

Кінетичні та механохімічні особливості мікроструктурних перетворень тертьових поверхонь сталі мартенситного класу

Мишук О.О., Цаплій М.П.

Науково-дослідний інститут нафтопереробної та нафтохімічної промисловості «МАСМА»,
Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, м. Київ, Україна

***Анотація.** Досліджено кореляції між динамічними процесами в контактній тертьовій зоні загартованої кінематичної пари, виготовленої зі сталі мартенситного класу, та перетвореннями мікроструктури тертьових поверхонь. Проаналізовано трибологічні характеристики та сигнали акустичної емісії, генеровані тертьовою зоною, за періодичної зміни швидкості обертання контртіла. Тертьові поверхні на стадіях перетворення їх мікроструктури досліджено методами оптичної та сканувальної електронної мікроскопії та Оже-спектроскопії. Виявлено природний зв'язок між походженням різних поверхневих механохімічних процесами: низькотемпературного відпуску гартувального мартенситу, окиснення, масоперенесення нанофрагментів мікроструктури та наноконцентів мастильного середовища, зокрема, колоїдних гетерогенних наповнювачів. Ключові слова: сталь мартенситного класу, кінетика тертя, акустична емісія, мікроструктура поверхні, мікрозондовий Оже-аналіз, мастильний матеріал, колоїдний гетерогенний наповнювач.*

Вступ та визначення проблеми. В практиці дослідження мастильних матеріалів кінематичні пари типу зразок-контртіло, елементи яких виготовлено зі сталей мартенситного класу та загартовані, застосовують в більшості сучасних методів оцінювання змащувальної ефективності мастильного середовища. Природно, що за кімнатних температур під час тертя в поверхневих шарах елементів кінематичної пари мають відбуватися структурні зміни, пов'язані з закономірностями їх перетворення в умовах низькотемпературного відпуску. В контактній тертьовій зоні відбувається розклад гартувального мартенситу, зумовлений інтенсивними імпульсними напруженнями тертьових поверхонь металу на мікроконтактах, що вже за відносно невисоких температурах фрикційного саморозігрівання пари призводить до суттєвих змін інтенсивності її зношування та антифрикційних характеристик. Ефективність мастильного матеріалу, оцінювана під час трибологічних випробувань, у значній мірі є наслідком його здатності впливати на результативність подібної релаксаційної перебудови мартенситного поверхневого шару, яка є суттєво нерівноважною.

Інтенсивність зношування та антифрикційні характеристики загартованої сталевий кінематичної пари не просто монотонно змінюються від навантаження, швидкості та температури, а характеризуються специфічними екстремумами на залежностях, мають доволі різкі максимуми та мінімуми. В роботі [1] було вперше проілюстровано подібність екстремальних залежностей коефіцієнту тертя від температури та від швидкості циклічного обертання (коливання) контртіла. Ця подібність зберігається для різних кінематичних схем сталевий пари: чотирикулькової, блок-кільце (схеми Тімкена), куля-площина (для зворотнопоступального руху). Характерні перегиби на екстремальних залежностях від швидкості обертання відносно слабо зсуваються в бік зменшення обертів, коли лінійна швидкість ковзання в контактній зоні змінюється на порядки. Подібні ефекти засвідчують роль поверхні контртіла в тертьових процесах, важливість періоду її перебування в мастильному середовищі між моментами потрапляння в тертьову зону в контакті з поверхнею зразка і, як наслідок, порушують питання про важливість впливу процесів масоперенесення між поверхнями контртіла та зразка на утворення мікроструктури тертьових поверхонь.

Подальший розвиток досліджень вже сприяв розумінню тієї обставини, що ідентифіковані характеристичні перегиби на екстремальних залежностях коефіцієнту тертя

обумовлені процесами розкладання мартенситної складової структури сталі в контактній зоні. Було засвідчено [2], що попередній низькотемпературний (260 °С) відпуск загартованих на мартенсит елементів сталеві пари, який супроводжується термічно активованим розкладом мартенситу та залишкового аустеніту, призводить також й до практично повного згладжування вказаних екстремальних залежностей зношування та коефіцієнту тертя від температури. В роботі [3] на прикладі стандартної загартованої чотирикулькової сталеві пари кінематичної пари досліджено вплив поступового збільшення швидкості обертання рухомої кулі на мікроструктуру тертьових поверхонь. Виявлено ефекти утворення за певних критичних швидкостей обертання специфічних тонких періодичних (подібних до двійникових), а також стовпчастих дендритних поверхневих мікроструктур, пов'язаних з механохімічними перетвореннями мартенситу, виділеннями аустенітно-окисно-карбідних колоній, динамічними процесами зовнішнього окиснення та навулцювання. Деталізація природи та кінетики утворення цих мікроструктур, однак, ще й до сьогодні вимагає подальших досліджень. Це залишається актуальним з погляду на розкриття мікромеханізмів впливу сучасних мастильних матеріалів на тертя та зношування металів.

Мета роботи полягала у точному визначенні початкових умов зародження та дослідженні механохімічних особливостей мікроструктур тертьових поверхонь різного типу.

