

УДК 621.891(045)

О.У. Стельмах, к.т.н., с.н.с.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ТЕЧІЙ ПРИМЕЖОВИХ ШАРІВ МАСТИЛА В ТРИБОКОНТАКТІ КОВЗАННЯ

Національний авіаційний університет
E-mail: stelmah@nau.edu.ua

Наведено результати експериментальних досліджень примежових шарів мастил у трибоконтаті ковзання. Висунуто гіпотезу компресійно-вакуумної природи тертя та зношування, яка дозволяє по-новому підійти до вирішення завдань трибології в умовах граничного змащування контакту ковзання.

The results of experimental researches of the action of lubricants boundary layers in the friction contact are presented. These results confirmed the hypothesis of the compression-vacuum nature of a friction and wear processes. As well it allows to make the new decisions in the tribology problems of friction contact.

Приведены результаты экспериментальных исследований граничных слоев смазочных материалов в трибоконтатке скольжения. Выдвинута гипотеза компрессионно-вакуумной природы трения и изнашивания, позволяющая по-новому подойти к решению задач трибологии в условиях граничной смазки контакта скольжения.

Постановка проблеми

Основу трьох базових розділів сучасної трибології складають постулати й уявлення про природу тертя [1–7] та така класифікація.

1. Безконтактне та практично беззносне гідродинамічне тертя в підшипниках ковзання описується відомою теорією змащення [1–3]. Для такого режиму характерні значення коефіцієнтів тертя ковзання 0,010–0,001, а іноді й 0,0001.

Силу тертя в парі «вал–підшипник» визначають за такою залежністю:

$$F = \frac{\eta v S}{\varepsilon + \frac{\eta}{\lambda_1} + \frac{\eta}{\lambda_2}}, \quad (1)$$

де η – в'язкість мастильного середовища;

v – лінійна швидкість обертання вала;

S – площа поверхні тертя;

ε – зазор між валом і підшипником;

λ_1, λ_2 – коефіцієнти зовнішнього тертя.

Якщо коефіцієнти зовнішнього тертя на межах мастильна плівка – поверхні вала і підшипника значно більші від η , залежність (1) набуває вигляду

$$F = \frac{\eta v S}{\varepsilon}, \quad (2)$$

Вираз (2) широко використовують для розрахунків підшипників ковзання за великих швидкостей і малих навантажень.

При цьому не враховують осьове навантаження, а також вплив контактних течій примежових шарів, зумовлених градієнтами тисків у контактї. У разі збільшення сили стиснення поверхонь трибосистема переходить у більш навантажений режим контактно-гідродинамічного тертя.

2. Контактне та теоретично беззносне еластогідродинамічне тертя пояснюють із позицій контактної гідродинаміки [4–6] на підставі спільного розв'язання гідродинамічної та пружно-деформаційної задач взаємодії середовища та поверхонь трибоконтатку. Відомі залежності для оцінювання сили тертя та інших параметрів трибосистем.

Коефіцієнт тертя в реальних трибосистемах на один-два порядки є більшим від розрахункових, а його значення досягає 0,01–0,10, що характерно для ще більш навантаженого режиму – тертя в умовах граничного змащення. При цьому поверхні з малою інтенсивністю зношуються, особливо в пускозупинних циклах експлуатації вузлів.

3. Тертя в умовах граничного змащення, що супроводжується інтенсивним зношуванням поверхонь, добре аргументоване адгезійно-деформаційною теорією [7–8], відповідно до якої макросилу тертя $F_{\text{тр}}$ утворюють механічна або деформаційна $F_{\text{деф}}$ і молекулярна або адгезійна $F_{\text{адг}}$ компоненти:

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{деф}} + F_{\text{адг}}.$$

Дослідження співвідношення адгезійної й деформаційної складових сили тертя показали, що в умовах граничного змащення відношення $F_{\text{адг}} / F_{\text{деф}}$ досягає 10 000 [7], а за даними [8] близько 100. Тому вважають, що домінуючим під час тертя в умовах граничного змащення є взаємодія робочих поверхонь на молекулярному рівні.

Зношування матеріалу поверхонь тертя є наслідком їх адгезійної взаємодії (утворення та руйнування «містків зварювання» [8]).

Тертя в умовах граничного змащення можна розглядати як процес трибоадгезії.

У разі цього контактні гідродинамічні течії примежових шарів мастила, які можуть викликати додатковий опір руху, не враховують. Припускають, що примежові шари мастила між стисненими поверхнями твердих тіл утворюють деяке «третє тіло», що має властивості склоподібного композиту [6; 7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Фундаментальні дослідження пристінних шарів мастильного середовища [9] доводять, що вони являються гомеотропними епітропними рідинно-кристалічними (ЕРК) шарами мастила.

Експериментальні дані про ЕРК – шари деяких рідин [10] свідчать, що їх в'язкість перевищує об'ємну, а рівноважна товщина становить від 20 нм до кількох мікрометрів.

Аналізуючи сучасний стан трибології, автор роботи [11] зазначає, що через складність процесів тертя, натепер нема єдиної думки про його природу. Тертя та зношування розглядають з позиції розрізнених уявлень про їх природу.

Теоретичних розробок у трибології, результати яких могли б стати базовими положеннями, немає, а результати нових експериментальних досліджень [12] часто не мають пояснень з позицій відомих теорій.

Так, в умовах ковзання поверхонь твердих тіл трибосистем з лінійним контактом не знаходить пояснення утворення слідів трибоадгезії матеріалу у вигляді виривів, каверн і кратерів, які спостерігаються в підшипниках та зразках на виході вала з контакту, а на вході контакту утворюються лише риски чи подряпини. При цьому немає пояснень накопичення продуктів зношування на ділянці входу вала в контакт на малій відстані від нього.

Виникає певна суперечність. За короткочасного ковзання полірованих сталевих поверхонь коефіцієнт тертя становить значень 0,15, що свідчить про виникнення в контакті адгезійної складової сили тертя, яка згідно з молекулярно-деформаційною теорією на два порядки більша від інших чинників, а основного її прояву – зношування – немає. Не проявляються навіть ознаки пошкодження поверхонь тертя.

