

**Олександренко В.П.,
Кирилков В.А.,
Паршенко К.А.,
Мисліборський В.В.**

Хмельницький національний університет,
м. Хмельницький, Україна
E-mail: parshenko@ukr.net

ВПЛИВ ЗДАТНОСТІ СТАЛІ X12 ДО РЕЛАКСАЦІЇ МІКРОНАПРУЖЕНЬ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТА ДОВГОВІЧНІСТЬ В УМОВАХ ТЕРТЯ КОЧЕННЯ

УДК 621.793.6

Наведені результати дослідження впливу кількості насиченого та ненасиченого азотом залишкового аустеніту на здатність матеріалу до релаксації мікронапружень. Доведено, що максимальна довговічність та зносостійкість зразків із сталі X12 відповідає максимальній зміні реологічних властивостей матеріалу, тобто вичерпанню внутрішнього резерву. Оптимальне значення початкової кількості залишкового аустеніту для отримання максимальних показників реологічних характеристик матеріалу та контактної витривалості при зношуванні від дії циклічних навантажень до появи викришування на доріжці кочення для структур ненасиченого та насиченого азотом залишкового аустеніту складає 30 об'ємних відсотків.

Ключові слова: аустеніт, реологічні властивості, тертя кочення, зносостійкість.

Вступ

Підвищення надійності, довговічності та конкурентоздатності машин і обладнання є одним з важливіших завдань машинобудування. Статистика свідчить, що близько 80 % несправностей у роботі машин відбуваються в результаті зносу і руйнування поверхні тертя деталей машин.

У сучасному машинобудуванні збільшення питомих навантажень і швидкостей руху ускладнюють умови експлуатації деталей і вузлів машин, що призводить до підвищення інтенсивності зносу контактуючих поверхонь. У зв'язку з цим проблеми вивчення процесів зношування і пошук шляхів підвищення зносостійкості та довговічності деталей машин мають велике практичне значення.

Широке застосування в машинобудуванні мають пари тертя кочення. Їх зносостійкість і довговічність у багатьох випадках визначає працездатність і довговічність машин та обладнання в цілому. Є різні способи підвищення довговічності пар тертя кочення: конструктивні, технологічні, експлуатаційні. В літературі є значна кількість досліджень, присвячених цим питанням. Проте проблема підвищення зносостійкості та довговічності пар тертя кочення, що виготовлені зі сталі X12 з різним вмістом залишкового аустеніту залежно від здатності до релаксації мікронапружень, не вирішена і є актуальною.

Вивченням питання впливу метастабільних структур, зокрема залишкового аустеніту, на контактну витривалість та здатність до релаксації мікронапружень займався багато вчених, серед них: М.Н. Бриков, Я.М. Гладкий, В.В. Запорожець, В.М. Зінченко, Л.С. Малінов, В.В. Шевеля та інші. Деякі з них вважають, що в поверхневому шарі деталей, які працюють при змінних навантаженнях, навіть незначна кількість залишкового аустеніту є недопустимою. Інші, навпаки, стверджують, що при дії тертя ковзання зносостійкість сталі є дуже високою навіть при вмісті залишкового аустеніту 90 %. Ряд авторів вважає, що для зубчатих коліс вміст залишкового аустеніту 46 - 50 % є оптимальним для забезпечення контактної витривалості. М.Н. Бриковим доведено, що в умовах абразивного зношування оптимальним вважається вміст залишкового аустеніту 60 % [4].

В умовах експлуатації при контактній взаємодії конструктивних елементів їх довговічність значною мірою залежить від властивостей матеріалів, з яких вони виготовлені, і, зокрема, від їх хімічного складу, структури, здатності до релаксації мікронапружень. Очевидно, що для різних умов експлуатації існують оптимальні значення характеристик матеріалів, при яких досягається максимальна довговічність цих конструктивних елементів.

Мета і постановка задачі

Метою даної роботи є виявлення залежностей впливу залишкового аустеніту та здатності до релаксації мікронапружень на контактну витривалість сталі X12 в умовах тертя кочення для різних умов навантаження та експлуатації до кінця не вивчене і є актуальним.

