сталь.*

V.A. GONCHAR, P.V. KAPLUN  
Khmelnitsky national university

**WEAR RESISTANCE STEEL 45 IN CORROSIVE-ABRASIVE ENVIRONMENT AFTER ION NITRIDING**

*Experimental study of the properties of the surface layer of steel 45 after ion nitriding among the mixture of nitrogen and argon in their different ratios for different technological regimes was conducted. Investigated thickness, hardness, wear resistance and phase composition of the nitrided layers. Studies were conducted on the durability of the machine mechanical friction at specific load of 0.5 MPa and slip speed 1.37 m/s in the environment model abrasive solution. On the basis of the plan of experiments we investigated the analytical properties depending on the technological parameters of the process of ion nitriding. Constructed graphic dependence of the nitrided layer thickness and hardness of the surface of the technological parameters of the process of ion nitriding. The kinetics of the process of the nitrided layers wear in the model abrasive solution was calculated. We conducted the comparison of the intensity of wear steel 45 after quenching and ion nitriding. An optimization study was done according of the properties of the nitrided layer by setting the maximum hardness of the surface, the thickness of the hardened layer and its durability. Optimum conditions of ion nitriding steel 45 were found for each of the studied characteristics. We established that the wear resistance of steel 45 after ion nitriding is 1,6 times higher compared to its durability after hardness.*

*Keywords: wear, nitriding, extruder, steel.*

**Постановка проблеми.** При переробці зерна методом екструдювання, 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.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** 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.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** 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 45 проводилася в тліючому розряді в середовищі суміші азоту з аргоном. Властивості азотованого шару керувалися 4-а 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.

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 45 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 проводилися 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

Познач.	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	$A_r$ , %		
1.	200	65	5403	226,3
2.	200	35	6796	322,5
3.	80	65	6223	150,1
4.	80	35	7409	222,6
5.	140	71	5484	171,2
6.	140	29	7289	289,3
7.	225	50	6026	293,1
8.	55	50	7041	168,4
9.	140	50	6646	240,3
10.	140	50	6602	240,3
11.	140	50	6690	240,3
12.	140	50	7102	240,3
13.	140	50	6622	240,3

На основі результатів експериментальних досліджень відповідно до двох факторного рототабельного плану отримані емпіричні математичні залежності товщини азотованого шару (3) і твердості поверхні (4) сталі 45 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).

$$h_{(мкм)} = 241,8 + 44,1 x_1 - 41,7 x_2 - 5,92 x_1x_2 - 4,9 (x_1)^2 - 7,8 (x_2)^2 \quad (3)$$

$$H_{100} = 6670 - 358,9 x_1 - 638,3 x_2 - 51,8 x_1 x_2 - 49,5 (x_1)^2 - 198,2 (x_2)^2 \quad (4)$$

З рис. 1. 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 10–15 %, а максимальна твердість – при 25–30% об'ємного вмісту аргону в насичуючому середовищі.

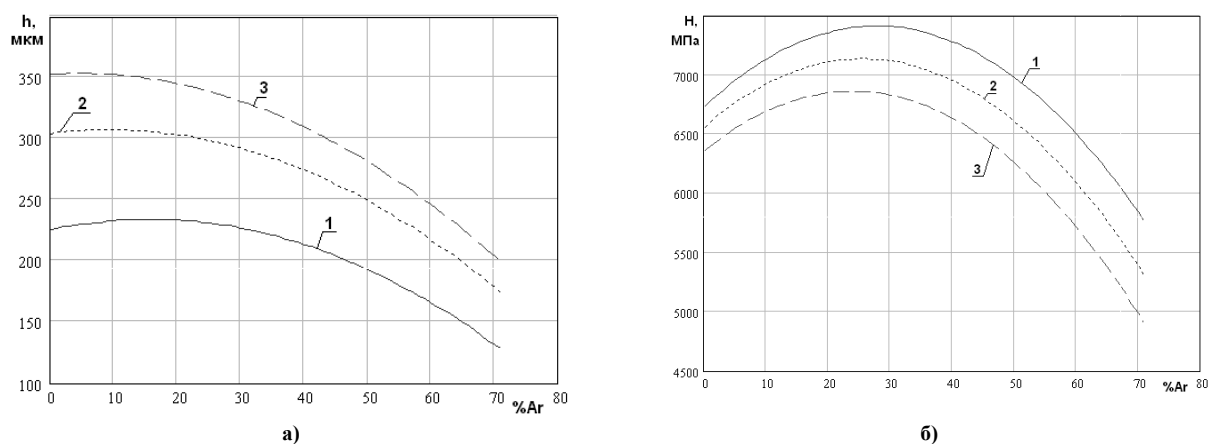


Рис. 1. Залежність товщини азотованого шару (а) і твердості поверхні (б) сталі 45 від вмісту аргону в насичуючому середовищі при різних тисках: 1 – 80 Па, 2 – 150 Па; 3 – 200 Па

