

УДК 621.891:621.316

В.М. Стадниченко, канд. техн. наук

ВИЗНАЧЕННЯ РАДІАЛЬНОЇ УСАДКИ МЕТАЛОКЕРАМІЧНОГО ШАРУ ТА ОЦІНКА ЙОГО СТІЙКОСТІ НА ПОВЕРХНЯХ ТЕРТЯ В ПРОЦЕСІ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

НАУ, кафедра інформаційних технологій
E-mail: stadnichenko_nau@mail.ru

Наведено результати досліджень радіальної усадки металокерамічного шару, що утворюється на поверхнях контакту внаслідок використання трибовідновлювальних сумішей. Показано, що в результаті процесів сегрегації та сепарації на поверхні металокерамічного шару, його окремих структурних ансамблів і модуля зсуву по лінії контакту утворюються умови синхронності зсувних процесів у всьому мікрооб'ємі.

In the work, the results of researches of the radial shrinkage of metallic-ceramic layer, which is formed on the contact surfaces as a result of applying the triboretrofitting mixes in lubrication are presented. It is shown that as a result of processes of segregation and separation of its separate structural ensembles and modulus of shift on the surface of MC layer and along the line of contact the conditions of the synchronization of shift processes in entire microvolume are formed.

Постановка проблеми

Упродовж останніх декількох років автомобільний парк України стрімко розвивається як кількісно, так і якісно.

З'являється більше нових сучасних транспортних засобів, які спроектовані так, щоб виконувати жорсткі вимоги екологічних стандартів та забезпечувати:

- низькі матеріальні й енергетичні витрати;
- великий ресурс роботи;
- високу надійність при мінімальних витратах на технічне обслуговування.

Щоб реалізувати всі техніко-економічні вигоди, закладені виробниками автомобільної техніки, необхідно застосовувати високоякісні витратні матеріали, і зокрема, автомобільні масла.

Один із сучасних способів значного поліпшення експлуатаційних властивостей мастил – використання трибовідновлювальних сумішей, які забезпечують:

- зниження енергоспоживання;
- захист від зносу, корозії і утворення відкладень, які порушують нормальну роботу деталей і механізмів автомобіля.

Проте недостатнє дослідження особливостей поведінки металокерамічного шару (його усадки), що утворюється на поверхнях контакту при додаванні в мастило трибовідновлювальних сумішей, значно знижує ефективність використання цієї технології.

У цій роботі одержано математичні вирази для оцінки стійкості металокерамічного шару на поверхні тертя в процесі експлуатації фрикційних вузлів.

Результати досліджень

Радіальну усадку металокерамічного шару під дією нормального радіального навантаження можна визначити, виходячи з моделі Вінклера [1], що дозволяє рахувати металокерамічний шар пружною балкою, яка лежить на квазіжорсткій основі при постійній напрузі стиснення в радіальному напрямку по товщині шару і відсутності інших компонентів напруг.

При цьому відбувається проста залежність переміщень від питомого тиску на поверхні пружного шару (рис. 1) [1]:

$$U_{\varphi} = \frac{q_{\varphi} h_2}{E_2},$$

де q_{φ} – нормальний поверхневий тиск; h_2 – товщина металокерамічного шару; E_2 – модуль пружності матеріалу металокерамічного шару. До аналогічного розв'язку можна дійти, виходячи з праці [2].

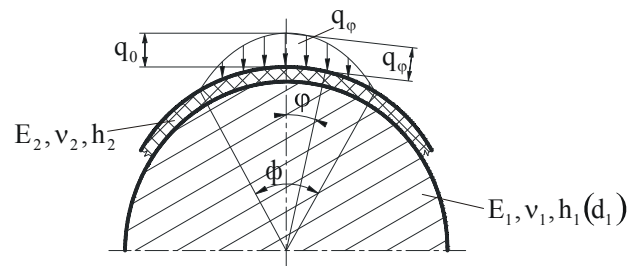


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення радіальної усадки металокерамічного шару

В.З. Власов і Н.І. Леонт'єв в праці [3] піддали критиці модель Вінклера, проте навели графік, з якого видно, що при визначенні осідання поверхні застосування цієї моделі призводить до досить незначних похибок.

Д.С. Коднір, використовуючи інтегральне перетворення Фур'є, одержав більш загальний розв'язок [4]:

$$U_{\varphi} = \frac{2(1-\nu_2^2)}{\pi E_2} P \Phi \left[\frac{\varepsilon - x}{2h} \right],$$

де P – зосереджене нормальне навантаження;

$\Phi \left[\frac{\varepsilon - x}{2h} \right]$ – інтегральна функція, для якої в праці

[4] наведено таблицю числових значень.

