

PACS numbers: 62.20.Qp, 81.40.Ef, 81.40.Pq, 81.65.Lp, 81.65.Mq

## **Новий метод і технології підвищення контактної міцності трибосистем**

**В. Г. Каплун, П. В. Каплун**

*Хмельницький національний університет,  
вул. Інститутська, 11,  
29016 Хмельницький, Україна*

Представлені новий метод та технології підвищення контактної міцності трибосистем при терті кочення з застосуванням інтегрального технологічного процесу зміцнення композиції «покриття–основа», що включає безводне іонне азотування, термоактивування азотованих шарів з метою оптимізації їх властивостей та наступну термічну обробку для підвищення твердості основи. Досліджено фізико-механічні та трибологічні властивості дифузійного покриття в залежності від технологічних режимів іонного азотування та термоактивування при технологіях нітрогартування та оксинітрогартування. Визначено оптимальні властивості покриттів та основи за критеріями максимальної контактної витривалості.

**Ключові слова:** іонне азотування, термоактивування, нітрогартування, оксинітрогартування, контактна міцність, покриття, основа.

A new method and technologies for improving the contact strength of tribosystems in the rolling friction with use an integrated technological process of hardening the ‘coating–base’ composition are introduced. This includes the non-hydrogen ion-nitridation, thermal activation of the nitrided layers in order to optimize their properties, and the following thermal treatment to increase a substrate hardness. The physico-mechanical and tribological properties of the diffusion coating are investigated depending on technological regimes of ion-nitridation and thermal activation within the scope of ni-

Corresponding author: Vitalii Grygorovych Kaplun  
E-mail: [vgkaplun@gmail.com](mailto:vgkaplun@gmail.com)

*Khmelnyskyi National University,  
11 Instytutska Str., UA-29016 Khmelnytskyi, Ukraine*

Citation: V. G. Kaplun and P. V. Kaplun, New Method and Technologies of Increasing of Tribosystems Contact Durability, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 7: 913–926 (2019) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.41.07.0913](https://doi.org/10.15407/mfint.41.07.0913).

troquenching and oxynitroquenching technologies. Optimal properties of coverage and base are determined according to criteria of maximal contact endurance.

**Key words:** ion-nitridation, thermal activation, nitroquenching, oxynitroquenching, contact endurance, coating, base.

Представлены новый метод и технологии повышения контактной прочности трибосистем при трении качения с применением интегрального технологического процесса упрочнения композиции «покрытие–основа», что включает безводородное ионное азотирование, термоактивирование азотированных слоёв с целью оптимизации их свойств и следующую термическую обработку для повышения твёрдости основы. Исследовано физико-механические и трибологические свойства диффузионного покрытия в зависимости от технологических режимов ионного азотирования и термоактивирования при технологиях нитрозакалки и оксинитрозакалки. Определены оптимальные свойства покрытия и основы за критериями максимальной контактной выносливости.

**Ключевые слова:** ионное азотирование, термоактивирование, нитрозакалка, оксинитрозакалка, контактная выносливость, покрытие, основа.

*(Отримано 6 вересня 2018 р.; остаточн. варіант — 12 травня 2019 р.)*

## 1. ВСТУП

Підвищення контактної міцності трибосистем при коченні є актуальною проблемою для техніки. Вихід з ладу більшості конструкційних елементів при цьому відбувається від викришування поверхні внаслідок втоми матеріалу. Дослідженням процесів контактної втоми при терті кочення присвячено багато праць [1–11], в більшості яких розглядається робота однорідних матеріалів [1–5], що мають певні обмежені можливості з підвищення контактної витривалості при коченні. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є модифікація поверхні нанесенням зміцнювальних покриттів. На контактну витривалість конструкційних елементів з покриттями впливають ряд факторів, що залежать від властивостей композиції «покриття–основа» [7], а саме: конструкція і технологія нанесення покриттів, товщина, твердість і її градієнт по товщині, хімічний і фазовий склади, залишкові напруження в покритті, твердість основи та адгезійна міцність покриття і основи. Крім того, великий вплив на контактну витривалість мають робоче середовище і водень [6, 8, 9].

В даний час є велика кількість одинарних технологій для нанесення покриттів [10], кожна з яких має свої переваги та недоліки і забезпечує вплив на довговічність конструкційних елементів певних факторів. Максимальне підвищення довговічності покриттів можна отримати при врахуванні впливу всіх факторів. Тому перспекти-

вним є застосування в технологічному процесі інтегральних технологій з використанням кількох одинарних. На сьогодні для підвищення контактної витривалості найбільш поширеними є технології хіміко-термічної обробки — цементації та нітроцементації [11]. Але вони є високотемпературними і застосовують водневовмісні середовища насичення, що негативно впливає на характеристики міцності і контактної витривалості [6, 8].

