

УДК 678.057:621.787

В. Г. КАПЛУН, В. А. ГОНЧАР

*Хмельницький національний університет, Україна*

## ВПЛИВ РЕЖИМІВ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ І ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ СТАЛЕЙ В КОРОЗІЙНО-АБРАЗИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

*Наведені результати експериментальних досліджень впливу технологічних параметрів іонного азотування сталей 45, ШХ15 і Х12 на їх зносостійкість в корозійно-абразивному середовищі та кінетика зношування в залежності від шляху тертя. Показано вплив азотистого залишкового аустеніту в структурі сталі Х12 після нітрогартування за оптимальним режимом на зносостійкість в даному середовищі.*

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

**Вступ.** Азотування в тліючому розряді є ефективним методом 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.

Перспективними є 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 окрихнення металів в процесі дифузійного насичення і підвищення пластичних характеристик поверхневих шарів за рахунок різного співвідношення фаз [5]. На властивості азотованого шару найбільш впливають 4 технологічні параметри: температура дифузійного насичення, тиск в вакуумній камері, склад насичуючого середовища і час азотування. Теоретичні і експериментальні дослідження [6] показали, що всі вказані вище технологічні параметри процесу азотування мають вплив на властивості азотованого шару. Для забезпечення максимальної зносостійкості пар тертя в абразивному середовищі необхідно, щоб поверхневі шари мали високу твердість і максимальну товщину. Крім того, як показують дослідження [7], на зносостійкість сталей в абразивному середовищі мають значний вплив метастабільні фази в структурі матеріалу

**Постановка завдання.** Дослідження впливу технологічних параметрів іонного азотування конструкційних сталей на твердість, товщину і зносостійкість азотованого шару в корозійно-абразивному середовищі. Визначення впливу залишкового аустеніту в структурі сталі Х12 після нітрогартування на її зносостійкість.

**Основний матеріал.** З метою дослідження впливу режимів іонного азотування і термічної обробки сталей на їх зносостійкість в корозійно-абразивному середовищі, що моделює умови роботи екструдерів при переробці фуражного зерна з домішками мінералу сапоніту, в складі якого є кварцовий пісок, виготов-

лялися зразки зі сталі 45 і легованих сталей ШХ15 та Х12 з різним вмістом хрому. Зразки перед випробуваннями мали різну термічну та хіміко-термічну обробку: гартування, іонне азотування та нітрогартування (іонне азотування за оптимальним режимом з наступним гартуванням). Сталь Х12 при гартуванні від температури 1050 °С має в структурі біля 50 % метастабільного залишкового аустеніту, а після нітрогартування стільки ж азотистого залишкового аустеніту, який впливає на процес зношування.

Дослідження проводилися на спеціальній машині тертя [8], в якій моделювались умови роботи екструдерів при переробці фуражного зерна з домішками мінералу сапоніту, при тиску 4МПа, швидкості ковзання 1,37 м/с і температурі 140 °С в модельному корозійно-абразивному середовищі. Модельне середовище являло собою водний розчин муки з домішками мінералу сапоніту в співвідношенні 8:9:1 відповідно. Мінерал сапоніт, який має в своєму складі кварцовий пісок і понад 20 мікроелементів корисних для тварин, та пари води при високій температурі утворюють корозійно-абразивне середовище.

Теоретичними і експериментальними дослідженнями процесу іонного азотування металів [3; 5; 6] встановлено, що для більшості конструкційних сталей максимальна твердість досягається за температур 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 [9]. В процесі досліджень змінювалися два фактори: склад насичуючого середовища в межах 29–71 %, тиск у вакуумній камері в межах 55–225 Па. Тривалість азотування та температура фіксувалися і становили 240 хв. та 570 °С відповідно.

В табл. 1 наведено результати експериментальних досліджень твердості і товщини азотованого шару сталей 45, ШХ12, Х12 в залежності від режимів іонного азотування в безводневих середовищах. На основі результатів цих досліджень, відповідно до двох факторного рототабельного плану проведення експериментів, отримані емпіричні математичні залежності твердості поверхні ( $H_{100}$ ) і товщини азотованого шару ( $h$ ) від вмісту аргону в насичуючому середовищі та тиску в вакуумній камері досліджуваних сталей, що описуються регресивним рівнянням (1).