Отже, твердження, що адгезійна складова макросили тертя переважає (99% усі втрати на тертя в умовах граничного змащення), викликає сумнів.

Гідродинамічний ефект, що виникає під час тертя в підшипниках ковзання, й фундаментальне в трибології граничного змащення утворення оптимальної шорсткості також трактують по-різному.

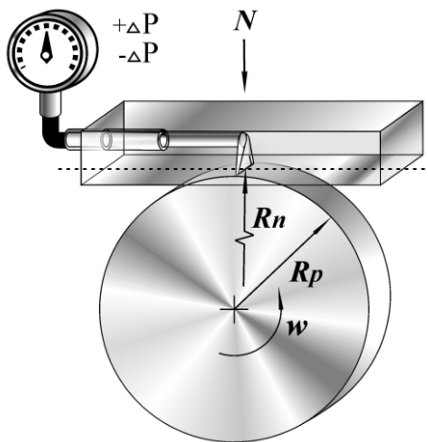
Не всі результати експериментів і теоретичних побудов у межах сучасної трибології є співставними.

Мета роботи – розроблення нових гіпотез і положень, покликаних усунути недосконалість уявлень про природу тертя.

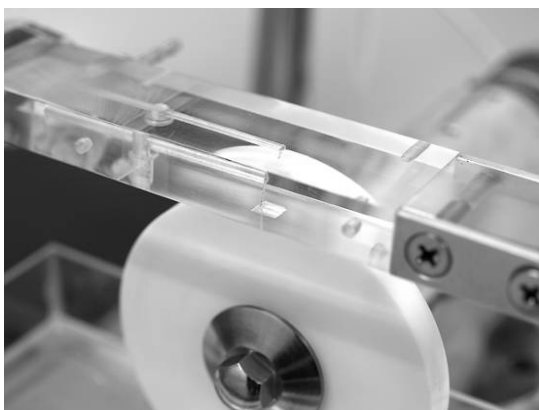
У науково-дослідній лабораторії нанотриботехнологій Національного авіаційного університету під керівництвом О.Ф. Аксьонова проводяться дослідження трибосистем в

умовах граничного змащення, явищ і закономірностей, що супроводжують тертя.

Висунута в 2008 р. гіпотеза компресійно-вакуумної природи тертя [12; 13] експериментально підтверджується, однак потребує більш глибокого вивчення. Для цього були розроблені та використані оригінальні лабораторні машини тертя одностороннього ковзання з оптично прозорим лінійним контактом (рис. 1). У них передбачена можливість змінювати швидкість ковзання й осьове навантаження поверхонь тертя, що дозволяє реалізувати гідро- та еластогідродинамічний режими та тертя в умовах граничного змащення.



а



б

Рис. 1. Машина тертя ковзання з верхнім положенням контакту:

а – схема;

б – трибівузол

Конструкція стенда

Як модель вала використано фторопластовий ролик (зовнішній діаметр 80 мм, ширина 9 мм), а плоский нерухомий паралелепіпед, що моделює контртіло, виготовлено з оптично прозорого матеріалу (неорієнтоване органічне скло).

У середовищі атмосферного повітря робоча поверхня, що утворює циліндр ролика, у процесі стиснення контактує з плоскою поверхнею прозорого паралелепіпеда, візуалізуючи площадку контакту.

Протяжність такого контакту відповідає ширині ролика 9 мм, а його ширина за осьової сили стиснення 4 Н становить 0,7 мм, і за 40 Н близько 0,8 мм.

Як основне модельне мастильне середовище використовували авіаційний гас ТС-1 – прозору, малов'язку рідину, що виключає за малих швидкостей ковзання (0,2–0,8 м/с) і малих навантажень (1–10 Н) виникнення режиму гідродинамічного безконтактного тертя.

Лінійна швидкість ковзання варіювалась з плавною зміною від 0,2 до 0,9 м/с. Осьове навантаження змінювалось від 4 до 200 Н.

Після установа лінійного контакту навколо нього утворювалась симетрична відносно лінії контакту пляма гасу за рахунок змочування ним поверхонь (рис. 1).

У попередніх експериментах [12] шорсткість робочої поверхні ролика припускали $R_a < 20$ нм. У подальших дослідженнях [13] використовували зразки з великими нерівностями ($R_a < 0,8$ мкм).

Візуалізація процесів у контактній зоні

За поведінкою шарів гасу, внесених роликом у зону контакту, під час тертя повз нижню грань прозорого контртіла, спостерігали через його бокову й верхню грані за певного освітлення (рис. 2).

Як видно з рис. 2, шари гасу подаються роликом у зону контакту й частково обтікають краї. На поверхні контртіла макропоток зникають за контактом так, що пляма змочування зміщується в бік, зворотний напрямку ковзання.

Після стабілізації швидкості обертання та підсвічування зони контакту під певним кутом відбувається безперервне інтенсивне струминне витікання гасу з зони контакту в напрямку, зворотному обертанню.

На виході ролика з контакту візуально спостерігається неперервна інтенсивна течія гасу в напрямку контакту, тобто у напрямку, зворотному ковзанню. Лінії течії гасу показано на рис. 2, *a*.

Збільшення швидкості ковзання ролика по поверхні паралелепіпеда призводить до значного зсуву контактної плями гасу в бік, зворотний напрямку обертання.

Неоднорідності течії гасу «з контакту» на вході ролика в контакт і «в контакт» на виході ролика з контакту стають більш помітними. Те саме відбувається й у разі збільшення навантаження за сталої швидкості ковзання.

