

5. Салыга В.И. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Идентификация и оптимизация управления. – Харьков: Вышш. шк., 1976. – 180 с.
6. Шенон Р. Имитационное моделирование систем - искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
7. Gupta N.K., Hall W.E., Trankle T.L. Advanced Methods of Model Structure Determination from Test Data// Proceedings of Atmos. Flight Mech. Conf. – Hollywood, Florida, 1977. – P. 386–400.
8. Hall W.E., Gupta N.K., Tyler J.S. Model Structure Determination and Parameter Identification for Nonlinear Aerodynamic Flight Regimes – AGARD-CP-172. – 1975. – P. 21/1–21/21.
9. Klein V. On the Adequate Model for Aircraft Parameter Estimation – Cranfield Institute of Technology / Cranfield Report NAERO 28. – 1975. – 29 p.
10. Schwanz R. C., Wells W. R. Identification of Aerolastic Parameter Using a Recursive Sequential Least Squares Method// AIAA Atmos. Flight Mech. Conf. – Danvers, Mass, New York. – 1980. – P. 651–661.
11. Эйхофф П. Основы идентификации систем управления. – М.: Мир, 1975. – 682 с.
12. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 534 с.

Стаття надійшла до редакції 16.10.02.

K413.166

УДК 621.891

трение жидкостное
поверхность контактная металла
материал смазочный
слой поверхностный металла

Р.Г. Мнацканов, д-р техн. наук, проф.
(Національний авіаційний університет)

В.О. Довбуш, асп.
(Національний авіаційний університет)

О.Є. Якобчук, асп.
(Національний авіаційний університет)

ЗМІНА СТРУКТУРИ І СКЛАДУ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ

Розглянуто результати досліджень особливостей структурного стану тонких поверхневих шарів металу при динамічному навантаженні під час граничного змащення з застосуванням звичайних і хімічно модифікованих мастильних матеріалів. Наведено умови формування оптимального структурного складу, що визначає підвищення зносостійкості і вплив мастильного середовища на досліджуваний процес.

Вступ. Механізм взаємодії контактних поверхонь у мастильному середовищі під час граничного змащення визначається комплексом механо-фізико-хімічних процесів, що протікають на них і залежать від складу й властивостей мастильного середовища. У разі тертя сталі за наявності вуглеводнів у зоні тертя утворюються смолоутворюючі відкладення й окисли заліза, що вказує на протікання у процесі тертя хімічних реакцій, в яких беруть участь вуглеводні, кисень, присадки і метал [1].

Мастильна дія з фізичного погляду виявляється в утворенні граничних шарів на контактних поверхнях. При помірних навантажувально-швидкісних режимах властивості граничних шарів багато в чому визначає мастильна дія масла. У механізмі контактної взаємодії роль граничних шарів має неоднозначний характер, що пов'язано з впливом поверхнево-активних речовин (ПАР), що визначають рівень поверхневої енергії в місцях фактичного контакту металів. Граничні мастильні шари, що формуються на контактних поверхнях, значною мірою змінюють властивості поверхневих шарів металу.

Мастильна дія масел із позиції хімії контакту виявляється в утворенні на поверхнях тертя і під поверхневих шарах нових хімічних сполук у вигляді твердих плівок. Особливості хімічних реакцій, кінетика утворення плівки і її руйнування ще знаходяться в стадії вивчення. Очевидно, що у визначенні характеристик присадок, крім властивостей мастильного матеріалу, необхідно враховувати властивості тонкого поверхневого шару [2].

Основний розділ. Для виявлення особливостей структурного стану тонких поверхневих шарів металу, зумовленого дією різних типів мастильних матеріалів, досліджували зразки зі

сталі Ст-45 під час динамічного навантаження в умовах граничного змащення з застосуванням звичайних і хімічно модифікованих мастильних матеріалів. Метою цієї серії експериментів було виявлення умов формування оптимального структурного стану, що визначає підвищення зносостійкості і вплив мастильного середовища на цей процес, а також установлення особливостей взаємодії мастильного середовища з поверхнею металу. Для дослідження складу поверхневих шарів, утворених трибохімічними реакціями, використовували методи растрової електронної мікроскопії (мікроскоп-мікроаналізатор "Camscan-4DV"), рентгеноспектрального мікроаналізу, Оже-спектроскопії і енергодисперсійного аналізу.

