

Т.В. Тернова, М.В. Кіндрачук

Поверхневі вторинні структури в умовах граничного беззносного тертя

*Національний авіаційний університет, пр-т Комарова, 1, Київ, 03058, Україна,
тел. (044) 406-77-73, e-mail: m_kindrachuk@ukr.net*

В роботі вперше вивчені нові вторинні поверхневі структури, які формуються під дією тертя в режимі граничного беззносного тертя, їх трибологічності, взаємозв'язок з вторинними структурами в змащувальних матеріалах, вплив на макровластивості трибосистем.

Ключові слова: вторинні трибоструктури, граничне тертя, граничне беззносне тертя

Стаття поступила до редакції 07.07.2005; прийнята до друку 15.11.2005

Всі механічні машини і пристрої являють собою перш за все набір різної конструкції вузлів тертя (трибосистем, надалі ТС), які приводяться в рух електромоторами або двигунами внутрішнього згорання. Від якості цих ТС (довговічності, економічності та функціональних можливостей) значною мірою залежить якість машин і механізмів.

Однак наявність тертя в ТС і породжуваних ним руйнівних процесів невідворотно приводить до втрати цієї якості в часі і руйнування ТС в цілому.

Аналіз розвитку практичної трибології в авіації, результат широкомасштабних лабораторних експериментів, а також теоретичні дослідження енергетичних, силових та імовірнісних полів у трибологічному контакті дозволяє позитивно відповісти на запитання про принципову можливість зменшення інтенсивності трибологічних потоків на 1-3 порядки [1,2].

Багато є теорій, методів, явищ, які пояснюють те, що спостерігаються в процесі тертя, які здатні трохи зменшувати руйнівну дію тертя і навіть усувати її в деяких вузьких специфічних умовах, але немає жодного способу досягнення беззносного тертя в умовах експлуатації машин і механізмів. Тому в світі введено таку вимогу до машин і механізмів як „ресурс” і різною комбінацією відомих способів намагаються забезпечити цей „ресурс”. Сьогодні переважаюча більшість машин працює в режимі граничного змащування, в якому поверхні тертя ТС для зменшення тертя і зношування намагаються розділити введенням різного роду змащувальних композицій. При малих навантаженнях таке розділення досягається, тому в таких ТС зношування поверхонь тертя незначне і реалізуються малі

значення коефіцієнта тертя. Проте при середніх і значних навантаженнях на фрикційному контакті (граничне змащення) такий режим недосяжний, тому він виділений в окремий вид тертя режим граничного змащування.

Отже хоч від мастильних композицій вимагається розділення тертьових поверхонь, забезпечення тепловідводу і зниження тертя, однак в умовах граничного тертя, в яких працюють практично всі машини, розділення тертьових поверхонь змащенням не досягається, наслідком чого є їх зношування та руйнування змащувальних матеріалів. Тому головною властивістю мастильної композиції стало забезпечення зниження зносу тертьових поверхонь і зменшення руйнування змащувальних матеріалів, а про надання трибосистемі якісно нових властивостей та ще й умовах експлуатації машин на сьогодні ще мова взагалі не йшла.

Існують тисячі назв різних мастильних композицій, розроблених для використання у вузько конкретних умовах роботи вузла тертя, універсальних мастильних композицій не існує.

Фахівцями всього світу визнано, що найбільш ефективним методом поліпшення трибохарактеристик змащувальних композицій є введення в них різного роду присадок, назви яких також обчислюються сотнями і призначені вони також для роботи у вузько конкретних умовах, як і самі мастильні композиції.

Отже присадки визнані наукою кращим засобом впливу на фізико-хімічні і механічні процеси на фрикційному контакті. Однак через свою складність ці процеси вважаються такими, що не піддаються

управлінню, наука вмів на них тільки в незначному ступені впливати.

Досягнення по поліпшенню трибохарактеристик мастильних композицій у світі невеликі. Це пов'язано з найскладнішими, завжди руйнівними фізико-хімічними процесами, що реалізуються в умовах тертя, і відсутністю радикального вирішення проблеми упорядкування і керування трибопроцесами.