На рис.2 наведені залежності товщини і твердості поверхні азотованого шару від тиску в вакуумній камері при різних вмістах аргону. 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.

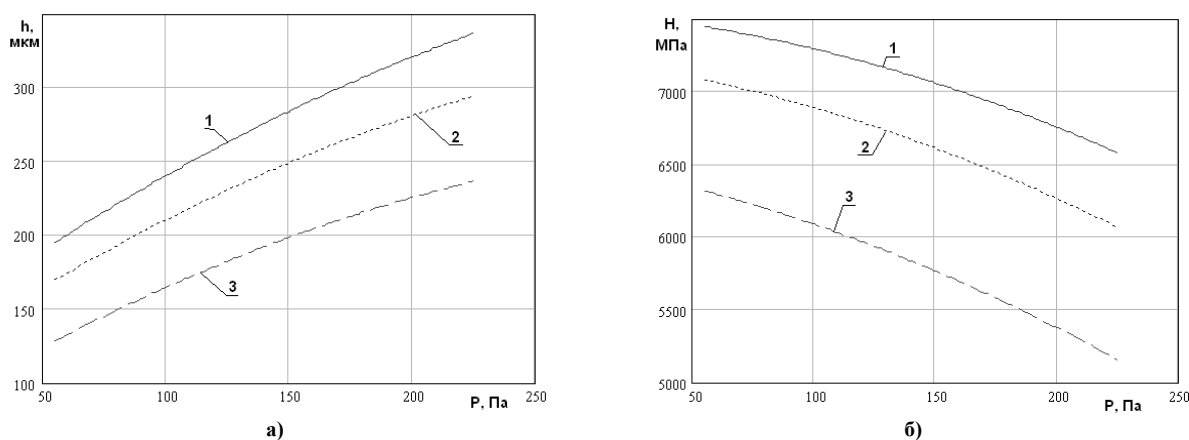


Рис. 2. Залежність товщини азотованого шару (а), твердості поверхні (б) сталі 45 від тиску в вакуумній камері в процесі дифузійного насичення при різних кількостях аргону в насичуючому середовищі: 1 – 35% Ar, 2 – 50% Ar, 3 – 65% Ar

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. 3 наведені графіки зміни твердості

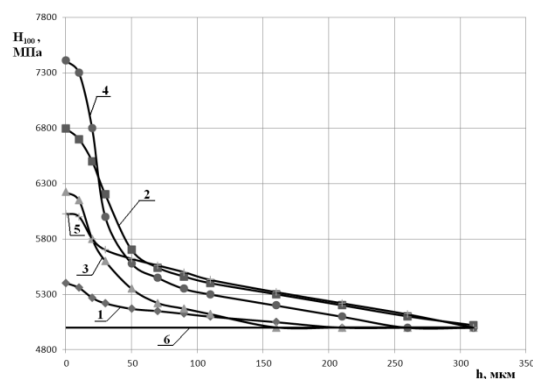


Рис. 3. Розподіл твердості по товщині азотованого шару в залежності від режимів азотування (табл. 2): 1 – 4 – відповідні режими азотування; 5 – режим №7; 6 – гартування

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.

В табл. 4 та рис. 4 наведені результати експериментальних досліджень зносостійкості зразків з сталі 45 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].

