

Р.Є. Костюнік, О.У. Стельмах, В.А. Радзієвський, О.Г. Ковальчук, В.С. Бондар

Національний авіаційний університет

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИВЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ГРАНИЧНИХ ШАРІВ БЕЗКОНТАКТНИХ ТРИБОСИСТЕМ КОВЗАННЯ

Розроблено нові методики та прилади для вивчення динамічних процесів граничних шарів при їх статичній та динамічній взаємодії в трибоконтках з оптичним каналом знімання інформації.

Ключові слова: трибоконтакт, граничні шари, тертя, методики, прилади, зазор, динамічні процеси

Р.Е. Костюник, А.У. Стельмах, В.А. Радзиевский, Е.Г. Ковальчук, В.С. Бондарь

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ БЕСКОНТАКТНЫХ ТРИБОСИСТЕМ СКОЛЬЖЕНИЯ

Разработаны новые методики и приборы для изучения динамических процессов граничных слоев при их статическом и динамическом взаимодействии в трибоконтках с оптическим каналом съема информации.

Ключевые слова: трибоконтакт, граничные слои, трение, методики, приборы, зазор, динамические процессы

R.E. Kostyunik, A.U. Stelmakh, V.A. Radziewsky, E.G. Kovalchuk, V.S. Bondar

METHODS AND INSTRUMENTS FOR EXPERIMENTAL STUDY OF DYNAMIC PROCESSES OF BOUNDARY LAYERS OF NON-CONTACT SLIDING TRIBOSYSTEM

New techniques and devices have been developed for studying the dynamic processes of boundary layers during their static and dynamic interaction in tribocontacts with an optical information pickup channel.

Key words: tribocontact, boundary layers, friction, techniques, devices, gap, dynamic processes

Постановка проблеми. Існуюча сучасна діагностика трибосистем заснована, головним чином, на вивченні стану робочих поверхонь трибоконтку з використанням традиційних матеріалознавчих методів аналізу їх складу та структури [1-3], як результат післядії процесу тертя. Опубліковані результати експериментальних досліджень динамічних процесів в граничних шарах носять, в основному, якісний характер, наприклад, кавітація в дифузійній області контакту [4]. Інформація про кількісні параметри граничних шарів в динаміці практично відсутня, так як для такого роду досліджень потрібні спеціальні методики і прилади.

В рамках даної роботи представлені деякі нові методики і експериментальне обладнання, розроблені в науково-дослідній лабораторії нанотриботехнологій НДЧ НАУ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючі положення відомих теорій, гіпотез і положень про тертя та зношування трибосистем стали класичними і ніколи не піддавалися сумніву. На їх основі створювалися відповідні методики і техніка експериментів, які повністю забезпечували експериментальне підтвердження відповідних теорій. Тому одержувані відхилення результатів експериментів від теоретичних обґрунтувань відносились до розряду помилок, похибок вимірювань та ін., а експериментальна техніка досліджень створювалась традиційно: машини тертя для визначення товщини змащувального шару, прилади тертя для вимірювання реології змащувальних матеріалів, прилади визначення електричних властивостей рідин в умовах стиснення та ін. До таких класичних приладів можна віднести одну з перших розробок [5]: «Прилад для безперервного вимірювання товщини змащувального шару в підшипнику ковзання» (Авторське свідоцтво № 91589 на винахід). Усі наступні машини тертя були модифікаціями цієї машини, де товщина змащувального шару вимірювалась непрямо за величиною електричного пробою та ін., а тиск і течії у ньому не досліджувались. Проникнути в контакт і сканувати по ньому вузькими прийомними каналами, які миттєво забруднюються продуктами зношування, для вимірювання тиску дійсно досить складна інженерна задача.

На переважній більшості існуючих приладів та машин тертя контактні течії граничних шарів раніше не спостерігали, так як не було відомостей про них. Крім цього, всі модельні трибосистеми, як правило, складаються із непрозорих деталей, часто розташованих у непрозорих

камерах, що не дозволяє проводити відеомоніторинг або візуально спостерігати динаміку течій деформованих граничних поверхневих шарів при їх відносному русі.

Деякі машини тертя, які дозволяють візуально спостерігати контакт [5,6], не застосовувались для дослідження динаміки вторинних течій граничних шарів у контакті через відсутність відомостей про них. Вони використовувались для визначення товщини змащувального шару в контакті непрямыми оптичними, зокрема інтерференційними методами.

Головною причиною практичної відсутності досліджень динаміки в граничних шарах трибоконтакту трибосистем є відсутність нових засобів та методів, котрі можуть дозволити на простих моделях вивчати динаміку граничних шарів мастила в трибоконтакті.

