

УДК 621.891

В. М. БОРОДІЙ, А. П. КУДРІН, О. Є. ЯКОБЧУК, М. С. ХІМКО

Національний авіаційний університет, Київ

## ВПЛИВ ТИСКУ НА ФОРМУВАННЯ ПРОФІЛЮ І ТОВЩИНИ МАСТИЛЬНОЇ ПЛІВКИ У ЛОКАЛЬНОМУ КОНТАКТІ КОЧЕННЯ В УМОВАХ ЕЛАСТОГІДРОДИНАМІЧНОГО МАЩЕННЯ

*Досліджено вплив тиску на формування мастильної плівки у локальному контакті кочення. Проаналізовано особливості розподілу тиску і товщини мастильного матеріалу в умовах еластогідродинамічного мащення.*

**Ключі слова:** *трибомеханічні системи, тертя кочення, товщина мастильного шару, локальний контакт, розподіл тиску по Герцу.*

**Вступ.** Аналіз сучасного стану проблеми підвищення довговічності трибомеханічних систем показує, що мащення є одним із найбільш поширених і ефективних засобів впливу на процеси перенесення енергії і матеріалів у трибомеханічних системах, зниження тертя та зменшення інтенсивності зношування деталей. Будь яке порушення установленого режиму мащення має негативні наслідки для працездатності трибомеханічних систем.

Тертя важко-навантажених і не припрацьованих поверхонь трибоспряжень, у першу чергу, трибоспряжень з локальною формою контакту (підшипники кочення, зубчасті передачі) здійснюється в еластогідродинамічному (ЕГД) режимі мащення. У цьому випадку актуальним питанням у вирішенні завдань прогнозування та підвищення довговічності вузлів тертя є визначення умов утворення і параметрів ЕГД-мастильного шару.

**Мета роботи.** Метою роботи було визначення впливу тиску на формування профілю і товщини мастильної плівки у локальному контакті кочення в умовах еластогідродинамічного мащення.

**Методика досліджень.** Товщина мастильного шару, що розділяє поверхні ЕГД-контакту, є одним із найбільш важливих параметрів, який визначає ефективність мастильної дії. Серед існуючих способів вимірювання товщини мастильного шару найбільш інформативним є метод оптичної інтерферометрії [1; 2]. Метод базується на огляді області контакту через одне з контактуючих тіл (виготовлене з прозорого матеріалу) і спостереганні інтерференційної картини (в даному випадку кільця Ньютона), яка породжується інтерференцією світла, що відбивається від поверхні непрозорого тіла. Такий метод дозволяє вимірювати товщину мастильного шару з урахуванням картини підведення та розподілу мастила в межах контакту тертя та фактичної площини контакту. Принцип і методика визначення товщини мастильної плівки методом оптичної інтерферометрії описано у праці [1].

Схема експериментальної установки, що використовується для створення умов аналогічних тим, що виникають в контакті поверхонь тіл кочення представлено на рис. 1.

Основним об'єктом дослідження є зона контакту між скляним диском 1 і сталевим роликком 7 (кулею), що притискається до диска вантажем.

Поверхня тертя диска покривалася тонким шаром хрому (товщиною близько 150Å) методом випаровування у вакуумі. Ролик виготовлявся зі сталі ШХ-15 з наступною термічною обробкою на твердість 60 HRC. Шляхом точного шліфу-

вання шорсткість робочої поверхні ролика до  $R_a < 0,025$  мкм, яка відповідала умовам дослідів. Ролик виготовлено заодно з валом кінці якого встановлено на кулькові підшипники і розміщено у спеціальному стакані. Стакан виготовлено заодно з ванною для досліджуваного мастильного матеріалу і обладнано кожухом, який забезпечує циркуляцію охолоджуючої чи нагріваючої речовини. Стакан через компенсуючі підшипники (для повного прилягання ролика) за допомогою валу притискається до скляного диска.

