

*В. Є. Марчук, канд. техн. наук, доц.,
О. І. Духота, канд. техн. наук, страш. наук. співроб.,
В. І. Морозов, канд. техн. наук, доц.*

ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТЕКСТУРОВАНИХ ЛУНКОВИХ ПОВЕРХОНЬ З ДИСКРЕТНО-ОРІЄНТОВАНОЮ СТРУКТУРОЮ В УМОВАХ ГРАНИЧНОГО МАЩЕННЯ

Національний авіаційний університет

Експериментально досліджено зносостійкість текстурованих лункових поверхонь з дискретно-орієнтованою структурою в умовах граничного мащення. На підставі фрактографічних досліджень поверхні тертя і сформованої фізичної моделі встановлено закономірності зношування дискретних поверхонь з лунками.

Загальна постановка проблеми та її зв'язок з науково-практичними задачами. Більшість вузлів тертя машин і механізмів працюють в умовах мащення контактуючих поверхонь. Загальноновизнано, що на перехідних режимах під час пуску і зупинок зношування трибовузлів настільки великий, що порівнюється із зношуванням під час виконання основної роботи. Але найбільше зношення має місце під час першого пуску і особливо при низьких температурах – режим граничного тертя, яке проявляються при мінімальній товщині мастильної плівки. Механізми зношування трибовузлів в таких умовах складний і різний для різних вузлів тертя. Забезпечення надійності роботи вузлів при граничному терті полягає в першу чергу в удосконаленні механізму мащення поверхонь.

Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем. Механізм граничного тертя досліджували Ахматов А.С., Боуден Ф.П., Слін Л.В., Крагельський І.В., Костецький Б.І., Матвієвський Р.М., Венцель С.В., Виноградов Г.В., Аксьонов А.Ф., Райко М.В., Ребіндер П.А., Розенберг Ю.А. та ін.

Уявлення про механізм граничного тертя різноманітні. Питання самоорганізації мастильних плівок розглядаються у багатьох роботах. Але більшість дослідників дотримують думки, що при граничному терті велике значення відіграють процеси руйнування і відновлення

мастильної плівки в крапках контакту, причому швидкість відновлення повинна бути не нижче швидкості руйнування [1–6].

При граничному терті навантаження сприймається не тільки мастильним шаром, але і окремими металевими виступами в місцях руйнування плівки. Швидкість відновлення мастильної граничної плівки залежить від механізму подачі мастила на поверхню тертя, який обумовлений дифузією, змащуваністю поверхні і розтіканням рідкого мастила. Велике значення у цих процесах відіграє мікротопографія поверхні тертя й особливо шорсткість. Від шорсткості залежить тривалість процесу формування і руйнування плівки, що може призвести до «плівкового голодування». Поняття «плівкове голодування» визначає процес граничного тертя, коли інтенсивність відновлення мастильної плівки в місцях її розриву нижче інтенсивності руйнування, плівка в місцях розриву не встигає відновлюватися і на поверхнях контактуючих тіл створюються ювенільні ділянки. Механізм «плівкового голодування» визначається від текстури мікрогеометрії поверхні тертя, зокрема, системою створених на поверхні мікрозаглибин [6].

Вплив форми, розмірів, профілю, розташування мікрозаглибин на триботехнічні характеристики вивчено недостатньо. Це пояснюється тим, що в промисловості існуючі способи обробки не можуть забезпечити можливість варіювання формою і розташуванням мікрозаглибин.

Механізм граничного тертя поверхонь з мікрозаглибинами дуже складний, залежить від великої кількості факторів при нормальному терті, саморегулюючий і сьогодні найменш досліджений. Процеси тертя та зношування на поверхнях з мікрозаглибинами протікають на фактичній площині контакту, розташованих між мікрозаглибинами, і по суті аналогічні процесам, що відбуваються на поверхнях контакту поверхонь без мікрозаглибин.

Мікрозаглибини мають різні геометричні форми (лунки, канавки), топографію. Вони можуть формуватися природньо у вигляді нерівностей на поверхні тертя (сформована шорсткість після припрацювання) або штучно (з застосуванням різних технологічних методів).

Для підвищення зносостійкості деталей сьогодні активно застосовують механічний метод формування текстурованих лункових пове-

рхонь з дискретно-орієнтованою структурою, суть якого полягає в динамічному впливі індентора на поверхню деталі і створення лунок за рахунок поверхнево-пластичного деформування. Лунки покращують змащувальні властивості поверхні, підвищують опір схоплюванню і корозії, скорочують період припрацювання. Вибір оптимального розташування лунок дозволяє конструювати поверхню з високими експлуатаційними властивостями, поліпшити триботехнічні характеристики, знизити напружений стан поверхні [7–10].

