

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ЕКСТРУДЕРІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КОМБІКОРМІВ

Гончар В.А., к.т.н., Каплун П.В., д.т.н.

Хмельницький національний університет

Експериментальне дослідження властивостей поверхневого шару сталей після іонного азотування серед суміші азоту і аргону при різних їх співвідношеннях для різних технологічних режимів. Досліджено товщина, твердість, зносостійкість і фазовий склад азотованих шарів. На підставі плану експериментів досліджені аналітичні властивості в залежності від технологічних параметрів процесу іонного азотування. Побудована графічна залежність твердості поверхні азотованого шару від технологічних параметрів процесу іонного азотування. Досліджено кінетику процесу зносу азотованих шарів в модельному абразивному розчині. Проведена оптимізація дослідження властивостей азотованого шару шляхом встановлення максимальної твердості поверхні, товщини загартованого шару і його довговічності. Знайдено оптимальні умови іонного азотування сталей по кожній з досліджуваних характеристик. Показано, що найбільшу зносостійкість в абразивному середовищі має сталь X12M після нітрогазотування за оптимальним режимом з вмістом в структурі 55% залишкового аустеніту.

Підвищення зносостійкості і надійності машин є одним з важливих завдань машинобудування. Баро-термічна переробка зерна різних культур з добавками мінералу сапоніту методом екструдювання є перспективною технологією виготовлення високоефективних комбікормів для тварин. Після такої переробки високомолекулярні органічні сполуки в зерні переходять в нижчі, які легше засвоюються організмом тварин. Засвоюваність такого комбікорму досягає 96%. Наявність в комбікормі невеликої кількості (до 5 вагових відсотків до загальної маси) мінералу сапоніту, який містить більше двадцяти цінних для тварин мікроелементів, забезпечує не тільки значний (1,5 – 2 рази) ваговий приріст тварин, але й підвищує якість тваринницької продукції (м'яса і молока) та зменшує захворюваність молодняка [1].

Досвід експлуатації екструдерів при переробці зерна з домішками сапоніту [2] показав, що зносостійкість і довговічність деталей матеріального циліндра низка. Це обумовлено тим, що мінерал сапоніт має в своєму складі кварцовий пісок і є абразивним матеріалом, а наявність вологи в зерні при температурі баро-термічної переробки 140–160°C створює агресивне корозійне середовище. Правильний вибір матеріалу, його термічної та хіміко-термічної обробок має великий вплив на зносостійкість і довговічність деталей екструдера. Тому підвищення зносостійкості шнеків і циліндрів екструдера в таких умовах експлуатації є актуальним завданням.

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 [3, 4]. Це дозволяє оптимізувати властивості зміцненого поверхневого шару для забезпечення максимальних експлуатаційних характеристик з врахуванням реальних умов експлуатації конструкційних елементів [5]. 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) [6]. Особливістю даної технології є виключення водневого окрихчення металів в процесі дифузійного насичення і підвищення пластичних характеристик поверхневих шарів за рахунок різного співвідношення фаз [7]. Властивості азотованого шару керуються 4-ма технологічними параметрами: температурою дифузійного насичення, тиском у вакуумній камері, складом насичуючого середовища і часом азотування. Теоретичні і експериментальні дослідження [8] 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 [9], на зносостійкість сталей в абразивному середовищі мають великий 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 X12M 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, виготовлялися зразки з сталі 45 і легованих сталей ШХ15 та X12M 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 X12M при гартуванні від температури 1050°C 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 [10], що моделювала умови роботи екструдерів при переробці фуражного зерна з домішками мінералу сапоніту, при тиску 4МПа, швидкості ковзання 1,37 м/с і температурі 140°C в модельному корозійно-абразивному середовищі, що моделює умови роботи екструдерів при переробці фуражного зерна з домішками мінералу сапоніту. 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 пара води при високій температурі створюють корозійно-абразивне середовище.