Виклад матеріалів досліджень

Для визначення реологічних і міцнісних властивостей поверхонь тертя, зокрема здатності матеріалу до релаксації мікронапружень було використано пристрій на базі мікротвердоміра ПМТ-3, розроблений професором Шевелею В.В., що працює за методом безперервного втискування індентора [1, 2, 7]. Метод засновано на реєстрації у процесі досліджень глибини h заглиблення індентора під навантаженням та при його зні-

манні. Величину h оцінюють за допомогою вимірювальної системи мікротвердоміра або по автоматично записаній на самописці безперервним втискуванням індентора діаграмі втискування $P = f(h)$ - функціональній залежності глибини заглиблення індентора від навантаження. Розшифрування такої діаграми дозволяє отримати не тільки більш широкую, але також і принципово нову інформацію [1, 2, 5, 7].



Рис. 1 – Загальний вигляд пристрою для визначення релаксаційної здатності матеріалів методом безперервного втискування індентора [2]

Загальний вигляд і принципову схему пристрою для дослідження здатності матеріалу до релаксації мікронапружень показано на рис. 1. та рис. 2. До складу пристрою входять: столяр і рама, на яких розміщено механізми реєстрації навантаження і глибини втискування, двокоординатний потенціометр типу ПДС-021М [2].

На жорсткій рамі 7 за допомогою пружних пластин 8 закріплено стакан 9, усередині якого на пружних мембранах 11 підвішено шток 10 із індентором 5. Вимірювання здатності матеріалу до релаксації мікронапружень проводиться безконтактним ємнісним датчиком 3, закріпленим на стакані 7, а вимірювання величини навантаження – аналогічним датчиком 6, закріпленим на стакані 9.

Пружини 8 забезпечують вертикальне безлюфтове переміщення стакана 9, мембрани 11, дозволяють виконувати вимірювання навантаження за величиною їх прогину та плавне прикладення навантаження до зразка 2. Навантаження індентора виконується за допомогою привода 13 через шток 12.

Встановлення зразка 2 в потрібне положення здійснюється за допомогою трикоординатного столика 1. Нагрівання зразка відбувається за допомогою нагрівального пристрою 4.

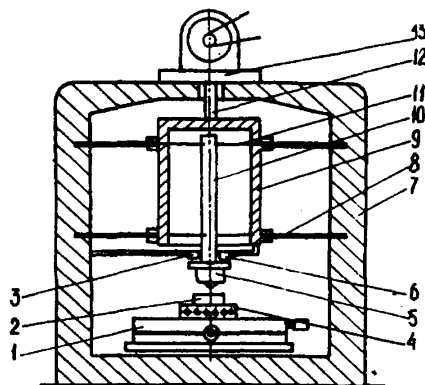


Рис. 2 – Схема пристрою для визначення релаксаційної здатності матеріалів методом безперервного втискування індентора [2]:

- 1 – столик; 2 – зразок; 3 – датчик контролю глибини вдавлення;
4 – електроніч; 5 – індентор; 6 – датчик контролю навантаження;
7 – корпус; 8 – мембрана; 9 – стакан; 10 – шток;
11 – мембрана; 12 – шток; 13 – електропривід

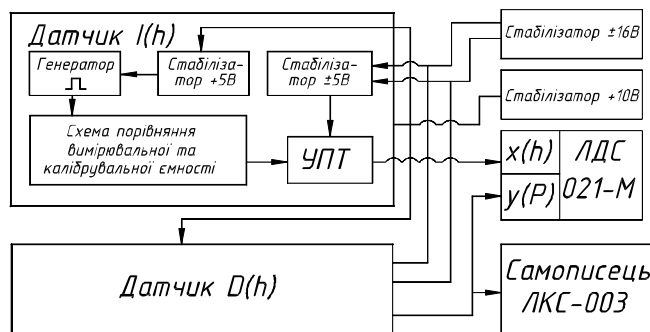


Рис. 3 – Блок-схема пристрою для визначення релаксаційної здатності матеріалів методом безперервного втискування індентора [2]

Електронну блок-схему пристрою наведено на рис. 3. Сигнали, що знімаються з датчиків 1 та 2 надходять на двокоординатний самописець ПДС-021М для отримання залежності навантаження (P) – глибина втискування (h) або на самописець ЛКС4-003 для отримання залежності навантаження – час, що дозволяє оцінити релаксаційні властивості матеріалу при витримці зразка під навантаженням. Гранична помилка, пов'язана з похибкою тарування при обрахунку за діаграмами втискування від 0,01 до 1 Н, не перевищує 10 %.