Постановка завдань. Відомі лабораторні машини та прилади тертя створені для оцінки триботехнічних властивостей конструкційних та/або мастильних матеріалів, як правило, для відносного порівняння їх ефективності за протизносними та антифрикційними показниками. Такі порівняльні лабораторні випробування дозволяють за відносно короткий термін розробляти та впроваджувати нові ефективні змащувальні матеріали та присадки до них, конструктивні матеріали та технологічні прийоми для підвищення зносостійкості трибосистем. Наприклад, винахід [7] дозволяє визначити ступінь ефективності того чи іншого методу підвищення трибологічних властивостей трибосистем в лабораторних умовах за вимірюваними величинами зносу, температури та сили тертя.

Інші прилади призначені для оцінки триботехнічних характеристик мастильних матеріалів в підшипниках ковзання за допомогою непрямого визначення показників їх якості за відповідними критеріями, серед яких найбільш визнаним є мінімальна товщина граничного шару в контакті. В основу таких методів покладена контакт-гидродинамічна теорія змащування [8], виходячи з якої основним критерієм оцінки змащувальних властивостей мастил є виконання умови, що товщина змащувального шару повинна перевищувати суму висот мікронерівностей контактуючих поверхонь, що має призвести до реалізації практично беззносного тертя.

Більшість відомих дослідницьких машин тертя реалізують тертя ковзання на модельній трибосистемі, деталі якої виготовляються з металевих, тобто непрозорих конструкційних матеріалів. При цьому площа контакту, як правило, є не визначеною, тому зробити отвори в нерухомій деталі для утворення приймального отвору чи отворів, за допомогою яких можна виміряти тиск в контрольованих областях, вимагає значних зусиль і затрат. Якщо такі отвори виконати у непрозорих матеріалах, поверхні яких знаходяться в області тертя граничних шарів, то встановити момент, коли вони забиваються продуктами зношування або механічними частками, які природно є у середовищі, та відповідно запобігти цьому неможливо.

Приладів тертя або машин тертя, що дозволяють вимірювати тиск у граничних шарах мастильного середовища під час процесу їх тертя, тобто у динаміці, з можливістю сканування без зупинки, не виявлено.

Викладення основного матеріалу. Об'єктом досліджень є теплові та гідродинамічні процеси, що виникають у трибоконтакті як під навантаженням, так і з певним зазором.

Методи досліджень: диференційно-фазова акустооптична мікроскопія-профілометрія; оптико-поляризаційний метод дослідження контактних напружень в ізотропному матеріалі; тепловізіонний, а також метод лабораторно-експериментального моделювання тертя граничних шарів.

Вимірювально-випробувальний комплекс для дослідження тертя в умовах граничного змащення

З метою дослідження впливу сталості миттєвих контактних напружень на протизносні властивості трибосистеми ковзання з лінійним контактом наногіометричних поверхонь тертя була розроблена і створена машина тертя зі стабілізованими миттєвими контактними напруженнями і певними радіальними відхиленнями модельного вала. На рис. 1 представлена схема і зовнішній вигляд створеної машини тертя АСК-01 [7], де при вимірі сили тертя вісь навантаження, вісь обертання модельного вала і вісь, навколо якої коливається плоский нерухомий зразок, перетинаються в центрі мас контрзразка. Таким чином, миттєві контактні напруги відповідають розрахунковим, що підтверджується утворенням рівномірно по всій поверхні контрзразка вторинних структур.

Більшість вуглеводневих неполярних мастильних матеріалів при змочуванні поверхонь деталей машин утворюють на них епітропні рідкокристалічні структури в нано- та мікрометровому діапазоні. Так як їх структура і властивості в значній мірі визначаються шорсткістю робочої поверхні, то необхідно мати максимально повну інформацію про тривимірний стан вихідної

поверхні. Наногеометрична поверхня модельних зразків потребує відповідного контролю, який необхідно здійснювати безконтактним методом з високою чутливістю за профілем і досить великим полем зору.

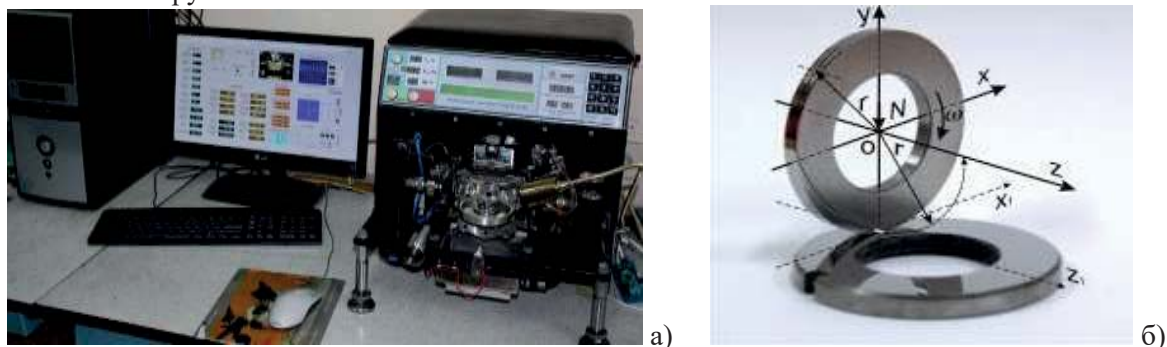


Рис. 1. Зовнішній вигляд машини тертя АСК-01 (а) і модельної трибосистеми ковзання з лінійним контактом (б)