Переходячи від зосередженого навантаження до розподіленого, Д.С. Коднір [4] одержав вираз для визначення радіальної усадки:

– для випадку, коли матеріал шару може вільно розтікатися:

$$U_{\varphi} = \frac{q_{\varphi} h_2}{E_2} (1 - \nu_2^2);$$

– для випадку, коли переміщення матеріалу вздовж шару відсутні:

$$U_{\varphi} = \frac{q_{\varphi} h_2}{E_2} \frac{(1 - 2\nu_2)(1 + \nu_2)}{1 - \nu_2}.$$

Найімовірніше, що насправді спостерігається проміжний випадок, тобто для металокерамічного шару можна взяти:

$$U_{\varphi} = \frac{q_{\varphi} h_2}{E_2} \frac{2(1 - \nu_2^2)}{\pi}. \quad (1)$$

У першому наближенні можна вважати, що закон розподілу тиску q_{φ} – косинусоїдальний [5]:

$$q_{\varphi} = q_0 \cos k\varphi, \quad (2)$$

$$k = \pi/2\Phi,$$

де q_0 – тиск у центрі майданчика контакту.

Максимальний тиск q_0 можна знайти з формули для розрахунку довільного зусилля F_r , що передається на металокерамічний шар:

$$F_r = 2rbq_0 \int_0^{\Phi} \cos \varphi \cos k\varphi d\varphi,$$

де r – радіус диска-індентора; b – ширина диска-індентора; Φ – кут розподіленого навантаження; φ – поточне значення кута розподіленого навантаження.

Після інтеграції формули (2), вирішуючи рівність відносно тиску q_0 , знаходимо його значення:

$$q_0 = \frac{F_r (k-1)}{2rbk \cos \Phi},$$

де F_r можна визначити за залежністю:

$$F_r = \frac{2Mtg(\alpha + \rho')}{2r},$$

де M – момент зовнішнього навантаження; α – кут тиску; ρ' – кут тертя ($\rho' \approx 5^\circ$).

Підставляючи значення тиску q_{φ} у вираз (1), при $\varphi = 0$ дістаємо максимального значення радіальної усадки металокерамічного шару в центрі майданчика контакту U_0 :

$$U_0 = \frac{F_r (k^2 - 1) h_2 (1 - \nu_2^2)}{rbk E_2 \cos \Phi \pi}.$$

Таким чином, нам вдалося визначити радіальну усадку U_0 , тиску q_0 , довільного зусилля F_r , а також загальний закон розподілу тиску по дузі контакту, спираючись на модель Вінклера.

Похибка у визначенні цих величин не перевищує 2–3% [4].

Оскільки величина осідання суттєво залежить від радіального зусилля, а по лінії контакту це зусилля змінюється за лінійним законом, то створюються умови для переміщення металокерамічного шару з області великих радіальних зусиль в області меншого радіального зусилля.

При рівномірному осьовому стисненні зусилля F_a (при превалюючому впливі радіальних зусиль F_r) елемента двохшарової системи на деякому видаленні від торців прогин буде постійним по довжині.

Отже, при зростанні осьового навантаження F_a може наступити втрата стійкості системи, тобто двохшарова система починає здиматися і один шар починає відділятися від іншого.

Це призведе до відсутності умови спільності деформації та руйнування конструктивно-ортотропної системи в принципі – металокерамічний шар може відокремитися від основи [6].

Припустимо, що при відділенні металокерамічного шару від основи хвилеутворення, на поверхні розділу двох складових системи віссиметричне.

Диференціальне рівняння, що описує вісесиметричну форму втрати стійкості двошарової системи при сумісній дії радіальної та осьової складових навантаження, має вигляд:

$$\frac{d^4 \omega}{dx^4} + 2\beta^2 \frac{d^2 \omega}{dx^2} + \alpha^4 = -\frac{B_1 T}{B_1 D_1 - A_1^2} \frac{d^2 \omega}{dx^2}; \quad (3)$$

$$\alpha^4 = \frac{B_1 B_2 - v^2 B^2}{(B_1 D_1 - A_1^2) R^2};$$

$$\beta^2 = \frac{v B A_1}{(B_1 D_1 - A_1^2) R},$$

де B_1 – жорсткість системи в напрямку зсувних і стискаючих деформацій:

$$B_1 = B + \frac{E_1 F_1}{l_1};$$

B_2 – жорсткість системи у напрямку вигнутих деформацій:

$$B_2 = B + \frac{E_2 F_2}{l_2};$$

D_1 – зведена циліндрова жорсткість при вигині в напрямку зсувних і стискаючих деформацій:

$$D_1 = D + \frac{E_1 I_{x1}}{l_1};$$

A_1 – параметр взаємного впливу вигнутих зсувних і стискаючих деформацій:

$$A_1 = \frac{E_1 S_1}{l_1};$$

S_1 – зсувне внутрішнє зусилля; R – радіус середньої поверхні системи.

