

УДК 621.891

О.О. МІКОСЯНЧИК

Національний авіаційний університет, Україна

**КІНЕТИКА ЗМІНИ МІКРОТВЕРДОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ
МЕТАЛУ ПРИ АДАПТАЦІЇ ГРАНИЧНИХ АДСОРБЦІЙНИХ
ШАРІВ МАСТИЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ В ЗОНІ КОНТАКТУ**

Досліджено інтенсивність зміни мікротвердості поверхневих шарів сталі 45 залежно від початкової шорсткості поверхонь, контактної навантаження та кінетики формування на активованій тертям поверхні екрануючих протизношувальних граничних адсорбційних шарів при змащуванні елементів трибоспряження трансмісійною оливою ТАД-17і та її композицією з нанодисперсною добавкою фулерен C_{60} .

Ключові слова: мікротвердість, граничні адсорбційні шари, інтенсивність зношування, мастильний матеріал.

Вступ. Тертя та зношування можна розглядати як поверхневі явища, які протікають в достатньо тонких шарах контактуючих матеріалів. Тому для підвищення зносостійкості і зниження тертя часто модифікують поверхневі шари деталей трибосистем. В сучасній трибології термін інженерія поверхні визначає галузь технологій впливу на поверхню, таких як нанесення покриттів, поверхнева обробка і модифікація поверхневих шарів металу компонентами мастильного матеріалу [1; 2].

Вирішальну роль в процесі захисту і відновлення поверхонь пар тертя відіграють, зокрема, аморфні утворення молекул вуглецю C_{60} (фулерени), здатні до плавлення і кристалізації при виникненні гідродинамічного тиску [3; 4]. Після кристалізації на поверхневих шарах елементів трибоспрями створюється тонкоплівкова субстанція, яка характеризується підвищеною мікротвердістю (до 70 %) і зниженням коефіцієнту тертя на 1–2 порядки, де і локалізуються всі триботехнічні зміни контактних поверхонь при експлуатації [5; 6].

Мета роботи. Метою проведених досліджень було встановлення впливу граничних шарів мастильного матеріалу на кінетику зміни мікротвердості поверхневих шарів металу та їх зносостійкість при роботі контактних поверхонь в нестационарному режимі.

Матеріали і методи досліджень. Дослідження триботехнічних параметрів пар тертя проводилось на установці СМЦ-2. Товщина мастильного шару аналізувалась методом вимірювання падіння напруги у режимі нормального тліючого розряду [7]. Нестационарний режим відповідав наступним умовам: цикли пуск (4,5 с) – зупинка (3 с) слідували один за іншим; максимальна обертова швидкість в період пуску в сталому режимі складала 1,04 м/с (проковзування – 15 %). Максимальні контактні напруги по Герцу складала 250, 400, 550 і 650 МПа.

В якості зразків використовувалися ролики зі сталі 45 (HRC 38–40). Залежно від механічної обробки отримана первинна шорсткість контактних поверхонь складала:

- при абразивному доведенні поверхонь $R_a = 0,1$ мкм;
- при круглому шліфуванні $R_a = 0,33$ мкм і $R_a = 0,7$ мкм;
- при фрезеруванні $R_a = 1,0$ мкм.

В якості мастильного матеріалу використовувалась всесезонна трансмісійна олива ТАД-17і (SAE 80w/90, виробник – ЗТМ «Аріан») та її композиція з нанодисперсною добавкою фулерена C_{60} в концентрації 0,1 %.

Результати досліджень та їх обговорення. При змащуванні вузла тертя товарною трансмісійною оливою ТАД-17і для контактних поверхонь з первинною шорсткістю R_a 0,1 і 0,33 мкм при σ_{\max} 250 – 550 МПа встановлено розміщення поверхневого шару металу випереджаючої і відстаючої поверхонь в процесі припрацювання (рис. 1). Для поверхонь з початковою шорсткістю R_a 0,7 і 1,0 мкм, незалежно від навантаження, і для пар тертя з R_a 0,1 і 0,33 мкм при σ_{\max} 650 МПа зафіксовано зміцнення поверхневого шару при $N \geq 200$ циклів.