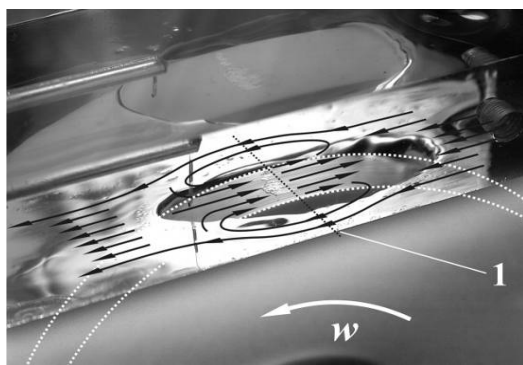
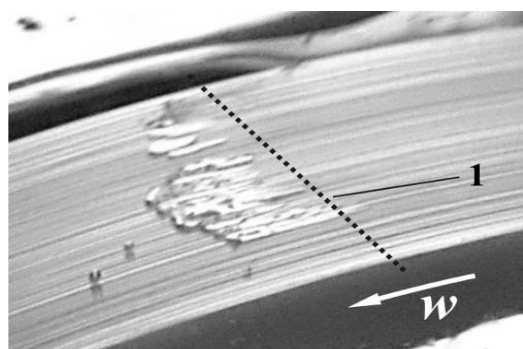
*a**б*

Рис. 2. Лінії току рідини в контактній зоні при терті ковзання ролик на плоскій грані контртіла (*a*) й утворення кавітаційних порожнин і пухирців у дифузійній ділянці лінійного контакту «ролик–контртіло» (*б*):
l – середня лінія контакту поверхонь

У разі плавного підвищення швидкості ковзання до 0,3 м/с у зоні виходу ролика з контакту в шарах гасу спостерігається утворення газових пухирців, які, переміщаючись у напрямку ковзання, вносились рухомою поверхнею ролика на відстань 5 мм від контактної ділянки й потім зникали.

Рух газових пухирців (рис. 2, *б*) біля контакту здійснювався в напрямку ковзання, але проти струминної течії гасу, напрямленої зворотню – «в контакт».

Пухирці хаотично утворюються по всій ширині лінійного контакту в системі «ролик–контртіло» внаслідок кавітації гасу.

Для гасу ТС-1 за температури 20 °С тиск пари, що перебуває в стані динамічної рівноваги з рідкою фазою, становить 919,9 Па за відношення об'єму рідини до об'єму пари 4:1. Розрідження в зоні виходу ролика з контакту вже за швидкості 0,3 м/с та осьового навантаження 4 Н є суттєвим, і в цій ділянці відбувається вакуумування прилежових шарів до тиску 919,9 Па. Подальше збільшення швидкості ковзання призводить до інтенсифікації формування пухирців, наступного їх злиття і виникнення парогазових порожнин. Останні, осцилюючи у напрямку ковзання, мають витягнуту форму, схожу на «язики полум'я» (рис. 2, *б*) з основою біля середини ділянки контакту.

У процесі зміни напрямку ковзання потоки гасу в зоні контакту також змінюють напрямок руху у протилежному ковзанню напрямку. Зміна напрямку ковзання зумовлює симетричну зміну напрямку контактних течій середовища.

Визначення розподілу тиску в контакті

Для дослідження розподілу тиску в контактній ділянці у контртілі створено канали з виходом на поверхню контактної взаємодії у вигляді отворів або щілини, що слугують зондом вимірника тиску в змащувальному шарі. Передбачено сканування ділянки контакту зондом.

Тиск у шарі гасу вимірювали в середній частині контактної зони по нормалі до його середньої лінії за допомогою резистивних датчиків тиску МДД-ТЕ 0-1. Крок зондування в площині контактної зони – 0,05 мм.

Результати вимірювань (рис. 3, а) показали, що тиск гасу на вході ролика в контакт починає зростати за 2 мм до початку контакту контртіла з роликом.

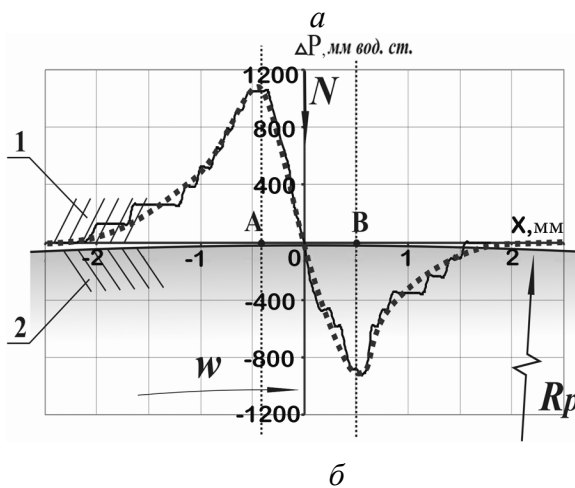
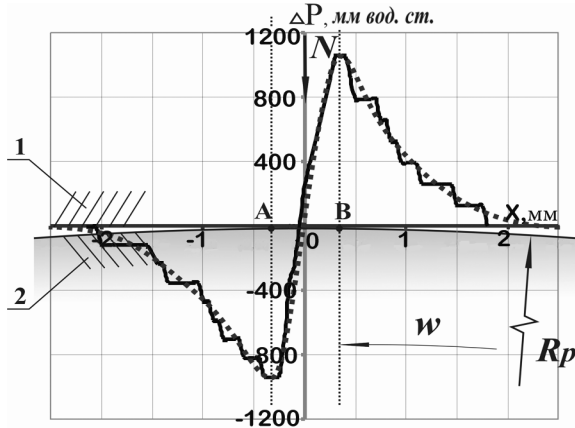


Рис. 3. Розподіл перепаду тиску в примежових шарах гасу ТС-1 відносно атмосферного ΔP :
 а – обертання за годинниковою стрілкою;
 б – обертання проти годинникової стрілки;
 1 – контртіло;
 2 – ролик

Біля передньої кромки контакту на вході, досягнувши максимуму понад 1000 мм вод. ст., тиск стрімко падає й поблизу середини контакту знижується до атмосферного. Далі в зоні виходу ролика з контакту відбувається розрідження з екстремальним тиском нижче від атмосферного (близько 1000 мм вод. ст.), а також на самому краю контакту, на виході ролика.

