

Каплун П.В., *
Гончар В.А., *
Тютюник Б.І., *
Матвійшин П.В. **

* Хмельницький національний університет,

** Бережанський аграрно - технічний інститут

E-mail: kaplunpavel@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СТАЛЕЙ В КОРОЗІЙНО - АБРАЗИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ПІСЛЯ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ ІОННИМ АЗОТУВАННЯМ

УДК: 678.057:621.787

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

Ключові слова: знос, іонне азотування, зносостійкість, сталь.

Вступ

Азотування в тліючому розряді є одним з 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 працює 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 деталей, що зношуються.

Для вирішення цієї проблеми перспективною є технологія зміцнення поверхні тертя методом іонного азотування 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]. Властивості азотованого шару керуються чотирма 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. Для забезпечення максимальної зносостійкості пар тертя в корозійно-абразивному середовищі необхідно щоб поверхневі шари мали високу твердість, корозійну стійкість і максимальну товщину. Крім того, як показують дослідження [7], на зносостійкість сталей в абразивному середовищі мають великий вплив метастабільні фази в структурі матеріалу.

Мета і 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.

Методика досліджень

Експериментальні дослідження проводилися на спеціальній машині тертя [8], що моделювала умови роботи обладнання при виготовленні палетів з муки соломи зернових культур, при переробці якої в складі муки є абразивні частинки від пилі та піску. Експериментальні зразки виготовлялися з середньо вуглецевої конструкційної 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 після нітрогартування від температури 1050 °С мала в структурі біля 50% метастабільного залишкового азотистого аустеніту, який суттєво вплинув на процес зношування.

Дослідження проводилися при тиску 4 МПа, швидкості ковзання 1,37 м/с і температурі 140 °С в модельному корозійно-абразивному середовищі. Модельне середовище являло собою водний розчин муки соломи з домішками мілких абразивних частинок (кварцового піску розміром 50 ... 100 мкм) в співвідношенні 8:9:1 відповідно, яке при наявності води і високої температури створювало корозійно-абразивні умови зношування.

З метою скорочення кількості експериментів при дослідженні властивостей азотованого шару та процесу зношування азотованих зразків, було використано двофакторний рототабельний план другого порядку [9]. В процесі досліджень змінювалися такі фактори: склад насичуючого середовища змінювали від 29 до 71 % вмісту аргону, тиск у вакуумній камері в межах – 55 ... 225 Па. Тривалість азотування та температуру залишали незмінними – 240 хв і 570 °С відповідно.

Рівняння регресії для математичної моделі параметра оптимізації є 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 $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – коефіцієнти регресії;

x_1, x_2 – змінні фактори, що враховують вплив тиску в вакуумній камері і вміст аргону в середовищі насичення, $x_1 = \frac{(P - 140)}{60}$, $x_2 = \frac{(Ar\% - 50)}{15}$.

Коефіцієнти рівнянь регресії для сталей 45, ШХ15, Х12 наведені в табл. 1.

Таблиця 1

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 Х12

Коефіцієнт регресії	Сталь ШХ15		Сталь 45		Сталь Х12	
	H_{100} , МПа	h , мкм	H_{100} , МПа	h , мкм	H_{100} , 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

Зокрема, для сталі Х12 залежності товщини азотованого шару і мікротвердості його поверхні від технологічних параметрів іонного азотування описуються такими рівняннями регресії:

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

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

Аналогічні рівняння можна записати для сталей 45 і ШХ15, використовуючи дані табл. 1.

Результати досліджень

Теоретичними і експериментальними дослідженнями процесу іонного азотування металів [3, 5, 6] показано, що для більшості конструкційних сталей прийнятна твердість досягається при температурах 560 ... 580 °С, а максимальну товщину азотованого шару отримуєть, коли час процесу дифузійного насичення складає 6 ... 8 годин.

Технологічні параметри іонного азотування мають великий вплив на твердість поверхні азотованого шару. Залежності твердості поверхні від тиску в вакуумній камері і об'ємного вмісту аргону в середовищі насичення (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 Х12 – при тиску 360 ... 370 Па та вмісту аргону 38 ... 42 %.

В таблиці 2 наведені 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 двофакторного рототабельного плану проведення експериментів, отримані емпіричні математичні залежності твердості поверхні (H_{100}) і товщини азотованого шару (h) від вмісту аргону в середовищі насичення та тиску в вакуумній камері досліджуваних сталей, що описуються регресивним рівнянням (1).