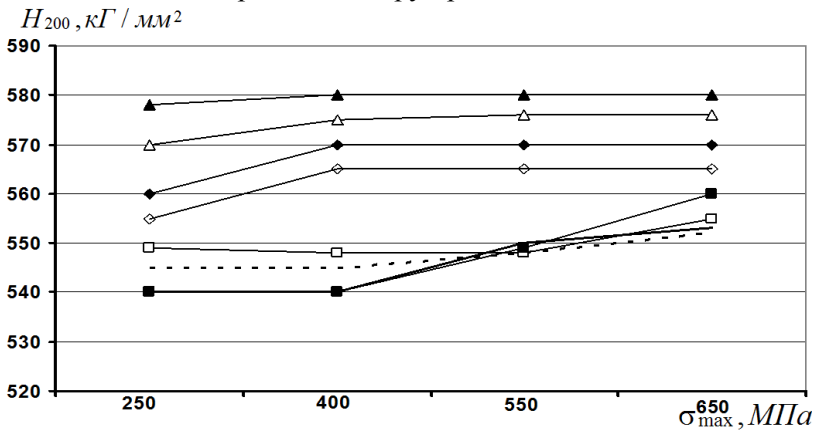


Рис. 1. Зміна мікротвердості поверхневого шару металу в залежності від початкової шорсткості контактних поверхонь (змашування оливою ТАД-17і): випереджаюча - - - R_a 0,1; -□- R_a 0,33; -△- R_a 0,7; -◇- R_a 1,0; відстаюча — — R_a 0,1; -■- R_a 0,33; -▲- R_a 0,7; -◆- R_a 1,0

Визначено, що ступінь розміщення – зміцнення контактних поверхонь залежить від кінетики формування граничних адсорбційних шарів на активованій поверхні металу і від ступеня деформаційних змін в поверхневих шарах металу при терті. Розглянемо цю залежність для відстаючої поверхні. Так, на контактних поверхнях з початковою R_a 0,1 і 0,33 мкм при σ_{\max} 250 МПа утворюються граничні адсорбційні шари фізичної природи, що характеризуються слабкими екрануючими властивостями, а домінуюча пружна складова деформаційних змін не забезпечує утворення зміцненого поверхневого шару металу при напрацюванні. При σ_{\max} 400 МПа на 25 % площі контактуючих поверхонь утворюються міцніші граничні шари – самогенеруючі органічні плівки (СОП), проте деформаційні зміни в поверхневих шарах металу при даному навантаженні незначні, інтенсивність зношування зростає для R_a 0,1 і 0,33 мкм відповідно на 20 % і 38 %, в порівнянні з аналогічними показниками при σ_{\max} 250 МПа, що призводить також до розміщення поверхневих шарів металу і зниження зносостійкості пар тертя. При σ_{\max} 550 МПа на 50 – 60 % утворюються СОП на активованій тертям поверхні металу, збільшується ступінь пластичної деформаційної компоненти, інтенсивність зношування зростає лише на 5 % і 14 % для пар тертя з початковим R_a 0,1 і 0,33 мкм відповідно, при цьому мікротвердість поверхневих шарів до закінчення періоду припрацювання не змінюється, в порівнянні з початковою мікротвердістю, що підвищує зносостійкість контактних поверхонь.

Слід зазначити, що зменшення поверхневих шарів випереджаючої поверхні для даних пар тертя при σ_{\max} 250 – 550 МПа менше на 2 – 9 кГ/мм², в порівнянні з відстаючою поверхнею, і саме цей чинник сприяє підвищенню зносостійкості випереджаючої поверхні.

