

УДК 621.891

О.У. Стельмах, к.т.н., с.н.с.

КОМПРЕСІЙНО-ВАКУУМНА СКЛАДОВА СИЛИ ТЕРТЯ В УМОВАХ ГРАНИЧНОГО ЗМАЩУВАННЯ

Теоретично доведено та експериментально підтверджено наявність компресійно-вакуумної складової сили тертя в умовах граничного змащування.

In this article existence compression vacuum making force of friction in conditions of boundary greasing is theoretically proved and experimentally proved

Постановка проблеми

Сучасна трибологія містить ряд фундаментальних основних концепцій, положень і теорій тертя та зношування в умовах граничного змащування високо- і низькомолекулярними вуглеводневими рідинами [1–8].

Визнаною в науці є молекулярно-механічна або адгезійно-деформаційна теорія тертя і зношування [3; 4], в основу якої покладено гіпотезу про двоїсту природу тертя. Згідно з цією теорією макросила тертя $F_{\text{тер}}$ включає дві основні складові: механічну або деформаційну $F_{\text{деф}}$ та молекулярну або адгезійну $F_{\text{адг}}$:

$$F_{\text{тер}} = F_{\text{адг}} + F_{\text{деф}}. \quad (1)$$

Дослідження співвідношення адгезійної та деформаційної складових сили тертя показали, що в умовах граничного змащування перша молекулярна складова (1) більша від механічної у 10 000 разів за В. Гарді [4], а за даними І.В. Крагельського [5] – у 100. Тобто деформаційна складова становить не більше 1 % макросили тертя, вимірюваної апаратно. Це означає, що домінуючим при терті в умовах граничного змащування є процес адгезійної взаємодії робочих поверхонь.

Процес зношування, викликаний двома основними контактними процесами (адгезією і деформацією), також має двоїсту природу: зношення внаслідок адгезійної взаємодії поверхонь тертя супроводжується зменшенням маси і відповідно об'єму робочих деталей з утворенням продуктів зношування, а зношення деформаційне характеризується пластичною та пружно-пластичною деформацією поверхонь з відповідною зміною геометрії без зменшення маси.

Пластичний контакт трибосистем, який приводить до лінійної формозміни, виникає з першим прикладенням навантаження. І під дією повторного навантаження і подальшого тертя деформація має бути пружною.

Пластична течія поверхонь тертя неприпустима, інакше була б неможливою нормальна робота вузла тертя. У результаті зношування матеріалу поверхонь тертя у змащувальному середовищі завжди утворюються продукти зношування, які виносяться з контакту гідродинамічними потоками мастила за певною траєкторією та накопичуються у віддалених від контакту областях [1; 3]. Отже, зношування матеріалу поверхонь тертя має адгезійну природу й відбувається під дією визначених силових процесів у фрикційному контакті.

Постановка завдання

Якщо послідовність процесів адгезійного тертя розглядати як «первинна адгезія» → «первинне зношування» → «вторинна адгезія» → «вторинне зношування» → «третинна адгезія» → і т. д., то якщо не буде первинних сил адгезії, тертя відбуватиметься без зношування. Тому розуміння механізму виникнення сил, які породжують первинне матеріальне зношування поверхонь тертя – ключова задача трибології граничного змащування.

Виклад основного матеріалу досліджень

Тертя в умовах граничного змащування принципово відрізняється від інших режимів (газо- та гідродинамічного, еластогазо- і еластогідродинамічного) тим, що тільки в цьому режимі виникає адгезійна складова сили тертя, яка призводить до зношування матеріалу поверхонь тертя з утворенням продуктів зношення. Термін «адгезія» (лат. *adhaesio* – прилипання) широко використовують у різних галузях знань (медицині, біології, хімії, фізиці та ін.), відповідно він має різне смислове навантаження. Тому для тертя поняття «адгезія третьових поверхонь» слід визначати як трибоадгезію, а режим «тертя в умовах граничного змащування» – як «адгезійне тертя», яке завжди супроводжується «адгезійним зношуванням».

Адгезійне зношування під час тертя відбувається також за мікрорізання, наприклад, тертя дуже шорстких поверхонь (сталь ШХ15, 59...62 HRC, $R_a = 0,5$ мкм) з відповідними навантаженнями (100 МПа) і швидкістю (0,3 м/с) у відповідному середовищі (авіагас РТ). У цьому випадку різання й адгезійне тертя відбуваються одночасно й внесок кожного з них у вимірювану силу тертя невідомий. Тому, експериментально вивчаючи трибоадгезію, слід створювати такі умови, коли повністю виключається навіть можливість виникнення режиму мікрорізання, з одного боку, та еластогідродинамічного тертя – з другого.