Теоретичними і експериментальними дослідженнями процесу іонного азотування металів [3, 5, 6] показано, що для більшості конструкційних сталей твердість досягається при температурах 560-580°C, 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 двохфакторний рототабельний план другого порядку [11]. 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 240 хв. та 570°C відповідно.

В табл. 1 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 двохфакторного 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 у вакуумній камері досліджуваних сталей, що описуються регресивним рівнянням (1).

Таблиця 1 – Залежність мікротвердості та товщини азотованого шару від режимів іонного азотування різних сталей

Номер режиму	Технологічні параметри азотування		Сталь ШХ15		Сталь 45		Сталь Х12М	
	P , Па	Ar,%	Мікротвердість H_{100} , МПа	Товщина азотованого шару, мкм	Мікротвердість H_{100} , МПа	Товщина азотованого шару, мкм	Мікротвердість H_{100} , 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

Математична модель параметра оптимізації виражається рівнянням регресії – поліном другого порядку [11]:

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

де: $b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – коефіцієнти регресії; x_1, x_2 – змінні фактори, що враховують вплив тиску у вакуумній камері і вміст аргону в насичуючому середовищі, $x_1 = \frac{P - 140}{60}$, $x_2 = \frac{Ar\% - 50}{15}$.

Коефіцієнти рівнянь регресії для сталей 45, ШХ15, Х12М наведені в табл. 2.

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 Х12М

Коефіцієнт регресії	Сталь ШХ15		Сталь 45		Сталь Х12М	
	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 Х12М залежності товщини азотованого шару і мікротвердості його поверхні від технологічних параметрів іонного азотування описуються такими рівняннями регресії:

$$h(\text{мкм}) = 130.4 + 49.6 x_1 - 22.5 x_2 - 7.0 x_1 x_2 - 10.4 (x_1)^2 - 5.6 (x_2)^2, \quad (2)$$

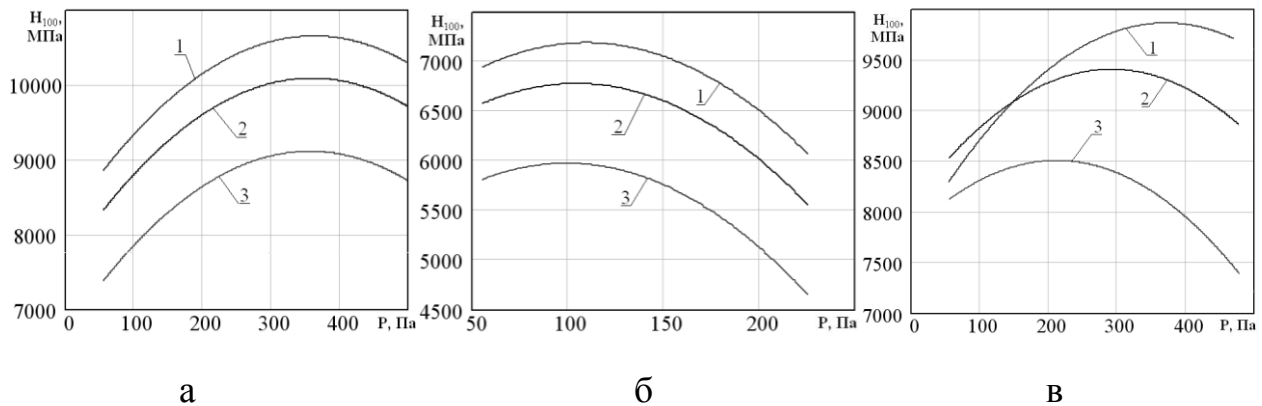
$$H_{100}(\text{МПа}) = 9050 + 284.8 x_1 - 301.2 x_2 - 150 x_1 x_2 - 56.5 (x_1)^2 - 320.2 (x_2)^2. \quad (3)$$

Аналогічні рівняння можна записати для сталей 45 і ШХ15, використовуючи дані табл. 2.