Максимального підвищення контактної витривалості композиції «покриття–основа» при терті кочення можна досягти при застосуванні інтегрального технологічного процесу її зміцнення за наступною концепцією: нанесення градієнтних покриттів з використанням низькотемпературних безводневих технологій з оптимальними властивостями покриття і залишковими напруженнями стиску і термічної обробки для забезпечення високої твердості основи. Для забезпечення даної концепції запропоновано новий метод підвищення контактної витривалості та зносостійкості конструкційних елементів з покриттями при терті кочення. Метод включає: іонне азотування або іонне оксиазотування в безводневих середовищах [12] за технологічними режимами, що забезпечують максимальну товщину азотованого шару та залишкові напруження стиску [13]; термоактивування азотованого шару в розплаві солей з певною витримкою в часі при температурі гартування [12, 14] для оптимізації властивостей покриття; наступне гартування та низькотемпературний відпуск для забезпечення високої твердості основи. Для впровадження даного методу розроблені інтегральні технології нітрогартування [15] та оксинітрогартування.

## 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження довговічності сталей з покриттями було реалізовано на універсальній установці [17], що дозволяє проводити випробування зразків при терті кочення з точковим і лінійним контактами. Дослідження проводилися на торцевій поверхні плоских діаметром 40 мм зразків зі сталей 40Х, ШХ15 і Х12М з дифузійними покриттями та без покриттів. Дифузійні покриття наносили методами іонного азотування в безводневих середовищах, а також за інтегральними технологіями нітрогартування і оксинітрогартування. Технологія нітрогартування включала: іонне азотування в безводневому середовищі за оптимальними режимами, що забезпечували максимальну товщину азотованого шару [12]; термоактивування в розплаві солей (50% KCl і 50% NaCl) при температурі гартування 860°C для сталей 40Х, ШХ15 і 930°C для сталі Х12М з різними витримками (5, 7, 10 і 25 хв); гартування в мастилі з наступним відпуском при температурі 160°C протягом 90 хв. Технологія оксинітрогартування включала: іонне азотування в безвод-

невому середовищі та наступне іонне оксидування в середовищі кисню за режимами, що наведені в табл. 1. Термоактивування, гартування та наступний відпуск проводилися аналогічно як при нітрогартуванні. Перед випробуваннями зразки шліфувалися ( $Ra = 0,125$  мкм). Тілами кочення були кульки діаметром 7,14 мм, які мали твердість HRC 63 і рухалися по колу діаметром 30 мм. Випробування проводилися при максимальному тиску на площадці контакту 2140 МПа в середовищі мастила I-20.

Для одержання максимальної товщини азотованого шару після іонного азотування в безводневих середовищах застосовувалися оптимальні технологічні режими, що визначалися методом планування експериментів з застосуванням 4-х факторного плану Хартлі, де технологічні параметри іонного азотування змінювалися в значних межах (температура  $T$  — 480–600°C, тиск  $P$  — 80–400 Па, час дифузійного насичення — 20–240 хв, вміст Ar в суміші з азотом — 0–76% об.). Залишкові напруження стиску в азотованих шарах визначалися за методикою [13]. Дослідження впливу твердості основи на контактну витривалість проводилися на сталі X12M після оксинітрогартування зразків, що гартувалися від різних температур. Мікротвердість основи змінювалася в інтервалі 5150–8560 МПа за рахунок різного процентного вмісту залишкового аустеніту в структурі матеріалу. Методами металографії визначалися структура, товщина і мікротвердість по товщині азотованого шару з використанням мікроскопів МІМ-9 і ПМТ-3. Фазовий склад на поверхні азотованих шарів визначали з використанням ДРОН-3М. Градієнт твердості по товщині азотованого шару є змінною величиною. Тому в дослідженнях для порівнянь застосовувалася його величина, що визначалася за формулою (1)

**ТАБЛИЦЯ 1.** Оптимальні режими іонного азотування сталей, що забезпечують максимальне значення товщини  $h_{\max}$  азотованого шару у заданих межах зміни технологічних параметрів.

**TABLE 1** Optimal conditions of ion-nitridation of steels, which provide the maximal value of nitrided layer thickness  $h_{\max}$  within given limits of change of technological parameters.

| № | Марка сталі | Режим іонного азотування |               |                                       |                                    | Товщина азотованого шару $h_{\max}$ , мкм | Мікротвердість поверхні $H_{100}$ , МПа |
|---|-------------|--------------------------|---------------|---------------------------------------|------------------------------------|---|---|
|   |             | Температура $T$ , °C     | Тиск $P$ , Па | Час дифузійного насичення $\tau$ , хв | Вміст Ar, в суміші з $N_2$ , % об. |   |   |
| 1 | ШХ15        | 600                      | 400           | 240                                   | 57                                 | 350                                       | 9180                                    |
| 2 | X12M        | 600                      | 400           | 240                                   | 38                                 | 315                                       | 9520                                    |
| 3 | 40X         | 600                      | 260           | 240                                   | 19                                 | 337,5                                     | 7275                                    |