При σ_{\max} 650 МПа домінує пластична деформаційна компонента, яка забезпечує підвищення активації поверхневих шарів металу, при цьому СОП утворюються на 70 – 80 % площі контакту. Синергізм цих чинників забезпечує зміцнення поверхневих шарів металу. Слід зазначити, що для R_a 0,1 і 0,33 мкм ступінь зміцнення склав ΔH_{200} 3 кГ/мм² і 10 кГ/мм² відповідно (рис. 2). Перш за все, це обумовлено кінетикою утворення граничних адсорбційних шарів в процесі припрацювання і режимом змащувальної дії в контакті.

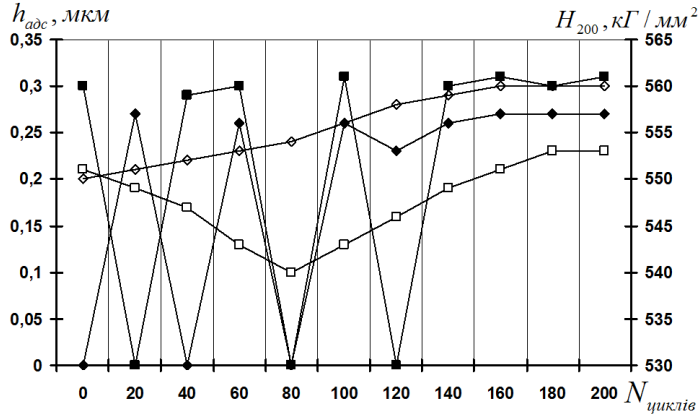


Рис. 2. Вплив граничних адсорбційних шарів на мікротвердість випереджаючої поверхні (змашування оливою ТАД-17і) —■— R_a 0,1; —◆— R_a 0,33; —□— R_a 0,1; —◇— R_a 0,33

Поверхні з початковою шорсткістю 0,1 мкм спочатку працюють в еластогідродинамічному режимі змащувальної дії ($\lambda \geq 3,18$), активація поверхневого шару металу відбувається лише в період початку руху при розриві «адгезійних містків». У початковий період припрацювання встановлено розміщення поверхневого шару металу і збільшення інтенсивності зношування на 8 % в порівнянні з аналогічним параметром при 550 МПа. По мірі встановлення оптимальної шорсткості до закінчення періоду припрацювання ($R_a = 0,23$ мкм) режим змащувальної дії змінюється на змішаний, поверхневі шари металу зміцнюються, причому до цього часу на них утворюється стабільна екрануюча плівка змащувального матеріалу. Поверхні з початковою $R_a = 0,33$ мкм спочатку працюють при граничному режимі змащувальної дії, де максимально виявляються ефективні протизношувальні властивості присадки, що міститься в трансмісійній оливі. Тому прискорюється на 50 % утворення граничних адсорбційних шарів на активованій поверхні металу, поверхневий шар поступово зміцнюється, що забезпечує підвищення зносостійкості на 4 %, в порівнянні зі зносостійкістю контактних поверхонь при σ_{\max} 550 МПа.

На випереджаючій поверхні для пар тертя з початковою $R_a = 0,1$ і 0,33 мкм також встановлено збільшення мікротвердості поверхневих шарів при σ_{\max} 650 МПа, в середньому, на 3 – 5 % менше у порівнянні з відстаючою поверхнею.

Ступінь зміцнення поверхневих шарів металу пар тертя з початковою шорсткістю $R_a = 0,7$ і 1,0 мкм більшою мірою залежить від кінетики утворення граничних адсорбційних шарів. Для контактних поверхонь з початковою шорсткістю $R_a = 0,7$ мкм, незалежно від навантаження, мікротвердість поверхневого шару металу до закінчення періоду припрацювання підвищується на 25 кГ/мм². Слід зазначити, що мікротвердість відстаючої поверхні, незалежно від навантаження, досягає максимального значення 580 кГ/мм² і залишається незмінною при подальшому напрацюванні $N \geq 200$ циклів.