Контактні профілографи-профілометри типу «Калібр М201» або М-283 не задовольняють цим вимогам через пошкодження поверхні та малої інформативності. Тому спільно із спеціалістами лабораторії акустооптики радіофізичного факультету КНУ ім. Тараса Шевченка був розроблений і створений [9] лазерний скануючий безконтактний диференційно-фазовий мікроскоп-профілограф-профілометр (ЛДСДФМП) (рис. 2). Експериментально встановлено, що саме 3D стан робочих поверхонь характеризує їх трибологічні властивості, а не стандартизовані параметри шорсткості (R_a , R_z , R_{max} , S_m , t_p та ін.), обчислені лише за однією профілограмою.

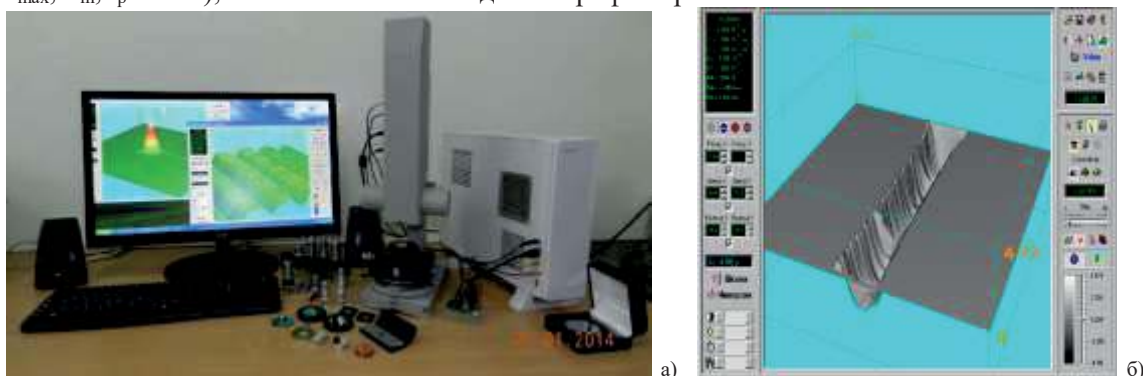


Рис. 2. Зовнішній вигляд лазерного скануючого диференційно-фазового мікроскопа-профілометра (а) і 3D інвертоване зображення доріжки тертя (б)

Експериментально встановлено, що при одному і тому ж параметрі шорсткості, зокрема R_a , створюваної різними технологічними прийомами, поверхні мають принципово різні трибологічні властивості, що залежать від їх 3D стану.

У результаті сканування поверхні ДФЛСПП можна отримати її двовимірне диференційно-фазове зображення (рис. 3, а), що складається з 512x512 профілограм. Шляхом інтегрування поверхня відновлюється (рис. 3, б) з можливістю аналізу будь-якої з 1024 профілограм (рис. 3, в). Новий спосіб двовимірного представлення тривимірного стану поверхонь у вигляді амплітудно-частотно-просторового розподілу дисперсії показаний на рис. 3, г, що надзвичайно важливо для трибосистем.

Таким чином, саме 3D мікро- і нано- стан поверхонь з урахуванням напрямку граничного тертя дає інформацію про експлуатаційні трибологічні властивості робочих поверхонь. Крім шорсткості, ДФЛСПП дозволяє визначати обсяг зношеного матеріалу в нанометрах кубічних, що значно підвищує точність визначення величини зношування.

Розроблено нову багатоступеневу методику трибологічних випробувань мастильних матеріалів, що враховує вплив вторинних структур на зносостійкість у ході тривалих випробувань [7]. Суть методики полягає в поетапних вимірах величини зносу в часі при інших рівних початкових умовах.

У сукупності лабораторний прилад тертя АСК-01, лазерний скануючий диференційно-фазовий мікроскоп-профілометр ЛДСДФМП і методики трибологічних випробувань в умовах

граничного змащення являють собою комплекс приладів і методів, який внесено до переліку кваліфікаційних методів УкрЦВТ СЕПРО України.

