

**Матвійшин П.В.,  
Гончар В.А.,  
Каплун П.В.,  
Каплун В.Г.**

Хмельницький національний університет,  
м. Хмельницький, Україна

## РОЗРАХУНОК ЗНОСОСТІЙКОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ ГРАДІЄНТНИХ ПОКРИТТІВ ПРИ АБРАЗИВНОМУ ЗНОШУВАННІ

Відомо [1 - 4], що зносостійкість чистих металів багатьох сплавів з стабільною структурою в абразивному середовищі при відсутності в структурі метастабільних фаз прямопропорційна їх твердості. При цьому величина зносу прямопропорційна роботі сил тертя і обернено пропорційна твердості (рис. 1). В роботі [1] та інших наводяться формули для розрахунку зносу в даних умовах. Проте в літературі немає формул для розрахунку зносостійкості покриттів з стабільною структурою і градієнтною зміною твердості по глибині.

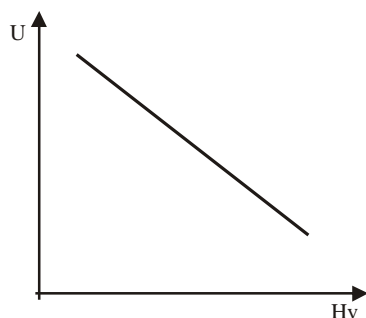


Рис. 1 – Залежність зносу від твердості для матеріалів з стабільною структурою

Для підвищення твердості і зносостійкості поверхонь тертя широко застосовуються методи хіміко-термічної обробки – азотування, цементація, борування, карбонітрування та інші. Досвід експлуатації конструктивних елементів при терті в абразивному середовищі показує, що найбільш ефективним методом хіміко-термічної обробки є азотування в тліючому розряді [5 - 8].

Азотовані шари складаються із нітридної зони з стабільною структурою та твердістю і перехідної зони (зони внутрішнього азотування) зі змінною твердістю і концентрацією азоту по глибині, які зменшуються від поверхні до основи за експоненціальною залежністю (1) в залежності від технологічних параметрів процесу азотування (рис. 2).

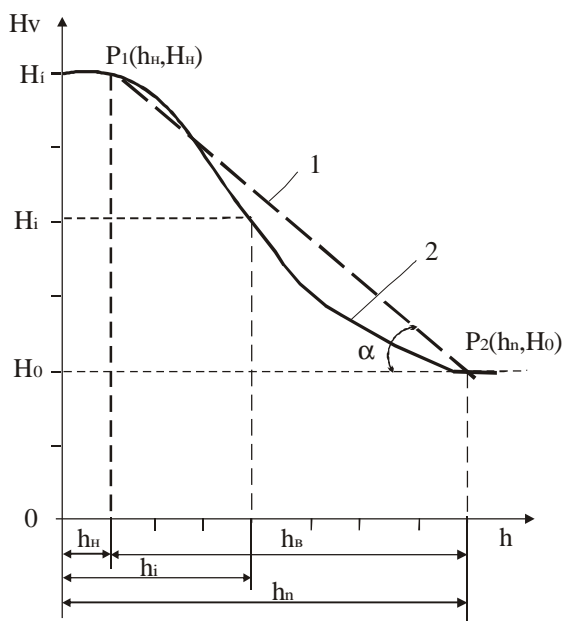


Рис. 2 – Розподіл твердості по товщині азотованого шару.  
1 – по лінійній залежності;  
2 – по експоненційній залежності

$$H_i = H_0 + (H_n - H_0)e^{-\frac{k(T,P,N,\tau)h_i}{h_n - h_i}}, \quad (1)$$

де  $H_0$  – твердість основи;

$H_0$  – твердість нітридної зони;

$k$  – коефіцієнт, що залежить від параметрів технологічного режиму (температури, тиску, азотного потенціалу, часу азотування);

$h_n$  – товщина азотованого шару.

Градієнт зміни твердості  $\frac{dH}{dh}$  по глибині внутрішнього азотування в цьому випадку буде змінною величиною.

Структура азотованих шарів для великої кількості конструкційних сталей, в тому числі і досліджуваних сталей (38ХМЮА, 45 і сталі 20) є стабільною і не включає метастабільних фаз. Тому їх зносостійкість підпорядковується прямо пропорційній залежності від твердості.