На основі рівнянь регресії побудовані графіки залежності твердості азотованого шару (рис. 1) від технологічних параметрів процесу азотування в безводневих середовищах сталей ШХ15, 45 і Х12М.

З рис. 1 видно, що технологічні параметри іонного азотування мають великий вплив на твердість поверхні азотованого шару. Залежності твердості поверхні від тиску у 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 Х12 – при тиску 360-370 Па та вмісту аргону 38-42%.

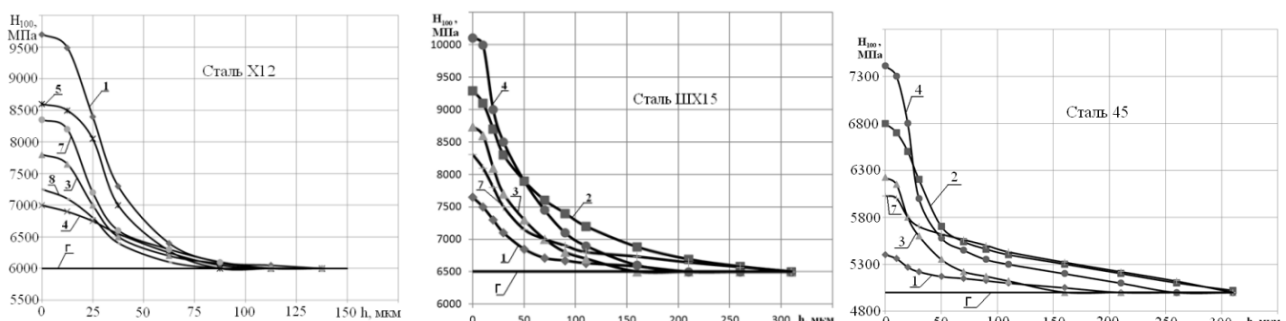


а – ШХ15; б – 45; в – Х12М. 1 – Ar 35%, 2 – Ar 50%, – 3 – Ar 65%.

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

Режими іонного азотування мають великий вплив на характер розподілу мікротвердості по глибині азотованого шару, що наглядно видно з рис. 2. Режими азотування 1 для сталі Х12М 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 Х12 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.



1-8 режими азотування (табл.1); Г – сталь гартована

Рис. 2 – Розподіл твердості по глибині азотованого шару в залежності від режимів іонного азотування

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 у 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 у 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 Х12 – 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 Х12 – 225 мкм.

На основі результатів досліджень, відповідно до двохфакторного рототабельного плану, отримані емпіричні математичні залежності зносу сталей ШХ15 (4), 45 (5) та Х12 (6) від технологічних параметрів іонного азотування.

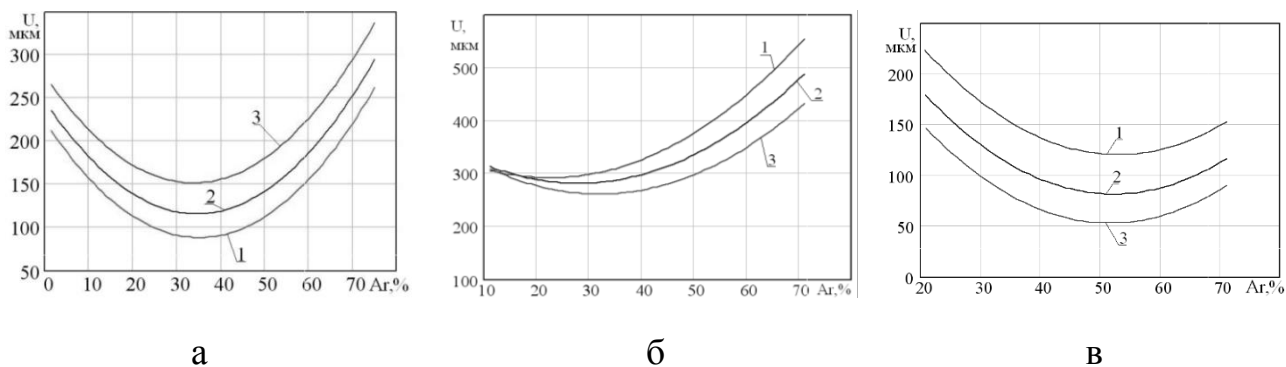
$$U_{(\text{мкм})} = 147,7 - 34 x_1 + 51 x_2 - 2,25 x_1 x_2 - 1,3 (x_1)^2 + 24,5 (x_2)^2 \quad (4)$$