На відстані близько 2 мм від контакту тиск гасу плавно підвищується та вирівнюється з атмосферним.

Різницю між виміряним і атмосферним тисками по координаті сканування X перпендикулярно контакту під час ковзання показано на рис. 3, де A, B – ширина лінійного контакту контртіла 1 і ролика 2 з радіусом R_p , ω – частота обертання, N – осьова сила стиснення, X – координати сканування.

Аналогічні вимірювання, проведені за рівними умовами, але з протилежним напрямку ковзання (рис. 3, б), показують симетричну інверсію параметрів, що свідчить про закономірний зв'язок контактних течій примежових шарів із напрямком ковзання. Тобто на вході в контакт відбувалося підвищення тиску гасу, а на виході з нього – зниження відносно атмосферного.

Зміна напрямку ковзання супроводжується зміною знаку перепаду тиску примежових шарів гасу ΔP , який за величиною майже не змінюється відносно середини контакту системи «ролик–контртіло» (рис. 3, б). Візуально лінії течії також змінюють напрям у протилежний бік.

На вході ролика в контакт із контртілом тиск гасу збільшується і біля самої кромки контакту досягає свого максимуму, а в середній частині – різко зменшується до атмосферного.

На виході ролика з контакту також стрибкоподібно відбувається зниження тиску сканованих шарів гасу до мінімуму. У міру віддалення зонда від нього починається плавне підвищення вимірюваного тиску до тиску навколишнього середовища.

Зниження тиску мастильного середовища в дифузійній ділянці контакту трибосистеми ковзання може досягати значень тиску насиченої пари, що призводить до часткової або повної деструкції примежових шарів мастила в пристінних шарах.

Деструкція примежових шарів в умовах сильного зниження тиску в них, імовірно, і є основною причиною утворення ділянок сухого тертя, що призводить до виникнення «містків схоплювання» поверхонь тертя.

Припустимо, що молекулярна або адгезійна складова сили тертя (99% від сумарної сили тертя), що виникає на трибоконткті з граничним змащенням, є наслідком зниження тиску середовища між поверхнями, що рухаються в напрямку дифузійної частини контактної зони.

Якщо унеможливити зниження тиску середовища між поверхнями тертя в умовах примежового змащення трибосистема ковзання стане майже беззною.

Течії і розподіл тиску (симетричне підвищення та зниження відносно мінімального зазору) спостерігаються в рідких середовищах і в середовищі задимленого або чистого повітря. Вони виникають під впливом нано- і мікронерівностей на поверхнях вала та контртіла, що перебувають у контакті або розміщенні з деяким зазором (без контакту).

Таким чином, виникнення вторинної течії середовища, зворотню напрямку тертя зумовлено підвищенням тиску в утворюваному в напрямку обертання ролика в конфузорному каналі та симетричному відносно мінімального зазору або середини контакту розрідженням у дифузорному каналі. У цьому випадку тертя в контакті відбувається внаслідок опору навколишнього середовища деформаціям – компресії або стисненню та вакуумуванню або розтягання.

Контактні й безконтактні вторинні течії та розподіл тиску в примежових шарах середовища спостерігались у воді, середовищах авіаційного гасу ТС-1, диалкілбензольного мастила, вакуумного мастила ВМ-6, у моторних, трансмісійних та інших технічних мастилах [13].

На вході ролика в контакт А (рис. 3) зі збільшенням лінійних швидкостей ковзання (0,2–0,8 м/с) сила тертя та підвищення тиску шару мастила збільшуються, а максимум його досягає 1 атм., тобто на порядок більший, ніж у середовищі гасу. В'язкість цього мастила також на порядок більша, ніж у гасу.

За постійної лінійної швидкості ролика 0,86 м/с і зі збільшенням осьового навантаження у 2,5 рази (4–10 Н) сила тертя збільшується.

Тиск гасу у конфузорній ділянці контакту підвищується з 1400 до 3700 мм вод. ст., тобто приблизно у 2,5 рази.

Сила тертя ковзання зростає пропорційно збільшенню надлишкового тиску середовища в конфузорній ділянці контакту за напрямком руху валу, який, у свою чергу,

зростає зі збільшенням в'язкості середовища, осьового навантаження і лінійної швидкості ковзання.

Отже, сила тертя ковзання є інтегральним результатом процесів, що відбуваються у примежових шарах мастила в конфузорно-дифузорних порожнинах контакту. При цьому в дифузорній ділянці контакту В (рис. 4), тобто в ділянці зниження тиску характер розподілу тиску суттєво відхиляється від симетричного (пунктир), як це відбулося в гасі.

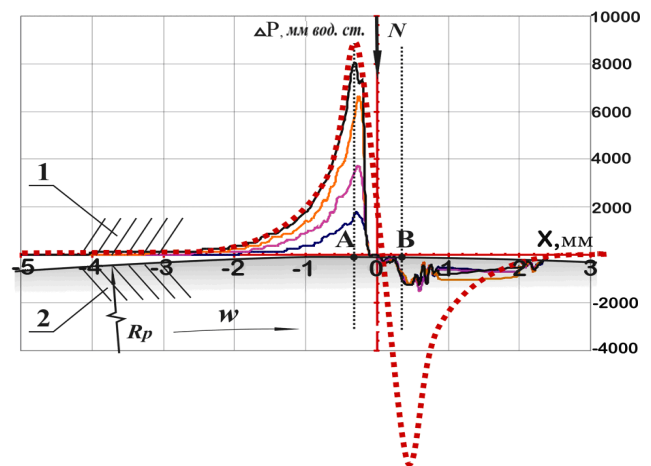


Рис. 4. Розподіл перепадів тиску ΔP у примежових шарах диалкілбензольного мастила за різних швидкостей ковзання:

1 – контртіла

2 – ролик

Це пояснюється особливостями поведінки рідини в умовах зниженого відносно навколишнього середовища тиску, коли вона скипає й переходить у двофазний стан, а також недосконалістю техніки вимірювань у розглянутих експериментах.