Математична модель параметра оптимізації виражається рівнянням регресії – поліномом другого порядку [9]:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2, \quad (1)$$

де  $b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{11}, b_{22}$  – коефіцієнти регресії;  $x_1, x_2$  – змінні фактори, що враховують вплив тиску в вакуумній камері і вмісту аргону в насичуючому середовищі,

$x_1 = \frac{P - 140}{60}$ ,  $x_2 = \frac{Ar\% - 50}{15}$ . Зокрема, для сталі Х12 залежності товщини азотованого шару і мікротвердості його поверхні від технологічних параметрів іонного азотування описуються такими рівняннями регресії:

$$h \text{ (мкм)} = 130,4 + 49,6x_1 - 22,5x_2 - 7,0 x_1x_2 - 10,4(x_1)^2 - 5,6(x_2)^2, \quad (2)$$

$$H_{100} \text{ (МПа)} = 9050 + 284,8 x_1 - 301,2 x_2 - 150x_1x_2 - 56,5(x_1)^2 - 320,2 (x_2)^2. \quad (3)$$

Аналогічні рівняння можна записати для сталей 45 і ШХ15, використовуючи дані табл. 2, в якій наведено коефіцієнти рівнянь регресії для сталей 45, ШХ15, Х12.

*Таблиця 1*

**Залежність мікротвердості та товщини азотованого шару**

## від режимів іонного азотування різних сталей

Номер режиму	Технологічні параметри азотування		Сталь ШХ15		Сталь 45		Сталь X12	
	P, Па	Ar,%	Мікротвердість H <sub>100</sub> , МПа	Товщина азотованого шару, мкм	Мікротвердість H <sub>100</sub> , МПа	Товщина азотованого шару, мкм	Мікротвердість H <sub>100</sub> , МПа	Товщина азотованого шару, мкм
1	200	65	7650	225	5400	226	9700	134
2	200	35	9290	307	6790	322	9500	192
3	80	65	8736	133	6220	150	7800	50
4	80	35	10110	190	7400	222	7000	80
5	140	71	7860	168	5480	171	8600	88
6	140	29	9970	265	7280	289	8450	150
7	225	50	8300	285	6020	293	8350	178
8	55	50	9650	137	7040	168	7250	40
9	140	50	9110	223	6640	240	7800	130
10	140	50	9110	222	6600	240	7780	128
11	140	50	9110	223	6690	240	7900	133
12	140	50	9110	220	7100	240	7850	131
13	140	50	9110	223	6620	240	7910	127

Таблиця 2

**Коефіцієнти рівнянь регресії (1), що описують залежності товщини  $h$  і мікротвердості поверхні  $H_{100}$  азотованого шару від технологічних параметрів іонного азотування для сталей ШХ15, 45 і X12**

Коефіцієнт регресії	Сталь ШХ15		Сталь 45		Сталь X12	
	H <sub>100</sub> , МПа	$h$ , мкм	H <sub>100</sub> , МПа	$h$ , мкм	H <sub>100</sub> , МПа	$h$ , мкм
$b_0$	9171,9	224,5	6670	291,8	9050	130,4
$b_1$	476,5	52,3	-358,9	44,1	284,8	49,6
$b_2$	-746,3	-34,3	-638,3	-41,7	-301,2	-22,5
$b_{12}$	-66,6	-6,4	-51,8	-1,9	-150,0	-7,0
$b_{11}$	-68,6	-6,0	-300,5	-11,9	-56,5	-10,4
$b_{22}$	-205,8	-5,8	-198,2	-10,8	-320,2	-5,6

На основі рівнянь регресії побудовані графіки залежності твердості азотованого шару (рис. 1) від технологічних параметрів процесу азотування в безводневих середовищах сталей ШХ15, 45 і X12. З рис. 1 видно, що технологічні параметри іонного азотування мають значний вплив на твердість поверхні азотованого шару. Залежності твердості поверхні від тиску в вакуумній камері і об'ємного вмісту аргону в насичуючому середовищі (суміш азоту з аргонном) мають екстремальний характер з явно вираженими максимумами. Для різних сталей є оптимальні значення цих параметрів, при яких досягається максимальна мікротвердість. Наприклад: для сталі ШХ15 максимальне значення мікротвердості досягаються при тиску 340–360 Па та вмісту аргону 22–26 %; для сталі 45 – при тиску 110–118 Па та вмісту аргону 25–30 %; для сталі X12 – при тиску 360–370 Па та вмісту аргону 38–42 %.