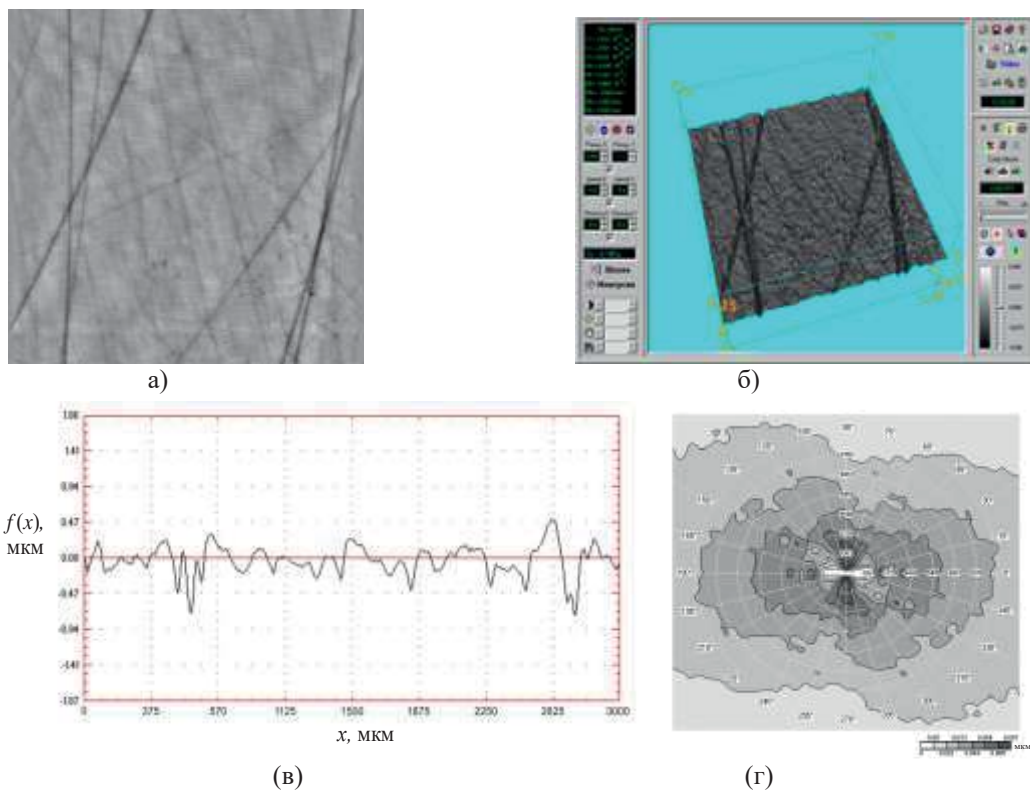


Рис. 3. Рельєф реальної поверхні з параметром шорсткості $R_a = 0,15$ мкм в дво- (а) і тривимірному (б) зображеннях, один з її профілів (в) і двовимірний розподіл дисперсії у напрямку для окремих спектральних складових просторового спектра поверхні (г), (по радіусу - просторові частоти в см⁻¹)

Лабораторний прилад тертя граничних шарів з регульованим зазором АСБ-03. Для дослідження динамічних процесів, що виникають при терті граничних шарів при відносному русі поверхонь з адсорбованими фрагментами граничних шарів змащувального середовища, був розроблений і виготовлений лабораторний прилад АСБ-03 (рис. 4). Цей прилад включає в себе механічний модуль (електропривод прецизійного вала через шківів і ремінну передачу, який обертається відносно нерухомого блоку з прийомним пристроєм) і електричний модуль управління частотою обертання зі зворотним зв'язком і реєстрацією споживаної потужності електродвигуна.

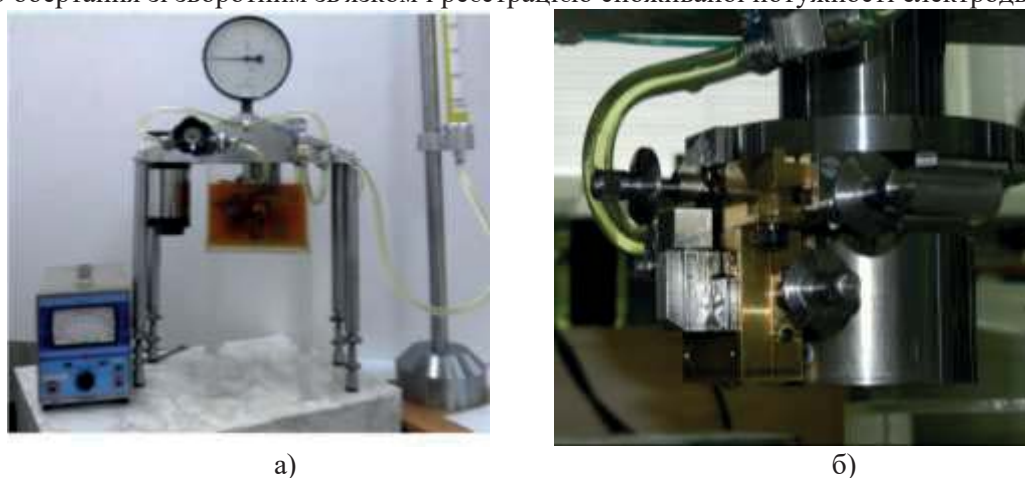


Рис. 4. Зовнішній вигляд лабораторного приладу тертя граничних шарів АСБ-03 (а) і його нерухомого блоку 1 з регульовальними гвинтами позиціонування приймального пристрою відносно поверхні вала 2 (б)

На відміну від попередніх приладів, тут в якості приймального пристрою використана довга щілина (20 мм) і реалізована можливість її зміни від 0 до 5 мм, а також точного регулювання зазору між валом і поверхнею з приймальним пристроєм і точного позиціонування щілини щодо осі обертання валу. На блоці з прийомним пристроєм розміщена система тонкого регулювання мікрометричними гвинтами (рис. 4, б).

