

Р.Є. Костюнік, О.У. Стельмах, В.А. Радзівський, О.Г. Ковальчук, В.С. Бондар<sup>1</sup>  
В.Л. Мартинюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний авіаційний університет

<sup>2</sup>Луцький національний технічний університет

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ АДГЕЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ ТРИБОКОНТАКТУ КОВЗАННЯ В УМОВАХ ГРАНИЧНОГО ЗМАЩУВАННЯ

*На основі вивчення закономірностей зміни тиску та фазового стану граничного шару (рідина, рідинно-газова суміш) вздовж осі вводу матеріалу змащування і робочих областях лінійного контакту ковзання (конфузорної – перехідної – дифузорної) запропонована фізична модель ДПГШ, котра встановлює взаємозв'язок динамічних процесів з трибологічною поведінкою вузла тертя.*

*Ключові слова: тертя, зношування, граничні шари, динамічні процеси*

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

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ АДГЕЗИОННОГО ИЗНАШИВАНИЯ ТРИБОКОНТАКТА СКОЛЬЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКИ

*На основе изучения закономерностей изменения давления и фазового состояния граничного слоя (жидкость, жидкогазовая смесь) вдоль оси ввода материала смазки в рабочих областях линейного контакта скольжения (конфузорной – переходной – диффузорной) предложена физическая модель ДПГС, устанавливающая взаимосвязь динамических процессов с трибологическим поведением узла трения.*

*Ключевые слова: трение, изнашивание, граничные слои, динамические процессы*

R.E. Kostyunik, A.U. Stelmakh, V.A. Radzievsky, E.G. Kovalchuk, V.S. Bondar,  
V.L. Martyniuk

### EXPERIMENTAL REGULARITIES OF ADHESIVE WEAR OF TRIBOCONTACT SLIDING UNDER BOUNDARY LUBRICATION CONDITIONS

*Based on the study of the regularities of the pressure change and the phase state of the boundary layer (liquid, liquid-gas mixture) along the axis of the lubricant material input in the working regions of the linear sliding contact (converging - transitional - diffuser), a physical model of the DPGS is proposed, which establishes the relationship between dynamic processes and the tribological behavior of the friction unit.*

*Key words: friction, wear, boundary layers, dynamic processes*

**Постановка проблеми.** Сучасні машини та механізми є сукупністю вузлів тертя з рухомими поверхнями, що контактують. Тому їх надійність, довговічність і працездатність визначаються переважно експлуатаційними властивостями кожної із трибосистем. Найбільш поширеними та проблемними є трибосистеми ковзання та кочення в умовах граничного змащування. Відмови машин і агрегатів під час експлуатації, викликані зношуванням вузлів тертя, перевищують 80%, а втрати, пов'язані із цим, складають до 5% національного доходу промислово-розвинутих країн світу.

Однією з актуальних проблем сучасної трибології є підвищення працездатності трибосистем із граничним тертям. Розвиток цього напрямку стримується недостатністю знань про складні фізико-хімічні, фізико-механічні та динамічні процеси, що відбуваються при терті в умовах високих навантажувально-швидкісних параметрів у трибосистемі «тверде тіло - змащувальне середовище - тверде тіло».

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існує два основні взаємовиключних підходи до вирішення проблеми граничного тертя. Перший, ЕГД (еластогідродинамічний) підхід, заснований на динамічних процесах у тонкому змащувальному шарі, у котрому виникає надлишковий тиск, що ототожнюється з контактними напруженнями в робочих поверхнях, хоча трибоконттакт має три характерні області у порівнянні з напрямком руху: область, що звужується, або конфузорна (КО), перехідна область (ПО) та область, що розширюється, або дифузорна (ДО). При цьому змащувальне середовище розглядається, як ньютонівська однорідна рідина. Цей підхід

розроблений О. Рейнольдсом, М.П.Петровим та ін. [1,2] в основному на рівні теоретичних описів, котрі передбачають беззносність ЕГД-контакту, що суперечить експерименту. При цьому адгезійно-деформаційні взаємодії між поверхнями не розглядаються. Однак у рамках цього підходу виявлені кавітація [3] і термоэффект [4] у змащувальних шарах, котрі підтверджують наявність у них динамічних процесів.