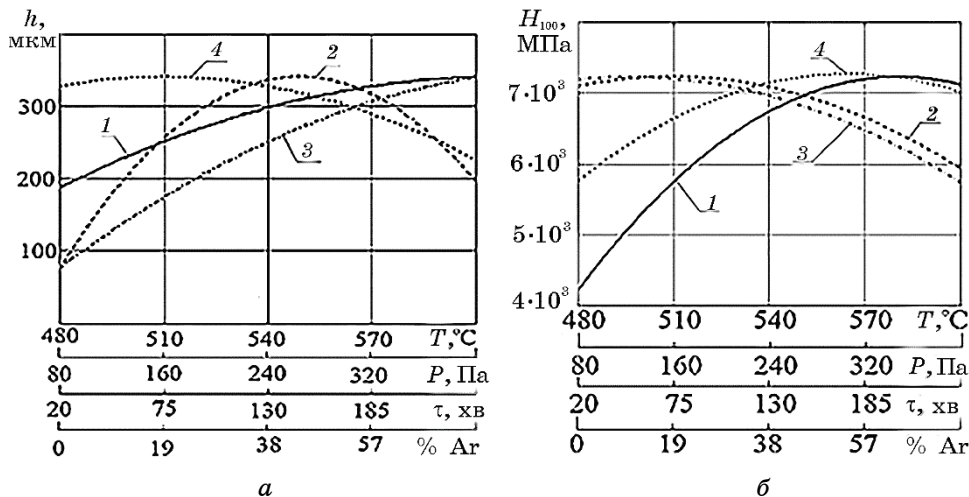
$$\text{Grad} = (H_{\max} - H_o)/h, \quad (1)$$

де  $H_{\max}$  — максимальна твердість в азотованому шарі в МПа,  $H_o$  — твердість основи в МПа,  $h$  — товщина азотованого шару в мкм.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В таблиці 1 наведено оптимальні режими іонного азотування в безводневих середовищах, що забезпечують максимальну товщину азотованого шару на досліджуваних сталях. На рисунку 1 показані залежності товщини і твердості азотованого шару сталі 40Х від технологічних параметрів іонного азотування, з якого видно їх значний вплив та максимальні значення даних характеристик дифузійного покриття.

В таблиці 2 і на рис. 2 наведені результати досліджень властивостей азотованих шарів сталі ШХ15 (мікротвердість  $H_o = 2950$  МПа) до і після термоактивування з різною витримкою. При термоактивуванні характеристики азотованого шару змінюються в значних межах залежно від часу витримки при даній температурі. Зокрема, при збільшенні часу витримки зменшуються мікротвердість та за-



**Рис. 1.** Залежності товщини (а) і мікротвердості (б) азотованого шару сталі 40Х від технологічних параметрів іонного азотування: 1 — температури  $T$ , 2 — тиску  $P$ , 3 — часу дифузійного насичення  $\tau$ , 4 — відсоткового вмісту Ar.

**Fig. 1.** Dependences of thickness (a) and microhardness (б) of nitrided layer of 40X steel on technological parameters of ion-nitridation: 1—temperature  $T$ , 2—pressure  $P$ , 3—time of diffusional saturation  $\tau$ , 4—percentage of Ar.

**ТАБЛИЦЯ 2.** Властивості азотованого шару сталі ШХ15 після термоактивування.**TABLE 2.** Properties of nitrided layer of ШХ15 steel after thermal activation.

| № з/п | Вид термообробки та технології | Твердість поверхні $H_{100}$ , МПа | Товщина покриття $h$ , мкм | Фазовий склад поверхні  | Гradient твердості МПа/мкм | Залишкові напруження, $\sigma_3$ , МПа |
|-------|--------------------------------|------------------------------------|----------------------------|---|----------------------------|--|
| 1     | Азотування, витримка 0 хв      | 9180                               | 350                        | 55% $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ + 45% $\text{Fe}_4\text{N}$       | 17,8                       | 629                                    |
| 2     | Азотування, витримка 5 хв      | 8300<br>$H_{\max} = 8350$          | 357                        | 15% $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ + 85% $\text{Fe}_4\text{N}$       | 14,98                      | 415                                    |
| 3     | Азотування, витримка 7 хв      | 7600<br>$H_{\max} = 7800$          | 365                        | 84% $\text{Fe}_4\text{N}$ + 16% $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$ | 13,28                      | 330                                    |
| 4     | Азотування, витримка 10 хв     | 6500<br>$H_{\max} = 7600$          | 370                        | 50% $\text{Fe}_4\text{N}$ + 50% $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$ | 12,56                      | 280                                    |
| 5     | Азотування, витримка 25 хв     | 4000<br>$H_{\max} = 5750$          | 380                        | 35% $\text{Fe}_4\text{N}$ + 65% $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$ | 6,25                       | 150                                    |
| 6     | Оксиазотування, витримка 5 хв  | 8800                               | 362                        | 20% $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ + 80% $\text{Fe}_4\text{N}$       | 16,16                      | 470                                    |
| 7     | Оксиазотування, витримка 7 хв  | 8400                               | 370                        | 90% $\text{Fe}_4\text{N}$ + 10% $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$ | 14,72                      | 385                                    |
| 8     | Оксиазотування, витримка 10 хв | 7700                               | 375                        | 60% $\text{Fe}_4\text{N}$ + 40% $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$ | 12,66                      | 310                                    |
| 9     | Оксиазотування, витримка 25 хв | 6250                               | 386                        | 48% $\text{Fe}_4\text{N}$ + 52% $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$ | 8,54                       | 175                                    |