**Залежність мікротвердості та товщини азотованого шару h
від режимів іонного азотування різних сталей**

Номер режиму	Технологічні параметри азотування		Сталь ШХ15		Сталь 45		Сталь X12	
	P , Па	Ar , %	мікротвердість H_{100} , МПа	товщина азотованого шару h , мкм	мікротвердість H_{100} , МПа	товщина азотованого шару h , мкм	мікротвердість H_{100} , МПа	товщина азотованого шару h , 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

На основі рівнянь регресії побудовані графіки залежності твердості азотованого шару (рис. 1) від технологічних параметрів процесу азотування сталей ШХ15, 45 і X12 в безводневих середовищах.

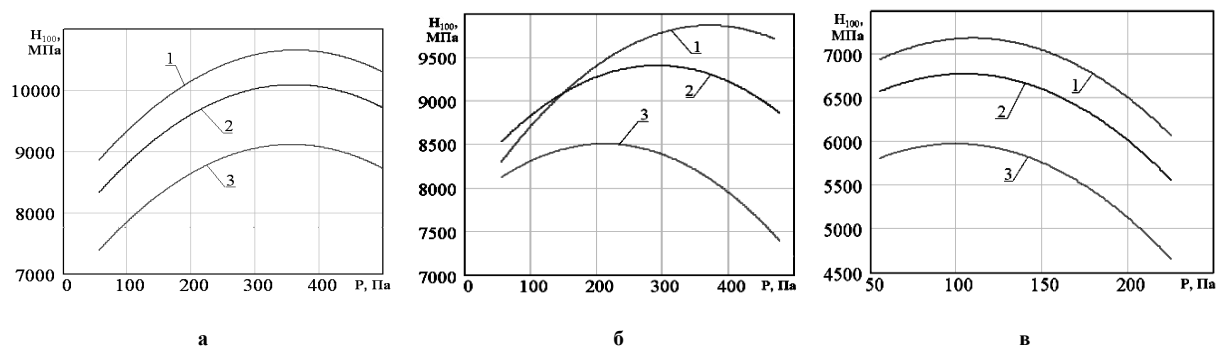


Рис. 1 – Залежність твердості поверхні азотованого шару від технологічних параметрів процесу іонного азотування в безводневих середовищах сталей:

- а – ШХ15;
- б – X12;
- в – 45;
- 1 – Ar 35 %;
- 2 – Ar 50 %;
- 3 – Ar 65 %

Режими іонного азотування мають великий вплив на характер розподілу мікротвердості по глибині азотованого шару, див. рис. 2. Режими азотування 1 для сталі X12 і 4 для сталей ШХ15 та 45 забезпечують високу твердість поверхні завдяки утворенню 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, можна змінювати не тільки твердість поверхні, але і розподіл твердості та її градієнт по товщині азотованого шару.

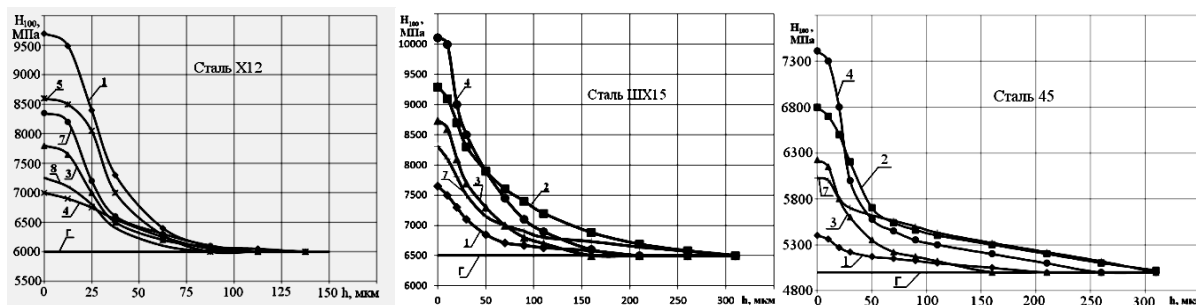


Рис. 2 – Розподіл твердості по глибині азотованого шару в залежності від режимів іонного азотування:
1 - 8 – режими азотування (таблиця 1); Г – гартована сталь

Використовуючи рівняння (1) і дані табл. 1, можна побудувати графіки залежності товщини азотованого шару для сталей, що досліджувались, в залежності від складу середовища насичення і тиску в вакуумній камері. Були знайдені оптимальні режими іонного азотування, що забезпечують максимальну товщину зміцненого шару. Оптимальні режими азотування досягалися при умовах: для сталі ШХ15 – тиск у вакуумній камері 420 ... 425 Па, вміст аргону в середовищі насичення до 5 %; для сталі 45 ці параметри відповідно складають 240 ... 250 Па та 20 ... 25 % аргону; для сталі X12 – тиск 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.