Об'єкти та методи досліджень. Досліджували тертя, зношування, а також тертьові поверхні стандартної чотирикулькової загартованої кінематичної пари, виготовленої зі сталі мартенситного класу. Застосовано методи поступового збільшення швидкості обертання рухомої кулі [3], реєстрації сигналів акустичної емісії [4], оптичної та сканувальної електронної мікроскопії та мікрондодової Оже-спектроскопії [5].

Результати досліджень. Кінетику екзотермічних процесів тертя та зношування, характер мікроструктурних перетворень тертьових поверхонь у головних рисах проілюстровано на рис. 1 та 2. Виявлено 3 критичні швидкості обертання (n_{ef} , n_1 та n_2), пов'язані з деформаційно-активованим розкладом мартенситу та зношуванням поверхні.

Руйнування початкової мікроструктури поверхневого шару сталі (припрацювання пари) завершується вже наприкінці першого ступеня $n=100$ хв.⁻¹. Після досягнення значення швидкості $n=n_{ef}$ на поверхні зразка (стаціонарних куль) спостерігаємо початкові (перше фото на рис. 1,б) стадії перенесення фрагментів мікроструктури контртіла (рухомої кулі).

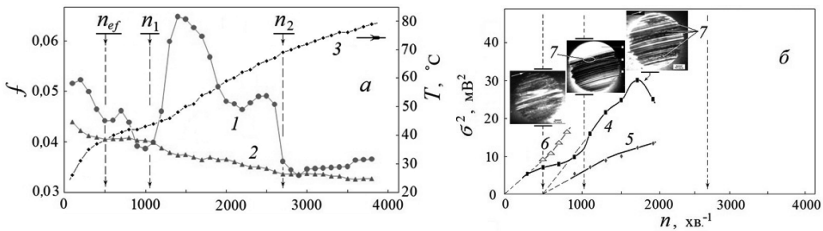


Рис. 1 - Залежності (а) коефіцієнту тертя f (1, 2), температури T фрикційного саморозігрівання (3), (б) квадратичної дисперсії σ^2 амплітуди акустичної емісії (4, 5) від швидкості обертання n рухомої кулі (контртіла) чотирикулькової сталеві пари (осьове навантаження 392 Н). Крива б ілюструє пропорційну до n залежність дисперсії для випадку крихкого покриття з карбідом вольфраму на поверхні дюралюмінію в парі Д11(WC)-сталь (за даними роботи [4] σ^2 взято з коефіцієнтом $5 \cdot 10^{-4}$). Мастильне середовище: 1, 3, 4 – базова олива; 2, 5 – колоїдний розчин гетерогенного наповнювача; 6 – моторна олива. На фотовставках - мікроструктура слідів зношування стаціонарних сталевих куль чотирикулькової пари для критичних величин швидкості обертання (випадок базової оливи): $n=n_{ef}$; $n-n_1$ та в максимумі для $n_1 < n < n_2$. Позначення 7 - вказує на вершини стовпчастих дендритних мікроструктур.

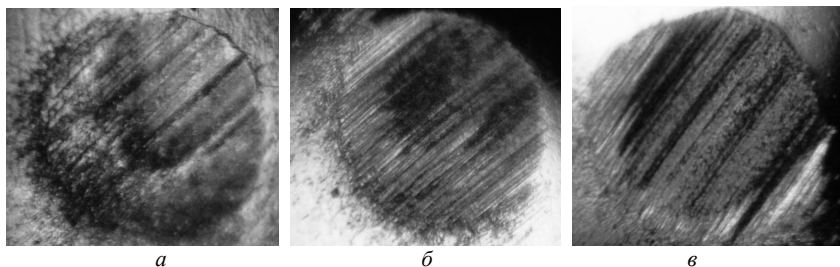


Рис. 2 - Мікроструктура “бархатистої плівки” на тертьових поверхнях стаціонарних сталевих куль чотирикульової пари після зростання швидкості обертання n у діапазоні 100–4000 хв.⁻¹ до максимальної величини в наногетерогенних надлужних мастилах різного типу [6]: PhG-4 (а); AG-4 (б); SG-4 (в)

В діапазоні $n_{ef} < n < n_1$ перенесені мікрофрагменти контртіла спричиняють утворення тонких періодичних (двійникових) поверхневих мікроструктур (світлі мікросмуги на фото рис. 1,б). Перші стовпчасті дендритні мікроструктури проявляються на ступені $n = n_1$ та розвиваються в діапазоні $n_1 < n < n_2$. Вони зникають для $n > n_2$ - розпочинається другий цикл утворення тонких періодичних структур [3].

Ретельний аналіз засвідчив особливу інформативність квадратичної дисперсії амплітуди зареєстрованого сигналу акустичної емісії (рис. 1,б). Визначено, що скритий період зародження стовпчастих дендритних мікроструктур розпочинається одночасно з періодом утворення тонких періодичних на ступені $n = n_{ef}$ (див. екстраполяційні прямі).