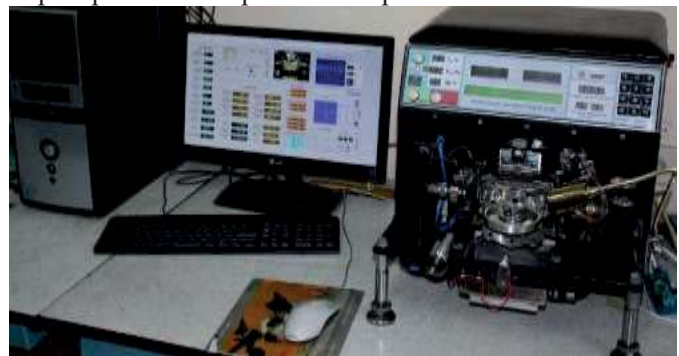
Другий підхід, заснований на адгезійно-деформаційній теорії граничного змащування, є визнаним у сучасній трибології, експериментально підтвердженим і розвинутий у роботах Крагельського І.В, Боудена та ін.[5, 6], а також вітчизняним вченим Костецьким Б.І. та його школою (Голего М.Л., Аксьонов О.Ф., Шевеля В.В., Запорожець В.В., Дмитриченко М.Ф. та ін.) [7...9]. У рамках цього підходу граничний шар розглядається, як «третє тіло», в котрім тиск, що ототожнюється з герцівськими контактними напруженнями, завжди вище тиску навколишнього середовища. При цьому які-небудь динамічні процеси в граничному шарі не враховуються, що не дозволяє пояснити наявність у ньому кавітації та термоэффекту, описати кінетику адгезійно-деформаційної взаємодії поверхонь, визначити умови та області його локалізації, обґрунтувати механізм утворення й розподілу продуктів зношування в контактній області та інші ефекти. Це обмежує встановлення взаємозв'язку неоднозначних складних динамічних процесів у граничних шарах із адгезійно-деформаційною взаємодією поверхонь, що не дозволяє управляти трибологічною поведінкою трибоконтакту. В даній роботі запропонований третій підхід до проблеми, що розглядається [10], котрий заснований на адгезійно-деформаційній взаємодії поверхонь у її взаємозв'язку з динамічними процесами у граничному шарі. Для встановлення такого взаємозв'язку було необхідно провести систематичні комплексні дослідження як закономірностей динамічних процесів у граничному шарі, так й адгезійно-деформаційної взаємодії поверхонь спільно з трибологічною поведінкою контакту, що й виявилось метою даної роботи.

**Постановка завдань.** В роботі поставлена мета – шляхом експериментальних досліджень встановити взаємозв'язок динамічних процесів з трибологічною поведінкою вузла тертя.

**Викладення основного матеріалу.** Дослідження процесів тертя в умовах граничного змащування вимагало використання спеціального обладнання, котре було розроблено і виготовлено в лабораторії нанотриботехнологій НАУ. Фізичне моделювання радіального підшипника ковзання здійснювалось на спеціально розробленому та виготовленому приладі тертя ковзання з лінійним контактом АСК-01, де модель підшипника реалізовувала плоска поверхня нерухомого зразка (рис. 1, а), а модель вала – зразок у вигляді циліндричного ролика (діаметр – 33 мм, ширина робочої поверхні твірної, тобто довжина модельного підшипника – 3 мм). Сталь ШХ-15, HRC 59...63. У приладі АСК-01 (рис. 1, б) забезпечується сталість лінійного миттєвого контакту та рівномірність розподілу контактних напружень завдяки використанню системи самовідновлення контакту (рис. 1, а). Це досягнуто тим, що осі обертання модельного підшипника OZ і OX перетинають ось обертання модельного вала OZ в його центрі мас по осі дії осьового навантаження OY. Для забезпечення коректності трибологічних досліджень використовувався розроблений та виготовлений лазерний скануючий диференційно-фазовий мікроскоп-профілометр ЛСДФМП з чуттєвістю по профілю 1 нм, а також растровий електронний мікроскоп РЕМ-106І.