Випробування мастильних композицій з кращими традиційними присадками в ідентичних умовах на різних машинах тертя показали максимальне зниження зносу, що досягається лише за допомогою присадок, які мають у своєму складі молібден, у 2-5 разів порівняно з базовим середовищем. В часі ця різниця швидко знижується. Між собою товарні мастильні композиції (найкращі і найгірші, вітчизняні та зарубіжні) за головними протизносними властивостями різняться ще менше: у 1,5 - 2,0 рази і в часі ця різниця знижується. Відсутність хороших мастильних композицій стала гальмом для розвитку машинобудування в усьому світі.

Але в трибології відомо, що присадки не безпосередньо надають змащувальним композиціям ті чи інші властивості, а, опосередковано через формування вторинних структур на поверхнях тертя, які утворюються під дією тертя. Про інші, не поверхневі вторинні структури мови в науці ще не було, тому вважається, що саме властивості поверхневих вторинних структур і визначають макровластивості композицій, зокрема протизносні, антиокислювальні, антифрикційні та інші. Тому саме цим вторинним структурам наука приділяє багато уваги, але й тут досягнення поки що невеликі.

Так в 1966 р. з'явилося відкриття Д.Н.Гаркунова і І.В.Крагельського вибіркового переносу міді з мідного сплаву на сталь і зворотньо в умовах граничного тертя мідних сплавів по сталі, що супроводжується суттєвим зниженням коефіцієнта тертя та зносу. В класичному варіанті це відбувається в середовищі гліцерину у вузькому температурному (65°C) та навантаженому інтервалі (до 40 МПа) і не переноситься на реальні умови експлуатації техніки. Вважається, що в указаних умовах на поверхнях тертя формується мідна плівка, яка дістала назву "сервоитної", тобто вторинна структура, яка визначає зниження зносу і коефіцієнта тертя [3].

Менш значні зміни тертя та зношування досягаються при використанні явища структурного пристосування матеріалів до умов тертя Б.І. Костецького, яке полягає в формуванні під дією тертя на поверхнях тертя вторинних структур з продуктів руйнування присадок, мастил та поверхонь тертя, склад і структура яких весь час руйнується і змінюється, але це сповільнює дещо зношування і зменшує тертя на фоні їх значної величини [4].

Всі практичні способи зменшення тертя та зношування трибосистем ґрунтуються на використанні вказаних явищ з додаванням різних добавок, плакування, зокрема високодисперсними металами, нанесення різної природи покриттів.

Ефективність цих засобів невелика: по зносу вона знаходиться в межах 1-300% відносно базових середовищ. Попереднє штучне нанесення різних плівок (покриттів) на поверхні тертя є добре відомим методом зниження зносу та покращення других властивостей поверхонь, але всі такі покриття руйнуються в процесі тертя, тобто проблему беззносності трибосистеми не вирішують, як не вирішують її мідні плівки при реалізації відомого явища вибіркового переносу міді Гаркунова, Крагельського, бо останнє явище реалізується лише у вузьких специфічних умовах.

Таким чином, всі відомі в трибології явища та практичні засоби або малоефективні, або не здійснюються в реальних умовах експлуатації техніки, або руйнуються в умовах тертя, якщо були створені до тертя. Отже, хоч вторинні структури завжди формуються в умовах тертя, але руйнуються в процесі тертя, тому не здатні упорядковувати їх взаємодію з мастильним середовищем і упорядкувати процеси на контакті, тобто сьогодні невідомі явища, які б дозволяли формувати в умовах тертя стійкі трибоструктури, які б зберігались або відновлювались в часі.

Отже, для досягнення беззносного тертя в умовах експлуатації машин та механізмів, треба реалізувати новий, упорядковувачий механізм взаємодії всіх компонентів трибосистем, який би забезпечував нові властивості композицій і нові можливості трибосистем.

Відомо, що тертя навіть при експлуатаційних навантаженнях трибосистем охоплює широкий інтервал енергетичної взаємодії речовин, коли мають місце високі температури на контакті, рентгенівське випромінювання, електронна емісія та інші активні і руйнівні явища, тобто це умови, коли можуть хаотично протікати будь-які хімічні реакції, тобто природа руйнувань середовища і поверхонь тертя перш за все хімічна, термічна та електрична [5].

І поки вказані енергетичні дії будуть хаотичними, ТС буде руйнуватись в цілому: поверхні тертя, мастильне середовище і все, що в ньому є.

