

О.У. Стельмах, д.т.н.

Ч. Хао, к.т.н.

Пекінський технологічний інститут, Китай

Р.Є. Костюнік, к.т.н.

Державний університет «Київський авіаційний інститут», Україна

К.К. Бадір, к.т.н.

Університет Халіфа, ОАЕ

Л. Танович, д.т.н.

Белградський університет, Сербія

МЕХАНІЗМ ЗНОШУВАННЯ ПРИ ТЕРТІ В УМОВАХ ГРАНИЧНОГО ЗМАЩЕННЯ

Однією з актуальних проблем сучасної трибології є підвищення працездатності трибосистем з граничним тертям. Значимість цієї проблеми зростає, якщо врахувати, що втрати, пов'язані із зношуванням вузлів тертя, становлять до 5% ВВП промислово розвинених країн. Розвиток цього напрямку стримується недостатністю знань про складні фізико-хімічні, фізико-механічні та динамічні процеси, що протікають при терті в умовах високих навантажувально-швидкісних параметрів у трибосистемі «тверде тіло-мастильне середовище-тверде тіло». При цьому в трибології граничного мастила і фізики конденсованого стану термін «граничні шари мастила» (від моно- до мультимолекулярних), які за своїми реологічними і теплофізичними властивостями істотно відрізняються від об'ємних властивостей мастильного середовища, міцно увійшов в ужиток. На відміну від терміна «прикордонний шар» в аеро- та гідродинаміці, визнаного терміну «граничні шари мастила» досі не дано, хоча глибокі дослідження граничних шарів на сучасному нанорівні свідчать про істотний вплив їх властивостей на процеси тертя і зношування поверхонь трибоконтактів у різних об'єктах техніки, наприклад у металорізальних верстатах.

Існує два основних взаємовиключних підходи до вирішення проблеми граничного тертя. Перший, ЕГД (еластогідродинамічний) підхід, заснований на динамічних процесах у тонкому мастильному шарі, в якому виникає надлишковий тиск, що ототожнюється з контактними напруженнями в робочих поверхнях, хоча трибо контакт має три характерні області за напрямком руху відповідно до термінології О. Рейнольдса: звужується або конфузозна область (КО), перехідна область (ПО) і розширюється або дифузозна область (ДО).

В рамках ЕГД моделі мастильне середовище розглядається як ньютонівська однорідна рідина. Цей підхід передбачає беззмінність контакту, що суперечить експерименту. При цьому адгезійно-деформаційні взаємодії між поверхнями не розглядаються. Однак, в рамках цього підходу виявлені кавітація і термоэффект в мастильних шарах, що підтверджують наявність в них динамічних процесів.

Другий підхід, заснований на адгезійно-деформаційній теорії граничного змащення. У рамках цього підходу граничний шар розглядається як «третє тіло», в якому тиск, що ототожнюється з герцевськими контактними напруженнями, завжди вищий за тиск навколишнього середовища. При цьому будь-які динамічні процеси в граничному шарі не враховуються, що обмежує встановлення взаємозв'язку неоднозначних складних динамічних процесів у граничних шарах з адгезійно-деформаційною взаємодією поверхонь та не дозволяє керувати трибологічною поведінкою трибоконтакту.

Автори розглядали третій підхід, заснований на адгезійно-деформаційній взаємодії поверхонь у її взаємозв'язку з динамічними процесами в граничному шарі. Для встановлення такого взаємозв'язку необхідно було провести дослідження як закономірностей динамічних процесів у граничному шарі, так і адгезійно-деформаційної взаємодії поверхонь спільно з трибологічною поведінкою контакту.

Під час досліджень моделювався процес тертя ковзання підшипника з лінійним контактом, де підшипник ковзання представлений у вигляді системи (рис. 1) – нерухомого плоского зразка і обертового циліндричного ролика (діаметр – 33 мм, ширина робочої поверхні контакту – 3 мм), виготовлених зі сталі ШХ-15 (HRC 59...63). Крім поступального переміщення по осі дії осьового навантаження ОУ робоча поверхня плоского зразка могла вільно обертатися відносно осей ОХ і ОZ, які перетинаються в центрі мас модельного вала. Це дозволяє коректно вимірювати силу тертя датчиком, що обмежує переміщення вала відносно осі ОZ і забезпечувати повне прилягання поверхонь контакту при обертанні вала за рахунок можливості плоского зразка вільно переміщатися відносно осі ОХ. У разі відсутності переміщення плоского зразка відносно осі ОХ, тертя ковзання реалізується малою частиною (до 5% довжини контакту) поверхні модельного вала, яка за один оборот має випадкову ширину



і описує траєкторію тертя «вісімки». У цьому випадку реальна площа контакту істотно менша за розрахункову величину, а контактні напруги відповідно більші за розрахункові значення.

Для забезпечення коректності вимірювань після трибологічних випробувань використовувалися безконтактний лазерний скануючий диференціально-фазовий мікроскоп-профілометр з чутливістю по профілю 1 нм, а також растровий електронний мікроскоп РЕМ-106І. Параметри зношеної доріжки ковзання у вигляді профілограм і 3D зображення визначалися на мікроскопі-профілометрі шляхом растрового сканування у напрямку ковзання.