У проведених дослідженнях динаміки утворення граничних адсорбційних шарів і формуванні топографії поверхонь тертя встановлено, що на контактних поверхнях з первинною шорсткістю $R_a = 0,7$ мкм створюються оптимальні умови утворення граничних адсорбційних шарів на активованій тертям поверхні металу. Вже при σ_{\max} 250 МПа СОП формуються на всій площі зони контакту, що забезпечує зниження інтенсивності зношування при напрацюванні, в середньому, на 45 %. Слід зазначити, що підвищення тиску не впливає на зміну мікротвердості поверхневих шарів металу і їх ступінь зміцнення, оскільки сформовані граничні адсорбційні шари зменшують вплив пластичної деформаційної компоненти на мікроструктурні перетворення в тонких поверхневих шарах металу. Ця залежність простежується для контактних поверхонь з первинною шорсткістю $R_a = 1,0$ мкм. При σ_{\max} 250 МПа СОП формуються лише на 5% площі зони контакту, ступінь зміцнення при цьому складає 5 – 8 кГ/мм². Мікротвердість поверхневих шарів металу до закінчення процесу припрацювання нижча, ніж для контактних поверхонь з початковою $R_a = 0,7$ мкм, оскільки інтенсивність зношування підвищується в 2 рази, що обумовлює постійне стирання зміцненого шару і залучення до зони пластичних деформацій розміщених шарів об'ємного матеріалу, який розташований нижче. З підвищенням контактної напруги до 400 – 650 МПа товщина граничних адсорбційних шарів збільшується на 60 – 70%, мікротвердість відстаючої поверхні досягає 570 кГ/мм², а випереджаючої – 565 кГ/мм², незалежно від навантаження. Проявляється аналогічний ефект СОП, встановлений для контактних поверхонь з початковою $R_a = 0,7$ мкм, – утворення граничних адсорбційних шарів зменшує вплив пластичної деформаційної компоненти на ступінь зміцнення поверхневих шарів металу.

При додаванні в трансмісійну оливу ТАД-17і нанодисперсної добавки фулерену C_{60} встановлено підвищення мікротвердості поверхневого шару металу як на випереджаючій, так і на відстаючій поверхні в діапазоні досліджуваного навантаження, незалежно від початкової шорсткості пар тертя (рис. 3).

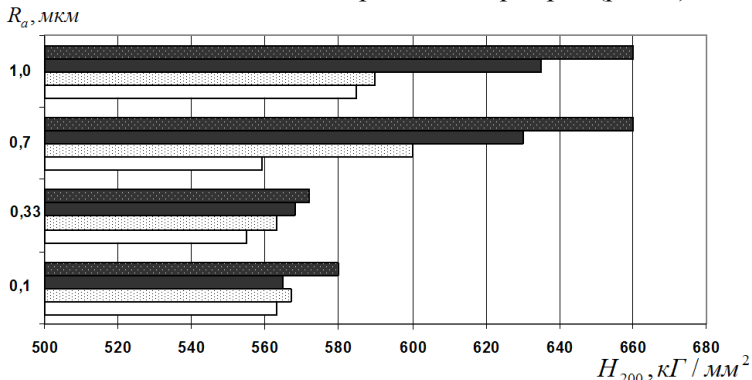


Рис. 3. Вплив нанодисперсної добавки фулерену C_{60} на динаміку зміни мікротвердості поверхневого шару металу (для випереджаючої поверхні) в залежності від початкової шорсткості та контактного навантаження: □ – 250 МПа, ТАД-17і; ■ – 650 МПа, ТАД-17і; ▨ – 250 МПа, ТАД-17і + C_{60} ; ▩ – 650 МПа, ТАД-17і + C_{60}