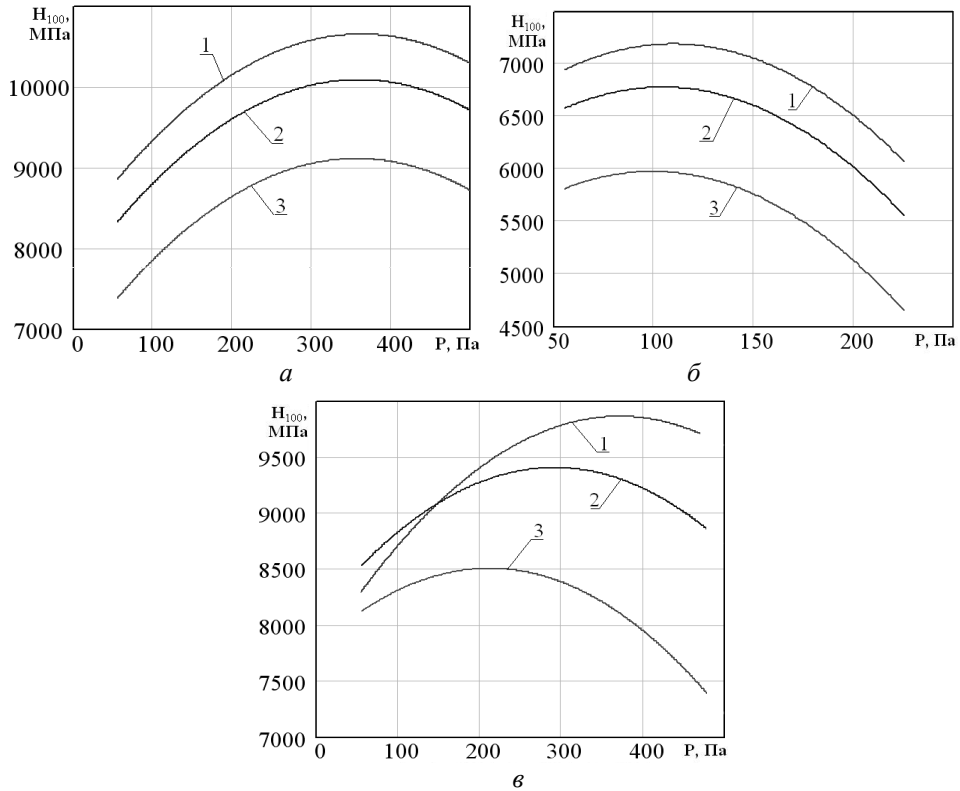


Рис. 1. Залежність твердості поверхні азотованого шару від технологічних параметрів процесу іонного азотування в безводневих середовищах сталей:  
*a* – ШХ15; *б* – 45; *в* – X12; 1 – Ar 35 %; 2 – Ar 50 %; 3 – Ar 65 %

Режими іонного азотування мають значний вплив на характер розподілу мікротвердості по глибині азотованого шару, що наглядно видно з рис. 2. Режими азотування 1 для сталі X12 і 4 для сталей ШХ15 і 45 забезпечують високу твердість поверхні завдяки утворенню на них нітридного шару і великий градієнт зміни мікротвердості по глибині азотованого шару. При азотуванні за режимом 1 сталей ШХ15 та 45 і за режимом 4 сталі X12 мікротвердість їх поверхні значно менша в зв'язку з відсутністю нітридної зони, при цьому градієнт зміни твердості по товщині азотованого шару теж менший.