Вирішення проблеми зношування в трибології граничного змащування зводиться до зменшення адгезійної складової сили тертя через розроблення нових способів, методів і технологій, ґрунтуючись на теоретичних уявленнях про її природу, особливо в найперших моментах її виникнення.

Адгезійна складова сили тертя в умовах граничного змащування різними дослідниками [1–11] трактується по-різному і часто – суперечливо. Так само немає спільної думки щодо механізму зношування. Встановлені експериментальні ефекти, які не пояснюються теоретичними уявленнями про трибоадгезію, ймовірно, пов'язані з такими процесами, які об'єктивно протікають у фрикційному контакті і раніше не враховувалися. Для моделювання процесу тертя в умовах граничного змащування вибрано схему Тімкена, за якою контрзразок (циліндр діаметром 35 мм і товщиною 3 мм) проводив одностороннє тертя ковзання по плоскій нерухомій поверхні зразка (рис. 1).

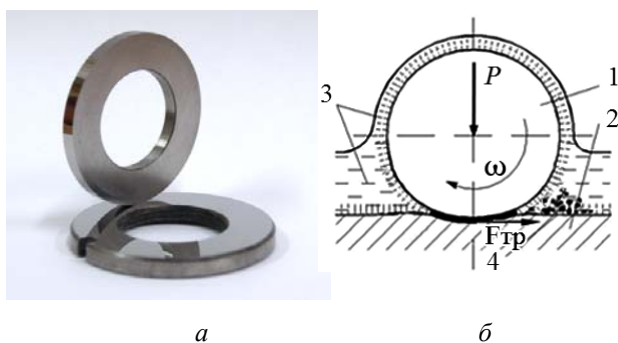


Рис. 1. Модельна трибосистема ковзання (а), яка реалізує за схемою (б) адгезійне тертя поверхню, що утворює циліндр обертового ролика 1 по плоскій поверхні нерухомого зразка 2, у змащувальному середовищі 3 з утворенням продуктів зношування 4

Базовою машиною тертя було вибрано ПТЛК(о), матеріал зразків – сталь ШХ15, твердість 59–62 HRC, лінійна швидкість ковзання 0,3 м/с. Через полірування на робочих поверхнях формувалась шорсткість з параметром R_a не більше 0,02 мкм, тобто максимальна різновисотність мікрогеометрії R_{max} не перевищувала 40 нм. Осьове навантаження встановлювалось таким чином, щоб у середовищі змащування реалізовувалось трибоадгезійне тертя, тобто нормальне зношування поверхонь. Так, для авіаційних палив воно становило 250 Н, а для масел моторно-трансмісійної групи – 1250 Н, що відповідає розрахунковим максимальним контактним напружень 400 і 2000 МПа.

Під час визначення протизносних властивостей масел моторно-трансмісійної групи на машині тертя ПТЛК(о) за розрахункових початкових контактних напружень 2000 МПа у 95 % експериментів спостерігалась майже безносність, а в 5 % – зношеність плоского зразка перевищувала 20 мкм з похибкою вимірювань не більше 0,01 мкм [12]. Пошук причин надзвичайно великої похибки випробувань за інших рівних умов (швидкість ковзання, осьове навантаження, середовище, температура та ін.) привів до такого висновку: фактичний, тобто миттєвий контакт не є постійним через радіальні та осьові відхилення робочої поверхні контрзразка, які можна усунути лише на машині тертя спеціальної конструкції.

Таку машину тертя АСК-01 розробили та сконструювали, надавши три ступеня вільності контакту [13]. На ній в усіх експериментах спостерігалось утворення продуктів зношування в усіх випробовуваних середовищах, а температура середовища, що розвивалась тертям, досягала 100...120 °С, тобто реалізовувався режим адгезійного тертя. При цьому однозначно було доведено ефект зменшення зношення зі збільшенням питомих контактних тисків, який не пояснюється існуючими теоріями.

Мікроскопічні дослідження зношуваних доріжок тертя на плоскому зразку показали принципову відмінність характеру зношування в областях входу контртіла у контакт і виходу з нього.

Детальний розгляд доріжок тертя (рис. 2) під растровим електронним мікроскопом РЕМ-106ІІ зі збільшенням по полю зору до 100 000 крат різних доріжок ковзання після 1000 метрів шляху тертя дало змогу виявити таку загальну закономірність (рис. 2).