Встановлено високий кореляційний зв'язок між такими параметрами як мікротвердість поверхневого шару металу, контактна напруга і товщина граничних адсорбційних шарів. Для контактних поверхонь з початковою шорсткістю $R_a = 0,1$ і $0,33$ мкм при σ_{\max} 250 МПа збільшення мікротвердості обумовлене, перш за все, прискореною адаптацією граничних змашувальних шарів до динамічних умов навантаження – їх товщина підвищується, в середньому, на 10 – 15 %,

в порівнянні з використанням в якості змащувального матеріалу оливи ТАД-17і без добавки. Цей чинник забезпечує зменшення інтенсивності зношування в початковий період припрацювання на 32 – 37 %, унаслідок чого зменшується ступінь стирання поверхневих шарів металу. В результаті цього деформаційні зміни металу локалізуються в тонкому приповерхневому шарі, а екрануючі властивості граничних адсорбційних шарів запобігають розповсюдженню цих змін в глибину металу, що забезпечує зміцнення поверхневого шару. Домінуючий вплив граничної адсорбційної плівки на підвищення мікротвердості поверхневого шару металу підтверджується кінетикою зміни цих параметрів при припрацюванні (рис. 4).

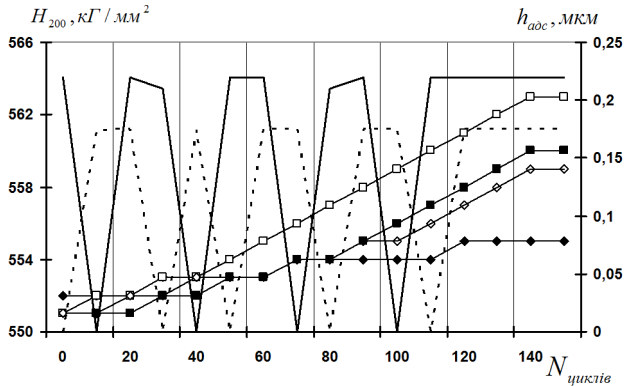


Рис. 4. Кінетика зміни граничної адсорбційної плівки та мікротвердості поверхневих шарів металу при припрацюванні (змащування композицією ТАД-17і з додаванням фулерену C_{60}) для випереджаючої поверхні: \blacksquare – $R_a 0,1$; \blacklozenge – $R_a 0,33$; — – $R_a 0,1$; відстаючої поверхні: \square – $R_a 0,1$; \diamond – $R_a 0,33$; \cdots – $R_a 0,33$

Товщина граничних адсорбційних шарів, сформованих до закінчення періоду припрацювання на контактних поверхнях з початковою шорсткістю $R_a = 0,1$ мкм на 21 % перевищує аналогічний параметр для поверхонь з первинною $R_a = 0,33$ мкм, а мікротвердість випереджаючої і відстаючої поверхонь для пар тертя з $R_a = 0,1$ мкм на 5 кГ/мм^2 перевищує мікротвердість поверхневих шарів металу з початковою $R_a = 0,33$ мкм.

Для контактних поверхонь з первинною шорсткістю 0,7 і 1,0 мкм при σ_{max} 250 МПа підвищення мікротвердості до закінчення періоду припрацювання встановлено відповідно на 49 і 36 кГ/мм^2 . Проте зміцнення поверхневих шарів металу обумовлене різними механізмами. Якщо для поверхонь з початковою $R_a = 0,7$ мкм домінуючий вплив на збільшення мікротвердості створює кінетика формування граничних адсорбційних шарів (товщина сформованих граничних плівок у порівнянні з досліджуваними парами тертя з різною шорсткістю поверхні найбільша, що перешкоджає розповсюдженню пластичних деформаційних змін в приповерхневих шарах металу по глибині), то для поверхонь з початковою шорсткістю 1,0 мкм зміцнення обумовлене тільки деформаційними змінами в поверхневих шарах металу в результаті багатократних пластичних змін при циклічному навантаженні.