Типова діаграма, що отримана під час випробувань, має три характерних ділянки (рис. 4): 1 – активного навантаження; 2 – витримки під навантаженням; 3 – активного розвантаження і повторного навантаження.

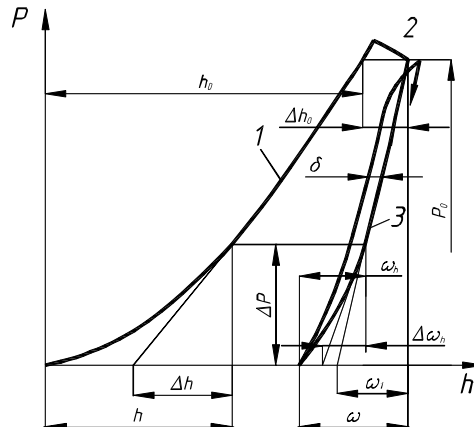


Рис. 4 – Типова діаграма $P - h$ та деякі її параметри [7]

За гілкою навантаження можна знайти ряд величин кінетичної твердості, що розраховується за глибиною відбитку h [1]:

$$H = \frac{P}{F} = C_0 \frac{P}{h^2} = \frac{P}{(c \cdot h)^2}, \quad (1)$$

де c – коефіцієнт форми індентора;

F – площа відбитку глибиною h , при цьому $c \cdot h = \sqrt{F}$.

Для пірамідального або конічного індентора C_0 , c – постійні величини. Якщо F – площа поверхні відбитку, то C_0 дорівнює 37,84 для піраміди Вікерса; 37,97 та 13,85 – для пірамід Берковича та Кнуппа відповідно [2, 7].

Аналіз кінетики руху індентора по діаграмі втискування дає можливість досліджувати закономірності пружнопластичного деформування матеріалів не тільки у процесі формування відбитку при навантаженні, а також при його пружному відновленні після зняття навантаження.

Приріст глибини відбитку при витримці під навантаженням, що характеризує мікроповзучість матеріалів, оцінюється за абсолютною величиною відповідної ділянки діаграми втискування (рис. 4). Більш повну інформацію можна отримати безпосередньо за кривою повзучості відбитку в координатах глибина відбитка-час. Необхідно відмітити, що збільшення пластичної деформації у часі в умовах витримки під навантаженням супроводжується зменшенням рівня діючих напружень через збільшення розміру відбитку, а також деякого зменшення величини навантаження через послаблення пружин при заглибленні індентора. Тому умови накопичення пластичної деформації матеріалу під індентором більше зумовлені режимом релаксації, ніж режимом повзучості, що відбувається при постійному рівні прикладених напружень.

Відповідно до [1] здатність матеріалу до релаксації напружень у часі оцінювали за величиною:

$$\delta H = \frac{H_0 - H_t}{H_0} = \frac{2\Delta h_0}{h_0 + \Delta h_0}, \quad (2)$$

де $H_0 = C_0 \frac{P}{h_0^2}$ – твердість, знайдена за гілкою навантаження;

H_t – твердість у такий момент часу t після виключення приводу навантаження, після закінчення якого твердість H_t практично не змінилась.

Коефіцієнт розсіювання енергії можна визначити за формулою [2, 6]:

$$\psi = \frac{\delta}{h}, \quad (3)$$

де δ і h – величини відповідних ділянок з діаграми втискування індентора (рис. 4).

За допомогою діаграми втискування також можна визначити модуль Юнга, пружні та пластичні деформації, енергетичні витрати.

Основним показником, що визначає здатність до релаксації мікронапружень та коефіцієнт розсіювання енергії сталі X12 є кількість залишкового аустеніту. У процесі досліджень визначалась здатність до релаксації мікронапружень та коефіцієнт розсіювання енергії в залежності від кількості ненасиченого азотом залишкового аустеніту сталі X12 та насиченого азотом залишкового аустеніту, отриманого методом описаним у роботі [4].

На рис. 5 - 8 наведено залежності впливу початкового вмісту метастабільного насиченого та ненасиченого азотом залишкового аустеніту на вихідну і кінцеву (після проведення експериментальних досліджень) здатність до релаксації мікронапружень, а також коефіцієнт розсіювання енергії. Встановлено, що насичення аустеніту азотом сприяє підвищенню вихідних реологічних властивостей хромистих сталей.