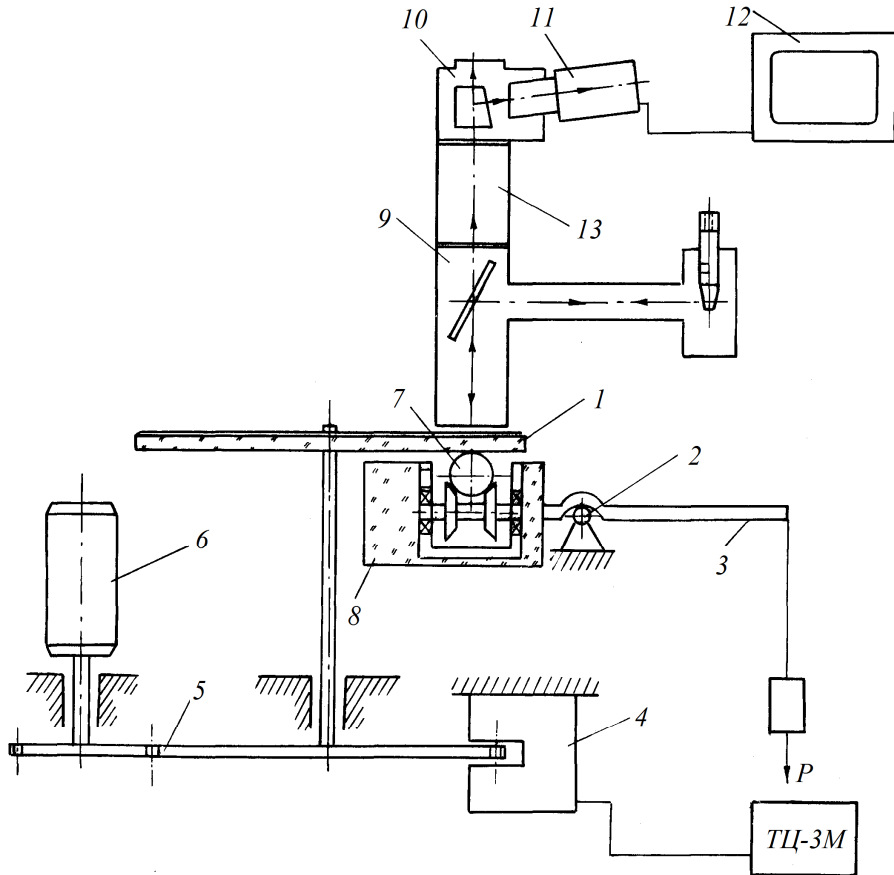


Рис. 1. Схема експериментальної установки для дослідження мастильної дії у локальному точковому та лінійному контакті: 1 – скляний диск; 2 – рухомий підшипник; 3 – вал; 4 – датчик тахометра; 5 – одноступінчаста передача; 6 – привідний електродвигун; 7 – сталевий ролик; 8 – ємність з оливою; 9 – об’єктив мікроскопа; 10 – мікрофотоапарат; 11 – відеокамера; 12 – телевізор; 13 – перехідний патрубок.

Диск 1 приводився в обертання двигуном 6 за допомогою одноступінчастої передачі 5. Навантаження в контакті задається через важільну систему за допомогою рухомого підшипника 2, що розміщується на валу 3. Датчик 4 електронного тахометра ТЦ-3М фіксував кількість обертів. Температура мастильного матеріалу вимірювалася за допомогою спеціальної термопари, що розміщувалася в безпосередній близькості до контакту тертя.

Спостереження контактної зони здійснювалося через об’єктив мікроскопа 9. Для візуального спостереження інтерферометричної картини в контакті тертя, використовувалася відео та цифрова записуюча апаратура, що складається з пе-

рехідного тубуса 13, мікрофотонасадки 10, відеокамери 11 і телевізора 12. У випадку використання комп'ютерної техніки, мікрофотонасадка, відеокамера та телевізор можна замінити на цифрову відеокамеру та комп'ютер.

**Результати дослідження та їх аналіз.** Дослідження з визначення розподілу тиску в локальному контакті та його впливу за зміну профілю і товщину мастильної плівки проводились в умовах мащення синтетичною оливою SAE 5W40 для двох варіантів: вздовж центральної лінії в напрямку кочення та в поперечному напрямку. Параметри тертя: нормальне навантаження у контакті  $P=1$  МПа, швидкість ковзання  $V=0,1$  м/сек.