При подальшому збільшенні навантаження від 400 до 650 МПа зміцнення поверхневого шару металу обумовлене полімеризаційними властивостями компонентів змащувального матеріалу. Молекули фулерену C_{60} структурують граничні адсорбційні шари, підвищуючи їх протизношувальні властивості. Зниження інтенсивності зношування контактних поверхонь забезпечує формування стабі-

льної зміцненої субмікроструктури в поверхневих шарах металу за рахунок зменшення ступеня їх стирання і постійного оновлення.

Висновки. Встановлено кореляційний зв'язок між ступенем розміщення-зміцнення контактних поверхонь, кінетикою формування граничних адсорбційних шарів на активованій тертям поверхні металу та інтенсивністю деформаційних змін в поверхневих шарах металу при терті. Зокрема, для контактних поверхонь з початковою шорсткістю $R_a = 0,7$ мкм при змащуванні композицією товарної оливи ТАД-17і з добавкою фулерену C_{60} створюються оптимальні умови для утворення граничних адсорбційних шарів і, незалежно від контактної навантаження, СОП формуються на всій площі зони контакту, що забезпечує зниження інтенсивності зношування на 45% при напрацюванні, при цьому підвищення тиску не впливає на зміну мікротвердості поверхневих шарів металу і їх ступінь зміцнення, оскільки сформовані граничні адсорбційні шари зменшують вплив пластичної деформаційної компоненти – мікротвердість контактних поверхонь до закінчення періоду припрацювання підвищується на 49 кГ/мм^2 .

Список літератури

1. Белый А.В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А.В.Белый, Г.Д.Карпенко, Н.К.Мышкин. – М.: Машиностроение, 1991. – 280с.
2. Hutchings I.M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials / I.M. Hutchings // London-Melbourne-Auckland: Edward Arnold. – 1992.
3. Parker D.H. Fullerenes and giant fullerenes synthesis, separation and mass-spectrometric characterization / D.H.Parker, K. Chatterjee, P.Wurr, K. P. Lukke // Carbon. – 1992. – 30, №8. – P.1167–1182.
4. Трефилов В.И. Фуллерены – Основа материалов будущего / В.И.Трефилов, Д.В.Щур, Б.П.Тарасов, Ю.М. Шульга и др. – К: ИПМНАУ и ИПХФ РАН, 2001. – 148с.
5. Соболев В.В. Электронная структура фуллерита C_{60} / В.В. Соболев, Е.Л. Бысыгин // Физика твердого тела. – 1996. – т. 41, № 6. – С. 365–375.
6. Skorokhod V.V. Features of Nanocrystalline Structure Formation on Sintering of Ultrafine Powders / V.V. Skorokhod, A.V. Ragulya – Nanostructured Materials: Science and Technology, NATO-ASI series, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1998. – P. 387–404.
7. Райко М.В. Исследование смазочного действия нефтяных масел в условиях работы зубчатых передач: дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук: 05.02.04 / М.В. Райко – К.: КИИГА, 1974. – 369 с.

Стаття надійшла до редакції 07.10.2013

О. О. MIKOSYANCHIK

KINETIC CHANGE OF MICROHARDNESS SURFACE LAYERS OF METAL AT ADAPTATION OF BOUNDARY ADSORPTION LAYERS OF LUBRICANT IN CONTACT ZONE

There was investigated the intensity of microhardness change of the surface layers of steel 45 depending on the surface initial roughness, contact loading and kinetic formation of screening anti-wear boundary absorption layers on the activated friction surface. It was determined that for contact surfaces with the initial roughness $R_a 0,7$ mcm at lubricating of oil commodity composition TAD-17i and with addition of fullerenes C_{60} optimal conditions for formation of boundary absorption layers create and, independently on contact loading, self-generated organic films format on the whole area of contact zone, which provide increasing of microhardness contact surfaces and decreasing their wear intensity on 45% at operating time.

Keywords: microhardness, boundary adsorption layers, intensity of wear, lubricant.

Мікосянчик Оксана Олександрівна – канд. техн. наук, доцент кафедри безпеки життєдіяльності Національного авіаційного університету.