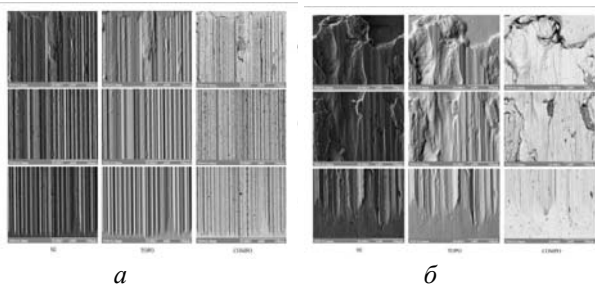


Рис. 2. Характер зношування в різних областях тертя: *a* – за осьового навантаження 500 Н; *б* – за навантаження 1300 Н на різних режимах РЕМ

Поверхня, утворююча циліндр контрзразка, що ковзає в області входу в контакт, завжди створює на поверхні плоского нерухомого зразка поздовжні паралельні борозни в напрямку тертя. Вони мають різну ширину, рівні краї і дуже нагадують мікрорізання або дряпання.

На поверхні доріжки ковзання в області виходу контрзразка з контакту завжди спостерігаються вириви, каверни та налиплі фрагменти матеріалу, тобто, за молекулярно-механічною теорією, внаслідок розриву адгезійних зв'язків, утворених раніше. Вириви матеріалу з поверхні тертя в області виходу спостерігались завжди, а їх площа залежно від навантаження та тривалості тертя становила 5...50 % від усієї площі доріжки тертя. При цьому на вході в контакт ознак утворення й наступного розриву у вигляді каверн ніколи неспостерігалось.

Отже, адгезійна взаємодія поверхонь тертя на доріжці відбувається переважно в зоні виходу контрзразка з контакту з нерухомим зразком.

Численні дослідження виявили ряд експериментальних фактів, які не вдається чітко пояснити з позицій відомих теорій, гіпотез і концепцій [1–11].

1. Сліди розривів адгезійних містків зварювання матеріалу (каверни та раковини) виникають у зоні виходу контрзразка з контакту і ніколи не спостерігаються на вході в контакт, хоча умови тертя нібито однакові як на вході, так і на виході контрзразка з контакту.

2. Під дією високих питомих тисків (2000 МПа) та за рухомого фактичного контакту за рахунок радіально-осьових відхилень контрзразка зношування майже немає, а під дією малих навантажень (500 МПа) і за стабілізованих миттєвих контактних напружень зношування відбувається досить інтенсивно.

3. Вимірювана сила тертя утричі більше ніж сили адгезії поверхонь тертя після припинення тертя ковзання.

4. Продукти зношування завжди накопичуються в області входу контрзразка в контакт у напрямку, зворотному тертю.

Пояснити такі результати можна лише ретельно досліджуючи всі фактори, що зумовлюють адгезійне тертя, як окремо, так і в сукупності. Отже, тертя відбувається в контакті двох поверхонь, розділених змащувальним середовищем.

Механізм виникнення фрикційного контакту реальної поверхні з абсолютно жорстким та ідеально гладким прозорим півпростором моделювався з використанням лазерного скануючого диференційно-фазового мікроскопа (ЛСМ) з чуттєвістю за профілем 1 нм [14] і сучасним програмним апаратом Microterm 12.1. Вихідна поверхня з різновисотністю 20...40 нм мала рельєф з опорною площею виступів, яка значно перевищує сумарну площу впадин, тобто за Ахматовим А. С. [4] поверхня мала каньйоноподібний вигляд (рис. 3).

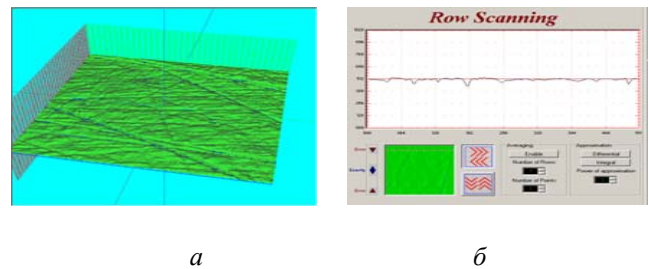


Рис. 3. Тривимірне зображення поверхні тертя на ЛСМ (*a*) і один з її каньйоноподібних профілів (*б*)

У статичних умовах збільшення зусилля стиснення призводить до збільшення фактичної площі контакту вершин під дією пружних деформацій. Тривимірне зображення цієї поверхні на ЛСМ і моделювання процесу пружної деформації під час стиснення (рис. 3) показало, що під час дотику полірованих поверхонь зі збільшенням стискаючої сили завжди настає момент, коли під дією навіть незначних пружних деформацій контактуючих мікровиступів вони послідовно зливаються, утворюючи замкнені контури контактів.

Усередині таких контурів, замкнених поверхнями вершин, є впадини, які мають свою топографію. Саме такі замкнені між вершинами поверхонь порожнини впадин мав на увазі Боуден, говорячи про резервуари з мастилом [6]. Тобто сумарна площа контактуючих виступів стає більшою, ніж сумарна площа впадин, і контактуюча поверхня складається з безлічі «сот» різної форми, між стінками яких утворюються замкнені резервуари з рештками видавлюваного з контакту середовища.