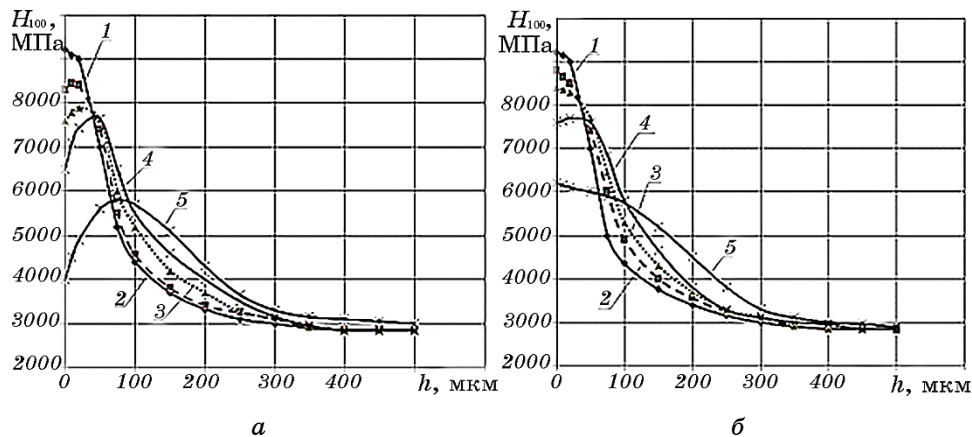
лишкові напруження на поверхні, змінюється фазовий склад в результаті часткового розпаду нітридних фаз та дифузії азоту, що вивільнився, всередину металу.

При термоактивуванні можливо отримувати азотовані шари з відсутньою  $\epsilon$ -фазою і переважаючою  $\gamma'$ -фазою чи з переважаючою  $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$ -фазою на поверхні та змінювати залишкові напруження стиску в широких межах (150–629 МПа). При цьому збільшується товщина азотованого шару, зменшується мікротвердість на поверхні, а її максимальне значення знаходиться в глибині на певній відстані від поверхні (рис. 2, а). Наявність оксидної плівки на поверхні азотованого шару є бар'єром для дифузії азоту, що утворився при розпаді  $\epsilon$ -фази, в навколишнє середовище і сприяє збільшенню дифузії азоту всередину металу. В результаті цього характеристики (мікротвердість на поверхні та товщина) азотованих шарів з оксидною плівкою після термоактивування мають більші значення порівняно

з азотованими шарами при термоактивуванні без оксидної плівки (табл. 2). Термоактивування азотованих шарів має великий вплив на величину залишкових напружень стиску в дифузійних покриттях, величина яких в умовах проведення експериментів змінювалася від 150 до 629 МПа (табл. 2). В результаті дифузії азоту всередину металу при термоактивуванні збільшується товщина азотованого шару, що впливає на зменшення градієнта твердості покриття.

Гартування азотованих шарів після їх термоактивування приводить до зміни структури матеріалу, значного підвищення твердості основи та суттєвого зменшення градієнта твердості в покритті (рис. 3 і 5), що має великий вплив на контактну витривалість. З рисунку 3 видно, що при однаковій витримці 5 хв при нітрогартуванні та оксинітрогартуванні розподіл мікротвердості в поверхневій частині азотованого шару значно відрізняється. При нітрогартуванні сталі ШХ15 максимальна твердість знаходиться на глибині 20 мкм, тоді як при оксинітрогартуванні максимальна твердість знаходиться на поверхні і зменшується зі збільшенням витримки.

Вплив твердості основи на контактну витривалість після оксинітрогартування сталі Х12М показано на рис. 4, з якого видно, що контактна витривалість значно зростає з підвищенням твердості основи. При цьому азотистий залишковий аустеніт, що утворився



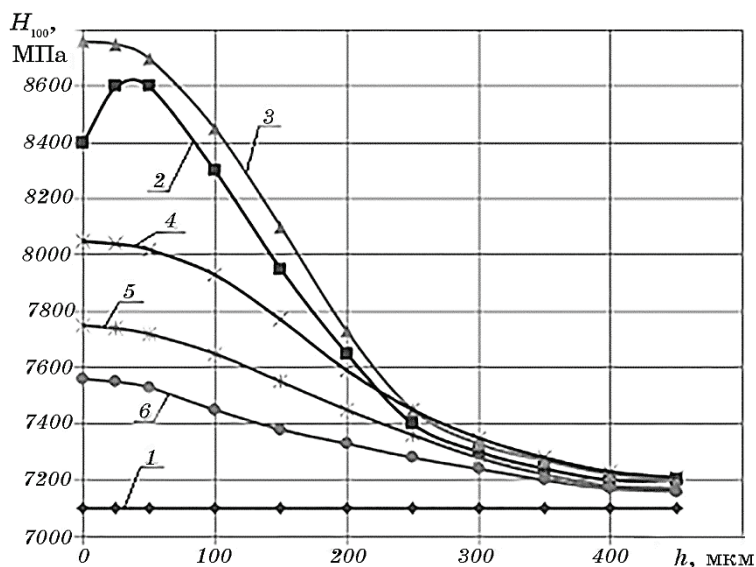
**Рис. 2.** Розподіл мікротвердості по глибині азотованого шару сталі ШХ15 після термоактивування при температурі 850°C з різною витримкою: 1 — 0 хв, 2 — 5 хв, 3 — 7 хв, 4 — 10 хв, 5 — 25 хв; а — без оксидної плівки на поверхні; б — з оксидною плівкою на поверхні.