Прилад АСБ-03 дозволяє вивчати розподіл тиску, що виникає в граничних шарах при їх русі з поверхнею обертового модельного вала з плоскою поверхнею, розташованою на певній відстані з встановленим мінімальним зазором від 0 до 5 мм, шагом 25 нм. В якості вимірювального приладу використовується мановакуумметр МВТП-160А. Для вимірювання витрати рідини при різному надлишковому тиску використовуються дросельний кран тонкого регулювання і витратомір у вигляді мірного тарованого циліндра. Одержані результати дозволили зробити принципову оцінку можливості використання динамічних процесів у дифузійній і конфузійній областях контакту для розробки і створення принципово нової трибомолекулярної техніки нагнітання і розрідження середовища.

Лабораторний прилад тертя АСБ-02Т для вивчення теплових процесів у граничних шарах трибоконтракту. Для вивчення теплових процесів у граничних шарах першорядне значення має розподіл температури в контактній області. З цією метою був виготовлений прилад АСБ-02Т, в якому модельний підшипник ковзання являє собою плоску поверхню у вигляді плоскопаралельного диска, виготовленого з германієвого скла вищої якості, полірованого, просвітленого, що має захисне покриття. Цей диск герметично встановлювався в днище камери, яка заповнювалася вазеліновим маслом ХЧ, пропускає 90% теплового молекулярного випромінювання у відповідному діапазоні інфрачервоного (ІК) спектра (від 7,5 до 13,0 мкм). У цьому діапазоні інфрачервоного випромінювання германієве скло і вазелінове масло практично прозорі, що дозволило за допомогою тепловізора ThermoCAM™65 (рис. 5) дослідити розподіл температури по полю зору в контактній області модельного підшипника ковзання при терті в динаміці з чутливістю 0,5 °С.



а)



б)

Рис. 5. Зовнішній вигляд машини тертя АСБ-02Т (а), тепловізора ThermoCAM™ R65(б) та їх розташування в ході досліджень

Після ретельного юстування і фокусування контрзразок шляхом повільного навантаження піднімався до зіткнення з поверхнею, що утворює циліндр фторопластового ролика, створювався лінійний контакт, і відеокамера фіксувала підвищення температури в ньому на 3,5°С відносно температури навколишнього середовища. При осьовій силі стиснення 40 Н утворювався контакт шириною близько 2,8 мм. Плавне зняття навантаження і вивід із контакту германієвого контрзразка не приводили до вирівнювання температури, тобто теплий слід від створеного разовим стисненням контакту залишався незмінним (рис. 6). Цей факт, так само як і розподіл теплових потоків при терті, вимагає додаткового вивчення, що може бути досягнуто з використанням розробленого приладу АСБ-02Т. Прямі вимірювання теплових процесів у трибоконтракту сучасної тепловізійної техніки на приладі АСБ-02Т дозволили підтвердити виникнення в еластогідродинамічному контакті термоэффекту [8], котрий не знаходить однозначного пояснення без урахування динамічних процесів у граничних шарах мастила.

Прилади та методи для вивчення впливу граничних шарів на контактні напруження. Прилад АСБ-01 дозволяє досліджувати вплив природи змащувального середовища на реологічні та

фізико-хімічні властивості граничних шарів, котрі мають істотний вплив на фактичні контактні напруження поверхонь тертя.

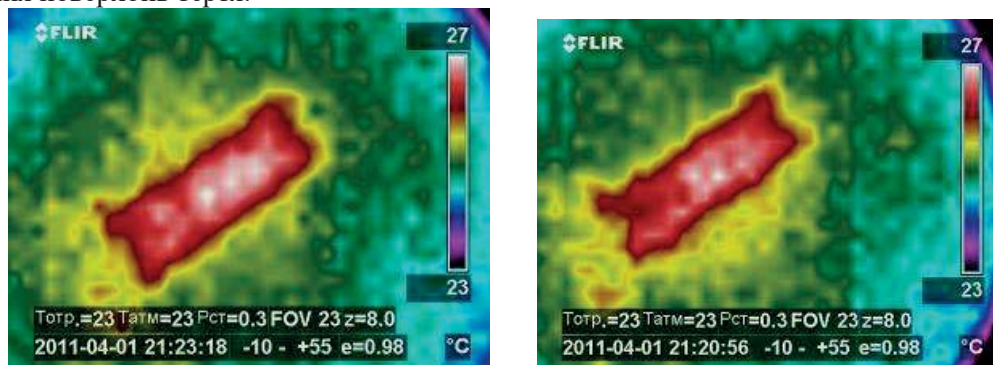


Рис. 6. Розподіл температури в контактній області при стисненні поверхні, що утворює циліндр ролика, з германієвим плоским склом у вазеліновому маслі (а) і те саме - після зняття навантаження і створення зазору між поверхнями 1 мм через 1 хвилину