Таблиця 4

**Кінетика інтенсивності зношування сталі 45 після гартування та іонного азотування в тліючому розряді за різними режимами**

№ режиму азотування	Інтенсивність зношування, $I \times 10^{-8}$											
	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	9,58	7,56	6,88	6,63	6,45	6,45	6,52	6,6	6,85	7,03	7,17	7,28
2	6,63	5,16	4,55	4,33	4,3	4,65	5,16	5,68	6,06	6,34	6,55	6,73
3	8,11	6,266	5,65	5,34	5,28	5,67	6,19	6,54	6,79	6,98	7,13	7,24
4	4,79	3,87	3,56	3,5	3,5	3,64	3,87	4,18	4,5	4,84	5,22	5,53
5	9,21	7,19	6,51	6,27	6,14	6,45	6,82	7,06	7,24	7,37	7,47	7,56
6	5,53	4,24	3,81	3,69	3,6	3,82	4,05	4,3	4,53	4,75	5,02	5,34
7	8,48	6,63	5,89	5,53	5,28	5,21	5,27	5,44	5,66	5,87	6,14	6,36
8	5,89	4,61	4,05	3,87	3,87	4,15	4,53	4,91	5,4	5,76	6,04	6,27
9	7,37	5,71	5,16	4,93	4,79	4,79	4,9	5,1	5,4	5,76	6,04	6,27
10	7,74	5,89	5,16	4,79	4,85	4,7	4,83	5,13	5,4	5,74	6,02	6,28
11	7	5,71	5,04	4,98	4,91	4,84	4,94	5,04	5,45	5,81	6,08	6,3
12	7,37	5,53	5,28	4,88	4,73	4,88	4,9	5,07	5,34	5,76	6,06	6,25
13	7,74	6,08	4,91	4,69	4,79	4,79	4,94	5,1	5,37	5,78	6,04	6,23
Гартований	13,3	11,61	10,69	10,13	9,52	9,22	9,03	8,91	8,82	8,75	8,7	8,66

З табл. 4. та рис. 4 видно, що інтенсивність зношування азотованої сталі за режимом 4 після 30 хв випробувань (шлях тертя  $0,54 \times 10^3$  м) в 2,8 менша, а після 300 хв. випробувань (шлях тертя  $5,4 \times 10^3$  м) в 1,6 рази менша в порівнянні з інтенсивністю зношування гартованої сталі. Тобто, по мірі зношування азотованого шару інтенсивність зношування азотованих зразків поступово наближається до інтенсивності зношування гартованої сталі. Це обумовлено зміною твердості по товщині азотованого шару.

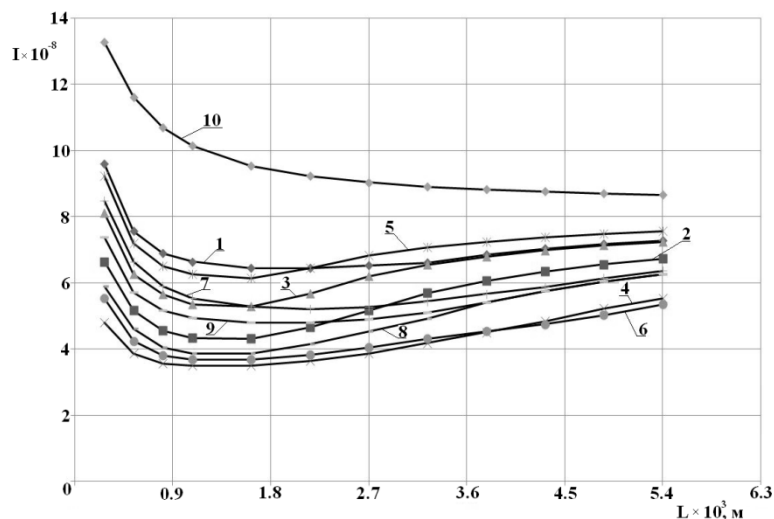


Рис. 4. Інтенсивності зношування сталі 45 після гартування та азотування за різними режимами: 1–9 режими азотування; 10 – гартування

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

$$I = 4,9 \cdot 10^{-8} + 5,6 \cdot 10^{-9} x_1 + 9,7 \cdot 10^{-9} x_2 + 1,2 \cdot 10^{-9} x_1 x_2 - 5,1 \cdot 10^{-10} (x_1)^2 + 2,9 \cdot 10^{-10} (x_2)^2 \quad (5)$$

На основі рівняння (5) побудовані графіки (рис. 5) залежності інтенсивності 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 залежно від даних параметрів (рис. 1, 2).