При малій товщині металокерамічного шару можна взяти $l_1 \approx l_2$.

Характеристичне рівняння – розв'язання диференціального рівняння (3) – має вигляд:

$$\omega = A \sin \frac{m\pi x}{l}. \quad (4)$$

Розв'язуючи диференціальне рівняння (3) у вигляді (4) щодо величини критичного навантаження $T_{кр}$, одержуємо формулу

$$T_{кр} = \left(D_1 - \frac{A_1^2}{B_1} \right) \left[\left(\frac{m\pi}{l} \right)^2 + \frac{\alpha^4}{\left(\frac{m\pi}{l} \right)^2} - 2\beta^2 \right],$$

де цілочисловий параметр $m = 1, 2, 3, \dots$ вибирається з умови мінімуму правої частини.

Неважко показати, що критичне значення параметра

$$\left(\frac{m\pi}{l} \right)_{кр} = \alpha.$$

Отже, довжину півхвилі при вісесиметричному здманні межі розділу компонентів системи визначають за виразом

$$\frac{l}{m} = \pi^4 \sqrt{\frac{(B_1 D_1 - A_1^2) R}{B_1 B_2 - v_{np}^2 B^2}}.$$

У праці [2] для визначення критичного осьового навантаження конструктивно-ортотропної системи при вісесиметричній формі втрати стійкості запропоновано таку формулу:

$$T_{кр} = \frac{2}{R} \sqrt{B_2 D_1 (1 - v_1 v_2)}. \quad (5)$$

Залежність (4) впливає з формули (5) з урахуванням властивостей конструктивно-ортотропних систем і приведених характеристик міцності і жорсткості.

Одержані вирази для оцінки стійкості металокерамічного шару на поверхні тертя за умови спільності деформації дозволили виконувати попередні оцінювальні розрахунки.

Їх результати допомагають пояснити „квазібезношувальні” властивості подібного покриття, що утворюється на поверхнях тертя в результаті застосування трибовідновлювальних сумішей, з погляду його стійкості на поверхні основного матеріалу.

Передумови збереження цієї стійкості можна знайти при інформаційно-статистичному моделюванні роботи покриття, враховуючи процеси сегрегації і сепарації по поверхні металокерамічного шару окремих складових його структурних ансамблів, що відбуваються в полі діючих напруг при структурній самоорганізації системи в напрямі збереження максимуму надійності [6]. Анізотропія структури поверхні, визначена в трьох точках по ширині лінії контакту, повністю підтверджує результати дослідження (рис. 2). Розміри окремих ансамблів структури металокерамічного шару змінюються відповідно до розподілу тиску по лінії контакту.

Навантаження по ширині лінії контакту збільшувалося зліва направо із-за деформації валів машини тертя. Аналіз розподілу елементів поверхневої структури залежно від їх розмірів показує, що в зоні підвищеного тиску розміри ансамблів збільшуються (рис. 2, а), у центрі лінії контакту (рис. 2, б) розміри блоків мають проміжний розмір, а в точці найменшого тиску вони мінімальні (рис. 2, в).