Збільшення питомих напружень і класу чистоти поверхні призводить до збільшення товщини стінок сот, опорної площі контактуючих виступів поверхонь і відповідно до зменшення об'єму резервуарів із середовищем.

Виходячи із зовнішнього вигляду доріжок ковзання на плоскому зразку (рис. 2), видно, що в області входу контрзразка в контакт з нерухомим зразком і в області виходу з нього протікають різні процеси на контакті поверхонь тертя.

Якщо розглянути дещо збільшений контакт контрзразка з плоским зразком (рис. 4) і припустити, що плоска нерухома поверхня ідеально гладка, а на тертьовій поверхні, яка утворює циліндр контрзразка, розташована одна впадина, то можливе протікання певних процесів.

Поверхня тертя обертового ролика, яка являє собою меандр впадин, змащена середовищем та перед входом в контакт в позаконтактній області С зазнає атмосферного тиску.

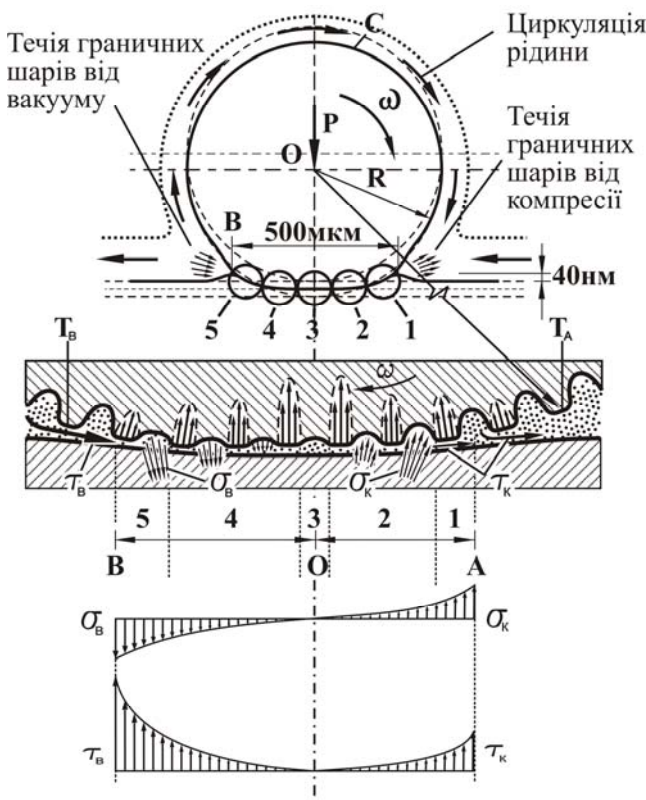


Рис. 4. Утворення вакуумних порожнин на виході з контакту:
 1 – область утворення замкнутих порожнин впадин;
 2 – область компресії замкнутих порожнин і видавлювання з них мастила;
 3 - область максимальної компресії замкнутих порожнин;
 4 – область вакуумування;
 5 - область декомпресії порожнин впадин біля самого виходу їх з контакту

На вході в контакт *AB* в області 1 (рис. 4) мікрівиступи піддаються інтенсивному стисненню, вони пружно деформуються, і з резервуарів мікроровпадин змащувальне середовище видавлюється в сусідні сполучені резервуари через зазори і канали рисок шорсткості. Площа контактуючих виступів за рахунок їх пружного деформування під час стискання стрімко зростає, і зі збільшенням контактного тиску, зливаючись, поверхні вершин виступів обов'язково замкнуться, утворюючи замкнені контури порожнини впадин зі змащувальним середовищем всередині.

Подальше здавлювання виступів в області 2 призведе до подальшого видавлювання змащувального середовища з впадин через контакти вершин у сусідні порожнини, звідти далі і далі, а потім – у змащувальне середовище за межі контакту, зменшуючи об'єм утвореного замкненого резервуара-впадини.

Отже, пружно-пластичне деформування виступів призводить до витискання мастила з порожнин, які розташовані позаду відносно напрямку ковзання, у сусідні впадини з меншим тиском, тобто повинна відбуватись течія середовища у зворотному напрямку руху контрзразка. Цей процес розпочинається в області входу поверхні контрзразка в контакт (рис. 4, область 1) і протікає в області 2 до області максимальних тисків 3.

Очевидно, що в областях входу контрзразка в контакт 1 і 2, в яких відбувається примусове видавлювання мастила з порожнин впадин через контактуючі виступи назовні утворюється сприятливий режим змащування, аж до області максимальних питомих тисків 3.

Далі в області виходу контрзразка з контакту 4 (рис.4) протікає зворотний процес: тиск на виступах контрзразка зменшується, об'єм резервуара починає зростати, тиск в утвореній порожнині падає до атмосферного і нижче. Тобто починається вакуумування середовища, яке залишилось у резервуарах впадин.

