

ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЇ МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ ПРИ ГРАНИЧНОМУ ТЕРТІ

Канд. техн. наук П.Є. Коновалов

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ГРАНИЧНОМ ТРЕНИИ

Канд. техн. наук П.Е. Коновалов

PHYSICAL MODEL OF CO-OPERATION OF METAL SURFACES AT BORDER FRICTION

Cand. of techn. sciences P.E. Konovalov

Метою роботи є побудова фізичної моделі опорної поверхні плями контакту при граничному терті і визначення залежності між товщиною граничного мастильного шару і площею адгезійного контакту тіл тертя. Відмінністю роботи є врахування наявності граничних шарів мастила на поверхнях тертя, їх характеристик, несучої здатності і впливу на процеси, які протікають в трибоузлах при граничному терті.

Ключові слова: фізична модель, адгезійна та полімолекулярна складова, мастильна плівка, несуча здатність, інтенсивність зношування, граничне тертя.

Целью работы является построение физической модели опорной поверхности пятна контакта при граничном трении и определения зависимости между толщиной граничного смазочного слоя и площадью адгезионного контакта тел трения. Отличием работы является учет наличия граничных слоев смазки на поверхностях трения, их характеристик, несущей способности и влияния на процессы, которые протекают в трибоузлах при граничном трении.

Ключевые слова: физическая модель, адгезионная и полимолекулярная составляющая, смазочная пленка, несущая способность, интенсивность изнашивания, граничное трение.

The aim of the given work is to build a physical model of a contact spot bearing surface under boundary lubrication and the determination of the dependence between the thickness of boundary lubrication layer and the area of adhesive contact of bodies of frictions. The distinguishing feature of the given work is the registration of the availability of boundary lubrication layers on friction surfaces, their characteristics, bearing capacity and their influence on the processes which take place in tribo-nodes under boundary friction.

The proposed physical model allows us to determine the dependence of the value of adhesive and polymolecular constituents of the area of that contact upon the effective thickness of lubricating film, which may be used for searching effective practical solutions, aimed at the reduction of friction unit wear rate and the improvement of mating surfaces wear-preventive property.

Key words: physical model, adhesive and polymolecular constituent, lubricating film, bearing capacity, wear rate, boundary friction.

Для вирішення завдання поліпшення мастильних властивостей осьових масел, які застосовуються у підвісці тягових електродвигунів тепловозів, необхідно, зокрема, розглянути механізм утворення мастильного шару на поверхні моторно-осьових підшипників (МОП) при граничному терті.

У дослідженнях, присвячених проблемі тертя і зносу вузлів машин, інтенсивність

зношування пов'язують з товщиною граничного мастильного шару [1-3] та вказують, що збільшення останнього сприяє зниженню числа контактів і пошкоджень мікроступів поверхонь тертя.

В роботі [4] приведені деякі закономірності такого зв'язку, однак запропонована концепція розглядає взаємодію мікроступів поверхонь без урахування сил адгезійної взаємодії.

Метою роботи є побудова фізичної моделі плями контакту при граничному змащенні і визначення залежності між товщиною граничного мастильного шару і площею адгезійного контакту.

Зважаючи на відносно невелику площу плям контакту (0,01% - 10% від номінальної [4,5]), величини тиску у них наближаються до граничних величин фізико-механічних характеристик матеріалів. При цьому у місцях контакту відбувається руйнування молекулярного граничного шару і активізація сил міжатомної (адгезійної) взаємодії. У відомих методиках [6-8] при розрахунку площі контакту під опорною поверхнею розглядається тільки та частина площі, яка безпосередньо утворена двома твердими тілами. Наявність граничних шарів мастила на поверхнях, їх особливі характеристики, отже, і їхня власна несуча здатність, у методиках розрахунків не враховуються.

Між тим, фізико-механічні характеристики та властивості адсорбованих мастильних шарів товщиною до 0,1 мкм [1,9] дозволяють розглядати їх як одну із важливих складових загальної опорної площі.

Величина цієї площі може бути значно відрізнитись. Так, при товщині шару в 0,1 мкм, діаметрі плями контакту тіл тертя $d = 3...50$ мкм [8] і куті утворення мікрориступів $\beta = 50$ [7,8], площа граничного шару, що утворений по периметру плями, може складати від 10 до 200 % від площі металевих контакту. Крім того, чим меншими є розміри одиничної плями і чим вище якість обробки поверхні, тим значніша несуча здатність граничного мастильного шару [4].