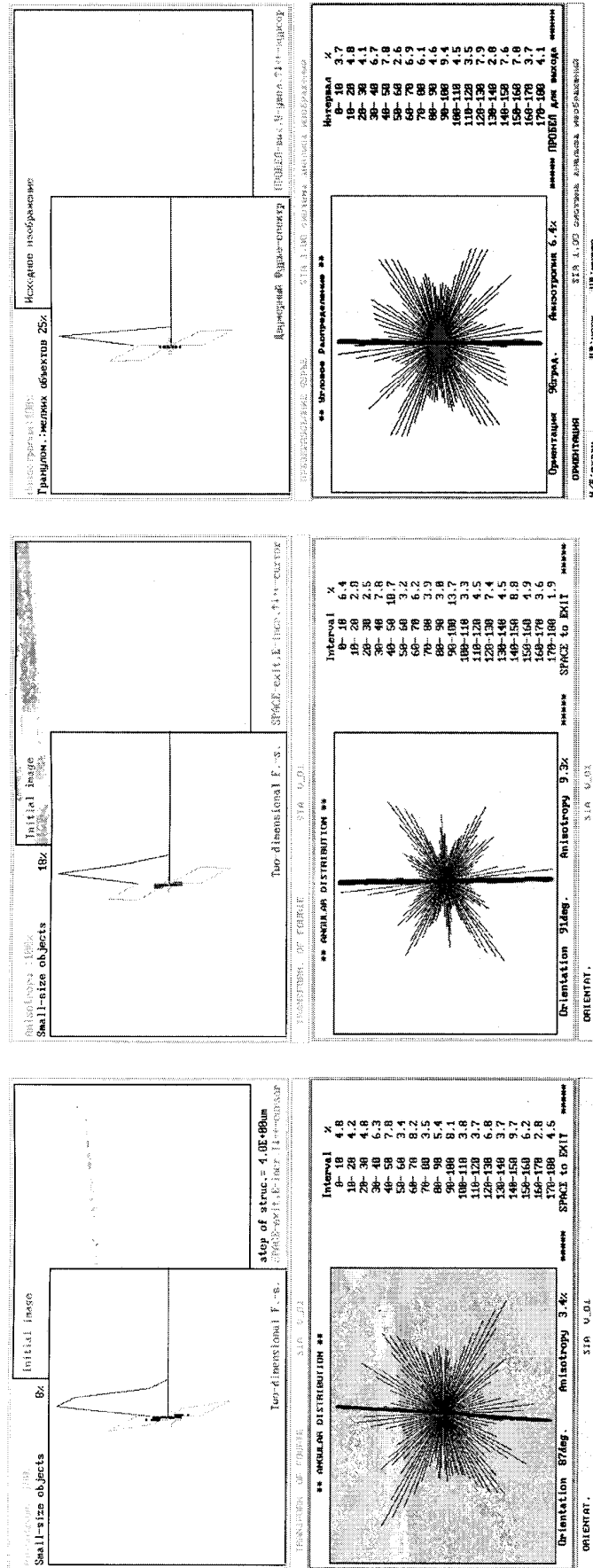


Рис. 2. Фур'є-аналіз анізотропії структури поверхні покриття в трьох точках по ширині лінії контакту: *a* – область підвищеного тиску; *b* – середня точка лінії контакту; *v* – область підвищеного тиску, найменшого по лінії контакту

Завдяки цьому, виникаюча в поверхневому шарі осьова сила від нерівномірно розподіленого навантаження компенсується відмінністю розмірів, а отже, рухливості структурних ансамблів: менша рухливість із-за укрупнення розмірів і навпаки.

Таким чином, відбувається перебудова структури металокерамічного шару, яка забезпечує його стійкість на поверхні при макрозсувному переміщенні, що забезпечує релаксацію надмірної механічної енергії, яка самоорганізовується.

В іншому випадку, коли не забезпечуються процеси сегрегації і сепарації поверхневих ансамблів у напрямі подібної самоорганізації, покриття «з'їжджає» з поверхні в результаті макрозсувного переміщення.

Саме через це, на початковому етапі формування металокерамічного шару, коли всі його унікальні властивості ще не сформувалися, в змащувальній ванні виявляються окремі «клапти» покриття, що злетіло так само.

Висновки

Запропоновані способи розрахунку радіальної усадки металокерамічного шару і оцінки його стійкості на поверхні тертя дозволяють пояснити роботу металокерамічного шару в беззношувальному режимі за рахунок його структурної перебудови.

У результаті процесів сегрегації і сепарації по поверхні металокерамічного шару окремих складових його структурних ансамблів і зміни під впливом чинників модуля зрушення покриття по лінії контакту, створюються умови синхронності зсувних процесів у всьому мікрооб'ємі.

Осьова складова, яка на етапі припрацювання призводить до зрушення металокерамічного шару з зони дії високого контактного тиску, зникає, і металокерамічний шар стабілізується на поверхнях тертя, забезпечуючи високі властивості протиспрацювання трибосистеми.

Література

1. Пелех Б.Л., Суходольский М.А. Контактные задачи теории упругости анизотропных оболочек. – К.: Машиностроение, 1980. – 214 с.
2. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
3. Власов В.З., Леонтьев Н.И. Балки, плиты и оболочки на упругом основании. – М.: Физматгиз, 1960. – 491 с.
4. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. – М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.
5. Приймаков А.Г. Усталостные испытания силовых трехволновых зубчатых передач с металлополимерными гибкими колесами // Пробл. трения и изнашивания. – 1985. – Вып. 27. – С. 48–51.
6. Бабак В.П., Стадниченко В.М., Філоненко С.Ф. Дослідження пар тертя з трибовідновлювальними сумішами методом акустичної емісії// Вісн. НАУ. – 2005. – №3 (21). – С. 3–8.

Стаття надійшла до редакції 02.10.06.