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

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

На основі рівнянь 4-6 побудовані графіки залежності зносу від технологічних параметрів процесу іонного азотування 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 % Ar, для сталі Х12М – тиск 200 Па і 52-55 % Ar.



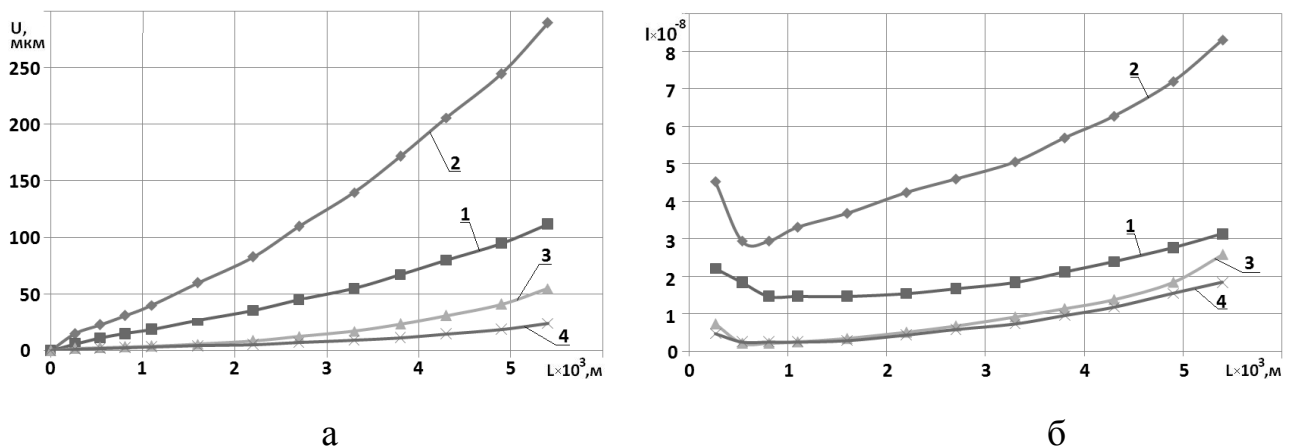
а – ШХ15; б – 45; в – Х12М; при тисках: 1 – 80 Па; 2 – 150 Па; 3 – 200 Па.

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

Оптимальними режимами іонного азотування за критерієм максимальної зносостійкості для досліджуваних сталей будуть наступні режими: ШХ15 – $T=570^{\circ}\text{C}$, $\tau=240$ хв., $P=80$ Па, $\text{Ar}\%=35\%$; 45 – $T=570^{\circ}\text{C}$, $\tau=240$ хв., $P=200$ Па, $\text{Ar}\%=32\%$; Х12М – $T=570^{\circ}\text{C}$, $\tau=240$ хв., $P=200$ Па, $\text{Ar}\%=53\%$.

На рис. 4 наведені залежності зносу та інтенсивності зношування в модельному розчині сталей ШХ15, 45 та Х12М після зміцнення методом іонного азотування за оптимальними режимами та сталі Х12М зміцненої методом нітрогартування.

З рис. 4 видно, що максимальну зносостійкість серед сталей, азотованих за оптимальними режимами має сталь Х12М. 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 Х12М після нітрогартування, величина зносу яких після шляху тертя 5.4×10^3 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.