На підставі отриманих експериментальних результатів досліджень і висунутої гіпотези компресійно-вакуумної природи тертя [12; 13] виявлено контактні процеси, які відбуваються в умовах тертя підшипника ковзання в мастильному середовищі.

У разі повільного зближення обертового ролика з нерухомою поверхнею плоского контртіла в момент утворення механічного контакту різко підвищуються сили тертя та тиску в конфузорній зоні та знижується тиск у дифузорній ділянці контакту.

У процесі руйнування контактних поверхонь не відбувається. У момент утворення пружного трибоконтакту різке підвищення сили тертя спричинено стрибкоподібним підвищенням надлишкового тиску біля самої кромки контакту в конфузурній зоні та симетричним зниженням – в дифузурній.

Візуально спостерігається стрибкоподібне прискорення потоків середовища (за напрямком обертання): із зони на вході ролика в контактну ділянку із неї – на виході ролика. Це пояснюється тим, що під час пружного деформування поверхонь тертя, розділених примежовими шарами мастила, в конфузурній зоні контактної ділянки за напрямком обертання ролика COF відбувається пружно-контактне стиснення та прискорення вторинної течії примежових шарів мастила у напрямку, зворотному руху ролика (рис. 5).

Таке прискорення зумовлено додатнім градієнтом тиску в мастильному шарі від атмосферного до величини максимального

контактного тиску, що відповідає максимальним контактним напруженням на поверхнях елементів трибопари.

За ділянкою максимальних напружень OO_1 в дифузурній ділянці виходу ролика з контакту ODE відбувається пружно-контактне розширення збіднених примежових шарів попереднім видавлюванням на ділянці COF і прискорена вторинна течія рідини з об'єму середовища у контакт.

Перед входом вала в контакт (рис. 5) на ділянці $CFAC$ в конфузурній частині контакту примежових шарів рідкого середовища A до перерізу OO утворюються вторинні гідравлічні течії середовища, направлені в бік, зворотний руху вала. Вони спричинені компресією набіглих адсорбованих на поверхні ролика шарів мастила, що рухаються разом із ним у напрямку контактної зони з максимальною швидкістю, рівною лінійній швидкості ковзання \vec{v}_l обертової поверхні, що утворює циліндр ролика.

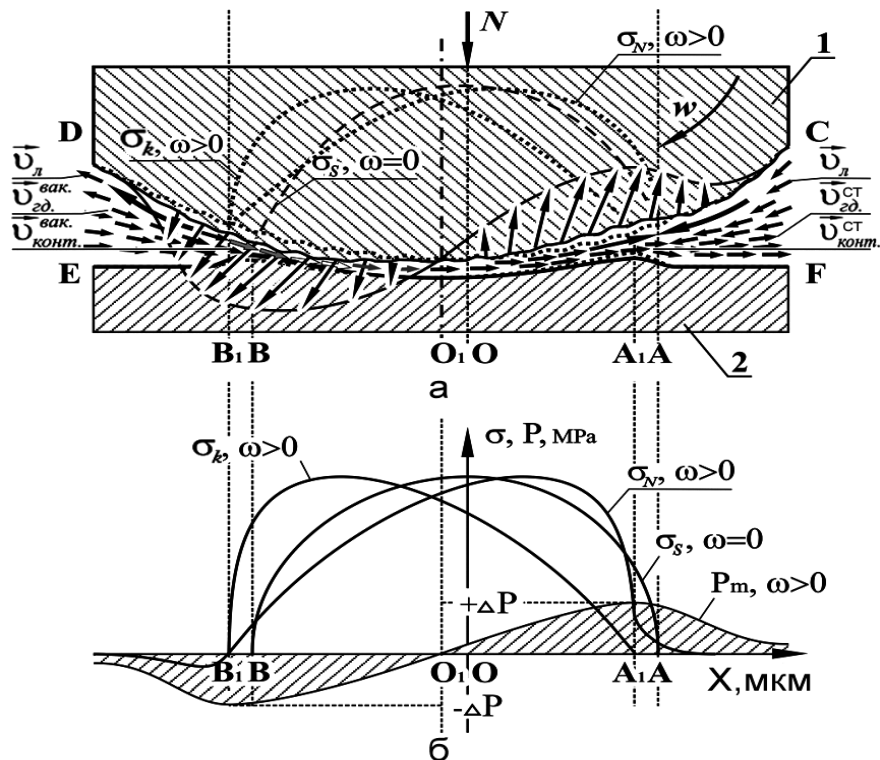


Рис. 5. Схема утворення контактних зустрічних компресійних і вакуумних течій примежових шарів мастила:

a – ковзання «ролик 1 – контртіло 2»;

б – розподіл напружень

Вторинна гідродинамічна течія, зворотна напрямку руху ролика, виникає на значній відстані від контактної зони. Вона утворюється під дією пружних деформацій примежових шарів, тобто стиснення в конфузорній приконтактній ділянці $CFAC$, зумовленого геометричним звуженням каналу, напрямлено в бік, зворотний руху ролика зі швидкістю $\vec{v}_{\text{гд}}^{\text{ст}}$.

Експериментально це спостерігається та фіксується за допомогою вимірювального зонда тиску під час обертання вала поблизу плоскої поверхні контртіла в рідкому та газоподібному середовищах.

У процесі прикладення осьового навантаження N до обертового вала виникає механічний пружний контакт AB з примежовими шарами середовища між стисненими поверхнями (рис. 5).

У трибосистемі ковзання «ролик 1 – контртіло 2» утворення контактних зустрічних компресійних і вакуумних течій напрямлено зворотно ковзанню. Зсув області контакту AOB відбувається в напрямку ковзання в зону $A_1O_1B_1$.

Розподіл контактних напружень на поверхнях тертя σ_s без руху ($\omega = 0$), розподіл тиску в примежових шарах мастила P_m в умовах тертя ($\omega > 0$), сумарний гідродинамічний тиск граничного мащення і контактних напружень, що виникають між контактуючими поверхнями σ_k в умовах тертя ($\omega > 0$), сумарне поле реактивних напружень, діючих нормально тільки на поверхню рухомого ролика σ_R в умовах тертя ($\omega > 0$), показано на рис. 5, б.