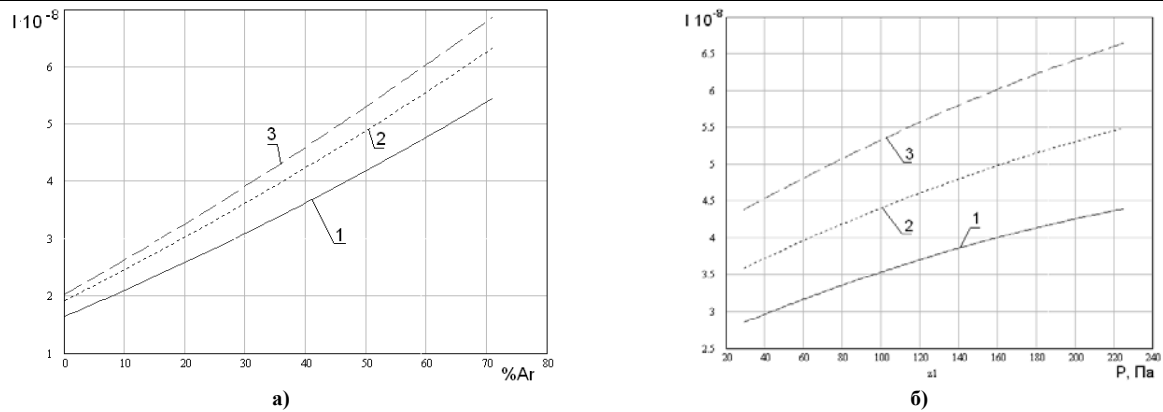


Рис. 5. Залежність інтенсивності зносу сталі 45 від вмісту аргону (а) і тиску (б) в насичуючому середовищі ( $N_2+Ar$ ): а) при тиску 1 – 80 Па; 2 – 150 Па; 3 – 200 Па; б) при 1 – 35% Ar; 2 – 50% Ar; 3 – 65% Ar

**Висновки.** Таким чином, проведені дослідження властивостей азотованого шару при азотуванні в тліючому розряді в безводневих середовищах та його зношування в модельному розчині сталі 45 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 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 // Современные технологии в машиностроении. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2007. – С. 388–403.
4. Каплун В.Г. Энерго- 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 / В.Г. Каплун // Физическая инженерия поверхности. – Харьков, 2003. – Т. 1. – № 2. – С. 141–146.
6. Пастух И.М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / Пастух И.М. – Харьков : НЕЦ ХФТИ, 2006. – 364 с.
7. Каплун П.В. Вплив покриттів на зносостійкість і довговічність підшипників кочення : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / Каплун П.В. – К., 2004. – С. 20.
8. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента / Владислав Борисович Тихомиров. – М. : Легкая индустрия, 1974. – 262 с.
9. Гончар В.А. Методика дослідження зносостійкості шнека екструдера для переробки фуражного зерна з добавками мінералу сапоніту / В.А. Гончар // Проблеми трибології. – Хмельницький, 2008. – № 4. – С. 19–21.

### References

1. Arzamasov B. N., Bratuhin A. G., Eliseev Ju.S., Panajoti T. A. Ionная химико-термическая обработка сплавов. М. Изд-во МГТУ им. Н. З. Баумана. 1999. 400 p.
2. Lahtin Ju.M., Kogan Ja.D. Azotirovanie stali. M. 1976. 256 p.
3. Kaplun V.G., Kaplun P.V. Progressivnye tehnologii uprochnenija konstruktivnih elementov. In book «Sovremenn'ie tehnologii v mashinostroenii». Har'kov. NTU «HPI». 2007. P. 388- 403.
4. Kaplun V.G., Pastuh I.M. Energo i resursozberigal'na ekologichno chista tehnologija i obladnannja dlja zmichennja detalej mashin. Mashinostroenie. 2002. №2. P. 49-51.
5. Kaplun V.G. Osobennosti formirovanija diffuzionnih sloev pri ionnom azotirovanii v bezvodородnih sredah. Fizicheskaja inzhenerija poverhnosti. Har'kov. 2003. Volume 1. №2. P. 141-146.
6. Pastuh I.M. Teorija i praktika bezvodородного azotirovanija v tlejuwem razrjadе. Har'kov. NEC HFTI. 2006. 364 p.
7. Parshenko K.V. Vpliv zalishkovogo austenitu ta jogo nasichennja azotom na znosostijkist' i dovgovichnist' stali H12 v umovah tertja kochennja. Khmelnytskyy. 2009. 18 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. Khmelnytskyy. 2008. №4. P. 19-21.

Рецензія/Peer review : 13.3.2013 р.

Надрукована/Printed : 7.4.2013 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Каплун В.Г.