Діаграми розподілу тиску і зміни товщини мастильної плівки у контакті, для зазначених варіантів дослідження, представлені на рис. 2.

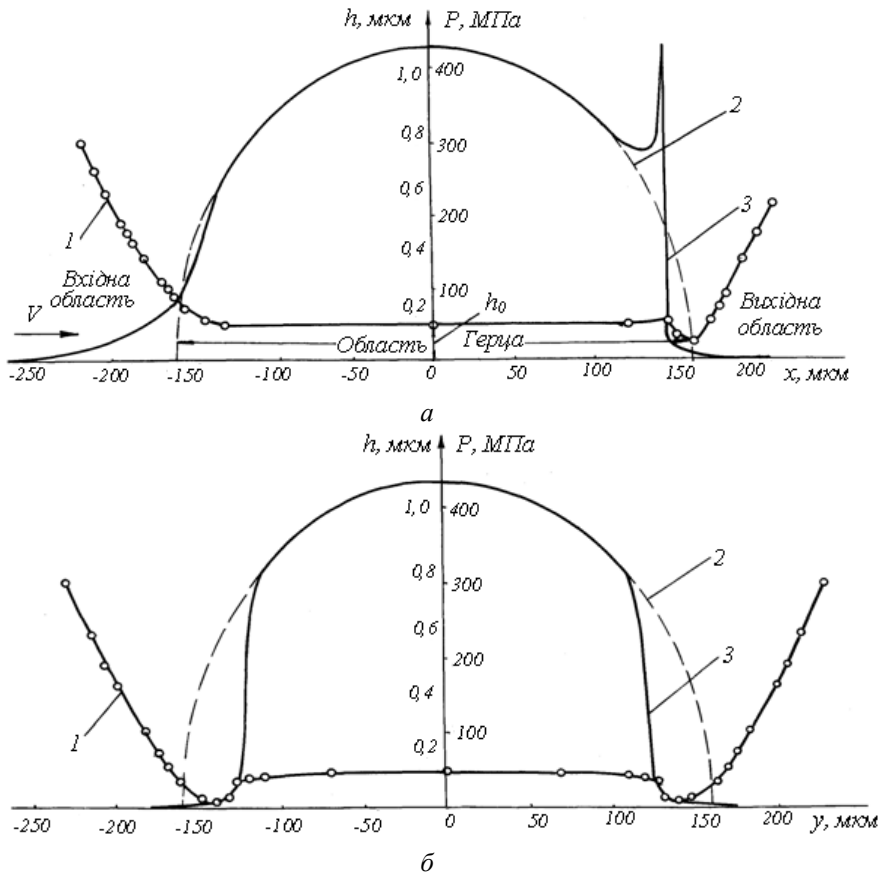


Рис. 2. Діаграми розподілу тиску у контакті та товщини мастильної плівки:  
 а – вздовж центральної лінії в напрямку кочення; б – в поперечному напрямку;  
 1 – вимірний профіль плівки; 2 – герцівський розподіл тиску;  
 3 – теоретичний розподіл тиску

Особливості розподілу тиску у вхідній області були отримані на підставі наступних міркувань. Оскільки товщина плівки у центрі герцівської області залишається практично постійною, тиск в цій області повинен бути близьким до герцівського, розрахованого із умови пружної деформації тіла кочення і плоского тіла. Обрив профілю тиску чітко визначається локалізацією обриву товщини мастильної плівки. У вхідній області, де тиск починає наростати, товщина плівки

стає чутливою відносно границі мащення. У цьому випадку, деформація переднього краю герцівської області більша, ніж відповідна герцівська деформація в статичних умовах. Це пов'язано з додатковим тиском, що виникає у вхідній області і який повинен складатись з герцівським тиском для створення у герцівській області рівномірної плівки. Поблизу заднього краю герцівської області товщина плівки різко спадає і різко спадає тиск, який стає значно нижчим ніж відповідний герцівський тиск.

У вихідній області при стисненні мастильної плівки, не дивлячись на стрибок тиску (пік Петрусевича), безпосередньо перед областю стиснення товщина плівки залишається практично постійною. Необхідною умовою рівномірності мастильної плівки, в цьому випадку, повинна бути співмірність величини тиску безпосередньо перед областю стиснення із відповідним герцівським тиском.