Так, шляхом повільного притиснення плоского модельного підшипника 1 з оргскла полірованою поверхнею до робочій поверхні валу 2 (рис.7, а) при осьовому навантаженні 4 Н на повітрі виникає тонка прямокутна площадка контакту.

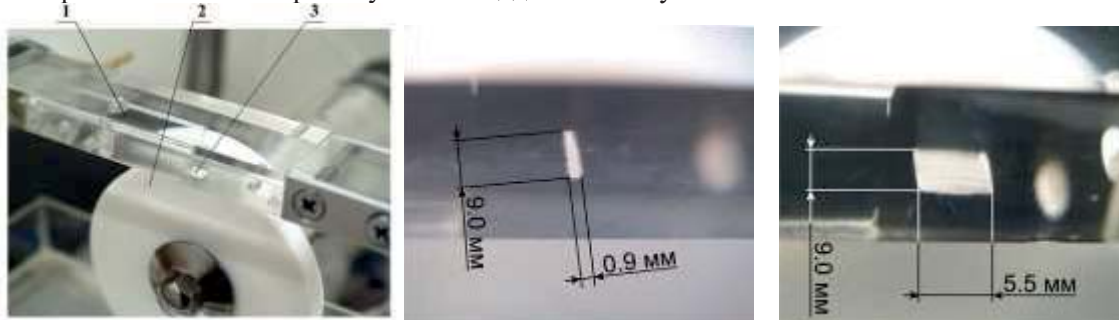


Рис. 7. Вигляд контакту 3 машини тертя АСБ-01, що виникає при зіткненні плоского модельного підшипника 1 з модельним валом 2, змоченого авіагасом ТС-1 (а), та утворення лінійного контакту на повітрі (б), а також при змочуванні його авіагасом при осьовому навантаженні 4 Н

Її довжина відповідає довжині модельного підшипника, тобто висоті ролика - 9 мм, а ширина - 0,9 мм, що узгоджується з розрахунковими значеннями, отриманими за формулою Г.Герца, що враховує модулі пружності матеріалів. У верхньому положенні контакту (рис. 7, а) при його змочуванні гасом капілярний і імерсійний ефекти проявляються візуально: ширина змоченого контакту при інших рівних умовах зростає до 5,5 мм. З огляду на те, що добре змочувані є модельний підшипник (оргскло), а поверхня вала (фторопласт) - олеофобна по відношенню до неполярних вуглеводневих рідин, можна припустити, що висота епітропних рідкокристалічних шарів дорівнює відстані між поверхнями в крайніх положеннях ширини контакту, яку можна оцінити шляхом обчислення відстані між поверхнями на краях меніска. Так, у гасі ТС-1 ширина змоченого контакту при діаметрі ролика 80 мм дорівнювала 7,4 мм, в маслі ПМ-10 - 7,9 мм і в маслі МС-20 - 11,4 мм. В'язкість цих масел при 20 0С відповідно становила 1,34 сСт; 24,7 сСт і 1600 сСт. Товщина епітропного імерсійного упорядкованого граничного шару визначалася з розрахунку сталості навантаження 1,5 Н без урахування відмінностей за коефіцієнтом поглинання в малих товщинах, які відповідно становили: для ТС-1 - 0,17 мм, для ПМ-10 - 0,19 мм і для МС-20 - 0,4 мм. При цьому врахувати мінімальну товщину змащувального шару виявилось досить складно, хоча вона, безумовно, впливає на отримані результати вимірювань ширини змоченого контакту. Таким чином, можна припустити, що границі мастильного шару неполярного вуглеводневого середовища, де припиняється імерсійний ефект навколо змоченого контакту, утвореного криволінійними поверхнями олеофобною (фторопласт) і олеофільною поверхнею, є показником, котрий відображає товщину епітропного рідкокристалічного приповерхневого шару, структурованих молекул у полі твердої підкладки.

Оптико-поляризаційний метод дослідження розподілу контактних напружень.

Дослідження розподілу напружень поверхні модельного, а також плоского вала, проводилися оптико-поляризаційним методом. В якості підшипника використовувався кубик ізотропного полімерного матеріалу з полірованими гранями. Паралельний пучок білого світла або лазера направлявся фронтально до контакту, після чого він, пройшовши через поляризатор, проектувався на екран. Такий підхід використовувався як в статичних умовах навантаження, так і в динаміці - при терті в різних середовищах (повітря або змащувальне середовище). Поляризаційно-оптичним методом досліджень (рис. 8) експериментально спостерігається перерозподіл контактних напружень у поверхнях, змочених граничними шарами мастила (рис. 8, б, в).