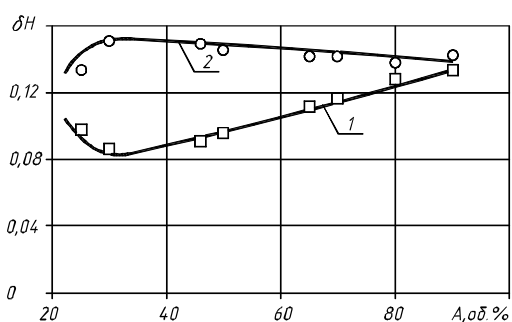


Рис. 5 – Залежність здатності матеріалу до релаксації мікронапружень δH від вмісту ненасиченого залишкового аустеніту:
1 – кінцева;
2 – початкова

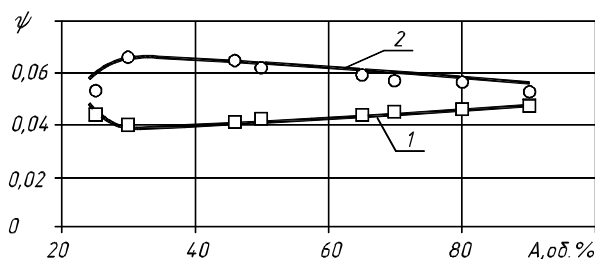


Рис. 6 – Залежність коефіцієнта розсіювання енергії ψ від вмісту ненасиченого залишкового аустеніту:
1 – кінцевий;
2 – початковий

Проведені експериментальні дослідження показують, що початкова здатність матеріалу до релаксації мікронапружень із структурою ненасиченого залишкового аустеніту має нелінійну екстремальну залежність з максимумом при вмісті залишкового аустеніту 30 об.% ($\delta H = 0,151$). Аналогічно впливає початковий вміст залишкового аустеніту і на коефіцієнт розсіювання енергії. При кількості залишкового аустеніту 30 об.% він набуває максимального значення ($\psi = 0,648$).

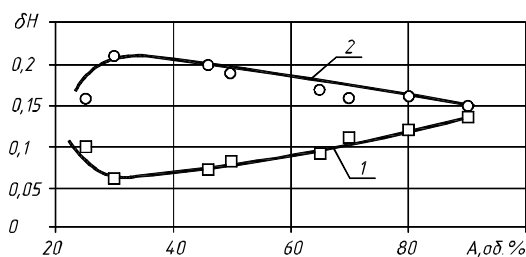


Рис. 7 – Залежність здатності матеріалу до релаксації мікронапружень δH від вмісту насиченого азотом залишкового аустеніту:
1 – кінцева;
2 – початкова

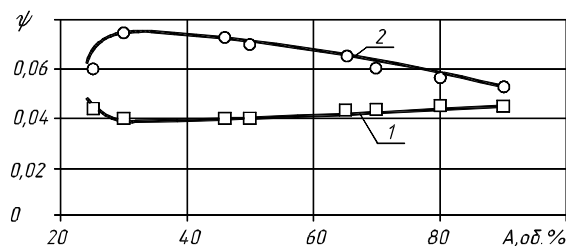


Рис. 8 – Залежність коефіцієнта розсіювання енергії ψ від вмісту насиченого азотом залишкового аустеніту:
1 – кінцевий;
2 – початковий

Як видно з рис. 5 - 8, вихідна здатність матеріалу до релаксації мікронапружень із структурою насиченого азотом залишкового аустеніту при вмісті аустеніту 30 об. % зростає приблизно на 30 %, а коефіцієнт розсіювання енергії – на 13 %, порівняно з структурою ненасиченого азотом залишкового аустеніту.

Зменшення стабільності залишкового аустеніту також спостерігається під час проведення експериментальних досліджень до появи викришування на доріжці кочення. Кінцеві значення реологічних властивостей досліджуваних зразків набагато нижчі за початкові.

Характер зміни показників здатності матеріалу до релаксації мікронапружень та коефіцієнт розсіювання енергії залежно від початкового вмісту залишкового аустеніту також відрізняється від початкового. При кількості нелегованого метастабільного аустеніту 30 об.% показник здатності до релаксації мікронапружень набуває після зношування мінімального значення ($\delta H = 0,085$), відповідно коефіцієнт розсіювання енергії дорівнює 0,41. Аналогічні зміни відбуваються під час насичення аустеніту азотом.