**Fig. 2.** Distribution of microhardness in depth of nitrided layer of ШХ15 steel after thermal activation at the temperature of 850°C with different soaking: 1—0 min, 2—5 min, 3—7 min, 4—10 min, 5—25 min; а—without an oxide film on the surface; б—with an oxide film on the surface.

при розпаді нітридів в процесі термоактивування, в результаті деформацій від дії циклічного контактного навантаження частково перетворюється в азотистий мартенсит, підвищує твердість покриття [7], що сприяє підвищенню контактної витривалості композиції «покриття–основа».

Вплив твердості онови на градієнт твердості в покритті наочно видно з порівняння його значення в табл. 2 і 4. Градієнт твердості в азотованому шарі після нітрогартування та оксинітрогартування сталі ШХ15 майже в 7 разів менший ніж після термоактивування цієї ж сталі з аналогічною витримкою. Такі ж результати отримані і для сталей 40Х та Х12М (рис. 5).

В таблиці 3 наведені результати порівняльних випробувань на контактну витривалість зразків різних сталей з покриттями і без покриттів з різною термічною та хіміко-термічною обробками в мастилі І-20 при максимальному тиску на ділянці контакту 2140 МПа. Найвищу контактну витривалість в даних умовах випробувань мали зразки після нітрогартування та оксинітрогартування. Значення довговічності підвищилися в 1,7–2,3 рази порівняно з гартованими сталей.

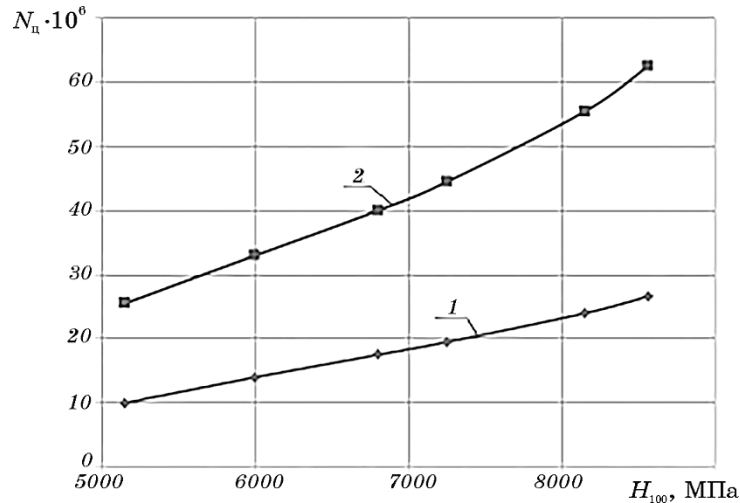


**Рис. 3.** Зміна мікротвердості по глибині зразків із сталі ШХ15 після: 1 — гартування, 2 — нітрогартування з витримкою 5 хв, 3–6 — оксинітрогартування з витримками відповідно 5, 7, 10 і 25 хв.

**Fig. 3.** Change in microhardness in depth of ШХ15 steel samples after: 1 — quenching, 2 — nitroquenching with soaking during 5 min, 3–6 — oxynitroquenching with soaking during 5, 7, 10, and 25 min, respectively.

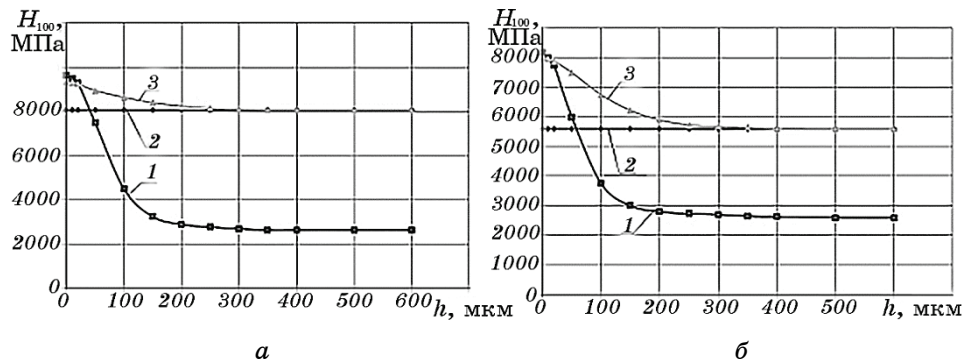


Довговічність зразків, що азотувалися після гартування, не зважаючи на високу твердість поверхні, підвищилася несуттєво (до 15%) в порівнянні з гартованими зразками. Це можна пояснити



**Рис. 4.** Залежність довговічності  $N_c \cdot 10^6$  при циклічному контактному навантаженні від твердості основи сталі X12M: 1 — після гартування, 2 — після оксинітрогартування.

**Fig. 4.** Dependence of durability  $N_c \cdot 10^6$  at cyclic contact load on hardness of X12M steel base: 1—after quenching, 2—after oxynitroquenching.



**Рис. 5.** Розподіли мікротвердості від поверхні по глибині сталей X12M (a) і 40X (б) після: 1 — іонного азотування, 2 — гартування, 3 — оксинітрогартування.

**Fig. 5.** Distributions of microhardness in depth from the surface of X12M (a) and 40X (б) steels after: 1—ion-quenching, 2—quenching, 3—oxynitroquenching.