Через те, що у сусідніх резервуарах відбуваються такі самі процеси всмоктування середовища, то заповнювати впадини з розрідженим мастилом нічим. При цьому граничні приповерхневі шари середовища в контактах відіграють роль ущільнень у зазорах між контактуючими виступами вершин, які раніше утворили замкнену вакуумну порожнину.

Для роз'єднання двох поверхонь, що утворили в області контакту 5 замкнені вакуумні порожнини, необхідно ще збільшити їх об'єм, це призведе

до підвищення ступеня вакууму і, отже, до збільшення напружень, які стискають контактуючі вершини, з одночасним стрімким зменшенням напружень реакцій на осьове навантаження. Зворотний процес заповнення утворених вакуумних порожнин в областях 4 і 5 (рис. 4) за рахунок зменшення контактних напружень на вершинах та їх пружної релаксації утруднений, тому що молекули середовища з об'єму проходять той самий шлях, що й під час видавлювання в областях 1, 2 і 3, але в зворотному напрямку: з середовища поза контактом мастило повинно надходити під атмосферним тиском у порожнини крайові, торцеві, прилеглі, і тільки потім – у важкодоступні центральні.

Швидкість такого процесу порівнянна зі швидкістю руху вакуумованої порожнини. Якщо реальна довжина контакту становить приблизно 500 мкм, а лінійна швидкість ковзання – 0,3 м/с, то час на падіння напруження в контактних вершинах від 2000 МПа до атмосферного (0,1 МПа) і розвакуування утворених між ними порожнин має бути до $8 \cdot 10^{-4}$ с.

Ураховуючи високу інерційність і в'язкість рідин, заповнення деформованих порожнин впадин, які досить віддалені від меж контакту, за долі мікросекунд не відбудеться.

Розвантаження вершин в області 4–5 (рис. 4) протікає з інтенсивністю, приблизно рівною інтенсивності стиснення $2,4 \cdot 10^6$ МПа/с, відповідно ступінь вакуумування в резервуарах перед виходом виступів контртіла з контакту, припустивши, що мастило – нестиснювана рідина, теоретично може досягати $5 \cdot 10^{-5}$ МПа за такий самий короткий час ($8 \cdot 10^{-4}$ с).

Припустивши, що в резервуарах із залишками середовища за максимальних напружень стиснення вершин до 2000 МПа тиск в мастилi після видавлювання в області 3 стане атмосферним і з урахуванням того, що поверхні від тертя випромінюють теплові потоки з температурою близько 300 °С, то після релаксації вершин до атмосферного тиску за декілька мікросекунд в замкнених порожнинах може утворитись досить глибокий вакуум до $5 \cdot 10^{-5}$ МПа.

У таких умовах висока ймовірність трибоадгезії, тобто схоплення та відрив з однієї з поверхонь і налипання на іншу цілою контуру контактуючих виступів з вакуумованими впадинами навколо.

У наступному обертi під час входу в контакт частина утворених мікросхопленням налиплих мікрочастинок на поверхні контртіла підризується

нерухомою поверхнею на самісінькому вході та виштовхується компресійною течією в напрямку, протилежному ковзанню. Інша частина вирваних кластерів відіграє роль мікрорізців, і тому саме на вході в контакт спостерігається мікрорізання (рис. 2). У центрі та на виході з контакту знову протікає вакуумування впадин контрзразка, далі адгезія, налипання, підризання і т. д.

Якщо на вході в контакт середовище витискається з кожної впадини в напрямку, протилежному ковзанню, то має утворитись відповідна потужна течія рідини у вигляді струї в тому ж напрямку, проти ковзання і проти течії прошарків рідини, які підхоплюються поверхневими адсорбованими шарами молекул рідини з об'єму. Така сама зворотна течія граничних шарів рідини має бути і на виході з контакту за рахунок всмоктування рідини з об'єму вакуумованими протягом всього шляху контактування впадинами із залишками рідини.

Отже, повинні виникати примусові гідродинамічні потоки граничних шарів у зоні контакту, направлені в протилежний бік ковзання (рис. 4).

Для підтвердження або спростування висунутого припущення виникнення примусових течій граничних шарів у зворотному до тертя напрямку спільно з науковцем та фахівцем прецизійної техніки Бондарем В.С. був поставлений експеримент.

На поліровану поверхню, яка утворює циліндр ролика, виготовленого з фторопласту (діаметр 80 мм, висота 15 мм), було встановлено прозору плоску лінзу.

Ролик нижнім сегментом занурювався у ванночку з авіагасом.

Під час обертання ролика через прозору лінзу спостерігалось утворення лінійного контакту ролика з лінзою, яка зі збільшенням навантаження перетворювалась у прямокутну площадку.