При визначенні розподілу тиску у вихідній області до уваги були прийняті також поверхневі зсуви для лінійного навантаження на напівнескінченній плоскій твердій поверхні, які описані і запропоновані у роботі [3], з використанням різниці тисків між описаним вище розподілом тиску і герцівським розподілом тиску. Тиски від пружних зсувів додавались до герцівського тиску, що дало теоретичну криву розподілу тиску.

Розподіл тиску в поперечному напрямку (рис. 2, б) описується аналогічним герцівському тиску в центральній області, оскільки товщина плівки в цій області залишається практично постійною. Тиск, пов'язаний з повздовжнім стисненням плівки і локалізованим у герцівській області, повинен бути значно нижче, ніж відповідний герцівський тиск. Важливим розходженням між стисненням у вихідній області у напрямку кочення (рис. 2, а) і стисненням у поперечному напрямку є те, що нахил кривої тиску, що призводить до стиснення плівки, зростає у першому випадку і зменшується у другому. Таким чином можна сказати, що, очевидно, не існує значного збільшення тиску в поперечному напрямку над герцівським тиском, що характерно для внутрішньої частини області стиснення у вихідній області вздовж центральної лінії в напрямку кочення.

В результаті у вихідній області пік тиску, яку б форму він не мав, швидше за все, обмежується тільки областю у напрямку вверх за течією оливи від області стиснення. Цей тиск має тенденцію створювати додаткову напругу в спрямованому за течією оливи краю герцівської області і виступає в якості однієї із причин того, що товщина мастильної плівки в області стиснення у вихідній області у напрямку кочення (рис. 2, а) в цілому більша, ніж при стисненні в поперечному напрямку. Менша товщина плівки в поперечному напрямку є результатом бічного витоку оливи у вихідній області, який більш істотний по краях вихідної області, ніж в центральній області контакту. Це перешкоджає збільшенню тиску, а отже, і збільшенню товщини плівки у здовж країв герцівської області.

Однією із найбільш важливих задач теорії ЕГД- мащення є визначення товщини мастильного шару у ключових точках локального контакту в умовах рясного мащення та мастильного голодування. Такими точками для лінійного контакту є центральна зона контакту та кінцеві зони (краї контакту). Дослідження багатьох авторів свідчать, що у центральній зоні лінійного контакту, навіть за умов обмеженого підводу мастильного матеріалу, зберігається рясне мащення і в цій зоні важче досягти мастильного голодування.

Особливий інтерес викликає результат розподілу товщини мастильного шару на кінцях лінійного контакту. В умовах мастильного голодування, саме в цих місцях

роликотідшипників, відбувається руйнування мастильного шару, що призводить до виникнення осередків схоплення між тілами кочення та обіймою підшипника [1].

Процес мастильного голодування відбувається за досить малих, ультратонких значень товщини мастильного шару. Поведінка саме таких шарів визначає весь комплекс процесів, що спостерігається у трибосистемі. Мастильне голодування в умовах ЕГД-контакту пов'язане з розміщенням межі оливи у вхідній області. Початок режиму масляного голодування відображається у розміщенні очікуваного місця зародження профілю тиску. В цій області товщина мастильного шару зменшується спочатку повільно, що свідчить про специфіку перерозподілу тиску, пов'язаного з бічним витоком оливи. Центральна товщина мастильного шару різко спадає до нуля, коли межа оливи наближається до контактної площини. В цей момент наступає режим катастрофічного мастильного голодування.