Введення в мастильний матеріал гетерогенних наноконпонентів (наповнювачів) змінює масоперенесення та перебіг механохімічного утворення нової мікроструктури, гальмуючи виникнення дендритних мікроструктур стовпчастого типу (рис. 1, криві 2 та 5; рис. 2).

Висновки. Виявлено ключову роль деформаційно-активованих екзотермічних ефектів низькотемпературного розкладу фази мартенситу в конкурентних процесах масоперенесення та окиснення, які обумовлюють механохімічне утворення мікроструктури тертьових поверхонь сталі мартенситного класу в мастильному середовищі.

Kinetic and mechanochemical peculiarities of the microstructural transformations for friction surfaces of a martensitic steel

Mishchuk O.A., Tsapliy M.P.

Abstract. The correlations between dynamic processes in a contact friction zone for the hardened kinematical pair which was produced from a steel of martensitic class, and micro-structural transformations of friction surfaces are investigated. Both tribological characteristics and acoustic emission signals, generated by the friction zone are analyzed at the periodical changes in the rotation rate of a counter-body. The friction surfaces are studied in the stages of their microstructural transformations by the methods of optical and scanning electron microscopy and Auger spectroscopy. The natural nexus between originations of different surface microstructures and its kinetic dependency by the competition between the parallel activated tribochemical processes, such as low-temperature martempering, oxidation, mass transferring of microstructural nanofragments and nanocomponents of lubricating surroundings and, in particular, colloidal heterogeneous fillers are found.

Keywords: martensitic steel, friction kinetics, acoustic emission, surface microstructure, microprobe Auger analysis, lubricating material, colloidal heterogeneous filler.

Кинетические и механохимические особенности микроструктурных превращений поверхностей трения стали мартенситного класса

Мишук О.А., Цаплій М.П.

Аннотация. Исследованы корреляции между динамическими процессами в контактной зоне трения закаленной кинематической пары, изготовленной из стали мартенситного класса, и микроструктурными превращениями поверхностей трения. Проанализированы трибологические характеристики и сигналы акустической эмиссии, генерируемые зоной трения, при периодическом изменении скорости вращения контртела. Поверхности трения на стадиях превращения их микроструктуры исследованы методами оптической и сканирующей электронной микроскопии и Оже-спектроскопии. Обнаружена природная связь между происхождением разных поверхностных микроструктур и ее кинетическая обусловленность конкуренцией между параллельно активируемыми механохимическими процессами: низкотемпературного отпуска закалочного мартенсита, окисления, массопереноса нанофрагментов микроструктуры и нанокомпонентов смазочной среды, в частности, коллоидных гетерогенных наполнителей.

Ключевые слова: сталь мартенситного класса, кинетика трения, акустическая эмиссия, микроструктура поверхности, микрозондовый Оже-анализ, смазочный материал, коллоидный гетерогенный наполнитель.

Список літератури

1. Мішук О.О. Класифікація авіаційних олив за механізмами їх поверхневої активності при терті // Технологічні системи. – 2000. – № 1. – С. 22–26. - [<http://technological-systems.com/index.php/Home>].
2. Мішук О.О., Богайчук А.В. Вплив процесів розкладу структури мартенситу на формування поверхонь пари тертя в мастильному середовищі // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2010. – Вип. 54. – С. 121–133. - [<http://jrn1.nau.edu.ua/index.php/PTZ/article/view/3196/3154>].
3. Мішук О.О., Цаплій М.П. Особливості структури сталевих поверхонь тертя в умовах нерівноважного механохімічного активування // Проблеми тертя та зношування. Наук.–техн. зб. – К.: НАУ.– 2011. – №56. – С. 151–165. - [<http://jrn1.nau.edu.ua/index.php/PTZ/article/view/3349/3302>].
4. Филоненко С.Ф., Космач А.П., Косицкая Т.Н. Обработка сигналов акустической эмиссии при трении поверхностей из композиционных материалов // Технологічні системи. – 2011. – № 2 (55). – С. 29–35. - [<http://technological-systems.com/index.php/Home/article/view/412/420>].
5. Мішук О.О. Методологія Оже-спектрального дослідження тонкоплівкової структури поверхонь тертя // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – Київ: НАУ-друк, 2010. – Вип. 53. – С. 59-70. - [<http://jrn1.nau.edu.ua/index.php/PTZ/article/view/3642/3701>].
6. Mishchuk O.A., Kobylansky E.V., Tsapliy M.P., Ishchuk Yu.L. Peculiarities of lipophilic calcite nanocomposites induced by unstable components / Book of Abstracts for Ukrainian-German Symposium on Physics and Chemistry of Nanostructures and on Nanobiotechnology, Kyiv, Ukraine, September 21-25, 2015. – Kyiv: TOV “TIM-SERVIS”, 2015. – P. 74.

Автори висловлюють щире подяку кандидату технічних наук, доценту Космачу О.П. (Чернігівський національний технологічний університет) за сприяння та поміч у здійсненні акустичних вимірювань.

Матеріали доповіді в цілому, з детальним аналізом та обговоренням результатів дослідження надіслані для опублікування в журнал Mechanics and Advanced Technologies.