Зношений об'єм азотованого шару при терті в абразивному середовищі можна виразити наступною формулою:

$$V = V_H + V_e = k \frac{FL_H}{H_H} + k \frac{FL_e}{H_{e.c}}, \quad (2)$$

де  $V_H$  і  $V_e$  – зношені об'єми нітридної зони і зони внутрішнього азотування;

$k$  – коефіцієнт, що враховує умови роботи пари тертя (знаходиться експериментально);

$F$  – сила тертя;

$L_H, L_e$  – шлях тертя до зносу нітридної зони і зони внутрішнього азотування;

$H_{e.c}$  – середнє значення твердості зони внутрішнього азотування

$$H_{e.c} = \frac{\int_{h_n}^{h_a} H_i dh}{h_n - h_n}, \quad (3)$$

де  $h_n$  і  $h_e$  – товщини нітридної зони і зони внутрішнього азотування відповідно;

$H_i$  – твердість азотованого шару на відстані  $h_i$  від поверхні (рис. 2).

Лінійний знос  $U$  азотованого шару з врахуванням (2):

$$U = \frac{V}{S} = \frac{kFL_n}{H_n S} + \frac{kFL_e}{H_{e.c} S}, \quad (4)$$

де  $S$  – площа поверхні тертя.

Інтенсивність зношування нітридної зони буде дорівнювати

$$I_n = \frac{kF}{H_n \cdot S}. \quad (5)$$

Інтенсивність зношування зони внутрішнього азотування

$$I_e = \frac{kF}{H_{e.c} \cdot S}. \quad (6)$$

Для пари тертя «вал-втулка» силу тертя можна виразити через крутильний момент  $M_{кр}$  на валу, або потужністю привода. Тоді:

$$F = \frac{2M_{кр}}{d} \text{ або } F = \frac{325N_\eta}{d \cdot n}, \quad (7)$$

де  $d$  – діаметр вала;

$N$  – потужність привода в кВт;

$n$  – частота обертання вала за секунду;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії передаточного механізму.

Тоді інтенсивність зношування за формулами (5) і (6) будуть мати вид:

$$I_n = \frac{2kM_{кр}}{H_n \cdot d \cdot S}, I_n = \frac{325k \cdot N \cdot \eta}{H_n \cdot d \cdot n \cdot S}; \quad (5')$$

$$I_в = \frac{2kM_{кр}}{H_{вс} \cdot d \cdot S}, I_в = \frac{325k \cdot N \cdot \eta}{H_{вс} \cdot d \cdot n \cdot S}. \quad (6')$$

Силу тертя можна виразити формулою:

$$F = P_c S \cdot f, \quad (8)$$

де  $P_c$  – середній тиск н поверхні тертя;

$f$  – коефіцієнт тертя.

Тоді (4) буде мати вид:

$$U = \frac{k \cdot P_c \cdot f \cdot L_n}{H_n} + \frac{k \cdot P_c \cdot f \cdot L_в}{H_{в.с.}}. \quad (9)$$

Інтенсивність зношування нітридної зони і зони внутрішнього азотування буде мати вирази:

$$I_n = \frac{kP_c f}{H_n}, I_в = \frac{kP_c f}{H_{в.с.}}. \quad (10)$$

У випадку, коли зміну твердості по глибині перехідної зони (зони внутрішнього азотування) апроксимувати прямолінійною залежністю твердості від товщини  $h_в$  рівнянням прямої, що приходив через дві задані точки  $P_1(h_n, H_n)$  і  $P_2(h_в, H_в)$  (рис. 2) буде мати вид:

$$\frac{H - H_n}{H_в - H_n} = \frac{h - h_n}{h_в - h_n}. \quad (11)$$

Тоді середнє значення твердості зони внутрішнього азотування  $H_{вс}$  буде дорівнювати:

$$H_{вс} = \frac{H_n - H_в}{2}, \quad (12)$$

де  $H_n$  і  $H_в$  – твердість нітридної зони і основи відповідно.

Градієнт зміни твердості по глибині зони внутрішнього азотування в цьому випадку буде мати постійне значення

$$Grad = \frac{H_n - H_в}{h_n - h_в} = \text{tg}\alpha. \quad (13)$$

Розрахунок зносу азотованого шару за формулами (4) і (9), та інтенсивності зношування зони внутрішнього азотування за формулами (5) і (6) та (5') і (6') спрощується. Розрахунки показують, що різниця значень цих величин при експоненційній (1) і прямолінійній (11) залежностях твердості від глибини зони внутрішнього азотування не перевищує 12 %.

На рис. 3 наведені загальні залежності зносу і інтенсивності зношування азотованого шару від шляху тертя в абразивному середовищі при прямолінійній і експоненціальних змінах твердості по товщині зони внутрішнього азотування.