Таким чином, запропонована модель взаємодії поверхонь при граничному змащенні побудована на наступних положеннях контактної теорії тертя:

- при сталому зносі у місцях контакту на припрацьованих поверхнях тертя переважають пружні деформації [6];

- при зміні зовнішнього навантаження N величина тиску на плямах контакту залишається постійною [5-7]. Сталість величини тиску p супроводжується стабільністю площі S_i поверхні контакту;

- шари мастила товщиною до 0,10 мкм мають несучі характеристики, які

наближаються до характеристик металів, на яких вони адсорбовані.

Уявімо, що на поверхні мікрориступу, що має форму усіченого конусу, граничний мастильний шар відсутній (рис. 1). Під дією зовнішнього навантаження N і внаслідок пружних деформацій матеріалу на мікро нерівностях виникають плями контакту діаметром d (рис. 1). Несуча здатність плями контакту

$$N = p \cdot S = \sigma \cdot S, \quad (1)$$

де p - тиск, що діє на площі плями;

S - площа плями контакту;

σ - пружні напруження у поверхневому шарі матеріалу мікрориступу.

Потім при тому ж навантаженні N на поверхню мікрориступу фізично адсорбується граничний мастильний шар товщиною h (рис. 1). Вважаючи властивості граничної змащувальної фази близькими до властивостей металеві фази [8,10], можна вважати, особливо при малих значеннях кута β , що у складі опорної площі контакту з'явилася полімолекулярна (рідкокристалічна) структура.

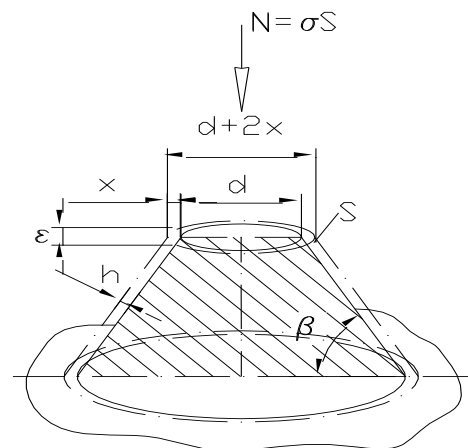


Рис. 1. Схема мікрориступу поверхні тертя

Величина нової опорної площі

$$S_1 = S + \Delta S, \quad (2)$$

де ΔS - додаткова опорна площа, утворена полімолекулярним змащувальним шаром по периметру плями контакту.

Поява додаткової площі ΔS при $p = \sigma = \text{const}$ призводить до порушення умови (1) рівноваги контакту, оскільки в цьому випадку $N < \sigma \cdot S_1$. Провідним чинником для встановлення нового рівня рівноваги є дія пружних напружень σ на поверхні контакту (рис. 1)

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad \varepsilon = \sigma / E, \quad (3)$$

де ε - деформація поверхні;

E - модуль пружності матеріалу.

Під дією σ поверхня контакту піддається деформації на величину ε до моменту встановлення рівності

$$N = \sigma \cdot S = \sigma \cdot (S_a + S_{nm}), \quad (4)$$

де S_a, S_{nm} - відповідно площі металевої і полімолекулярної взаємодії.

Таким чином, на опорній поверхні (4) з'являється полімолекулярний шар площею S_{nm} , який приймає на себе частину навантаження, зменшуючи площу металевого (адгезійного) контакту, та сприяючи зниженню інтенсивності зношування поверхні.

Площі адгезійної і полімолекулярної взаємодії

$$S_a = \frac{\pi}{4}(d - 2x)^2, \quad S_{nm} = \pi \cdot x(d - x),$$

де $x = \frac{h}{\sin \beta}$, (5)

де x - проекція товщини h граничного шару на опорну поверхню;

$2x$ - зменшення діаметру металевого контакту взаємодії тіл тертя.

Запропонована модель дозволяє встановити залежність між ефективною товщиною h мастильної плівки і площею адгезійного контакту. Після підстановки у (5)

$$S_a = \frac{\pi}{4}(d - 2h/\sin \beta)^2,$$

звідки

$$S_a = \min = 0 \text{ при } h = 0,5 \cdot d \cdot \sin \beta, \quad (6)$$

$$S_a = \max \text{ при } h = 0.$$

Для визначення кількісних залежностей величин (5-6) за методикою [5] проведено контактні розрахунки щодо поверхонь пари тертя МОП тепловоза 2ТЭ116А. Далі була розрахована функція $S_a/S = f(h)$ при наступних вихідних даних:

- матеріал пари тертя: бронза ОЦС-4-4-17

- сталь осьова;

- кут прямої, яка утворює мікрорівень $\beta = 40^\circ$;

- параметр шорсткості поверхонь $R_a = 1,5$ мкм;

- середній діаметр контакту $d = 13,8$ мкм.