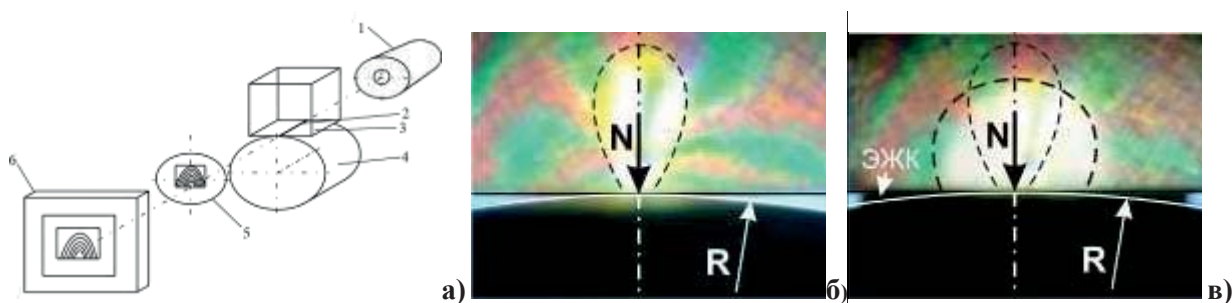


Рис. 8. Контактні напруження ізотропному кристалі (поляризоване світло) при стисненні навантаженням N : а - на повітрі в статиці; б - змочений маслом (ЕЖК-шарами) у статиці; в - тертя за годинниковою стрілкою

Зменшення максимальних розрахункових контактних напружень, викликане збільшенням фактичної площі контакту, обумовлене виникненням пружнодеформованих еліпсоїдних рідкокристалічних шарів мастила, схематично представлено на рис. 8.

При стисненні полірованих плоских поверхонь сталі ШХ15 і кварцового скла, на які попередньо наносився шар оптично непрозорої речовини (закрашене чорним барвником масло ТАД-17), спостерігається його екструзія, а після зняття навантаження - виникнення газових порожнин у граничному шарі. Вихідна полірована сталева поверхня після сканування на ЛДФСПП представлена на рис. 9, а. При стисненні поверхонь до 1,0 МПа у контакт вступають вершини хвилястих поверхонь сталевих і кварцових зразків (рис. 9, б), де площа контактів вершин (світлі ділянки) становила близько 40% контурної площі в полі зору. При збільшенні навантаження до 5,0 МПа, очевидно, починають зливатися пружно деформовані вершини, а між ними утворюються загальні площини із залишками непрозорого мастила (рис. 9, в).

Подальше збільшення навантаження до 10,0 МПа призвело до деякого розширення площі контактуючих вершин і зменшення площі площин, заповнених маслом (рис. 9, г). При цьому загальна площа контактуючих вершин (світлі ділянки) збільшилася до 60% і чітко видно утворення загальних для обох поверхонь порожнин, заповнених зафарбованим маслом.

При збільшенні навантаження спостерігалася перетікання граничних шарів з утворених порожнин назовні. Після цього зняття навантаження призводило до дуже повільного збільшення об'ємів зі змащувальним матеріалом, про що свідчать 2D зображення контакту через 10 хвилин і 24 години - після розвантаження контакту. При цьому після зняття навантаження в контакт, утвореному під тиском 10 МПа, і декількох днів спостережень, роз'єднати поверхні в нормальному напрямку до площини контакту не вдавалося. Роз'єднати його з найменшими зусиллями вдалося лише шляхом зсуву. Таким чином, при стисненні двох поверхонь з граничними шарами утворюються загальні для поверхонь замкнуті порожнини з субмікрооб'ємами змащувального матеріалу. Лазерна 3D профілографія підтверджує можливість виникнення розрідження в мікрооб'ємах граничних шарів в утворених, загальних для обох поверхонь порожнин, заповнених фрагментами змащувального середовища.

Отримані результати дослідження пружної деформації ЕЖК-шарів в статичних умовах (без тертя) стиснення і релаксації після зняття навантаження дозволяють пояснити ряд відомих явищ або доповнити їх новими відомостями і гіпотезами.