Запропонована експрес-методика випробувань на тертя і знос проби мастильного матеріалу, яка полягала в наступному. Камера, деталі кріплення зразків і самі зразки після доведення ретельно промивалися і протиралися насухо, у ванночку з плоским зразком

заливалася проба випробовуваної рідини. Електроприводом забезпечувалася номінальна частота обертання модельного вала (300 хв^{-1}) до лінійної швидкості при одночасному плавному збільшенні осьового навантаження до номінальної величини після чого починався відлік часу першого етапу випробувань до проходження робочою поверхнею вала 320 м шляху через контакт. Після цього проводиться другий етап тертя цього ж модельного вала по новій поверхні плоского зразка також протягом 320 м. Третій етап тертя аналогічний другому – той же модельний вал реалізує тертя, але по новій поверхні плоского зразка. Четвертий етап тертя проводиться за тих же початкових умов, що і попередні три, але протягом 1900 м шляху.

Перші три короткочасні етапи тертя забезпечували формування на робочій поверхні вала вторинних структур, характерних для даного зразка рідини, а четвертий, більш тривалий етап, дозволяє оцінити триботехнічні властивості рідини з урахуванням властивостей раніше утворених вторинних структур. Таким чином, перші три короткочасні етапи тертя характеризують припрацювальні властивості випробовуваного середовища за величиною, так званих початкових зносів, а IV-й, більш тривалий етап, характеризує інтенсивність зношування в часі. Оцінка протизносних властивостей випробовуваних зразків проводилася за середнім значенням п'яти однакових серій чотири-етапних випробувань.

Розроблена методика експрес-випробувань дозволяє лабораторним шляхом досить надійно визначати протизносні властивості мастил.

За наведеною методикою трибологічні випробування проводилися при визначених експериментальним шляхом початкових розрахункових контактних напружень для низькомолекулярних вуглеводневих середовищ – 1000 МПа, а для масел залежно від в'язкості – від 1000 до 2500 МПа. Залежно від цілей трибологічних досліджень лінійна швидкість ковзання модельного вала варіювалася від 0,04 м/с до 2 м/с. Шорсткість робочих поверхонь модельного підшипника створювалася шляхом їх послідовного полірування алмазними пастами до рівня параметра $Ra < 20 \text{ нм}$, що контролювалося мікроскопом-профілометром. Вимірювання профілів зносу доріжок тертя проводилися контактним профілографом-профілометром «Калібр М201» і безконтактним мікроскопом-профілометром.

Досліджено паливно-мастильні матеріали різних класів: авіакеросини (ТС-1, РТ), моторні мінеральні (МС-20, ГАЛОЛ М-4042, МК-8) синтетичні оливи (діалкілбензолна, ПМ-10) вакуумні оливи (ВМ-6, ВМ-4), гідравлічні оливи (АМГ-10, ІГП 18), холодильне масло ХФ 12-16, бензини та присадки до них. У всіх цих середовищах під час лабораторних випробувань і після тертя спостерігалися якісно схожі процеси: закономірна локалізація мікрозачеплення і мікрорізання з характерними пошкодженнями поверхонь тертя, однаковий розподіл продуктів зносу і циркуляційні течії в середовищі відносно напрямку ковзання, що послужило приводом для висунування гіпотези про наявність двох різнополярних процесів стиснення і розтягування фрагментів мастила в граничних шарах трибосистеми ковзання з лінійним контактом, взаємозумовлених зворотними мікропотоками граничних шарів в конфузійній області і їх випаровуванням в дифузійній області контакту.

Підвищення зносостійкості трибосистем із зростанням фактичних контактних напружень, асиметрія зношених доріжок ковзання, виникнення первинних вузлів адгезійної взаємодії в ДО і осідання продуктів зношування в області, близькій до КО – закономірний наслідок протікання впорядкованих динамічних процесів у граничних шарах мастила, що супроводжується фазовими переходами: контактними мікропотоками граничних шарів у КО та нуклеацією газової фази в ДО.

У конфузійній області контакту під дією високих позитивних градієнтів стиснення відбувається пошарове плавлення квазікристалічних мультимолекулярних граничних шарів і їх течія в напрямку, протилежному руху вала.

У дифузійній області контакту під дією негативних градієнтів напружень розтягування граничні шари, перебуваючи в умовах розрідження, пошарово випаровуються, реалізуючи «холодне кипіння», створюючи умови квазісухого тертя. При цьому під дією атмосферного тиску зворотна течія формується з вільних молекул середовища і спрямована також у зворотному до обертання вала напрямку.

Аналіз отриманих результатів досліджень показав, що первинна адгезійна взаємодія поверхонь тертя виникає в дифузійній області трибоконтракту. Запропонований десорбційно-адгезійний механізм зношування при терті в умовах граничного змащення, що обумовлений адгезією поверхонь в дифузійній області (ДО) контакту, наслідком чого є наявність викидів і надходження разом з валом первинних частинок зносу в конфузійній області (КО), які здійснюють мікрорізання поверхні в цій області з подальшим сколюванням вершин адгезійних «наростів», що переходять у продукти зносу.