З рис. 9, 10 видно, що зміна реологічних характеристик є більш інтенсивною для випадку менш стабільної структури, тобто для насиченого аустеніту.

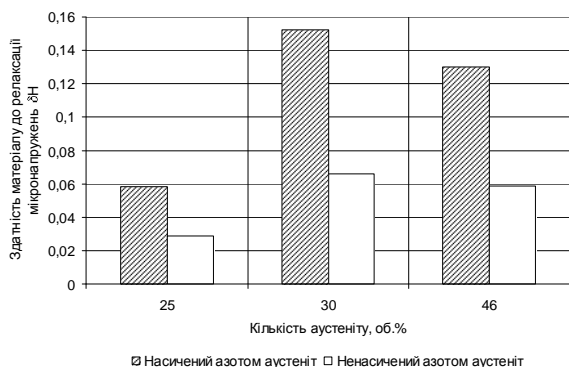


Рис. 9 – Порівняння здатності до релаксації мікронапружень δH при терті кочення від кількості насиченого та ненасиченого залишкового аустеніту

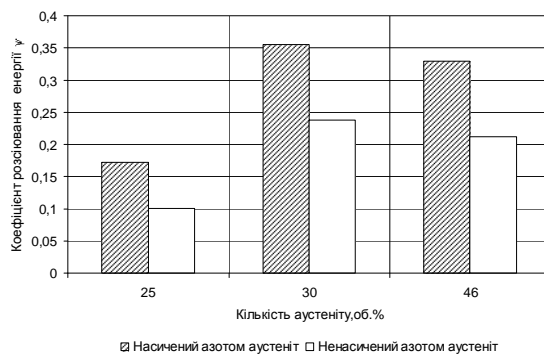


Рис. 10 – Порівняння коефіцієнта розсіювання енергії ψ при терті кочення від кількості насиченого та ненасиченого залишкового аустеніту

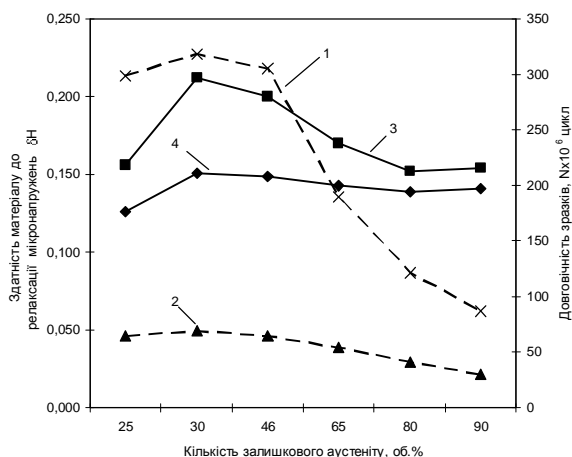


Рис. 11 – Порівняння здатності до релаксації мікронапружень δH при терті кочення та довговічності зразків від кількості залишкового аустеніту:

- 1 – довговічність зразків з насиченим аустенітом;
- 2 – довговічність зразків з ненасиченим аустенітом;
- 3 – здатність матеріалу до релаксації мікронапружень зразків з насиченим аустенітом;
- 4 – здатність матеріалу до релаксації мікронапружень зразків з ненасиченим аустенітом

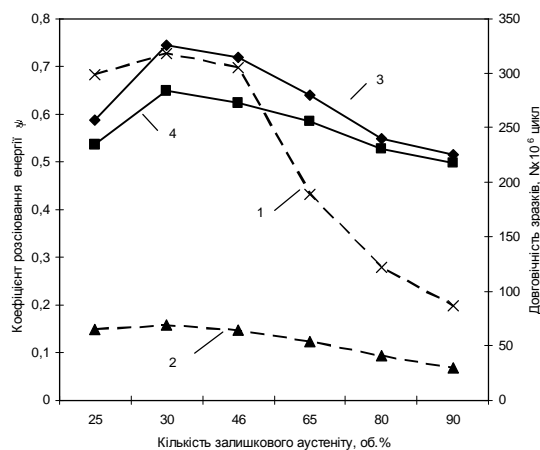


Рис. 12 – Порівняння коефіцієнта розсіювання енергії при терті кочення та довговічності зразків від кількості залишкового аустеніту:

- 1 – довговічність зразків з насиченим аустенітом;
- 2 – довговічність зразків з ненасиченим аустенітом;
- 3 – коефіцієнт розсіювання енергії зразків з насиченим аустенітом;
- 4 – коефіцієнт розсіювання енергії зразків з ненасиченим аустенітом

Тобто, на зносостійкість і довговічність зразків з метастабільними структурами в умовах тертя кочення, крім фізико-механічних характеристик і фазового складу, великий вплив мають реологічні характеристики матеріалу, такі, як здатність матеріалу до релаксації мікронапружень та коефіцієнт розсіювання енергії. В ході експериментальних досліджень виявлено, що максимальна довговічність та зносостійкість зразків із сталі X12 відповідає максимальній зміні реологічних властивостей матеріалу, тобто вичерпання внутрішнього резерву. Оптимальне значення початкової кількості залишкового аустеніту для отримання максимальних показників реологічних характеристик матеріалу та контактної витривалості при зношуванні від дії циклічних навантажень до появи викришування на доріжці кочення для структур ненасиченого та насиченого азотом залишкового аустеніту складає 30 об'ємних відсотків.

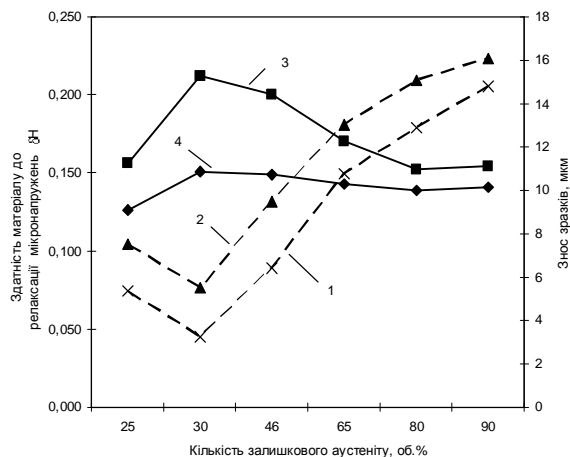


Рис. 13 – Порівняння здатності до релаксації мікронапружень δH при терті кочення та зносу зразків від кількості залишкового аустеніту:
 1 – знос зразків з насиченим аустенітом;
 2 – знос зразків з ненасиченим аустенітом;
 3 – здатність матеріалу до релаксації мікронапружень зразків з насиченим аустенітом;
 4 – здатність матеріалу до релаксації мікронапружень зразків з ненасиченим аустенітом

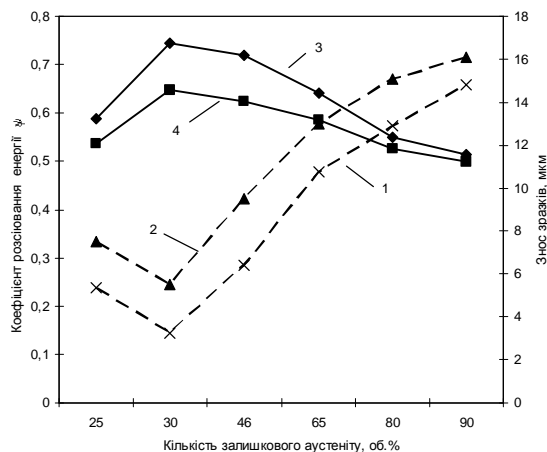


Рис. 14 – Порівняння коефіцієнта розсіювання енергії при терті кочення та зносу зразків від кількості залишкового аустеніту:
 1 – знос зразків з насиченим аустенітом;
 2 – знос зразків з ненасиченим аустенітом;
 3 – коефіцієнт розсіювання енергії зразків з насиченим аустенітом;
 4 – коефіцієнт розсіювання енергії зразків з ненасиченим аустенітом

Очевидно, що на ступінь перетворення метастабільних структур, зокрема залишкового аустеніту, а отже, на значення довговічності і величини зношування матеріалів, впливають умови контактної взаємодії, розподіл контактних напружень по глибині досліджуваних зразків.

Комплексне вивчення впливу наведених факторів дозволить сформулювати основні принципи підвищення зносостійкості та довговічності пар тертя, що працюють в умовах тертя кочення, застосуванням метастабільних структур, і як наслідок забезпечити зростання працездатності і надійності обладнання в цілому.