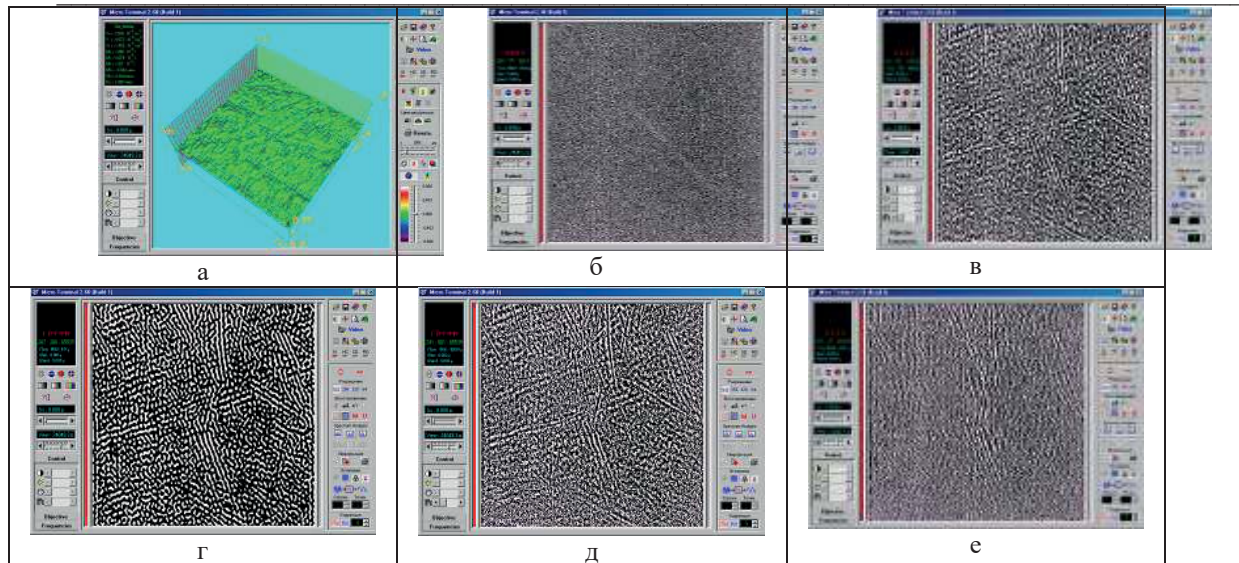


Рис. 9. Утворення загальних площин з граничними шарами непрозорого змащувального середовища між сталевію і кварцовію полірованими поверхніями (а) при їх стисненні до напружень 1,0 МПа (б), 5,0 МПа (в), 10,0 МПа (г) і після зняття навантаження через 10 хвилин (д) і 24 години (е)

Висновок. Розроблені і апробовані методики досліджень динамічних процесів граничних шарів у контактній області модельних трибосистем, а також виготовлені прилади дозволяють досліджувати еволюцію граничних шарів з позицій їх домінуючого впливу при виникненні областей квазісухого тертя в трибоконткті.

Література

1. Костецкий Б. И. Износостойкость деталей машин / Б. И. Костецкий. – М. ; К : Машгиз, 1950. – 168 с.
2. Крагельский И. В. Основы расчетов на тертя и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
3. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. – М. : Физматгиз, 1963. – 472 с.
4. Чихос Х. Системный анализ в трибонике /Х.Чихос. – М.: Мир, 1982. – 351 с.
5. Прибор для непрерывного измерения толщины смазочного слоя в подшипнике скольжения. Авторское свидетельство №91589 на изобретение. Бюллетень изобретений, 1950, № 16. Авт. Д.С.Коднир, Л.М.Ронин, М.Д.Медвинский, Э.Ф.Зоммер.
6. Дмитриченко Н.Ф. Мнацаканов Р.Г., Белоус В.С., Грабчак В.Г. Установка для измерения толщины смазочного слоя в подшипниках. Патент РФ №RU 2972. Оpubл. 15.05.1992.
7. Стельмах А.У., Кияшко С.Н., Костюник Р.Е., Терновая Т.В., Сидоренко А.Ю. Способ определения противоизносных и (или) антифрикционных свойств трибосистемы с одним линейным контактом постоянной протяженности и устройство для его осуществления. Патент РФ №RU 2279660. Оpubл. 10.07.2006 , бюл. №19.
8. Дмитриченко Н.Ф. Эластогидродинамика. – Львов: Изд-во Национального университета «Львовская политехника», 2000. – 224 с.
9. Патент на изобретение №2179328 РФ, G02B21/00, G01B11/30. Способ дифференциально-фазовой профилометрии и/или профилографии и устройство для его реализации /Кияшко С.Н., Смирнов Е.Н., Ильченко Л.Н., Коленов С.А., Стельмах А.У. – №2001116525/28; заявл. 19.06.01; опубл. 10.02.2002.
10. Dowson D. and Taylor, C.M., 1974, “Fundamental Aspects of Cavitation in Bearings,” Cavitation and Related Phenomena in Lubrication, ImechE, England, pp. 15-26.
11. Патент на корисну модель №57465 Україна, (51) МПК G01N 3/56. Пристрій визначення трибореологічних характеристик тертя ковзання в умовах граничного змащення /Стельмах О.У., Бондар В.С., Бадір К.К., Ібраїмов Т.Т. – № U 2010 10464; заявл. 30.08/2010: опубл. 25.02.2011. Бюл. №4. – 18 с.