Після стискання поверхонь силою 300 Н спостерігалась течія великого прошарку рідини, що омиває сам контакт, у напрямку ковзання. Під час такого тертя за лінійної швидкості ковзання 0,5 м/с в зону входу в контакт заводилась тонка шовкова нитка темного кольору.

Візуально чітко спостерігалось потужне виштовхування її з контакту назовні у торцеві області. Тобто потужна струминна течія граничних шарів авіагасу на вході в контакт відбувається в зворотному тертю напрямку. Якщо пробували завести нитку на вихід з контакту, вона не виштовхувалась, а всмоктувалась, утворюючи відповідну дугу, що вказує на течію рідини також у зворотному ковзанню напрямку.

При цьому збільшення навантаження на контакт призводило до збільшення потужності зворотних течій граничних шарів як на вході, так і на виході ролика з контакту.

Таким чином, ми вважаємо, що крім адгезійної та деформаційної сил тертя в умовах граничного змащування об'єктивно існують сили тертя контактно-гідродинамічних потоків граничних шарів з поверхнями, які слід враховувати в умовах граничного змащування і нехтувати ними неможна. Ці сили ми назвали компресійно-вакуумними, $F_{к.в.}$, які, очевидно, мають дві складові: компресійну $F_к$, яка виникає на вході контртіла в контакт, та вакуумну $F_в$, що виникає на виході. Ця компресійно-вакуумна складова сили адгезійного тертя повинна входити третім доданком у формулі (1) сили тертя:

$$F_{тер} = F_{адг} + F_{деф} + F_{к.в.}$$

Як показано на епюрах напружень (рис. 4), компресійно-вакуумна складова сили тертя $F_{к.в.}$ є результатом дії тангенціальних τ та нормальних σ напружень, які виникають під час течії високонавантажених граничних шарів змащувальної рідини і її терті з поверхневими адсорбованими мономолекулярними шарами.

Тангенціальний опір руху виникає під час тертя примусових тангенціальних протитечій граничних шарів середовища відносно руху поверхні тертя в області компресії 1, 2, 3 – $\tau_к$ (рис. 4) та в областях вакуумування 3, 4 і декомпресії 5 – $\tau_в$. Нормальні напруження опору тертя виникають в областях компресії 1, 2, 3 – $\sigma_к$ та в областях вакуумування 3, 4 і декомпресії 5 – $\sigma_в$. Вони направлені проти руху поверхні, який збільшує об'єм замкнутих порожнин впадин або «резервуарів» переміщенням контактуючих вершин, де змащувальне середовище відіграє роль ущільнення.

У разі адгезійного тертя (рис. 4) пружна деформація стиснення контактуючих виступів призводить до замикання їх у контурі з впадинами в середині, подальше стискання – до видавлювання з нього змащувального середовища назовні до зони максимальних напружень. Після цього починається релаксація вершинних контурів, що призводить до вакуумування раніше утворених «резервуарів» і їх опору розвакуумуванню змащувальним середовищем з атмосферним тиском у разі переміщення поверхонь одна відносно одної. Викладену гіпотезу далі називатимемо деформаційно-вакуумною.

В експериментальній трибології накопичено досить багато ефектів тертя: зменшення сили тертя у вакуумі; підвищення зносостійкості та зменшення сили тертя в пористих підшипниках ковзання; підвищення зносостійкості надзвичайно шорсткої поверхні під час ковзання по ній полірованою поверхнею; зсув валу у бік його ковзання в підшипнику ковзання; ефект кочення та ін., які можна пояснити з позицій висунутого в цій роботі деформаційно-вакуумного механізму адгезійного тертя.

Відомий ефект викрашування матеріалу під час кочення або пітингу, який характеризується лускатим відшаруванням матеріалу на поверхні в напрямку виходу з контакту тіла кочення, тобто у напрямку розвакуумування утворених замкнених порожнин.

На виникнення вакууму при пітингу (кавітаційне зношування), як на причину такого виду зношування, вказував німецький вчений Д. Кламанн у роботі [8, с. 50], про що у виносці редактор професор Ю.С. Заславський підкреслив досить суперечливу особисту трактовку автором механізму процесу пітингу. Механізм цього процесу розкритий далеко не повністю, його продовжують вивчати.

Звичайно, ця гіпотеза потребує більш глибокої доказової бази, що утруднено розмірами контактних фактичних порожнин (нанорівень), складністю потрапити в нього, не порушуючи умов адгезійного тертя.

Таким чином, адгезійне тертя в умовах граничного змащування, ймовірно, поряд з молекулярно-деформаційною, має й компресійно-вакуумну природу. Тому з цих позицій з'являються перспективи нових підходів вирішення проблем трибології граничного змащування.