малою твердістю їх основи, яка утворилася в результаті високотемпературного відпуску при азотуванні.

Дослідження показали, що час витримки при термоактивуванні

**ТАБЛИЦЯ 3.** Контактна витривалість зразків різних сталей з різними покриттями і без покриттів при випробуваннях на тертя кочення з точковим контактом в мастилі I-20 (максимальний тиск на ділянці контакту 2140 МПа).

**TABLE 3.** Back-to-back endurance of samples of various steels with different coatings and without coating during tests for rolling friction with point contact in I-20 lubricant (maximal pressure in the area of contact is 2140 MPa).

| № з/п | Марка сталі | Вид термообробки та технології нанесення покриття | Мікротвердість $H_{100}$ , МПа |        | Товщина покриття, мкм | Залишкові напруження в покритті, МПа | Довговічність, $N \cdot 10^6$ циклів |
|-------|-------------|---|--------------------------------|--------|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
|       |             |   | Поверхні                       | Основи |                       |                                      |                                      |
| 1     | 2           | 3   | 4                              | 5      | 6                     | 7                                    | 8                                    |
| 1     | ШХ15        | Гартування  | 7210                           | 7210   | 0                     | 0                                    | 25,1                                 |
| 2     | ШХ15        | Гартування + іонне азотування                     | 9180                           | 4970   | 300                   | 629                                  | 25,2                                 |
| 3     | ШХ15        | Нітрогартування, витримка 5 хв                    | 8700                           | 7200   | 330                   | 415                                  | 36,7                                 |
| 4     | ШХ15        | Нітрогартування, витримка 7 хв                    | 8050                           | 7200   | 350                   | 330                                  | 43,9                                 |
| 5     | ШХ15        | Нітрогартування, витримка 10 хв                   | 7750                           | 7200   | 360                   | 280                                  | 34,6                                 |
| 6     | ШХ15        | Нітрогартування, витримка 25 хв                   | 7450                           | 7200   | 385                   | 150                                  | 26,4                                 |
| 7     | ШХ15        | Оксинітрогартування, витримка 5 хв                | 8300                           | 7200   | 320                   | 470                                  | 40,8                                 |
| 8     | ШХ15        | Оксинітрогартування, витримка 7 хв                | 7840                           | 7200   | 330                   | 385                                  | 48,8                                 |
| 9     | ШХ15        | Оксинітрогартування, витримка 10 хв               | 7580                           | 7200   | 345                   | 310                                  | 38,4                                 |
| 10    | ШХ15        | Оксинітрогартування, витримка 25 хв               | 7300                           | 7200   | 365                   | 175                                  | 29,3                                 |
| 11    | 40X         | Гартування  | 5500                           | 5500   | 0                     | 0                                    | 23,7                                 |
| 12    | 40X         | Гартування + іонне азотування                     | 7850                           | 4100   | 290                   | 570                                  | 26,8                                 |
| 13    | 40x         | Нітрогартування, витримка 5 хв                    | 7700                           | 5500   | 300                   | 348                                  | 35,7                                 |
| 14    | 40X         | Нітрогартування, витримка 7 хв                    | 7640                           | 5500   | 310                   | 310                                  | 43,1                                 |

Продовження ТАБЛИЦІ 3.

Continuation of TABLE 3.

| 1  | 2    | 3  | 4    | 5    | 6   | 7   | 8    |
|----|------|--|------|------|-----|-----|------|
| 15 | 40X  | Нітрогартування,<br>витримка 10 хв       | 7520 | 5500 | 320 | 291 | 33,4 |
| 16 | 40X  | Оксинітрогартуван-<br>ня, витримка 5 хв  | 7790 | 5500 | 315 | 365 | 38,3 |
| 17 | 40X  | Оксинітрогартуван-<br>ня, витримка 7 хв  | 7720 | 5500 | 320 | 315 | 44,5 |
| 18 | 40X  | Оксинітрогартуван-<br>ня, витримка 10 хв | 7600 | 5500 | 335 | 296 | 36,2 |
| 19 | X12M | Гартування                               | 8560 | 8560 | 0   | 0   | 26,6 |
| 20 | X12M | Гартування + іонне<br>азотування         | 9560 | 5150 | 330 | 593 | 28,1 |
| 21 | X12M | Нітрогартування,<br>витримка 7 хв        | 9270 | 8560 | 340 | 349 | 49,2 |
| 22 | X12M | Оксинітрогартуван-<br>ня, витримка 7 хв  | 9340 | 8560 | 360 | 396 | 62,5 |

має значний вплив на довговічність сталей і існує його оптимальне значення, при якому досягається максимальна контактна витривалість. В умовах проведених досліджень цей час складав 7 хв.

Як відзначалося раніше, максимальну довговічність матеріалів при терті кочення можна досягнути при оптимальних значеннях основних властивостей композиції «покриття–основа» (твердості, товщини, фазового складу, градієнта твердості по товщині покриття, залишкових напружень стиску в покритті та твердості основи). В таблиці 4 наведені оптимальні значення цих основних властивостей, що забезпечили максимальну довговічність сталей ШХ15, 40X і X12M в умовах випробувань після нітрогартування та оксинітрогартування. Дослідженнями встановлено, що при оксинітрогартуванні досягається вища довговічність в порівнянні з нітрогартуванням за рахунок кращих властивостей покриття в зв'язку з наявністю на поверхні оксидного шару. Найвищу довговічність отримано на сталі X12M після оксинітрогартування  $62,5 \cdot 10^6$  циклів навантажень, що на 27% більша від її значення при нітрогартуванні.