У конфузорній частині контакту AO виникає зворотна течія примежових шарів середовища з ділянки мінімального зазору OO_1 і відповідно максимального одноосного тиску стиснення σ_{max} до кромки входу вала в контакт AA_1 , де тиск перевищує атмосферний на величину ступеня стиснення примежових шарів у приконтактній конфузорній зоні $CFAC$.

Ця вторинна контактна течія реалізується примусово, починаючи від зони входу ролика в контакт AA_1 , тобто від кромки торкання деталей з примежовими шарами середовища до зони OO_1 з максимальними контактними напруженнями σ_{max} , тобто з ділянки мінімального зазору пристінних примежових шарів мастила.

Зазначені течії зворотного компресійного струменя OA і набіглих адсорбованих шарів мастила CA біля передньої кромки контакту A_1A входять у зіткнення. Відбувається процес, подібний до відомого в гідродинаміці гідравлічного тарана, але на відміну від класичного – однократного – гідротаран у розглянутому випадку – безперервний.

На виході ролика з контакту за напрямком ковзання в ділянці BB_1 також виникають протилежні гідродинамічні та контактно-гідродинамічні течії, але з вакуумуванням або розтяганням примежових шарів.

Адсорбовані шари на поверхні ролика з фрагментами мастила в мінімальному зазорі рухаються разом із поверхнею ролика від мінімального зазору OO_1 до виходу з контакту BB_1 зі швидкістю $v_{\text{л}}$. Цей збіднений попереднім видавлюванням примежовий шар опиняється в дифузорному каналі, що розширюється, проходячи шлях від зони OO_1 до BB_1 , де на шляху руху відбувається його розрідження, тобто вакуумування.

Вторинна дифузорна зворотна течія формується із середовища, що перебуває в об'ємі DBB_1E поблизу зазору BB_1 із тиском навколишнього середовища $P_{\text{атм}}$.

Біля самої кромки виходу ролика з контакту з площиною BB_1 фрагменти середовища спрямовуються з ділянки B_1E в зону зниженого тиску примежових шарів BB_1 зі швидкістю $\vec{v}_{\text{конт}}^{\text{вак}}$, звідки поверхнею ролика виносяться розріджені фрагменти середовища, які, у свою чергу, пройшовши шлях від зони OO_1 до BB_1 , під дією від'ємного градієнта тисків опинилися в дифузорному каналі.

Контактний «вакуумний» струмінь виникає з відносно спокійних фрагментів середовища, що під впливом атмосферного тиску

заповнюють зазор тангенціально до поверхні ролика, що виходить із контакту з контртілом у зоні BB_1 . Розріджений шар мастила на ролик біля самої кромки виходу з контакту рухається з поверхнею ролика в напрямку ковзання по шляху від ділянки OO_1 до BB_1 , утворюючи другу течію середовища. Ці дві течії, де переважає течія з об'єму в зазор біля вихідної кромки контакту BB_1 , спрямовані майже тангенціально до поверхні вала. У разі зустрічі вони призводять до зниження ступеня розрідження змащувальних шарів у ділянці BB_1 до тиску навколишнього середовища.

Зокрема, під дією високого контактного градієнта тисків $\sigma_{\max} - P_{\text{атм}} = 1,1$ МПа на відстані половини ширини контакту 0,4 мм виникає витікання фрагментів середовища з контактної зони зі швидкістю $\vec{v}_{\text{конт}}^{\text{ст}}$. Ця швидкість за приблизними розрахунками для гасу за навантаження 4 Н і швидкості ковзання 1 м/с становить 16 м/с. Якщо врахувати, що швидкість набігаючих шарів гасу близько 1 м/с, то біля кромки контакту відбувається зіткнення двох зворотно напрямлених потоків середовища з відносною швидкістю 17 м/с. Цей ефект визначає силу тертя ковзання, яка лавиноподібно виникає у разі повільного навантаження контакту.

У полі високих градієнтів тиску рідкокристалічні примежові шари мастила ведуть себе, як рідина.

Інтенсивне зменшення швидкості обертання вала, що супроводжується характерною зміною шуму електроприводів за плавного створення контакту змащених поверхонь шляхом повільного навантаження, спостерігається завжди. Це спричинено виникненням контактного пружно-деформаційного витікання примежових шарів мастила з контакту під дією зростаючого в напрямку руху надлишкового тиску на вході в контакт. А на виході з нього плин об'єму середовища в розріджені шари контактної дифузійної ділянки відбувається під дією атмосферного тиску.

Такий спільний вплив цих течій на примежові шари поверхні тертя у зворотному обертанні напрямленні ролика є причиною його інтенсивного гальмування, а не під дією адгезійної складової сили тертя, оскільки в разі первинного контактування ознаки поверхневого схоплення не спостерігається.

На рис. 5 вісь OO , що проходить через центр обертання ролика, до якої прикладено силу стиснення N вала 1 і контртіла 2, є геометричною віссю симетрії контакту AB , що виникає в статичних умовах ($\omega = 0$).

Під час обертання вала ($\omega > 0$) виникають зони підвищеного тиску на вході вала в контакт і розрідження середовища – на його виході з контакту. На цих ділянках створюються перепади тиску ($+\Delta P$ і $-\Delta P$) відносно тиску навколишнього середовища, тому основа епюр контактних напружень і напружень сил тертя зміщується в бік напрямку руху вала (вліво на рис. 5). При цьому контактні напруження, що розвиваються на поверхнях елементів трибопари σ_k за наявності сили стиснення N , будуть являти собою різницю контактних напружень, що виникають в епітропних шарах мастила і на поверхнях у статичних умовах (без руху вала) σ_s , і перепадів тиску ΔP , що виникають у шарах мастила під час руху вала:

$$\sigma_k = \sigma_s - \Delta P \quad . \quad (3)$$

Таким чином, контактні напруження σ_k в умовах тертя ковзання будуть зміщуватися в бік напрямку руху вала, тобто в зону зниженого тиску, як показано на рис. 5.