Контактні поверхні досліджували в умовах змащування хімічно нелегованим маслом И-20А. Аналіз поверхневого шару металу, що не бере участь у терті, показав наявність елементів, що входять до складу сталі Ст-45, досить тонкий оксидний шар товщиною близько 0,01 мкм, Fe і O₂.

На рис. 1, а наведено Оже-спектр досліджуваної поверхні. Структури поверхонь знімалися в п'яти різних ділянках зразків. Область дослідження складала 20–30 мкм. Попередньо поверхню 3 хв піддавали обробці іонізованим Ar.

Під час дослідження поверхні, що змащується маслом И-20А з присадкою ВНИИ НП-354 (диоктилфенілдитиофосфат цинку) у кількості 5%, була зафіксована наявність на поверхні, крім виявлених елементів, додатково P, S, і Zn (рис. 1, б). Під дією фрикційного нагрівання і силового поля контактної поверхні атоми, що звільнилися, S і P вступають у реакцію з металом, у результаті чого утворюються сульфід і фосфід заліза, плівки яких забезпечують активну протизадирну дію.

Додатковий аналіз складу контактних поверхонь за глибиною показав такі результати (рис. 2).

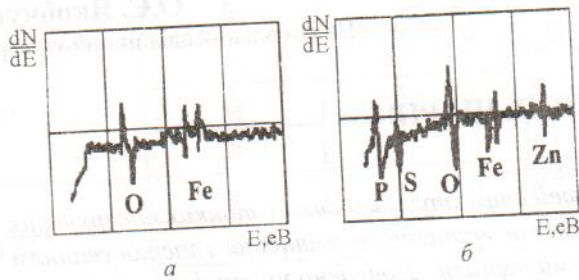


Рис. 1. Оже-спектр поверхні тертя:
а – масло МК-8; б – масло И-20А
з ВНИИ НП-354

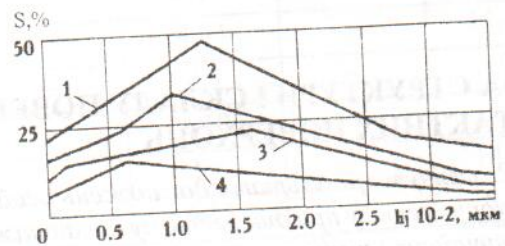


Рис. 2. Зміна вмісту легуючих елементів за глибиною поверхневого шару для масла И-20А з ВНИИ НП-354:
1 – кисень; 2 – цинк; 3 – сірка; 4 – фосфор

Розподіл S за глибиною має тенденцію збільшення до $1,47 \cdot 10^{-2}$ мкм, що пов'язано з утворенням сульфиду заліза. Характер розподілу P, Zn і O₂ за глибиною ідентичний. Розходження складається тільки в розташуванні піків концентрації елементів за глибиною. Особливо важливу роль під час формування структури поверхневого шару відіграє O₂. Зафіксоване підвищення концентрації O₂ впливає на зносостійкість. Неорганічні плівки на контактних поверхнях, утворені в результаті трибомеханічних реакцій, більш стійкі, ніж будь-які фізично чи хімічно адсорбовані плівки. Товщина модифікованого поверхневого шару складає $3,0 \cdot 10^{-2}$ – $4,5 \cdot 10^{-2}$ мкм залежно від типу підкладки, мастильного матеріалу і режиму навантаження. Сам шар є неоднорідним за глибиною і розташовується на доріжці тертя окремими острівцями. Це добре видно на фотографії ділянки доріжки тертя, отриманої на мікроскопі-мікроаналізаторі "Camscan-4DV" (рис. 3).

Рентгенівський спектр середнього хімічного складу частинок зносу отримано після відповідної фільтрації масла И-20А з присадкою ВНИИ НП-354 до кінця напрацювання $N_n=1117$ (рис. 4). Хімічний склад поверхневого шару контактних поверхонь, отриманий методом Оже-спектроскопії, і хімічний склад частинок зносу ідентичні. Дослідження поверхневих шарів тертя в умовах змащування легованими маслами свідчить про те, що відбувається хімічна взаємодія компонентів мастильної структури з поверхнею металу. Встановлений зв'язок між хімічним складом частинок зносу і поверхневого шару показує, що механізм адгезійного зношування в

умовах динамічного навантаження здійснюється в умовах граничного режиму змащення через модифікований поверхневий шар, що складається з плівок різних хімічних сполук S, P, Zn (сульфіди, фосфіди і т. д.).