Для розкриття механізму масляного голодування проведено дослідження розподілу товщини мастильної плівки у повздовжньому і поперечному напрямках лінійного локального контакту в умовах рясного і обмеженого мащення. Результати виміру товщини мастильної плівки методом оптичної інтерферометрії показали, що в центральній області контакту товщина мастильного шару  $h_0$  і її мінімальне значення  $h_{\min}$  зменшується відповідно до поступового припинення подачі оливи (вхідного параметру  $m$ ). Причому, як показала розшифровка мікроінтерферограм, динаміка зміни розподілу товщини мастильного шару у поперечному напрямку в умовах рясного мащення зберігається постійною. При виникненні мастильного голодування в області контакту в поперечному напрямку конфігурація розподілу товщини мастильного шару набуває складного вигляду, що пов'язано з бічними витоками оливи. У наслідок подальшого зменшення кількості оливи, динаміка розподілу товщини мастильного шару супроводжується локальними ділянками прориву плівки з його вираженим зміщенням до країв контакту, що спостерігається на мікроінтерферограмах, які характеризують режим катастрофічного масляного голодування. Прорив масляного шару, що сприяє виникненню задиру, може бути пов'язаний з кавітаційними процесами в наслідок стримування живлення мастилом.

**Висновок.** Досліджено вплив тиску на форму профіля і товщину мастильної плівки у локальному лінійному контакті кочення, в умовах еластогідродинамічного мащення.

Експериментально доведено, що в умовах ЕГД-контакту мастильне голодування пов'язано з положенням границі мащення у вхідній області контакту. Причому, чутливість товщини мастильної плівки до положення границі зростає у міру наближення до радіуса контактної площини. Положення вхідної границі мащення убуває зі збільшенням навантаження, у наслідок чого розподіл тиску в ЕГД-плівці прагне до герцівського розподілу тиску.

#### Список літератури

1. Дмитриченко М.Ф. Порівняльні характеристики напружень і мастильної дії в локальному контакті тертя / М. Ф. Дмитриченко, С. Данилюк, О. П. Золотарьова, Р. Г. Мнацаканов, О. А. Міланенко // Тези доповідей «4-го Міжнародного симпозіуму українських інженерів-механіків у Львові». – Львів, 1999. – С. 133–134.
2. Дмитриченко М.Ф. Особенности эластогидродинамической (ЭГД) смазки точечного контакта в условиях низких температур. // Тезисы докл. Международ.научн.-техн. конф. «Ресурс-2000». – К.: ОНТИ ИПП НАН Украины. – 2000. – Т.2. – С.335 – 336.

3. Бонесс Х. Влияние подачи масла на кинематику сепаратора и роликов в смазываемом роликоподшипнике / Х. Бонесс // Проблемы трения и смазки. – 1970. – № 1. – С. 48–56.

Стаття надійшла до редакції 27.09.2016

*V. M. BORODIY, A. P. KUDRIN, O. Ye. YAKOBCHUK, M. S. KHMKO*

**PRESSURE INFLUENCE ON THE FORMATION OF PROFILE AND THICKNESS OF LUBRICANT FILM IN THE LOCAL CONTACT OF ROLLING IN THE CONDITION OF ELASTIC-HYDRODYNAMIC LUBRICATION**

The influence of the pressure on the formation of lubricant film in the local contact of rolling investigated. The peculiarities of the pressure distribution and thickness of the material in the condition of elastic-hydrodynamic lubrication were analyzed. Friction of the high-loaded and worked-out tribological coupling is very critical and needs increased requirements for the reliability. Control of the parameters of lubricant layer will prevent the formation of lubricant starvation conditions in friction pairs with local contact form.

**Keywords:** tribomechanical systems, friction rolling, thickness of lubricant film, local contact, Hertz pressure distribution.

**Бородій Віктор Миколайович** – старший викладач кафедри технологій виробництва та відновлення авіаційної техніки Національного авіаційного університету. Напрямок наукової діяльності – вплив мастил на зносостійкість матеріалів, [wiktbor@rambler.ru](mailto:wiktbor@rambler.ru).

**Кудрін Анатолій Павлович** – канд. техн. наук, завідувач кафедри технологій виробництва та відновлення авіаційної техніки Національного авіаційного університету. Напрямок наукової діяльності – тертя та зношування в машинах і механізмах.

**Якобчук Олександр Євгенійович** – старший викладач кафедри технологій виробництва та відновлення авіаційної техніки Національного авіаційного університету. Напрямок наукової діяльності – вплив мастил на зносостійкість матеріалів.

**Хімко Маргарита Сергіївна** – аспірант Національного авіаційного університету, Напрямок наукової діяльності – вплив мастил на зносостійкість матеріалів.