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

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

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

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

На основі рівнянь 4 - 6 побудовані графіки залежності зносу від технологічних параметрів процесу іонного азотування сталей, що досліджувались.

Побудовані графіки (рис. 3) дозволяють зробити висновок, 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 % Ag, для сталі X12 – оптимальними є тиск 200 Па і 52 ... 55 % Ag.

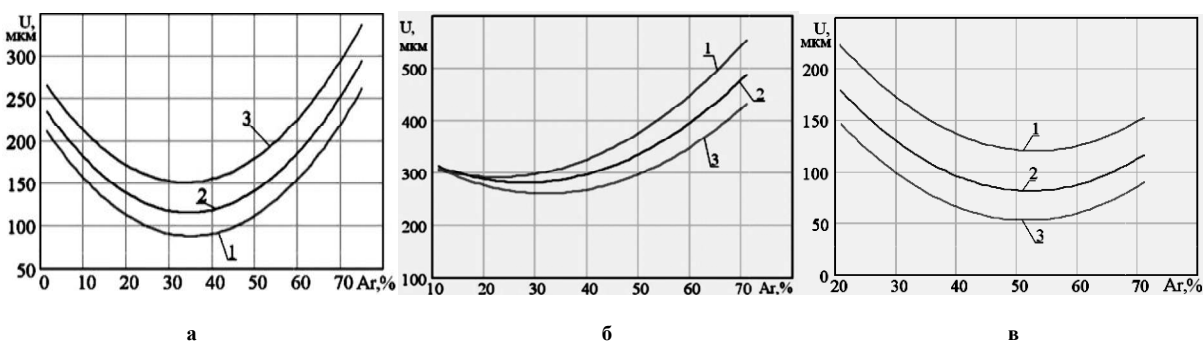


Рис. 3 – Залежність зносу від технологічних параметрів процесу іонного азотування в безводневих середовищах сталей:

а – ШХ15;

б – 45;

в – X12;

при тисках 1 – 80 Па; 2 – 150 Па; 3 – 200 Па

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

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.

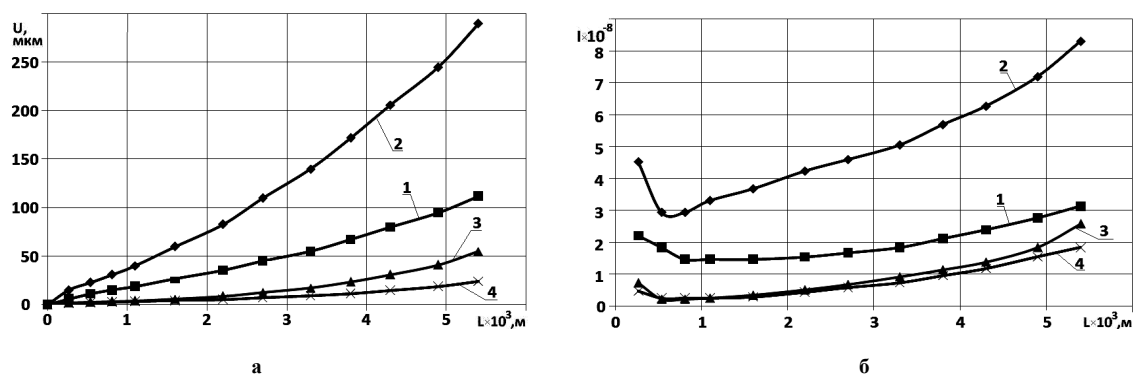


Рис. 4 – Залежність зносу (а) та інтенсивності зношування (б) в модельному розчині сталей після оптимальних режимів іонного азотування (1, 2, 3) та нітрогартування (4):
 1 – сталь ШХ15;
 2 – сталь 45;
 3 – сталь Х12;
 4 – Х12 нітрогартувана

З рис. 4 видно, що максимальну зносостійкість серед сталей, азотованих за оптимальними режимами має сталь Х12. Це обумовлено не тільки наявністю нітридів заліза в поверхневому шарі, але і наявністю в структурі сталі значної кількості (12 %) хрому, яка сприяла утворенню нітридів хрому і більшій товщині нітридного шару в порівнянні із сталями 45 та ШХ15. Найвищу зносостійкість мали зразки із сталі Х12 після нітрогартування, величина зносу яких після 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.