а)



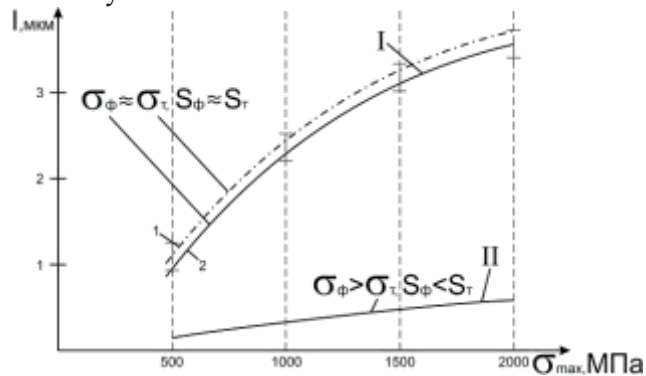
б)

Рис. 1. Лабораторна машина тертя АСК-01

В якості змащування використовували паливно-мастильні матеріали різних класів: авіагаси (ТС-1, РТ), моторні мінеральні МС-20, ГАЛОЛ М-4042, МК-8) синтетичні масла (диалкілбензолне, ИПМ-10) вакуумні масла (ВМ-6, ВМ-4), гідравлічні масла (АМГ-10, ИПП 18),  
© Р.Є. Костюнік, О.У. Стельмах, В.А. Радзівєвський, О.Г. Ковальчук, В.С. Бондар, В.Л. Мартинюк

холодильне масло ХФ 12-16 та ін. Трибологічні випробування проводились у широкому діапазоні навантажувально-швидкісних параметрів. Початкові контактні напруження створювались для низькомолекулярних вуглеводневих середовищ 1000 МПа, а для масел - від 2000 до 2500 МПа. Лінійна швидкість ковзання варіювалася від 0,04 м/с до 2м/с. Шорсткість робочих поверхонь модельних валів і плоского підшипника створювалася шляхом їх послідовного полірування алмазними пастами до рівня параметра  $Ra < 20$  нм, що контролювалася ЛСДФМП. Вимірювання профілів зношування доріжок тертя проводились контактним профілографом-профілометром «Калібр М201» і безконтактним ЛСДФМП.

**Результати досліджень та обговорення.** На рис. 2...4 представлені експериментальні закономірності процесу зношування, адгезійної взаємодії поверхонь і розподіл продуктів зносу після тертя симетричної системи, котрі не мають однозначного пояснення з позицій відомих теорій трибології. Але вони можуть бути описані з позицій упорядкованих мікротечій пружно-деформованих граничних шарів мастила, котрі зумовлюють градієнти тисків у конфузійній та дифузійній областях трибоконтракту.



**Рис. 2. Залежність зносу I від початкових максимальних контактних навантажень  $\sigma_{max}$  (1- теоретична, 2 –експериментальна) при різних миттєвих фактичних контактних напруженнях  $\sigma_{\phi}$  відносно теоретичних  $\sigma_{\tau}$  з урахуванням фактичної площі контакту  $S_{\phi}$  і теоретичної  $S_{\tau}$ . Швидкість ковзання 0,3 м/с**

На рис. 2 представлені зміни зносу від осьового навантаження модельної трибосистеми ковзання при реалізації сталого (I) і рухомого контакту (II). У першому випадку фактична миттєва площа контакту приблизно відповідає теоретичній і сам контакт при обертанні модельного валу практично не порушується.

Наведена залежність (I) відповідає традиційним уявленням про збільшення зносу з ростом контактних напружень (пунктир 1). Однак при рухомому контакті, викликаному осьовими відхиленнями поверхні твірної циліндру модельного валу, фактична площа контакту при постійному навантаженні суттєво (у рази) менше за теоретичну. Отже миттєві напруження поверхонь більші за розрахункові, що пояснюється осьовою рухомістю контактуючих ділянок у межах контурної площі. При цьому інтенсивність зношування суттєво зменшується (II). Після реалізації повного контакту на приладі АСК-01, коли миттєва площа контакту наближена до теоретичної та фактичні контактні напруження суттєво менші, ніж у попередньому випадку, інтенсивність зношування за інших рівних умов навантаження зростала, незважаючи на менші значення фактичних контактних напружень, які забезпечуються системою самоцентрування (рис. 1, а). Збільшення зносостійкості при підвищенні миттєвих контактних напружень (рис. 2, II) можна пояснити динамічними процесами в граничних шарах, а саме, їх торцевими мікро-перетіканнями з конфузійної області, котра реверсивно переміщується в дифузійну в осьовому напрямку. Ця закономірність справедлива для масел різних класів і особливо яскраво проявляється в синтетичних маслах (ІПМ-10).