Присадки нового типу з новим механізмом дії створені Т.В.Терновою, здатні вказані руйнівні дії, породжені тертям, упорядковувати, мінімізувати і усувати завдяки формуванню в умовах тертя вторинних структур нового типу в змащувальному середовищі, на поверхнях тертя і в приповерхневих шарах, які активно взаємодіють між собою і є динамічно стійкими.

Нові вторинні структури, які формуються під дією тертя з вказаними присадками і композиціями динамічно стійкі, бо здатні самовідновлюватись, тобто не еволюціонують помітно в часі і тому здатні упорядковувати їх взаємодію зі змащувальним середовищем і процеси на контакті, тобто руйнівну енергію тертя вони здатні перетворювати в упорядковану взаємодію поверхня-середовище, яка веде до беззносності та інших нових властивостей.

І тільки разом ці структури забезпечують беззносний режим роботи ТС. Але в даній роботі мова йтиме лише про вторинні структури на

поверхнях тертя і приповерхневих шарах. Це не організуючі структури, тобто вони супутні, похідні, але їх роль як складової всіх вказаних структур значна.

Утворення структур з вказаних речовин присадок на поверхнях тертя видно візуально вже через 0,5-1 годину тертя, якщо вибрати забарвлену присадку. Колір такої тонкої плівки (товщиною 0,5-1мкм) такий же, як і у присадки, що підтверджує відсутність руйнування поверхонь в часі. Наявність такої плівки пояснює таке раніше невідоме поняття, як "від'ємний знос", тобто не просто відсутність зносу, а й деякий приріст товщини поверхні за рахунок вказаної плівки з вказаних речовин. Це добре виявляється при скануванні поверхні взірця після тертя профілографом-профілометром, наприклад марки "Калібр".

В часі товщина цієї плівки коливається, але в широкому інтервалі навантажень не руйнується, бо самовідновлюється.

Підтверджена наявність такої плівки і растровим електронним мікроскопом (рис. 1). Плівка не суцільна, але досить міцна, не здирається легко і не розчинюється легко в основі.

Наявність металів присадки в поверхневій плівці підтверджена рентгеноспектральним методом (рис. 2).

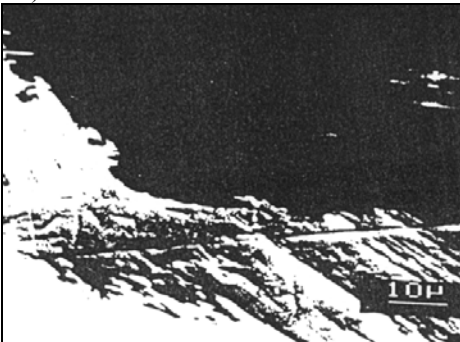


Рис. 1. Фотографія поверхні сталевго взірця після дії тертя в вазеліновому маслі з присадкою. Растровий електронний мікроскоп фірми OPTON. Чітко видна не суцільна плівка з речовини присадки.

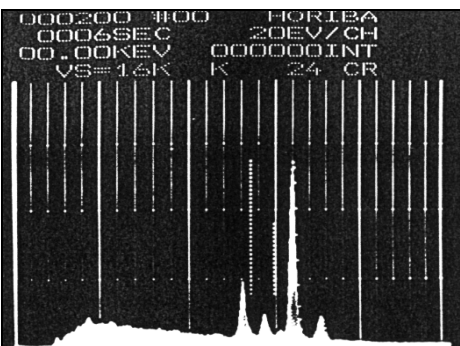


Рис. 2. Рентгенівський спектр вказаної на рис. 1 плівки: інтенсивні піки належать металу основи (заліза), слабкі, показані точковими лініями, належать металу присадки. Рентгенівський спектрометр Nariba, Японія.

Незмінний колір вказаної плівки відносно такого

присадки в часі і наявність металу присадки в поверхневій плівці свідчать про те, що будова речовини плівки і присадки близькі, що означає можливість посилення діелектричних властивостей поверхневого шару. Це могло б бути підтверджено суттєвим зростанням електроопору між поверхнями тертя в процесі тертя. Експериментальна перевірка цього припущення підтвердила його реалізацію.