Висновки

Таким чином, 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. Його зносостійкість залежить, головним чином, від повноти структурних перетворень в процесі зношування. Найбільшу зносостійкість в корозійно-абразивному середовищі показали зразки із сталі Х12 з вмістом залишкового аустеніту 55 % в структурі матеріалу, що зміцнювалась нітрогартуванням за оптимальним режимом.

Література

1. Арзамасов Б. Н. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеєв, Т. А. Панайоти. – 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. Энерго- і ресурсозберігальна екологічно чиста технологія і обладнання для зміцнення деталей машин / В.Г. Каплун, І.М. Пастух // Машиностроение, 2002. – №2. – С. 49-51.
- Каплун В.Г. Особенности формирования диффузионных слоев при ионном азотировании в безводородных средах /Физическая инженерия поверхности. – Харьков, 2003. – Т.1. – №2. – С. 141-146.
- Пастух И.М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. – Харьков: НЕЦ ХФТИ. – 2006. – 364 с.
- Попов В.С. Долговечность оборудования огнеупорного производства / В.С. Попов, Н.Н. Брыков, Н.С. Дмитриченко, П.Г. Приступа // Изд-во «Металлургия». – 1978. – 232 с.
- Гончар В.А. Методика дослідження зносостійкості шнека екструдера для переробки фуражного зерна з добавками мінералу сапоніту // Проблеми трибології. – 2008. – №4. – С. 19-21.
- Леонтьев Н.Л. Техника статистических вычислений / Н.Л. Леонтьев // Лесная промышленность. – 1996. – 236 с.

Поступила в редакцію 23.03.2017

Kaplun P. V., Honchar V.A., Tiutiunyk B.I., Matviishyn P.V. Investigation of the durability of steels in corrosive - abrasive environments after hardening by ionic nitriding.

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 nitrated 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 nitrated layer 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. 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 steels for each of the studied characteristics.

Key words: wear, ion nitriding, durability, steel.

References

1. Arzamasov, B. N., Bratuhin, A. G., Eliseev Yu. S., Panajoti, T. Arzamasov B. N. Ionnaya himiko-termicheskaya obrabotka splavov: M.: Izd-vo MGTU im N. 3. Bauman, 1999. 400 p.
2. Lahtin YU.M. Azotirovanie stali. YU.M. Lahtin, YA.D. Kogan. M. Mashinostroenie, 1976. 256 s.
3. Kaplun V.G. Progressivnye tekhnologii uprochneniya konstruktivnih zlementov. V.G. Kaplun, P.V. Kaplun. V kn. «Sovremenn'ie tekhnologii v mashinostroenii». Har'kov NTU «HPI», 2007. S. 388- 403.
4. Kaplun V.G. Energo i resursozberigal'na ekologichno chista tekhnologiya i obladnannya dlya zmicnennya detalej mashin. V.G. Kaplun, I.M. Pastuh. Mashinostroenie, 2002. №2. S. 49-51.
5. Kaplun V.G. Osobennosti formirovaniya diffuzionnih sloev pri ionnom azotirovanii v bezvodnorodnih sredah. Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. Har'kov, 2003. T.1. №2. S. 141-146.
6. Pastuh I.M. Teoriya i praktika bezvodnorodnogo azotirovaniya v tleyushchem razryade. Har'kov: NEC HFTI. 2006. 364 s.
7. Popov V.S. Dolgovech'nost' oborudovaniya ogneupornogo proizvodstva. V.S. Popov, N.N. Brikov, N.S. Dmitrichenko, P.G.Pristupa. Izd-vo«Metalurgiya». 1978. 232s.
8. Honchar V.A. Metodyka doslidzhennia znosostiikosti shneka ekstrudera dlia pererobky furazhnoho zerna z dobavkamy mineralu saponitu. Problemy trybolohii, 2008. №4.S. 19-21.
9. Leont'ev N.L. Tekhnika statisticheskikh vychislenij. N.L. Leont'ev. Lesnaya promyshlennost', 1996, 236 s.