Література

1. Бульчев С.И. Исследование механических свойств материалов с помощью кинетической диаграммы нагрузка – глубина отпечатка при микровдавливании / С.И. Бульчев, В.П. Алехин, М.Х. Шоршоров, А.П. Терновский // Проблемы прочности. – 1976. – № 9. – С. 79-83.
2. Ильинский И.И. Методика определения параметров микротекучести листовых материалов / И.И. Ильинский, В.В. Шевеля, А.П. Круглик // Проблемы прочности. – 1983. – № 2. – С. 105-109.
3. Каплун П. В. Кінетика зношування матеріалу підшипників кочення з структурою залишкового аустеніту / П.В. Каплун, К.А. Паршенко // Проблемы трибологии. – 2005. – № 3 - 4. – С. 25-28.
4. Паршенко К.А. Вплив метастабільного аустеніту на кінетику зношування нітрогартованої сталі X12 при терті кочення / К.А. Паршенко // Вісник Технологічного університету Поділля (ХНУ). – 2006. – Т.2, № 2. – С. 145-151.
5. Шевеля В. Вплив структури та складу сталі на припрацьовуваність в умовах фретингу / В. Шевеля, А. Джимала, Г. Калда, В. Олександренко // Машинознавство. – 2001. – № 1. – С. 24-27.
6. Шевеля В.В. Фреттинг-усталость металлов. / В.В. Шевеля, Г.С. Калда. – Хмельницький: Поділля, 1998. – 299 с.
7. Шевеля В.В. О роли релаксационных явлений и субструктурных превращений при трении металлов / В.В. Шевеля, В.П. Олександренко, Г.С. Калда // Проблемы трибологии. – 2003. – №2. – С. 3-10.

Поступила в редакцію 21.05.2014

Oleksandrenko V.P., Kyrylkov V.A., Parshenko K.A., Mysliborskiy V.V. **Effect of capacity of steel X12 relaxation microstresses on wear resistance and durability under rolling friction.**

The results of research on the impact the number of saturated and unsaturated nitrogen retained austenite on the ability of the material to relax microstresses. We prove that the maximum durability and wear resistance of steel samples X12 corresponds to the maximum change in the rheological properties of the material, that is exhausting internal reserves. The optimum value of the initial amount of retained austenite to maximize performance rheological characteristics of the material and the contact endurance in wear on the action of cyclic loads to the appearance of chipping on the track bearing structures for unsaturated and saturated nitrogen retained austenite is 30 percent by volume.

Keywords: austenite, rheological properties, rolling friction, wear resistance.

References

1. Bulychev S. Y. Issledovanye mekhanycheskykh svojstv materyalov s pomoshhju kynetycheskoj dyagrammy naghruzka – ghlubyna otechatka pri mykrovdavlyvanyy, Problemy prochnosty, 1976, No 9. pp. 79-83.
2. Iljynskij Y. Y. Metodyka opredeleniya parametrov mykrotekuchesty lystovykh materyalov, Problemy prochnosty, 1983, No 2, pp. 105-109.
3. Kaplun P. V. Kinytyka znoshuvannya materialu pidshypnykiv kochennja z strukturoju zalyshkovogho austenitu, Problemy tribologii (Problems of tribology), Khmel'nyts'kyi, KhNU, 2005, No 3-4, pp. 25-28.
4. Parshenko K. A. Vplyv metastabiljnogho austenitu na kinytyku znoshuvannya nitroghartovanoji stali X12 pry terti kochennja, Visnyk Tekhnologhichnogho universytetu Podillja, Khmel'nyts'kyi, KhNU. 2006, No 2, pp. 145-151.
5. Shevelja V. Vplyv struktury ta skladu stali na prypracjovuvanistj v umovakh fretynghu, Mashynonavstvo, 2001, No 1, pp. 24-27.
6. Shevelja V. V. Fretyngh-ustalostj metallov, Khmeljnyckyj, Podillja, 1998, 299 p.
7. Shevelja V. V. O roly relaksacyonnykh javlenyj i substrukturnykh prevrashhenyj pri trenii metallov, Problemy tribologii (Problems of tribology), Khmel'nyts'kyi, KhNU, 2003, No 2, pp. 3-10.