Типова зміна електричного опору між поверхнями тертя в процесі тертя в дизпаливі (1), маслі М8-В (2) і маслі АМГ-10 (3), досліджена Терновою Т.В., Башкевичем І.Н., Масловим В.Т. показана на рис. 3 і в тих же середовищах з вказаними присадками, з якої видно, що в присутності цих присадок електроопір між поверхнями тертя значно зростає і є стабільним в часі, на відміну від мастильних середовищ без присадок. Це дуже важлива властивість нових поверхневих вторинних структур, бо відомо, якої значної величини сягають руйнування мастил і поверхонь тертя через електричні розряди (роботи Костюка В.В., Дубіна А.Д., Коршунова Л.Г., Бакрадзе І.І., Виногорова Г.В. та ін. [6,7]), які виникають від трибоелектричних ефектів, породжених тертям. Суттєве підвищення електроопору і його стабільність в часі усуває ці руйнування.

Як слідує з рис. 3, електроопір між поверхнями тертя зростає на два порядки і більше, що здатне усунути і електронну емісію під час тертя, тобто усувається один з головних чинників хімічних руйнувань речовин мастильного середовища і поверхонь тертя. При цьому суттєво знижується також електрична складова адгезійної взаємодії поверхонь тертя і ця складова є головною в адгезії металевих поверхонь в процесі тертя. Все це повинно привести до суттєвого зниження коефіцієнта тертя.

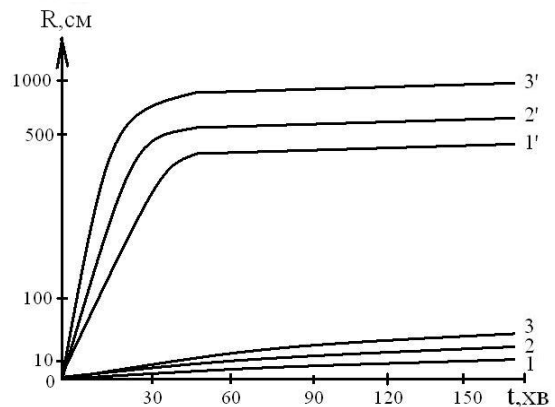


Рис. 3. Типова залежність електроопору пари тертя в гасі (1), маслі М8-В (2), маслі АМГ-10 (3) і відповідно з присадками (1', 2', 3') від часу тертя.

Випробуванням різних мастильних середовищ (базових, з кращими товарними присадками і з нашими присадками) на всевітньо відомій машині тертя RFL Optimol Test System з лінійним контактом, проведеними Стельмахом О.У., Терновою Т.В. показало (таблиця 1), що при більших в 5-7 разів контактних навантаженнях, які виникають при терті

Таблиця 1

Типові трибохарактеристики змащувальних матеріалів і таких з вказаними присадками. Вісьове навантаження 3,75 кН, машина тертя RFL Optimol Test System (Німеччина), програма випробувань M:1

Середовище	Фактичні контактні тиски, Н/мм ²	Коефіцієнт тертя μ
Товарні масла і палива	276-205	0,16-0,24
Товарні масла і палива з присадками	1700-1100	0,065-0,12