Висновки

Під час стиснення двох шорстких поверхонь першими в контакт вступають вершини, які пружно-пластично деформуються під дією сил стиснення і утворюють «фактичні плями контакту» (рис. 5, поз. 1), за І.В. Крагельським [5].

Зі збільшенням навантаження стиснення також збільшується ступінь деформації, і фактична площа контакту (виступами і розташованими біля вершин зонами, а також іншими, меншими за висотою, виступами, які вперше вступають у контакт) буде зростати.

З подальшим збільшенням навантаження стиснення обов'язково настане момент, коли сумарна площа контактуючих виступів стане однаковою та/або більшою і навіть набагато більшою сумарної площі впадин.

Отже, за визначеного ступеня стиснення двох шорстких поверхонь завжди будуть утворюватися замкнені порожнини, обмежені контуром фактично контактуючих пружно-пластично деформованих вершин, які Боуден [6] називає міні-резервуарами.

Зі збільшенням тиску на контактуючих вершинах вони ще більше пружно деформуються, об'єм замкнених порожнин, заповнених мастилом, ще більше зменшується, і воно під тиском через стиснуті та замкнені в контури вершини видавлюється у сусідні порожнини (одну, другу і т. д.), де тиск менший, і через них назовні, головним чином у порожнини, які лишаються позаду відносно напрямку руху поверхні (рис. 5, поз. 2).

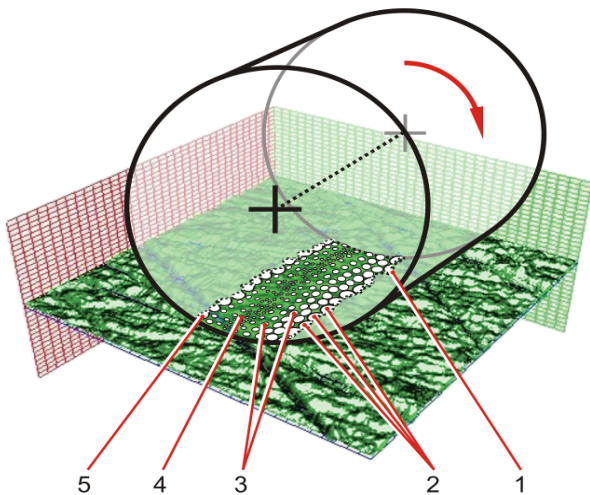


Рис. 5. Механізм виникнення компресійно-вакуумної складової сили адгезійного тертя:

- 1 – область утворення замкнених порожнин впадин із змащувальною рідиною;
- 2 – область компресії замкнених порожнин впадин і видавлювання рідини;
- 3 – область максимальної компресії замкнених порожнин впадин;
- 4 – область вакуумування порожнин впадин;
- 5 – область декомпресії порожнин впадин біля виходу їх з контакту

Рідина, що видавлюється, створює потік струї і б'є проти руху поверхні, викликаючи тангенціальний та нормальний опір руху. Таким чином виникає деформаційно-компресійна складова сили тертя, яка, у свою чергу, складається з тангенціального тертя граничних шарів рідини змащення, коли вона стрімко витікає і чинить опір руху поверхні

шляхом тертя з адсорбованими на поверхні молекулами рідини та нормального опору стисканню граничних шарів, які діють на деякій відстані від центру обертання контрзразка, створюючи крутильний момент, протилежний обертанню контрзразка.

Після досягнення максимальних контактних напружень на вершинах та компресійного витискування мастила із впадин, починається розвантаження вершин, їх пружна релаксація, що призводить до збільшення об'єму впадин, тиск зменшується в залишках мастила до атмосферного (рис. 5, поз. 3).

В області 4 починається процес вакуумування утворених порожнин впадин. Під дією зовнішнього впливу на замкнену вакуумовану порожнину, утворену двома поверхнями, направлену на збільшення об'єму й відповідне збільшення ступеня вакууму шляхом зміщення однієї поверхні відносно іншої, у граничних шарах миттєво виникають сили реакції, направлені протилежно руху. Під час тертя такі реактивні сили включають тангенціальні складові напруження, які направлені у площині контакту у бік, протилежний вектору переміщення однієї поверхні відносно іншої, і нормальні, які діють на деякій відстані від центру обертання контрзразка та створюють крутильний момент, також протилежний обертанню контрзразка. У сумі ці складові становлять компресійно-вакуумну складову тертя.

В області 5 (рис. 5) відбувається декомпресія вакуумованих в області 4 замкнених порожнин впадин.

З огляду на викладений механізм дії компресійно-вакуумної складової сили адгезійного тертя, процес зношування також протікає за відповідним сценарієм.