Знаючи товщину нітридної зони  $h_n$  і зони внутрішнього азотування  $h_в$  із результатів металографічного аналізу азотованого шару, можна знайти його довговічність при зношуванні в абразивному середовищі виражену в протяжності шляху тертя.

$$L = L_n + L_в = \frac{h_n}{I_n} + \frac{h_в}{I_в}. \quad (14)$$

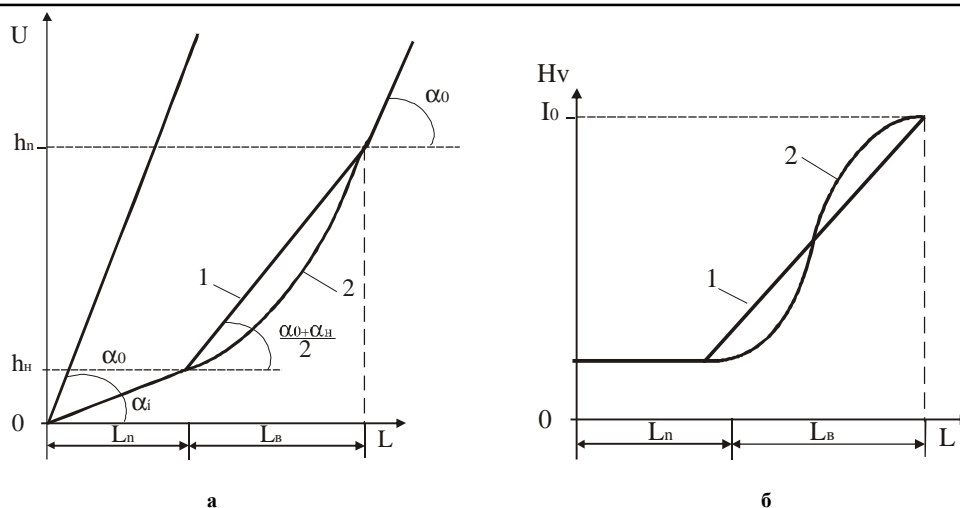


Рис. 3 – Залежність зносу (а) і інтенсивності зношування (б) азотованого шару від шляху тертя:  
 1 – при прямолинійній зміні твердості та постійному її градієнті по товщині зони внутрішнього азотування;  
 2 – при зміні твердості та її градієнті в зоні внутрішнього азотування за експоненціальною залежністю (2.1)

З врахуванням (5), (6), (5') і (6') формули для визначення довговічності будуть мати вид:

$$L = \frac{(h_n \cdot H_n + h_g \cdot H_{g.c}) \cdot S}{kF}, \quad (15)$$

$$L = \frac{(h_n \cdot H_n + h_g \cdot H_{g.c}) \cdot d \cdot S}{2 \cdot k \cdot M_{кр}}, \quad (16)$$

$$L = \frac{(h_n \cdot H_n + h_g \cdot H_{g.c}) \cdot d \cdot n \cdot S}{325 \cdot k \cdot N \cdot \eta}. \quad (17)$$

Таким чином, для розрахунку зносостійкості і довговічності азотованих шарів в абразивному середовищі для випадку відсутності метастабільних фаз в структурі азотованого шару необхідно на основ попередніх мікроструктурних досліджень одержати значення товщини азотованого шару та нітридної зони, а також твердості азотованого шару та твердості основи і, задавшись характером розподілу твердості по товщині зони внутрішнього азотування, можна визначити ці величини за наведеними формулами, попередньо знайшовши значення коефіцієнту  $k$  із експерименту.

### Література

1. Хрущев М.М. Абразивное изнашивание / М.М. Хрущев, М.А. Бабичев. – М.: Наука. – 1970. – 252 с.
2. Брыков Н.Н. К вопросу о закономерностях сопротивляемости сталей и сплавов абразивному изнашиванию / Н.Н. Брыков, М.Н. Брыков // Problems of Tribology. – 1997. – № 4. – С. 13-20.
3. Тененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. – М.: Машиностроение, 1966. – 332 с.
4. Брыков М.Н. Разработка и применение материаловедческих основ повышения износостойкости железоуглеродистых сплавов при абразивном изнашивании: Автореферат дис. д-ра техн. Наук: 05.02.01 – К., 2008. – 24 с.
5. Лахтин Ю.М. Азотирование стали / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган // М.: Машиностроение, 1976. – 256 с.
6. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Справ. Под ред. Л.С. Ляховича. – М.: Машиностроение, 1981. – 420 с.
7. 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.
8. Картинский Ц.Т. Технологические параметры ионного азотирования // Вестник машиностроения, 1979. - №12. – С. 56-58.

Надійшла 27.01.2012