1 – сталь ШХ15; 2 – сталь 45; 3 – сталь Х12; 4 – Х12М нітрогартувана

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

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 і його зносостійкість залежить головним чином від повноти структурних перетворень в процесі зношування. Найбільшу зносостійкість в абразивному середовищі показали зразки із сталі Х12М, що зміцнювалась нітрогартуванням за оптимальним режимом з вмістом залишкового аустеніту 55% в структурі матеріалу.

Список використаних джерел

1. Засуха Т.В. Нові дисперсні матеріали у тваринництві. Вінниця: Арбат, 1997, – 224 с.
2. Каплун В.Г. Экструдирование зернового сырья с сапонитом// В.Г. Каплун, В.С. Павлов, Н.А. Мазур / Комбикорма №3, – 2001,– С. 24.
3. 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.
4. Лахтин Ю.М. Азотирование стали / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган //М.: Машиностроение, 1976. –256 с.
5. 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.
6. 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.
7. Каплун В.Г. Особенности формирования диффузионных слоев при ионном азотировании в безводородных средах /Физическая инженерия поверхности - Харьков, 2003. - Т.1. - №2. - С. 141-146.
8. Пастух И.М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. - Харьков: НЕЦ ХФТИ. - 2006. - 364 с.
9. Попов В.С. Долговечность оборудования огнеупорного производства / В.С. Попов, Н.Н. Бриков, Н.С. Дмитриченко, П.Г. Приступа// Изд-во «Металлургия». –1978. –232 с.
10. 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.
11. Леонтьев Н.Л. Техника статистических вычислений / Н.Л. Леонтьев // Лесная промышленность, 1996. -236с.

Аннотация

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ЭКСТРУДЕРОВ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ КОМБИКОРМОВ

Гончар В.А., Каплун П.В.

Экспериментальное исследование свойств поверхностного слоя сталей после ионного азотирования среди смеси азота и аргона при различных их соотношениях для разных технологических режимов. Исследована толщина,

твердость, износостойкость и фазовый состав азотированных слоев. На основании плана экспериментов исследованы аналитические свойства в зависимости от технологических параметров процесса ионного азотирования. Построена графическая зависимость твердости поверхности азотированного слоя от технологических параметров процесса ионного азотирования. Исследована кинетика процесса износа азотированных слоев в модельном абразивном растворе. Проведена оптимизация исследования свойств азотированного слоя путем установления максимальной твердости поверхности, толщины закаленного слоя и его долговечности. Найдены оптимальные условия ионного азотирования сталей по каждой из исследуемых характеристик. Показано, что максимальную износостойкость в абразивной среде имеет сталь X12M после нитрозакалки по оптимальному режиму с содержанием в структуре 55% остаточного аустенита.

Abstract

IMPROVEMENT OF WEAR RESISTANCE OF DETAILS OF EXTRUDERS FOR PREPARATION OF FODDER

Gonchar V.A., Kaplun P.V.

Experimental study of the properties of the surface layer of steels after ion nitriding among a mixture of nitrogen and argon at different ratios for different process conditions. The thickness, hardness, wear resistance and phase composition of nitrated layers are investigated. Based on the experimental design, analytical properties were investigated depending on the technological parameters of the ion nitriding process. A graphical dependence of the nitrated layer on the surface hardness on the technological parameters of the ion nitriding process was constructed. The kinetics of the wear process of nitrated layers in a model abrasive solution was studied. The optimization of the properties of the nitrated layer has been carried out by establishing the maximum surface hardness, the hardened layer thickness and its durability. The optimal conditions for the ion nitriding of steels for each of the studied characteristics are found. It has been shown that X12M steel after nitro-hardening has the best wear resistance in the abrasive medium in terms of the optimum mode with the content of 55% residual austenite in the structure.