Робоча поверхня тертя в контактній дифузійній області характеризується ознаками адгезії (виривання, каверни, кратери, рис. 3, а), які завжди відсутні в конфузійній області. Профілограми доріжок зносу (рис. 3, б) мають явно асиметричний характер відносно осі пересічення максимальної глибини профілю, перпендикулярної плоскій поверхні. Симетрія профілів (рис. 3, б) порушується внаслідок адгезійного руйнування поверхні підшипника в дифузійній області (ДО) контакту. Адгезійна взаємодія поверхонь в дифузійній області трибоконтракту може бути викликана зниженням в граничних шарах тиску нижче тиску навколишнього середовища. Таке

розрідження в граничних шарах призводить до їх десорбції і додаткового стиску поверхонь, ініціюючи їх схоплювання.

На рис. 3, б показана фактична асиметрія профілограм доріжок ковзання, утворених на поверхні модельного підшипника після тертя теоретично симетричного лінійного трибоконтакту. Порушення симетрії пов'язано з утворенням адгезійних локальних взаємодій, показаних на рис.3,б, у вигляді сплесків величини зносу в дифузійній області контакту.

Продукти зношування у вигляді високодисперсного порошку розташовувалися навколо доріжки тертя певним чином (рис. 4), відображаючи траєкторію їх руху.

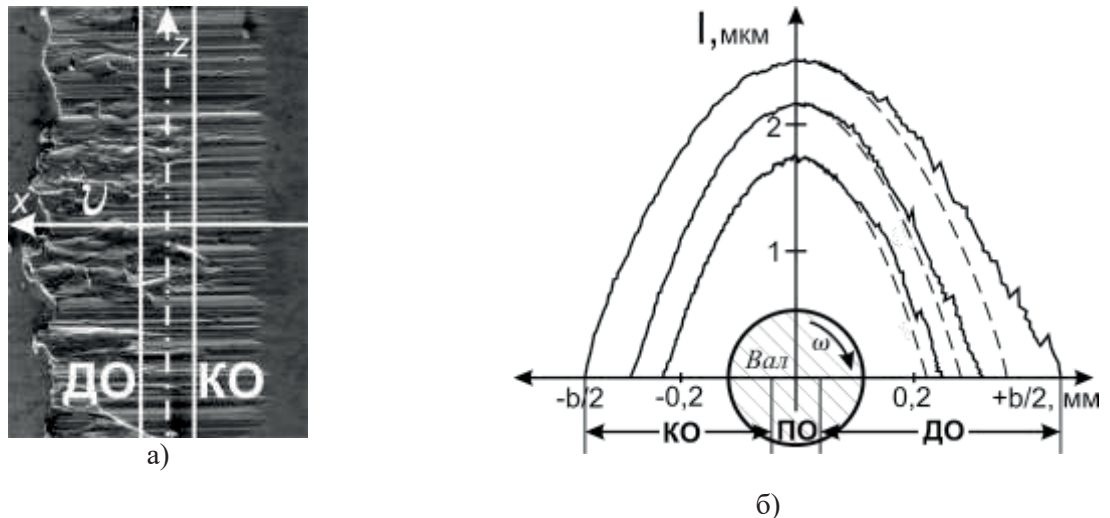


Рис.3. Адгезійна взаємодія матеріалів поверхонь у дифузійній області (а) і асиметрія профілів зношених доріжок ковзання (б)

Планарна картина осадження вказує на їх впорядкований рух: більшість частинок при цьому накопичувалась в області входу вала в контакт, а по торцях частки зносу осідали симетрично осі напрямку ковзання. Такий розподіл продуктів зносу свідчить про їх впорядкований рух із області входу вала в контакт в область виходу. Лінії току граничних шарів з мікрочастинками зносу, показані на рис. 4, відображають мікротечії. Звертає на себе увагу практична відсутність продуктів зношування в дифузійній області виходу вала з контакту. Аналіз такого розподілу продуктів зношування в навколоконтактній області свідчить про виникнення при терті в умовах граничного змащення певних течій граничних шарів, що виявляються в осіданні продуктів зносу за певними траєкторіями. У конфузійній області контакту відбувається винос частинок зносу зворотними течіями на досить велику відстань від нього. При цьому по краях контакту спостерігається рух продуктів зношування в область виходу вала з контакту, що свідчить про їх всмоктування. Можливі лінії токів граничних шарів набігаючих з поверхнею 1 і виникаючих зустрічних течій 3, спрямованих зворотно руху вала, представлені стрілками (рис. 4).