Сили тертя будуть визначатися нормальною й тангенціальною проекціями утворених на поверхнях елементарних реакційних напружень σ_N , які в, свою чергу, являють собою суму контактних поверхневих напружень σ_s і перепадів тиску ΔP , що виникають у цих шарах під час руху вала:

$$\sigma_N = \sigma_s + \Delta P. \quad (4)$$

Основа епюри A_1B_1 напружень від дії сил тертя σ_N збігається з основою A_1B_1 контактних напружень σ_s , але сама епюра буде нахилена в зворотному обертанні вала напрямку, як показано на рис. 5.

Як видно з формул (3) і (4), у випадку повного розділення поверхонь примежовими шарами мастила контактні напруження σ_k і напруження від дії реакційних сил σ_N , що виникають симетрично на поверхнях тертя вала і контртіла, під час проектування їх на вертикальну вісь інтегрально будуть дорівнювати напруженням, що виникають на робочих поверхнях, коли ті перебувають у стані спокою, урівноважуючи дію зовнішньої сили стиснення N .

Епюри контактних напружень σ_k і напружень впливу реакційних сил σ_N нахилені в різні боки. Тобто поверхні в зоні розрідження ЕРК-шарів будуть більше навантажені, ніж в зоні підвищеного тиску.

З огляду на закон адитивного додавання первинних сил сила тертя ковзання між валом і контртілом має: гідромеханічну складову сили тертя або силу внутрішнього тертя, яка описується співвідношенням Ньютона

$$f_{\text{гм}} = -\eta_{xy} \nabla v_y$$

та зв'язує силу внутрішнього тертя F_x , діючу на одиничну площадку в напрямку, протилежному градієнту швидкості течії в'язкого середовища (газу, рідини) з градієнтом швидкості ∇v_y за допомогою коефіцієнта динамічної в'язкості середовища η_{xy} . Тобто тонкий шар мастила, що рухається зі швидкістю \vec{v}_d , долає опір шарів середовища ($\vec{v}_\infty = 0$) з тангенціальною деформацією.

Сила внутрішнього тертя, що виникає під час руху тіла в середовищі з необмеженим об'ємом, тобто без будь-яких перешкод, значною мірою визначається товщиною структурно-чутливих примежових шарів середовища $h_{\text{сч}}$. Ця товщина визначається відстанню по нормалі від поверхні до тих шарів середовища, в яких руху майже не відбувається. При цьому враховується форма тіла, об'ємна в'язкість середовища η_0 і швидкості руху кожного фрагмента поверхні вала S_Σ .

Сили внутрішнього тертя є гідродинамічними силами, що спричинені лише опором середовища деформації від руху в ній твердого тіла.

Гідродинамічна складова сили тертя виникає навіть за відсутності безпосереднього контакту, що за наявності поблизу рухомої поверхні вала деякої поверхні, наприклад, нерухомої плоскої поверхні або підшипника ковзання. Вона виникає за рахунок гальмування набіглих з валом примежових шарів середовища зі швидкістю \vec{v}_d , що стікають із конфузорного зазору і рухаються у зворотного напрямку відносно викликаних гідродинамічною конфузорною деформацією стиснення течій зі швидкістю $\vec{v}_{\text{гд}}^{\text{ст}}$.

У дифузорній частині зазору в напрямку руху поверхні відбувається ковзання витічних із зазору розріджених примежових шарів мастила по шарам мастила, що втікають у нього зі швидкістю $\vec{v}_{\text{гд}}^{\text{бак}}$ під дією тиску навколишнього середовища.

Контактно-гідродинамічна складова сили тертя ковзання виникає від дії контактної навантаження, що викликає пружну деформацію примежових шарів, пов'язану з високим додатним градієнтом тисків, що виникають у них від стиснення на рівні пружної деформації поверхонь на ділянці OA (рис. 5).

Такий деформаційний вплив на внесені в контакт примежові шари середовища призводить до їх прискорення в конфузорній частині контакту від перерізу O_1O до кромки входу вала в контакт у перерізі A_1A , де примежові шари поверхонь тертя виходять із контактної взаємодії, а швидкість $\vec{v}_{\text{конт}}^{\text{ст}}$ вторинної течії молекул ЕРК-шарів максимальна.

Тиск у перерізі A_1A обумовлений дією гідродинамічних передконтактних конфузорних деформацій стиснення примежових структурно-чутливих шарів, що призводить до їх течій із сумарною швидкістю $\vec{v}_d + \vec{v}_{\text{гд}}^{\text{ст}}$.

У дифузорній частині також виникає додаткова, зумовлена вакуумуванням ЕРК-шарів, вторинна течія, напрямлена з середовища в контакт і також у напрямку, зворотному руху вала зі швидкістю $\vec{v}_{\text{конт}}^{\text{бак}}$.

Коли розрідження в примежових шарах не перевищує граничного тиску, що зумовлює кавітацію в середовищі мастила, силу тертя F_T або опори обертанню вала можна визначити так:

$$F_T = f_{ГМ} + f_{ГД} + f_{КГД}.$$

Гідромеханічна складова $f_{ГМ}$ виникає внаслідок опору деформуванню середовища у процесі її вимушеного переміщення примежовими шарами, якому чинять опір прилеглі статичні шари.

Гідродинамічна складова сили тертя $f_{ГД}$ виникає на рухомій поверхні, наприклад, обертовій поверхні, що утворює циліндр вала під впливом іншої поверхні, наприклад, нерухомої плоскої стінки, розташованої на деякій відстані $h_{ГД}$.

Досвід показує, що відносно мінімального зазору або лінії контакту виникають дві зворотні руху вала вторинні течії:

- у конфузорній зоні від сили стиснення середовища $f_{ГД}^К$;
- у дифузорній зоні від сили розтягнення середовища $f_{ГД}^Д$.