#### 4. ВИСНОВКИ

1. Запропонований метод та інтегральні технології нітрогартування та оксинітрогартування зміцнення композиції «покриття–основа» є

**ТАБЛИЦЯ 4.** Оптимальні властивості азотованих шарів і основи, що забезпечили максимальну довговічність сталей після нітрогартування та оксинітрогартування при випробуваннях на терті кочення в мастилі І-20 (максимальний тиск на площадці контакту 2140 МПа).

**TABLE 4.** Optimal properties of nitrided layers and base, which provide maximal durability of steels after nitroquenching and oxynitroquenching during tests for rolling friction in I-20 lubricant (maximal pressure in the area of contact is 2140 MPa).

| Марка сталі   | Мікротвердість $H_{100}$ , МПа |        | Товщина покриття $h$ , мкм | Град твердості, МПа/мкм | Фазовий склад поверхні                        | Залишкові напруження, МПа | Довговічність, $N \cdot 10^6$ циклів |
|---|--------------------------------|--------|----------------------------|-------------------------|---|---------------------------|--------------------------------------|
|   | Поверхні                       | Основи |                            |                         |   |                           |                                      |
| Нітрогартування при термоактивуванні з витримкою 7 хв     |                                |        |                            |                         |   |                           |                                      |
| ШХ15  | 8050                           | 7200   | 350                        | 2,42                    | 84% $Fe_4N$ + 16% $\alpha$ -Fe <sub>[N]</sub> | 330                       | 43,91                                |
| 40X   | 7640                           | 5500   | 310                        | 6,90                    | 80% $Fe_4N$ + 20% $\alpha$ -Fe <sub>[N]</sub> | 310                       | 44,5                                 |
| X12M  | 9270                           | 8560   | 340                        | 2,08                    | 90% $Fe_4N$ + 10% $\alpha$ -Fe <sub>[N]</sub> | 349                       | 49,2                                 |
| Оксинітрогартування при термоактивуванні з витримкою 7 хв |                                |        |                            |                         |   |                           |                                      |
| ШХ15  | 7840                           | 7200   | 330                        | 1,81                    | 88% $Fe_4N$ + 12% $\alpha$ -Fe <sub>[N]</sub> | 385                       | 48,8                                 |
| 40X   | 7720                           | 5500   | 320                        | 6,93                    | 82% $Fe_4N$ + 18% $\alpha$ -Fe <sub>[N]</sub> | 315                       | 48,1                                 |
| X12M  | 9340                           | 8560   | 360                        | 2,16                    | 92% $Fe_4N$ + 8% $\alpha$ -Fe <sub>[N]</sub>  | 396                       | 62,5                                 |

ефективними способами підвищення контактної витривалості конструкційних елементів при терті кочення, що дозволяють підвищити їх довговічність в 1,7–2,3 рази в порівнянні з гартованими сталями.

2. Встановлено, що при термоактивуванні азотованих шарів за рахунок часткового розпаду нітридних фаз можна змінювати і оптимізувати властивості азотованого шару та залишкові напруження за критерієм максимальної довговічності композиції «покриття-основа» при терті кочення. Наявність оксидного шару на поверхні азотованого шару є бар'єром для дифузії азоту в навколишнє середовище і сприяє підвищенню довговічності конструкційних елементів за рахунок покращення властивостей покриття. Контактна витривалість композиції «покриття-основа» зростає з підвищенням твердості основи і для досягнення максимального її значення рекомендується застосовувати основу з максимальною твердістю.