Результати розрахунків ілюструються графіками на рис. 2.

З графіків випливає, що зниження частки адгезійного контакту S_a на поверхнях тертя досягається шляхом:

- зменшення шорсткості поверхонь, що оцінюється параметром β . Наприклад, при $h = 0,10$ мкм і $\beta \approx 1^\circ$ частка адгезійного контакту практично знижується до нуля (крива 5);

- збільшення товщини h граничного мастильного шару, причому в міру зростання шорсткості цей ефект зменшується. Так, якщо для поверхні, у якої $\beta = 1^\circ = 10$, збільшення h від 0,01 до 0,03 мкм призводить до зменшення площі S_a адгезійного контакту на 50%, то при $\beta = 10^\circ$ і тих же величинах h зменшення S_a є менш суттєвим – приблизно 3-4%.

Крім того, за допомогою графіка $h_{\max} = f(\beta)$ (рис. 2,б) можна встановити ту товщину $h_{\max}$ граничного мастильного шару, при якій адгезійна складова площі на плямі контакту теоретично є відсутньою ($S_a = 0$).

Залежність $h_{\max} = f(\beta)$ з похибкою до 0,3% має вигляд лінійної функції

$$h_{\max} = 0,5d \cdot \sin \beta, \quad (8)$$

де d - діаметр плями контакту.

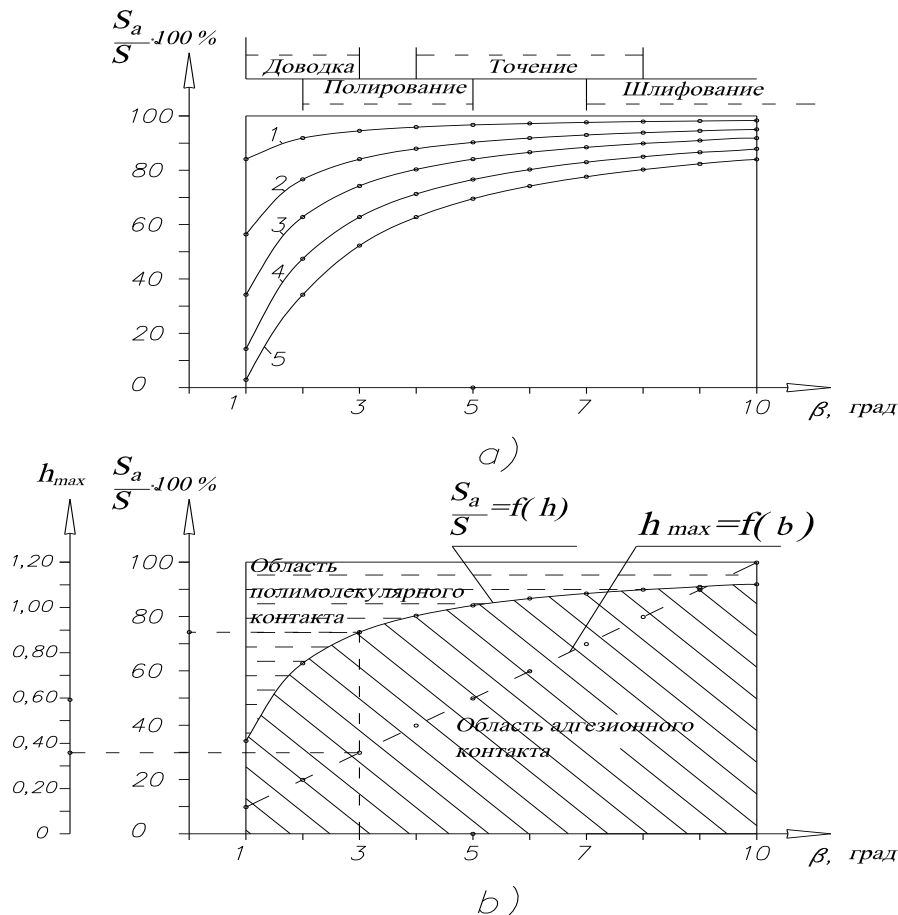
За допомогою представленої моделі і графіків (рис. 2) можливо:

- встановити співвідношення середніх величин металевої та рідинної складових на поверхнях контакту у парі тертя;

- уточнити розрахункову величину коефіцієнта зовнішнього тертя при граничному режимі змащування;

- визначити ту товщину $h_{\max}$ граничного мастильного шару, при якій адгезійна складова

площі на плямі контакту теоретично відсутня ($S_a = 0$), а граничний режим змащування в сполученні поступається змішаному.