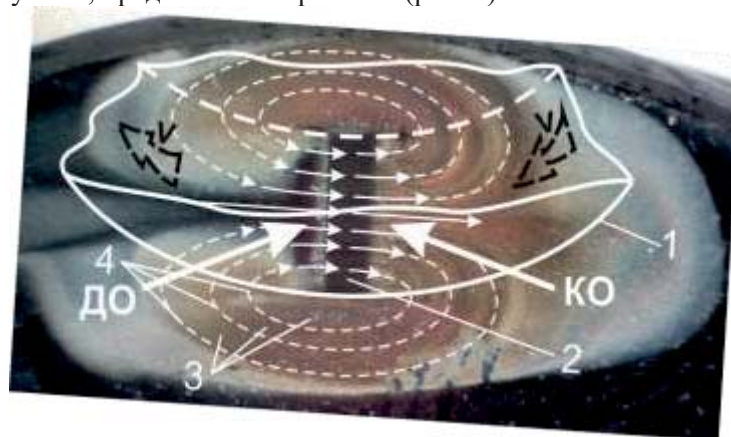
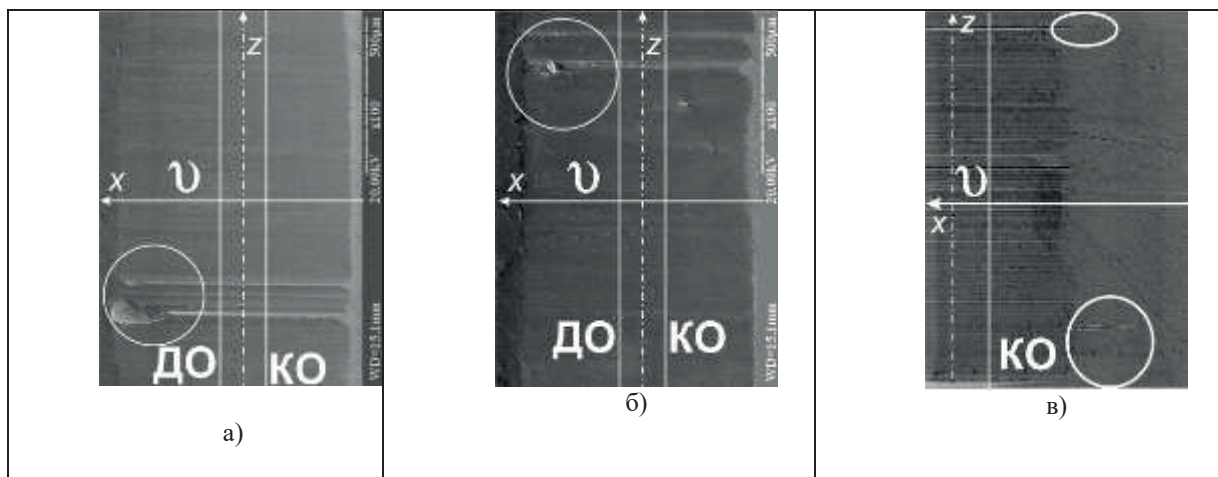


Рис. 4. Розподіл продуктів зношування: 1 – контур модельного вала, що ковзає в напрямку V; 2 – доріжка тертя; 3 – продукти зносу; 4 – траєкторії течій

Крім цього, спостерігається наступне: при короткочасному терті ковзання полірованих поверхонь основна ознака дії адгезійної складової сили тертя – зношування – практично відсутнє, а коефіцієнт тертя досягає значень 0,15. Виходячи з адгезійно-деформаційної теорії, адгезійна складова сил і тертя в сто разів більше інших складових. Тобто, представлення адгезійної складової макросили тертя у вигляді переважаючою (99% від усіх втрат на тертя в умовах граничного змащення) викликає сумнів. Отже, крім відомих адгезійної і деформаційної складових сили тертя, в умовах граничного змащення в контактні виникають процеси, що призводять до додаткового опору руху вала, викликані, ймовірно, динамічними процесами в граничних шарах.