3. Найвища довговічність при терті кочення досягається при техно-

логії оксинітрогартування з оптимальними властивостями покриття і основи, що запропоновані на основі проведених досліджень.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. К. Джонсон, *Механика контактного взаимодействия* (Москва: Мир: 1989).
2. Л. А. Галин, *Контактные задачи теории упругости* (Москва: ГИТТЛ: 1953).
3. Б. С. Ковальский, *Расчет деталей на местное сжатие* (Харьков: ХВКИУ: 1967).
4. С. В. Пинегин, *Работоспособность деталей подшипников* (Москва: Машгиз: 1949).
5. Г. К. Трубин, *Контактная усталость материалов для зубчатых колес* (Москва: Машгиз: 1962).
6. О. І. Балицький, В. М. Мочульський, Л. М. Іваськевич, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, № 4: 91 (2015).
7. П. В. Каплун, К. А. Паршенко, *Підвищення зносостійкості і довговічності підшипників кочення* (Хмельницький: ХНУ: 2016).
8. P. V. Kaplun, O. V. Dykha, and V. A. Gonchar, *Materials Science*, **53**, Iss. 4: 468 (2018).
9. P. V. Kaplun, *Mater. Sci.*, **53** (6): 818 (2018).
10. Н. В. Новиков, А. А. Видный, Б. А. Ляшенко и др., *Методы упрочнения поверхностей машиностроительных деталей* (Киев: ИСМ АН УССР: 1989).
11. В. М. Зинченко, *Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки* (Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана: 2001).
12. В. Г. Каплун, П. В. Каплун, *Ионное азотирование в безводородных средах* (Хмельницький: ХНУ: 2015).
13. P. V. Kaplun and B. A. Lyashenko, *Strength of Materials*, **50**, (2) (2018).
14. O. V. Zaitsev, V. G. Kaplun, S. V. Ivashchuk, and P. E. Filyushin, *Metal Sci. Heat Treatment*, **32**, Iss. 9: 650 (1990).
15. В. Г. Каплун, П. В. Каплун, В. А. Гончар, Т. В. Донченко, *Спосіб підвищення контактної витривалості при циклічному навантаженні нітрогартуванням*: Пат. 123692 UA, МПК G21D 1/18, G0 1N 3/40 (Опубл. 12.03.2018, бюл. № 5).
16. В. Г. Каплун, П. В. Каплун, В. А. Гончар, Т. В. Донченко, *Спосіб підвищення контактної витривалості сталей при циклічному контактному навантаженні застосуванням оксинітрогартування*: Пат. 123691 UA, МПК G21D 1/00, G0 1N 17/00 (Опубл. 12.03.2018, бюл. № 5).
17. П. В. Каплун, В. А. Гончар, А. В. Паршенко, *Спосіб випробувань на контактну витривалість при коченні з проковзуванням*: Патент № 106181 UA, МПК GD1L 1/00 (Опубл. 25.04.2016, бюл. № 8).

## REFERENCES

1. K. L. Johnson, *Contact Mechanics* (Cambridge: University Press: 2001).
2. L. A. Galin, *Kontaktnye Zadachi Teorii Uprugosti* (Moscow: GITTL: 1953) (in

- Russian).
3. B. S. Kovalskiy, *Raschet Detaley na Mestnoe Szhatie* (Kharkiv: HVKIU: 1967) (in Russian).
  4. S. V. Pinegin, *Rabotosposobnost Detaley Podshipnikov* (Moscow: Mashgiz: 1949) (in Russian).
  5. G. K. Trubin, *Kontaktnaya Ustalost Materialov dlya Zubchatykh Koles* (Moscow: Mashgiz: 1962) (in Russian).
  6. O. I. Balitskiy, V. M. Mochulskiy, and L. M. Ivaskevich, *Fizyko-Khimichna Mekhanika Materialiv*, No. 4: 91 (2015) (in Ukrainian).
  7. P. V. Kaplun and K. A. Parshenko, *Pidvyshchennya Znosostiystki i Dovgovichnosti Pidshypnykiv Kochennya* (Khmelnitskyi: KmNU: 2016) (in Ukrainian).
  8. P. V. Kaplun, O. V. Dykha, and V. A. Gonchar, *Materials Science*, **53**, Iss. 4: 468 (2018).
  9. P. V. Kaplun, *Mater. Sci.*, **53** (6): 818 (2018).
  10. N. V. Novikov, A. A. Vidnyy, B. A. Lyashenko *et al.*, *Metody Uprochneniya Poverkhnostey Mashinostroitelnykh Detaley* (Kyiv: ISM AN USSR: 1989) (in Russian).
  11. V. M. Zinchenko, *Inzheneriya Poverkhnosti Zubchatykh Koles Metodami Khimiko-Termicheskoy Obrabotki* (Moscow: MGTU im. N. E. Bauman: 2001) (in Russian).
  12. V. G. Kaplun and P. V. Kaplun, *Ionnoe Azotirovanie v Bezvodnorodnykh Sredakh* (Khmelnitskyi: KmNU: 2015).
  13. P. V. Kaplun and B. A. Lyashenko, *Strength of Materials*, **50**, (2) (2018).
  14. O. V. Zaitsev, V. G. Kaplun, S. V. Ivashchuk, and P. E. Filyushin, *Metal Sci. Heat Treatment*, **32**, Iss. 9: 650 (1990).
  15. V. G. Kaplun, P. V. Kaplun, V. A. Gonchar, and T. V. Donchenko, *Sposib Pidvyshchennya Kontaktnoy Vytryvalosti pry Tsyklichnomu Navantazhenni Nitrogartuvanniam*: Patent 123692 UA, MPK G21D 1/18, G0 1N 3/40 (Publ. 12.03.2018, Bull. No. 5) (in Ukrainian).
  16. V. G. Kaplun, P. V. Kaplun, V. A. Gonchar, and T. V. Donchenko, *Sposib Pidvyshchennya Kontaktnoy Vytryvalosti Staley pry Tsyklichnomu Kontaktnomu Navantazhenni Zastosuvanniam Oksynitrogartuvannya*: Patent 123691 UA, MPK G21D 1/00, G0 1N 17/00 (Publ. 12.03.2018, Bull. No. 5) (in Ukrainian).
  17. P. V. Kaplun, V. A. Gonchar, and A. V. Parshenko, *Sposib Viprobuvan na Kontaktnu Vytryvalist pry Kochenni z Prokovzuvanniam*: Patent No. 106181 UA, MPK GD1L 1/00 (Publ. 25.04.2016, Bull. No. 8) (in Ukrainian).