З метою вивчення процесів дифузії хімічно активних елементів мастила в поверхневі шари проведено серію досліджень із різними мастильними матеріалами, в яких ініціювався розвиток катастрофічних видів зношування. Після відповідної приробки створювався режим масляного голодування, що приводив до розвитку заїдання трибомеханічної системи. Типову картину контактної поверхні зі слідами схоплювання показано на рис. 5.

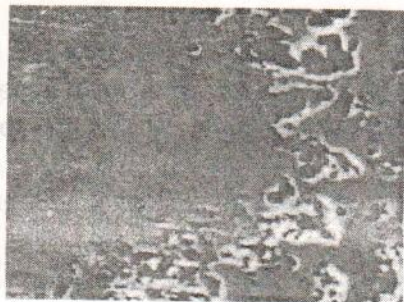


Рис. 3. Ділянка доріжки тертя (масло И-20А з ВНИИНП-354)

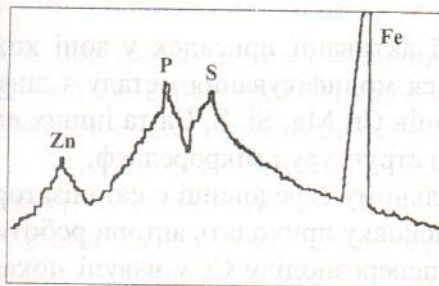


Рис. 4. Рентгенівський спектр середнього хімічного складу частинок зносу (масло И-20А з ВНИИНП-354)

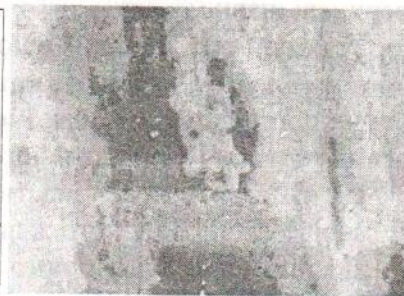


Рис. 5. Контактна поверхня зі слідами схоплювання (ВНИИНП-207)

На фотографії, отриманій методом растрової електронної мікроскопії, добре видно осередок схоплювання. Об'єктом аналізу розподілення хімічних елементів, виконаного на мікроскопі-мікроаналізаторі "Camscan-4DV", були три зони доріжки тертя: центр доріжки тертя, край доріжки тертя і середня частина осередку схоплювання. На рис. 6 наведено результати цього аналізу для пластичного мастила ВНИИНП-207.

Характер розподілу хімічних елементів у центрі і на краю доріжки тертя такий же, як і на поверхні, що не бере участь у терті (вихідна поверхня). Відмінності стосуються чотирьох елементів – Si, S, Cr, Ca. Процентний вміст Si знизився з 2,722 на вихідній поверхні до 2,238 % на краю доріжки і до 1,759 % у центрі. Кількість S і Cr також зросла. У зоні осередку схоплювання спостерігаються зростання Si з 2,722 (вихідна поверхня) до 3,629 %, S – з 0,77 до 1,178 %, різке зростання хрому з 0,191 до 3,557 % і дуже різке зростання Ca з 0,62 до 12,465 %. Характер розподілу хімічних елементів у зоні осередку схоплювання різко відрізняється від вихідної поверхні і підтверджує висновок про неоднорідність розподілу хімічних сполук на контактній поверхні. У центрі доріжки тертя і на краю кількість Si зменшується, а в центрі осередку схоплювання зростає. Якщо в мастилі ВНИИНП-207 міститься Si (кремнієорганічна рідина), то можна припустити, що дифузія Si відбувається як з мастильного середовища, так і із самого металу.

Кількість S також зростає в осередку схоплювання. Розподіл S поперек доріжки тертя показує, що S концентрується, переважно, в зонах пластичної деформації, де інтенсивно протікають процеси текстурірування й аморфізації, тобто в зонах із підвищеною енергією активації.

Якщо для S характерне збільшення концентрації в напрямку від краю доріжки тертя до центра, то для Si характерна зворотна тенденція. Основним постачальником S на поверхневі шари металу є мастильне середовище, що містить багатofункціональну присадку, тобто дифузійні процеси протікають у напрямку мастило – поверхня.