На рис. 5 представлені області локалізації адгезійного пошкодження модельного підшипника. Видно, що в дифузійній області перед кромкою виходу вала з контакту відбуваються локальні виривання матеріалу в випадкових місцях. У тому ж перерізі, але в конфузійній області (перед кромкою входу вала в контакт), спостерігається штрихове перерване мікрорізання поверхні часткою, раніше вирваною з підшипника в дифузійній області. Отже, в дифузійній області відбувається первинна адгезійна взаємодія поверхонь, після чого відбувається утворення продуктів адгезійного зносу за наступним механізмом. Окислені частки зносу адгезійного походження, котрі закріпилися на поверхні вала, потрапляючи в конфузійну область, здійснюють мікрорізання поверхні підшипника, утворюючи на ній рівномірні риски в напрямку ковзання (рис. 5 а, б). Сколювання вершин раніше утворених адгезійних «наростів» в області входу вала в контакт призводить до утворення частинок зносу, про що свідчить штрихове дряпання робочої поверхні в конфузійній області (рис.5, в). Виникнення адгезійних вузлів схоплювання відбувається перед кромкою виходу вала з контакту і на деякій відстані від неї в дифузійній області.



**Рис. 5. Локалізація адгезійного руйнування поверхні модельного підшипника в дифузійній області (ДО) контакту в напрямку  $y$  після тертя ковзання по ньому модельного вала (а, б) і штрихове мікрорізання передконтактної конфузійної області (КО) (в)**

Крім того, спостерігається протиріччя: при короткочасному терті ковзання полірованих поверхонь основна ознака дії адгезійної складової сили тертя - зношування - практично відсутня, а коефіцієнт тертя досягає значень 0,15, де, виходячи з молекулярно-деформаційної теорії, її адгезійна складова в сто разів більше інших складових. Тобто уявлення адгезійної складової макросили тертя у вигляді переважаючою (99% від усіх втрат на тертя в умовах граничного змащення) [7] викликає сумнів.

Отримані результати свідчать про різнополярність процесів у конфузійній і дифузійній областях відносно середини контакту модельної трибосистеми ковзання в умовах граничного змащення, що вимагає експериментального підтвердження на спеціальному лабораторному обладнанні з можливістю візуальних спостережень і зондування тиску в граничних шарах прямими вимірами шляхом сканування в динаміці.

Аналіз результатів експериментальних досліджень дозволив висунути гіпотезу про протікання в граничних шарах трибоконтакту ковзання двох різнополярних процесів у граничних змащувальних шарах, яка полягає в наступному. Процес тертя ковзання трибосистеми з лінійним

контактом у напрямку руху вала (рис. 6, 7) представляється, як послідовність динамічних деформаційних процесів у граничних шарах:

- етап початку формування контакту (рис. 6, 7, область 1), коли при малих навантаженнях у контакт вступають лише вершини шорсткостей, утворюючи дискретні площадки контакту (за Крагельським І.В.);

- етап формування замкнутих порожнин впадин (рис.6, 7, область 2). При збільшенні осьового навантаження за рахунок пружних деформацій поверхонь площа контактуючих вершин зростає з утворенням замкнутих порожнин з мастилом - «резервуари» (за Боуденом Ф.);

- етап стиснення виникаючих замкнутих порожнин (рис. 6, 7, область 3). При подальшому підвищенні контактного навантаження мастило видавлюється з замкнутих порожнин впадин у сусідні порожнини і через них - назовні;

- етап розрідження (рис. 6, 7, область 4). Після досягнення максимальної пружної деформації контурно-замкнутих вершин напруження в них зменшуються, вони пружно релаксують, збільшуючи обсяг «резервуарів» із залишками мастила. Так як надходженню мастила з середовища в мікрооб'єми резервуарів перешкоджають розташовані навколо них такі ж численні резервуари, то в них виникає розрідження;

- етап заповнення розріджених замкнутих порожнин впадин (мал. 6, 7, область 5). Цей етап носить вибуховий характер, коли сильно розріджені фрагменти мастила у впадинах виходять у середвище з атмосферним тиском за частки мікросекунд.