Ці процеси призводять до виникнення відповідних складових гідродинамічних сил тертя

$$f_{ГД} = f_{ГД}^К + f_{ГД}^Д.$$

Контактно-гідродинамічна складова сили тертя $f_{КГД}$ виникає в контактні примежових шарів, що перебувають у пружно-деформаційному одноосьовому напруженому стані під дією сили стиснення.

У разі відносного переміщення примежових шарів у конфузорній і дифузорній зонах їх контакту виникають відповідні зони стиснення і розрідження середовища, викликані пружною деформацією матеріалів.

Під дією високоградієнтних контактних напружень у матеріалах виникають зворотні руху вала контактно-гідродинамічні вторинні течії.

Контактно-гідродинамічна сила тертя виникає і в контактні пружно-деформованих ЕРК-шарів у відповідних конфузорно-дифузорних зонах контакту ЕРК-шарів:

$$f_{КГД} = f_{КГД}^К + f_{КГД}^Д.$$

У разі адитивного характеру дії сила тертя

$$F_{Тр} = f_{ГМ} + \{ f_{ГД}^К + f_{ГД}^Д \} + \{ f_{КГД}^К + f_{КГД}^Д \}$$

під час ковзання вала на плоскій поверхні контртіла є сумою первинних сил гідромеханічного, гідродинамічного та контактно-гідродинамічного опору деформуванню середовища.

Висновки

1. Гідродинамічні ефекти тертя в режимі граничного мащення зумовлені утворенням ділянок із підвищенням та зниженням тиску в мастильному шарі. Перепад тиску на сторонах контакту спричиняє до виникнення струминних течій середовища проти напрямку обертання вала.

2. Зі збільшенням осьового навантаження, швидкості ковзання та в'язкості середовища збільшується ступінь стиснення середовища на вході в контакт і ступінь його розрідження – на виході з контакту. Зони підвищеного та зниженого тиску рідкого середовища є симетричними відносно лінії максимуму контактних напружень і перевищують протяжність контакту в декілька разів. Симетрія порушується після досягнення певних контактних напружень та/або швидкості ковзання, коли виникає кавітація в зоні контакту.

3. Підвищення в'язкості середовища супроводжується зростанням компресії на вході вала в контакт і відповідно розрідженням середовища на виході вала з нього.

4. В умовах граничного мащення відбувається перерозподіл контактного навантаження, спричиненого деформаціями стиснення й розтягнення примежових шарів мастила на відповідних ділянках контакту. Вузли тертя зношуються переважно в зоні низького тиску середовища, що слід враховувати на етапі їх проектування.

5. Зсув ділянки контакту трибосистеми ковзання зумовлений перерозподілом тиску в конфузійній та дифузійній зонах контакту. Моделюванням трибосистеми ковзання з лінійним контактом встановлено, що в паливних, масляних та інших гідравлічних системах поряд із гідравлічною та акустичною кавітацією відбувається трибокавітація – процес, що перебігає в дифузійних зонах вузлів тертя та призводить до локального зниження тиску в середовищі до значень, близьких до мінімальних тисків порога кавітації.

6. Умови контактування двох змащених поверхонь, стиснутих деякою осьюовою силою, визначаються пружністю деформації примежових шарів рідини.

7. У контакті властивості змащувального середовища в статичних умовах навантаження подібні до пружного твердого тіла, а в умовах високих контактних градієнтів тиску та швидкостей – до рідини.

8. Гіпотеза компресійно-вакуумної природи тертя і зношування поєднує гідродинамічні, еластогідродинамічні уявлення та процеси тертя в умовах граничного мащення.

Література

1. *Воларович М.П.* Основоположник гидродинамической теории смазки машин / М.П. Воларович, Н.П.Петров // Трение и износ в машинах: тр. Второй всесоюз. конф. по трению и износу в машинах. – Москва-Ленинград: изд-во АН СССР, 1949. – Т. III. – С. 5–28.

2. *Петров Н.П.* Трение в машинах и влияние на него смазывающей жидкости / Н.П. Петров. – СПб., 1883. – 212 с.

3. *Никитин А.К.* Гидродинамическая теория смазки и расчет подшипников скольжения, работающих в стационарном режиме / А.К. Никитин, К.С. Ахвердиев, Б.И. Остроухов. – М.: Наука, 1981. – 316 с.

4. *Коднир Д.С.* Контактная гидродинамика смазки деталей машин / Д.С. Коднир. – М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.

5. *Основы трибологии: учеб. для техн. вузов* / под. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.

6. *Справочник по триботехнике.* – В 3-х т. Т.1. Теоретические основы / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.

7. *Ахматов А.С.* Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.

8. *Крагельский И.В.* Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение. – 1977. – 526 с.

9. *Открытие СССР «Явление образования гомогенной граничной жидкокристаллической фазы немезогенной жидкости»* / Б.В. Дерягин, Ю.М. Поповский, Б.А. Алтоиз. – Диплом №388. // Открытия и изобретения. – 1991. – № 12.

10. *Алтоиз Б.А.* Измерение параметров граничного слоя жидкости теплоносителя влияющих на интенсивность теплообмена / Б.А. Алтоиз, В.Т. Дейнека // Тепловые режимы и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры: науч-техн. сб. – Одесса, 2003. – Вып. 1. – С. 29–33.

11. *Лужнов Ю.М.* Нанотриботехнология сцепления колес с рельсами. Реальность и возможности / Ю.М. Лужнов. – М.: Интекст, 2009. – 176 с.

12. *Стельмах А.У.* Компрессионно-вакуумный механизм адгезионного трения и изнашивания / А.У. Стельмах. – К., 2008. – 28 с. – Деп. в ГНТБ Украины 07.07.2008, №109. – Ук 2008.

13. *Стельмах А.У.* Возникновение контактных струйных течений в условиях граничной смазки и механизм их образования / А.У. Стельмах. – К., 2009. – 43 с. – Деп. в ГНТБ Украины 14.04.09, №20. – Ук 2009.

Стаття надійшла до редакції 12.10.10.