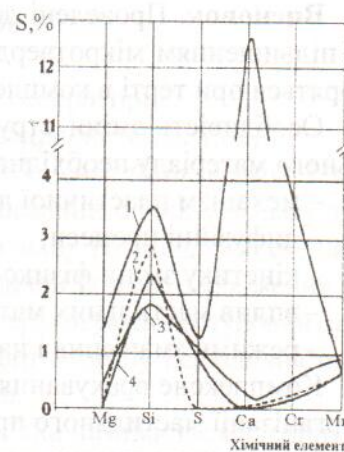


Рис. 6. Розподіл хімічних елементів по доріжці тертя (поперечний напрямок для мастила ВНИИНП-207)

1 – каверна; 2 – вихідна поверхня; 3 – центр доріжки тертя; 4 – край доріжки тертя

Збільшення концентрації Cr у центрі доріжки тертя також вказує на те, що Cr, як і S, концентруються в зонах із підвищеним рівнем пластичного деформування. Однак на відміну від S дифундування Cr у поверхневі шари відбувається не з мастильного середовища, а з найближчих до поверхневого шару шарів металу, оскільки в мастильному матеріалі Cr відсутній (ДСТ 19774-74).

В осередку схоплення було зафіксовано значне збільшення концентрації Cr, вміст якого зріс у 18 разів щодо вихідної поверхні. Ще більш значно зріс вміст Ca, що пов'язано, очевидно, з дифундуванням молекул Ca, які складають основу дисперсної фази мастильного матеріалу в поверхневі шари металу.

У результаті трибохімічної активації присадок у зоні контакту, процесів хемосорбції і триботермодеструкції відбувається модифікування металу з дифундуванням у його поверхневі шари як органічної фази, так і іонів Cr, Mg, Si, S, Ca та інших елементів, що легують шари поверхонь тертя, які змінюють його структуру і мікрорельєф.

На нашу думку, Cr у мастильному середовищі є каталізатором утворення захисних плівок (полімерів тертя). До такого ж висновку приходять автори роботи [3].

Дослідження дифузійного перерозподілу Cr у чавуні показали, що зменшення вмісту Cr від 9,3 до 7 % викликає збільшення зносу в п'ять разів [4].

Кращі антифрикційні і протиспрацьовувальні властивості демонструють ПАР, що складаються з активних кисне-, фосфор-, сірко-, хромовмісних груп і довгих вуглеводневих радикалів. Перевагою таких присадок є ефект утворення полімолекулярних адсорбційних шарів із сильною адгезійною взаємодією.

Висновок. Проведені дослідження дозволяють висловити припущення про взаємозв'язок між підвищенням мікротвердості поверхневого шару металу і наявністю хімічних сполук, що утворюються при терті в комплексі метал-мастильне середовище.

Особливість зміни структури тонкого поверхневого шару показує, що при підборі мастильного матеріалу необхідно враховувати такі найважливіші фактори:

- механізм пластичної деформації;
- дифузійні процеси;
- кінетику зміни фізико-хімічних властивостей;
- вплив мастильних матеріалів різного класу на дифузійні і фізико-хімічні процеси;
- режими змащення і навантаження трибомеханічної системи.

Комплексне врахування цих факторів є необхідною умовою у вирішенні питання керування організації мастильного процесу і мінімізації зносу в конкретних експлуатаційних умовах.

Установлена висока чутливість інтегральної характеристики процесу тертя і зношування – питомої роботи тертя – до складу, властивостей мастильних середовищ і аномальних змін у тонкому поверхневому шарі, що визначають темп зношування і, в остаточному підсумку, ресурс сполучених поверхонь (у конкретних експлуатаційних умовах), є основою для розробки системи критеріальних оцінок якості організації мастильного процесу.

Список літератури

1. Файн Р.С., Кройц К.Л. Химизм граничного трения стали в присутствии углеводородов // Новое о смазочных материалах. – М.: Химия, 1967. – 239 с.
2. Rounds F.G. Influence of steel composition on additive performance // ASLE Trans. – 1972. – 15, 54. – P. 25–26, 72–73.
3. Аксенов А.Ф., Бородин А.Е., Литвинов А.А. Влияние химического состава авиационных топлив на осевидный износ топливных агрегатов // Повышение износостойкости и срока службы машин. – К.: НТО Машпром, 1970. – Вып. II. – С. 33–38.
4. Марковский Е.А., Кириевский Б.А. Изменение химического состава поверхностных слоев, деформированных трением // Проблемы трения и изнашивания. – К.: Техника, 1974. – № 6. – С. 111–120.

Стаття надійшла до редакції 15.11.02.