1 – $h=0,01$ мкм; 2 – $h=0,03$ мкм; 3 – $h=0,05$ мкм; 4 – $h=0,075$ мкм; 5 – $h=0,10$ мкм

Рис. 2. Графіки співвідношення складових опорної площі на плямі контакту при граничному терті в залежності від виду обробки поверхонь:

а – при товщині h граничного шару від 0,01 до 0,10 мкм; б – при товщині $h = 0,05$ мкм

Результати, представлені на рис. 2, узгоджуються з даними роботи [10].

Таким чином, з позицій представленої моделі будь-які зміни ефективної товщини h граничної змащувальної плівки призводять до змін ΔS площі взаємодії мікроступів протилежних поверхонь. Це виводить систему сил в області контакту зі стану статичної рівноваги, що є початком виникнення процесу саморегулювання. Провідним фактором цього процесу виступають напруження σ пружної

деформації матеріалу. Дія цих напружень на площі $\sigma \cdot \Delta S$ направлена на переміщення опорної площини відносно початкової на величину ε . Робота пружних напружень на мікроступах контакту двох поверхонь є подібної до роботи умовного клину, що викликає зміни у зазорі між цими поверхнями.

Процес саморегулювання спрямований на досягнення нового рівня статичної рівноваги системи. Після його досягнення встановлюються раніш існуючі розміри площі

опорної поверхні плями контакту, проте її структура, яка визначається питомим співвідношенням площ адгезійного і полімолекулярного контакту, буде змінена. Якщо причиною розглянутих вище змін було збільшення товщини h граничної плівки, то у новій структурі площі полімолекулярна складова буде збільшеною, а адгезійна – зменшеною. Зворотні зміни будуть викликані зменшенням величини h .

Висновки:

1. Запропонована фізична модель контакту металевих поверхонь при граничному

терті, яка дозволяє встановити залежність величини адгезійної і полімолекулярної складових площі контакту від ефективної товщини мастильної плівки, та може бути використана для пошуку практичних рішень, що спрямовані на зниження інтенсивності зношування вузлів тертя.

2. Наведена залежність величин адгезійної і полімолекулярної складових площі контакту від товщини граничної мастильної плівки. Надана характеристика умов, за яких адгезійна складова площі тертя є мінімальною.

Список використаних джерел

1. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения [Текст] / А.С. Ахматов. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1963. – 471 с.
2. Лысов, Е.Н. Физические основы механизма воздействия внешнего электростатического поля на структуру рабочей жидкости гидроприводов строительных и дорожных машин [Текст] / Е.Н. Лысов // Вест. Харьк. гос. авт.-дор. универс. – Харьков, 2000. – Вып. 11. – С. 44-47.
3. Повышение ресурса технических систем путем использования электрических и магнитных полей [Текст]: монография / Е.Е. Александров, И.А. Кравец, Е.Н. Лысов [и др.]. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 544 с.
4. Лысов, Е.Н. Надмолекулярные структуры жидких смазочных сред и их влияние на износ технических систем [Текст] / Е.Н. Лысов, В.Б. Косолапов, С.В. Воронин. – Харьков: ЭДЭНА, 2009. – 274 с.
5. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (износ и безысность) [Текст] / Д.Н. Гаркунов. – 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд. МСХА, 2001. – 616 с.
6. Трение, изнашивание и смазка [Текст]: справочник; в 2-х кн. / под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисына. – М.: Машиностроение, 1978. – Кн. 1. – 400 с.
7. Комбалов, В.С. Оценка триботехнических свойств контактирующих поверхностей [Текст] / В.С. Комбалов. – М.: Наука, 1983. – 136 с.
8. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ [Текст] / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
9. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) [Текст] / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
10. Данилов, В.Д. Несущая способность контакта при смазке маслами с многоцелевыми присадками и наноразмерными комплексами [Текст] / В.Д. Данилов, В.И. Беклемешев, К.В. Филиппов // Трение, износ, смазка. – 2007. – т. 9. - №2. – С. 45-54.

Рецензент д-р техн. наук, профессор М.П. Ремарчук

Коновалов Павло Євгенійович, канд. техн. наук, асистент кафедри будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин Української державної академії залізничного транспорту.

Konovallon P.E., candidate of technical sciences, assistant, department of construction, travel and cargo handling machines, Ukrainian State Academy of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-72. E-mail: kafsprrm2@rambler.ru.