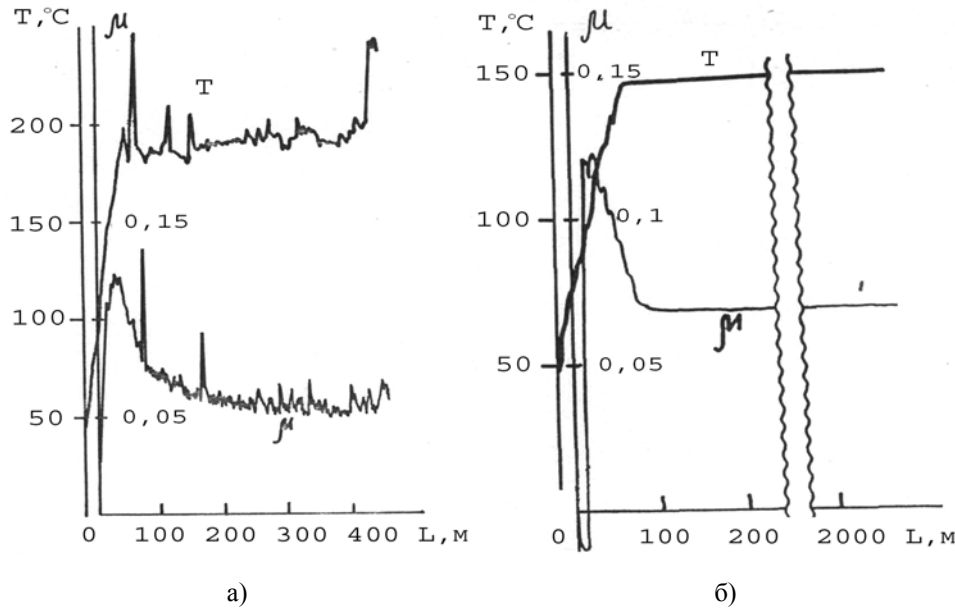


Рис.4. Типова залежність температури поверхні тертя та коефіцієнта тертя від шляху (часу) тертя в товарних змащувальних матеріалах. Машина тертя RFL Optimol Test System, навантаження 6,0 кН. Зубчастість ліній породжена мікросхвачуванням внаслідок адгезійної взаємодії поверхонь під час тертя (а) і суттєвим зниженням такої взаємодії в тих же змащувальних матеріалах з нашими присадками (б).

в змащувальних середовищах з нашими присадками внаслідок відсутності зношування, коефіцієнт тертя зменшується в середньому в 2 рази, хоч, як відомо, він повинен був набагато більше зрости, бо сила тертя (F), як відомо на сьогодні, зростає прямо пропорційно зростанню навантаження (N): $F = \mu N$, де μ – коефіцієнт тертя. Зникають і зовнішні ознаки прояву адгезійної взаємодії поверхонь тертя такі як відсутність продуктів зношування поверхонь в мастильному середовищі, такі, як зубчастість ліній залежності температури та коефіцієнта тертя від шляху (часу) тертя (рис. 4), одержані Стельмахом О.У. і Терновою Т.В. та інші.

Як відомо, така зубчастість, піки якої у вказаних залежностях розташовані на кривих симбатно, є результатом утворення та розриву вузликів мікро схоплень поверхонь під час тертя. Отже дійсно, при введенні наших присадок в мастильне середовище в тому числі і за рахунок зменшення електричної складової адгезійної взаємодії поверхонь, що труться, зникають вторинні прояви адгезійної взаємодії в трибохарактеристиках ТС. Це не є наслідком лише поверхневої складової нових вторинних структур, зокрема формування самовідновлювальної плівки на поверхнях тертя, але вклад такого плівкоутворення

суттєвий.

Хімічна складова адгезійної взаємодії поверхонь тертя суттєво компенсується вторинними структурами, які формуються в процесі тертя в мастильному середовищі.

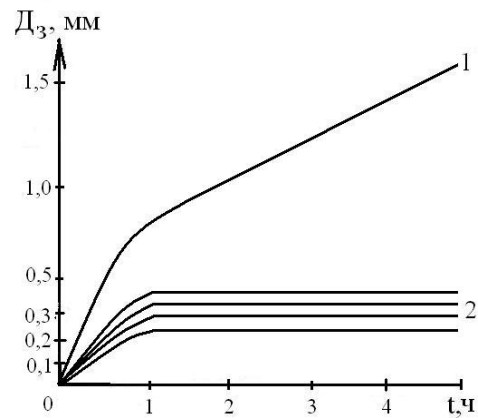


Рис.5. Типова залежність діаметра зносу (D_3) поверхонь тертя в змащувальних матеріалах від часу тертя: 1 – без наших присадок, 2 – з нашими присадками в тих же змащувальних матеріалах. Машина тертя ЧШМ.

Однак зникнення зовнішніх проявів адгезійної складової сили тертя ще не означає, що тертя стає безадгезійним.

Наявність металу присадки в поверхневій плівці навіть в хімічній сполуці присадки означає неминучу участь його в дифузійних процесах, швидкість яких на поверхнях тертя, як відомо, в умовах тертя зростає в сотні разів порівняно зі статичними умовами.

Таким чином, в умовах тертя швидко здійснюється і процес легування поверхневих шарів поверхонь тертя частково і через посередництво вторинних поверхневих плівок. Є і інший механізм обміну металів з поверхнями тертя, про який мова йтиме в іншій публікації.