Таким чином, змінюючи режим азотування можемо змінювати не тільки твердість поверхні, але і розподіл твердості та її градієнт по товщині азотованого шару.

Використовуючи рівняння (1) і дані табл. 2 можна побудувати графіки залежності товщини азотованого шару для досліджуваних сталей в залежності від складу насичуючого середовища і тиску в вакуумній камері, на основі яких знайдені оптимальні режими іонного азотування, що забезпечують максимальну товщину зміцненого шару. Оптимальні режими азотування досягалися для сталі ШХ15 при тиску в вакуумній камері 420–425 Па і вмісту аргону в насичуючому середовищі до 5 %, для сталі 45 ці параметри відповідно складають 240–250 Па та 20–25 % аргону, а для сталі X12 – при тиску 310–320 Па та 12–17 % аргону. Найбільша товщина азотованого шару при оптимальних режимах складала для сталі ШХ15 – 390 мкм, для сталі 45 – 350 мкм, для сталі X12 – 225 мкм.

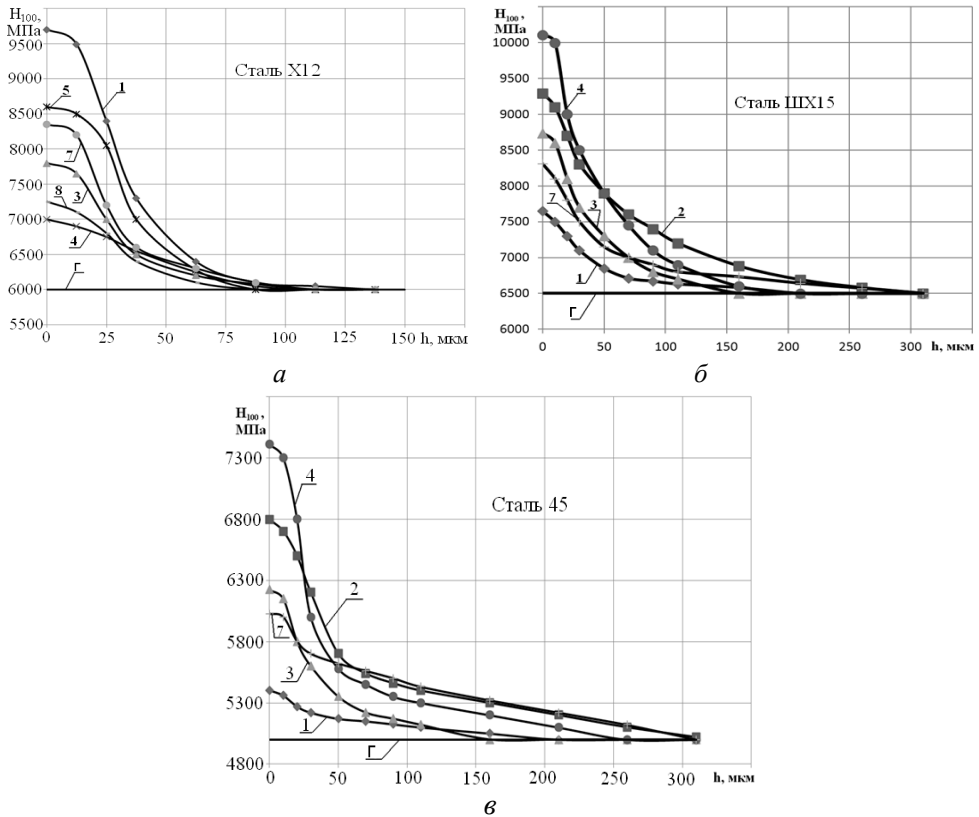


Рис. 2. Розподіл твердості по глибині азотованого шару в залежності від режимів іонного азотування: 1 – 8 режими азотування (табл. 1); Г – сталь гартована