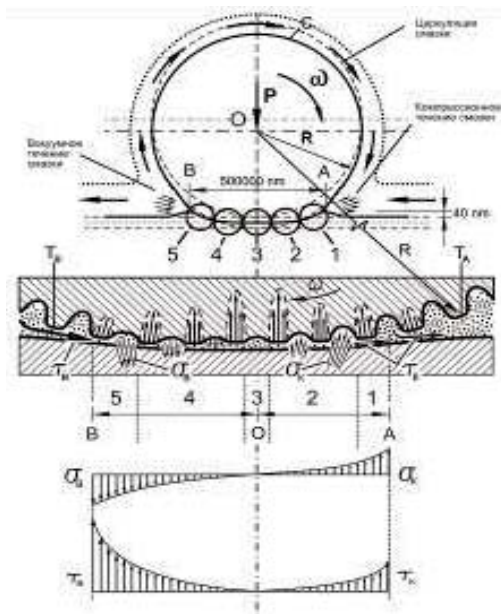


Рис. 6. Схема утворення порожнин розрідження в дифузійній і стиску – в конфузійній областях, виникнення вторинних течій, епюри розподілу нормальних  $\sigma$  і тангенціальних  $\tau$  тисків у граничних шарах:

1 – область утворення замкнутих загальних для поверхонь порожнин; 2 – область стиску замкнених порожнин впадин та екструзії мастила; 3 - область максимального стиску впадин та екструзії мастила; 4 – область розрідження; 5 - область заповнення порожнин впадин мастилом біля входу вала з контакту

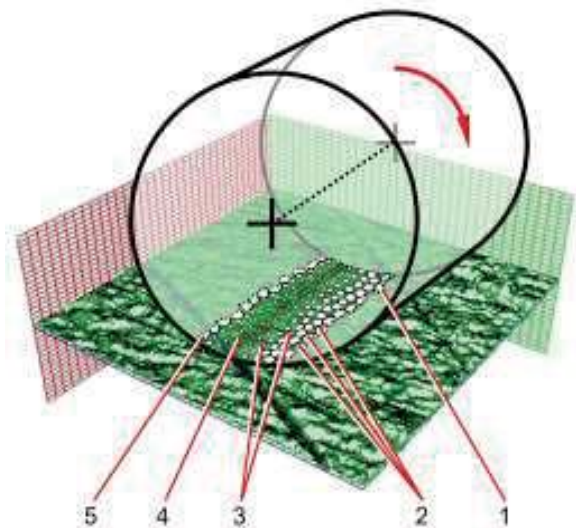


Рис. 7. Схема утворення загальних для поверхонь порожнин із граничними шарами, їх стиску в конфузійній та розрідження – в дифузійній областях контакту:

1 – область утворення загальних для поверхонь замкнутих порожнин впадин - «резервуарів» із мастилом; 2 – область стиску замкнутих порожнин впадин та екструзії мастила; 3 - область максимального стиску замкнутих порожнин впадин; 4 – область розрідження порожнин впадин; 5 - область заповнення порожнин мастилом під тиском навколишнього середовища

- етап формування замкнених порожнин западин (рис.6, 7, область 2). При збільшенні осевого навантаження за рахунок пружних деформацій поверхонь площа контактують вершин зростає з утворенням замкнених порожнин з мастилом - «резервуари» (по Боудену Ф.);

- етап стиснення виникають замкнених порожнин (рис. 6, 7, область 3). При подальшому підвищенні контактної навантаження мастило видавлюється з замкнених порожнин западин в сусідні порожнини і через них - назовні;

- етап розрідження (рис. 6, 7, область 4). Після досягнення максимальної пружної деформації контурно-замкнених вершин напруги в них зменшуються, вони пружно релаксують, збільшуючи обсяг «резервуарів» із залишками мастила. Так як надходження мастила з середовища в мікрооб'єми резервуарів перешкоджають розташовані навколо них такі ж численні резервуари, то в них виникає розрідження;

- етап заповнення розріджених замкнених порожнин западин (мал. 6, 7, область 5). Цей етап носить вибуховий характер, коли сильно розріджені фрагменти мастила в западинах виходять в середу з атмосферним тиском за частки мікросекунд.