Отже в процесі тертя контактуючі поверхні можна зміцнювати або послаблювати в залежності від вказаного легування і якщо цей процес не врівноважити, то, оскільки дифузія йде в одному напрямку (градієнта концентрації), навіть при позитивному процесі легування метал присадки весь витратиться і поверхні почнуть руйнуватись. Але завдяки існуванню вторинних динамічно стійких в часі і самовідновлювальних структур в змащувальному середовищі цього не може статись, бо процес дифузії буде врівноважений внаслідок взаємодії поверхневих вторинних структур з вторинними структурами в мастильному середовищі. Це означає, що дифузія буде проходити в коливальному режимі, періодично змінюючи напрям, що підтверджується експериментально.

Отже, за рахунок формування вказаних вторинних динамічно стійких структур, зокрема на поверхнях тертя і в приповерхневих шарах, суттєво покращуються такі важливі характеристики ТС, як суттєве зниження електричної складової адгезійної взаємодії поверхонь тертя і з'являється можливість суттєвого зміцнення їх поверхневих шарів за рахунок позитивного, дозованого і керованого мікро легування в процесі тертя.

А з врахуванням організуючої і регулюючої дії нових вторинних структур в мастильному

середовищі, всі процеси на поверхнях, поверхневих шарах і в мастильному середовищі починають взаємодіяти, врівноважуються і стають динамічно стійкими в часі, що дозволяє досягати режиму безносного тертя в широкому інтервалі навантажень і часу, який перевищує той інтервал, що використовується в експлуатації машин і механізмів (рис. 5).

Якщо напрацювати деякий час вказані вторинні структури на поверхнях тертя, а потім вивести їх з під впливу вторинних структур в змащувальному середовищі, то поверхневі структури починають руйнуватись, як в класичному варіанті, тобто спостерігається деяка післядія, після чого починається зношування поверхонь тертя.

Така поведінка поверхневих вторинних структур вказує на те, що головними організуючими і керуючими в режимі безносного тертя є вторинні структури, які реалізуються в змащувальному середовищі під впливом вказаних присадок.

Таким чином, всі вказані нові вторинні структури в процесі тертя створюються і теж руйнуються, але, на відміну від відомого, процес цей упорядкований, а не хаотичний, тобто нові структури не еволюціонують (в часі, в залежності від складу мастильних композицій і від навантаження) і самовідновлюються, що дозволяє досягати режиму безносного тертя, довготривалого в часі, підтвердженого випробуваннями.

Узгоджена дія нових вторинних структур в мастильному середовищі, на поверхнях тертя і в поверхневих шарах здатна усувати дію всіх відомих руйнівних процесів, породжених тертям, і створює свій новий режим – режим граничного безносного тертя, який можна реалізувати в умовах експлуатації машин і механізмів.

Тернова Т.В. – к.х.н., с.н.с.;

Кіндрачук М.В. – д.т.н., проф., завідувач кафедри машинознавства

- [1] Кульгавий Э.А. Трибосистемы в случайных средах // *Пробл. трибологии*. 3, сс. 8-12 (2004).
- [2] Кіндрачук М.В., Кульгавий Е.А. Трибология – наука двадцять першого століття // *Вісн. НАУ*. 4 сс. 67-72 (2005)
- [3] А.М. Азаров. *Открытие ученых СССР*, Киев, Наукова думка, (1988).
- [4] Б.И. Костецкий, Л.И. Бершадский. *Адаптивность и обучаемость трибосистем*. Киев, знание, УССР, (1987).
- [5] Г.Хайнике. *Трибохимия*, Москва, Мир, (1987).
- [6] Л.Г. Коршунов, Р.И. Минц. Влияние электризации и малых токов на износ металлов при трении скольжения // *Физико-химическая механика материалов*. (4) сс. 392-396 (1967)
- [7] И.И. Бакрадзе, Г.В. Виноградов, М.К. Иванов и др. *Электрические явления при трении, резании и смазке твердых тел*. Москва, Наука (1973).

T.V. Ternova, M.V. Kindrachuk

Surface second structures in the conditions of border friction without a wear

National aviation university, 1, Cosmonaut Komarova av., Kiev, 03058, Ukraine

In work the first studied new second surface structures which are formed under action of friction in the mode of border friction without a wear, their tribotechnical properties, intercommunication with the second structures in lubricating materials, influence on macro properties of tribosystem