Декомпресія утворених мікро- і нановакуумних порожнин при виході з контакту контртіла призводить до виривів матеріалу з поверхні нерухомої деталі і вакуумного його прилипання до поверхні контрзразка.

У випадку малого вакууму фрагменти вирваного матеріалу на виході з контакту з легкістю відшаровуються в середовище у вигляді продуктів зношування під дією центробіжних сил.

У випадку високого вакууму фрагменти вирваного матеріалу, вступаючи в контакт зі зразком, на наступному циклі тертя (на вході в контакт) або можуть підрізатись та переходити в середовище у вигляді продуктів зношування, або можуть стати ріжучою кромкою по відношенню до нерухомої поверхні тертя.

У замкнених вакуумних сусідніх порожнинах під час тертя знаходиться безліч різних молекул середовища, розвивається висока температура від високоамплітудного, височастотного і коливального стиснення контактуючих вершин, які утворюють вакуумні порожнини, хімічні реактори. Якщо вакуум, який може виникати в мінірервуарах контактуючих поверхонь тертя та при високій температурі (300 °С), сягає 10^{-4} МПа, залишки мастила будуть випаровуватись та скоріше всього перетворюватись на пару. При цьому контактуючі в умовах всебічного вакууму, високої температури і контактних тисків вершини можуть зварюватись за механізмом вакуумно-дифузійного зварювання, а молекули середовища виступати флюсом.

Викладений деформаційно-вакуумний погляд на природу адгезійного тертя і вакуумно-дифузійний механізм зношування дає змогу по-новому підійти до проблеми підвищення зносостійкості трибосистем відповідними методами розвакуування замкнених контактних порожнин. Показано, що поряд з деформаційною складовою сили тертя в умовах граничного змащення у контакті трибосистеми ковзання виникає та діє компресійно-вакуумна складова, яка чинить опір руху та раніше не розглядалась окремо від адгезійної складової. Внесок цієї складової сили тертя суттєвий, бо утворюються потужні течії граничних шарів мастильного матеріалу, котрі можна визначити фізично. Тому компресійно-вакуумну складову сили адгезійного тертя доцільно виділити та розглядати як самостійну третю складову макросили тертя.

Література

1. Аксёнов А.Ф. Трение и износ в углеводородных жидкостях / А.Ф. Аксёнов. – М.: Машиностроение, 1977. – 152 с.
2. Гаврилюк В.П. Трибология литейных сплавов / В.П. Гаврилюк, Е.А. Марковский, В.И. Тихонович. – К.: Охрана труда, 2007. – 428 с.
3. Костецкий Б.И. Износостойкость деталей машин / Б.И. Костецкий. – М.: Машгиз, 1950. – 168 с.
4. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.
5. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
6. Боуден Ф.П. Трение и смазка твердых тел / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор. – М.: Машиностроение, 1968. – 543 с.
7. Гаркунов Д.Н. Триботехника: учеб. для студентов вузов / Д.Н. Гаркунов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
8. Кламанн Д. Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты: пер. с англ. / Д. Кламанн; под ред. Ю.С. Заславского. – М.: Химия, 1988. – 488 с.
9. Запорожец В.В. Взаимосвязь силы трения и свойств вторичных структур / В.В. Запорожец // Трение и износ. – Минск: Наука и техника, 1983. – Т. IV, № 1. – С. 59-67.
10. Шевеля В.В. Трибохимия и реология износостойкости: моногр. / В.В. Шевеля, В.П. Олександренко. – Хмельницький: ХНУ, 2006. – 278 с.
11. Terzaghi K. Erdbaumechanik / Terzaghi K. – Wien, 1925. – S. 50.
12. Стельмах А. У. Методика идентификации ГСМ по противоизносным и антифрикционным свойствам с учетом реальных условий их работы / Стельмах А. У., Сидоренко О. Ю., Костюник Р. С. // Технологические системы. – К.: Компания «Индустриальные технологии». – 2002. – № 3. – С. 96–101.
13. Способ определения противоизносных и (или) антифрикционных свойств трибосистемы с одним линейным контактом постоянной протяженности и устройство для его осуществления: патент RU 2 279 660 C2 МПК G01N 3/56 (2006.01) / С.Н. Кияшко, А.У. Стельмах, Р.Е. Костюник, Т.В. Терновая, А.Ю. Сидоренко. – Оpubл. 10.03.06 [дата начала отсчета времени действия патента 30.09.04].
14. Способ дифференциально-фазовой профилометрии и/или профилографии и устройство для его реализации: патент RU 2179328 C1; 7 G02B21/00, G01B11/30 / С.Н., Кияшко Е.Н. Смирнов, Л.Н. Ильченко, С.А. Коленов, А.У. Стельмах. – Оpubл. 02.10.02 [дата начала отсчета времени действия патента 06.19.01].