Такий десорбційно-адгезійний механізм зношування і утворення продуктів зносу підтверджується відсутністю ознак адгезії поверхонь в конфузорній області і впорядкованим розподілом продуктів зносу в навколоконтактній зоні переважно в конфузорній області контакту (шириною 0,1 мм) на досить великому (2 мм) віддаленні від нього (рис. 5). Адгезійна взаємодія поверхонь відбувається в дифузорній області трибоконтакту і може бути викликана зниженням у граничних шарах тиску нижче тиску навколишнього середовища, що з одного боку призводить до додаткового стиснення поверхонь, а з іншого - створює умови для квазісухого тертя, ініціюючого адгезійне схоплювання поверхонь. Впорядкований розподіл продуктів зношування (рис. 4) у поєднанні з асиметрією профілів зношених поверхонь (рис. 3, б) також може бути результатом процесів мікротечій граничних шарів і відповідних градієнтів тиску в них.

Отримані експериментальні закономірності підтверджують запропоновану гіпотезу про взаємозв'язок процесів адгезійного зношування поверхонь тертя з виникаючими динамічними процесами в граничних шарах мастила.

На основі отриманих експериментальних ефектів, які не мають свого однозначного пояснення з позицій відомих теорій трибології і спостережень за течіями, що виникають в контактній області, висунута гіпотеза про протікання в трибоконтакті ковзання двох різнознакових процесів у граничних змащувальних шарах, що представлено на рис. 6 і 7.

**Висновки:** Підвищення зносостійкості трибосистем з ростом миттєвих контактних напружень, асиметрія зношених доріжок ковзання, виникнення первинних вузлів адгезійної взаємодії в ДО і осідання продуктів зношування в області, близькій КО - один з результатів виникнення контактних мікротечій граничних шарів.

Висунута гіпотеза про наявність двох різнополярних процесів стиснення і розтягування фрагментів мастила в трибосистемі ковзання з лінійним контактом, ініційованих мікротечіями граничних шарів.

Встановлено, що первинна адгезійна взаємодія поверхонь тертя виникає в дифузорній області трибоконтакту. Запропоновано десорбційно-адгезійний механізм зношування при терті в умовах граничного змащення, що полягає в адгезії поверхонь у дифузорній області (ДО) контакту, вириванні та надходженні разом з валом первинних частинок зносу в конфузорну область (КО), які здійснюють мікрорізання поверхні в цій області з подальшим сколюванням вершин адгезійних «наростів», що переходять в продукти зносу.

### Література

1. Гидродинамическая теория смазки / Под редакцией и с доп. статьями проф. Лейбензона Л.В. - Государственное технико-теоретическое издательство. - М. - Л., 1934. - 575 с.
2. Никитин А.К., Ахвердиев К.С., Остроумов Б.И. Гидродинамическая теория смазки деталей машин. М.: Машиностроение, 1976. - 304 с.
3. Floberg L. Sub-Cavity Pressure and Number of Oil Streamers in Cavitation Regions With Special Reference to the Infinite // Journal Bearing Mech. Engng.: Acta Polytechnica Scandinavica. - 1968. - Ser. №37.
4. Дмитриченко М.Ф., Міланенко О.А. Мастильна дія оливо в умовах еластогідродинамічного змащення. - К.: Інформавтодор, 2009. - 184 с.

5. Крагельский И. В. Основы расчетов на тертя 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. Костецкий Б. И. Износостойкость деталей машин / Б. И. Костецкий. – М. ; К : Машгиз, 1950. – 168 с.
8. Запорожец В.В. Ремонт летательных аппаратов. Учебник для вузов гражданской авиации /А.Я. Алябьев, Ю.М. Болдырев, В.В. Запорожец и др.; под ред. Н.Л. Голего. – 2-е узд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1984. – 422 с.
9. Дмитриченко Н.Ф. Эластогидродинамика. – Львов: Изд-во Национального университета «Львовская политехника», 2000. – 224 с.
10. Стельмах О.У. Компресійно-вакуумна складова сили тертя в умовах граничного змащування // Вісник НАУ. – 2008. – №4. – С. 50–57.