На основі результатів досліджень, відповідно до двох факторного ротатабельного плану, отримані емпіричні математичні залежності зносу сталей ШХ15 (4), 45 (5) та X12 (6) від технологічних параметрів іонного азотування:

$$U_{(\text{МКМ})} = 147,7 - 34x_1 + 51x_2 - 2,25x_1x_2 - 1,3(x_1)^2 + 24,5(x_2)^2 \quad (4)$$

$$U_{(\text{МКМ})} = 342,3 - 39,3x_1 + 76,4x_2 - 15,7x_1x_2 - 5,3(x_1)^2 + 25(x_2)^2 \quad (5)$$

$$U_{(\text{МКМ})} = 87,7 - 33,5x_1 - 6,6x_2 + 2,0x_1x_2 - 0,5(x_1)^2 + 22,2(x_2)^2 \quad (6)$$

На основі рівнянь 4–6 побудовані графіки залежності зносу від технологічних параметрів процесу іонного азотування для досліджуваних сталей.

З графіків (рис. 3) видно, що мінімальний знос для сталі ШХ15 досягається при тиску в вакуумній камері 80 Па і об'ємному вмісту аргону 33–37 %, для сталі 45 – при тиску 200 Па і 30–33 % Аг, для сталі X12 – тиск 200 Па і 52–55 % Аг.

Оптимальними режимами іонного азотування за критерієм максимальної зносостійкості для досліджуваних сталей є наступні режими: ШХ15 –  $T = 570$  °С,  $\tau = 240$  хв,  $P = 80$  Па, Аг % = 35 %; 45 –  $T = 570$  °С,  $\tau = 240$  хв,  $P = 200$  Па, Аг % = 32 %; X12 –  $T = 570$  °С,  $\tau = 240$  хв,  $P = 200$  Па, Аг % = 53 %.

На рис. 4 наведені залежності зносу та інтенсивності зношування в модельному розчині сталей ШХ15, 45 та X12 після зміцнення методом іонного азотування за оптимальними режимами та сталі X12 зміцненої методом нітрогартування.

З рис. 4 видно, що максимальну зносостійкість серед сталей, азотованих за оптимальними режимами має сталь X12. Це обумовлено не тільки наявністю нітридів заліза в поверхневому шарі, але і наявністю в структурі сталі значної кількості (12 %) хрому, яка сприяє утворенню нітридів хрому і більшій товщині ні-

тридного шару в порівнянні із сталями 45 та ШХ15. Найвищу зносостійкість мали зразки із сталі Х12 після нітрогартування, величина зносу яких за шляху тертя  $5,4 \times 10^3$  м в 2 рази менша в порівнянні з азотованими зразками і складає 24 мкм. Це пояснюється наявністю на поверхні нітридного шару та оптимальної кількості азотистого залишкового аустеніту в структурі матеріалу.

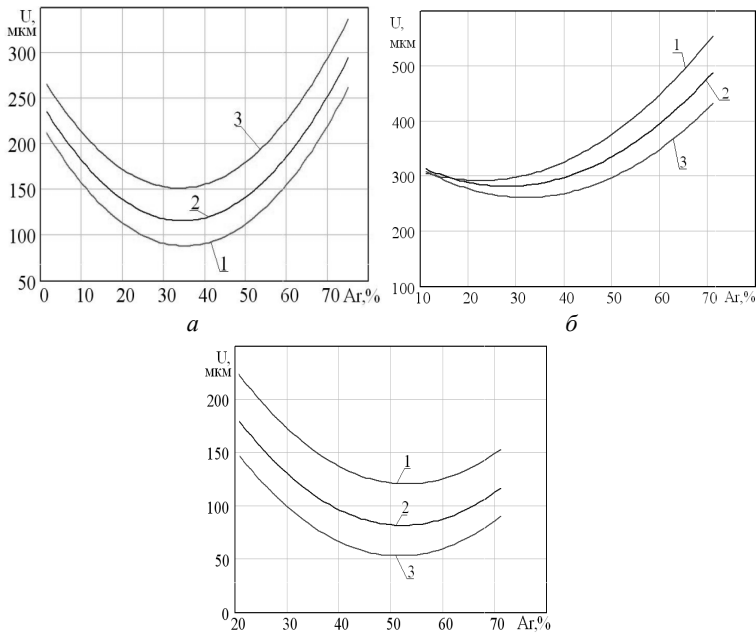


Рис. 3. Залежність зносу від технологічних параметрів процесу іонного азотування в безводневих середовищах сталей:

*a* – ШХ15; *б* – 45; *в* – Х12; при тисках: 1 – 80 Па; 2 – 150 Па; 3 – 200 Па

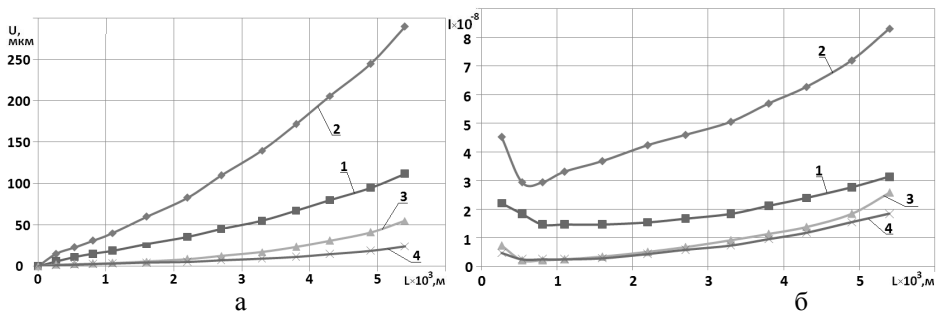


Рис. 4. Залежність зносу (*a*) та інтенсивності зношування (*б*) в модельному розчині сталей після оптимальних режимів іонного азотування (1, 2, 3) та нітрогартування (4):

1 – сталь ШХ15; 2 – сталь 45; 3 – сталь Х12; 4 – Х12 нітрогартувана

**Висновки.** Дослідження сталей після азотування та нітрогартування показали, що для сталей з нестабільною структурою, яка здатна до перетворень під дією абразивів при зношуванні, необхідно враховувати структурний стан поверхні матеріалу і його зносостійкість залежить головним чином від повноти структурних перетворень в процесі зношування. Найбільшою зносостійкістю в абразивному середовищі характеризуються зразки зі сталі Х12, що зміцнювалась нітрогартуванням за оптимальним режимом з вмістом залишкового аустеніту 55 % в структурі матеріалу.

**Список літератури**

1. Арзамасов Б. Н. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти - М.: Изд-во МГТУ им Н. З. 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. Попов В.С. Долговечность оборудования огнеупорного производства / В.С. Попов, Н.Н. Бриков, Н.С. Дмитриченко, П.Г. Приступа// Изд-во«Металлургия».–1978.–232с.
8. Гончар В.А. Методика дослідження зносостійкості шнека екструдера для переробки фуражного зерна з добавками мінералу сапоніту // Проблеми трибології (Problems of Tribology), 2008.– 4. –С. 19–21.
9. Леонтьев Н.Л. Техника статистических вычислений / Н.Л. Леонтьев // Лесная промышленность, 1996, –236 с.

Стаття надійшла до редакції 28.05.2013.

*V. G. KAPLUN, V. A. GONCHAR*

**THE INFLUENCE OF ION NITRIDING AND HEAT TREATMENT MODE ON THE WEAR RESISTANCE OF STEEL IN CORROSIVE ABRASIVE MEDIUM**

Experimental study of the properties of the surface layer of steels 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 nitrided layers. 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 nitrided layer hardness of the surface of the technological parameters of the process of ion nitriding. The kinetics of the process of wear of the nitrided layers in the model abrasive solution. An optimization study properties of the nitrided layer by setting the maximum hardness of the surface, the thickness of the hardened layer and its durability. Found optimum conditions of ion nitriding steels for each of the studied characteristics.

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

**Каплун Віталій Григорович** – д-р техн. наук, професор, професор кафедри машинознавства Хмельницького національного університету, директор НДІ трибології і матеріалознавства ХНУ, [vgkaplun@mail.ru](mailto:vgkaplun@mail.ru).

**Гончар Володимир Антонович** – мол. наук. співробітник НДЧ Хмельницького національного університету, [roger\\_rgr@mail.ru](mailto:roger_rgr@mail.ru).