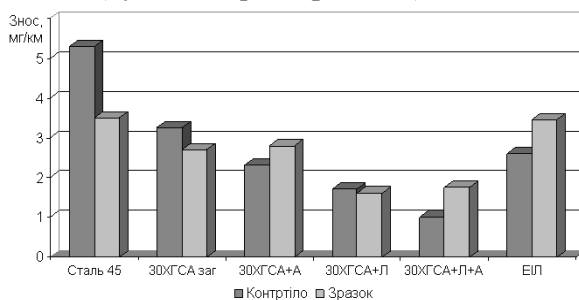
Мета дослідження. Дослідження кінетики та механізму зношування текстурованих лункових поверхонь з дискретно-орієнтованою структурою в умовах граничного тертя.

Методика досліджень. Дослідження триботехнічних характеристик текстурованих лункових поверхонь з дискретно-орієнтованою структурою проводили відповідно до стандарту [11], який встановлює метод дослідження матеріалів при терті з обмеженою подачею мастильного матеріалу. Суть методу полягає у визначенні залежності зносу і коефіцієнту тертя контактуючих поверхонь зразка матеріалу і контрзразка від швидкості ковзання і сили навантаження. В якості матеріалу зразка використовували сталь 45 (ГОСТ 1050-74) загартована (42–45 HRC) і контрзразка сталь 30ХГСА загартована. Лунки формували на робочій поверхні контрзразка за допомогою спеціального пристосування [12]. Зміцнення поверхневого шару текстурованої лункової поверхні здійснювалось методом іонно-плазмового термоциклічного азотування (ПТА) [13]. Нанесення азотованого шару на зразки здійснювалося на установці ВПА-1 за наступними режимами: тривалість процесу – 140–190 хв; тиск реакційного газу – 100–115 Па; склад реакційної суміші – 80–90%N₂ + 5%С₃Н₈ + 5–15%Ar; температура у вакуумній камері – 570–600°С.

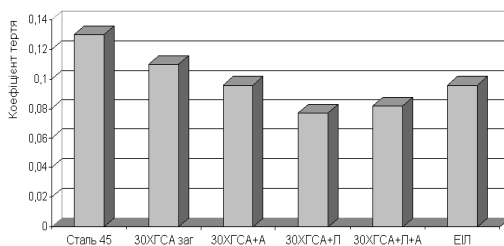
Для випробувань зразків в умовах граничного мащення використовувалася установка - машина тертя М–22М. Контакт пари тертя відбувався за схемою “диск-колодка”. В якості мастильного середовища застосовували індустріальне мастило И–20А відповідно до ГОСТ 20799-75. Для забезпечення режиму граничного мащення застосовували мастильний пристрій відповідно до рекомендацій ГОСТ 26614-85.

Рентгеноструктурний аналіз проводили на дифрактометрі «Дрон–4–13С» у залізному характеристичному випромінюванні. Дифракційні максимуми реєструвались у дискретному режимі з кроком $0,1^\circ$, час експозиції у точці – 2 с.

Результати досліджень та їхній аналіз. Експериментальними дослідженнями встановлено, що найбільшою зносостійкістю і найменшим коефіцієнтом тертя володіють контрзразки з текстурованими лунковими поверхнями як без (30ХГСА+Л), так і додатково зміцнених методом ПТА (30ХГСА+Л+А). Вони перевищують зносостійкість сталей 45 у 3,1–5,3 рази і 30ХГСА (30ХГСАзаг) 1,9–3,25 рази, сталі 30ХГСА, поверхневий шар якої зміцнений методом ПТА (30ХГСА+А) у 1,3–2,3 рази (рис. 1, а).



а



б

Рис. 1. Триботехнічні характеристики дискретних поверхонь при терті ковзанні в умовах граничного мащення (шлях – 2000 м, швидкість ковзання 0,625 м/с, питоме навантаження 10,0 МПа, середовище – індустріальне масло И–20А, матеріал зразка - сталь 45 загартована): *а* – знос; *б* – коефіцієнт тертя

Висока зносостійкість текстурованих лункових поверхонь з дискретно-орієнтованою структурою (30ХГСА+Л, 30ХГСА+Л+А) в цілому, так і окремих дискретних ділянок обумовлена високою захисною дією поверхневих шарів, а також високою ефективністю граничної мастильної плівки. Фрактографічний аналіз текстурованих лункових поверхонь (30ХГСА+Л) показав, що вони гладкі з відсутністю суттєвих пошкоджень і руйнувань поверхневого шару (рис. 2). Це пов'язано з тим, що мастильні матеріали в умовах граничного навантаження володіють властивістю впливати на процеси пластичної деформації і руйнування поверхневого шару металу. Процес пластичного деформування тонких поверхневих шарів обумовлює дифузійну активність металу і, як наслідок, суттєво впливає на фізико-хімічні процеси у граничній мастильній плівці, визначає характер формування дислокаційної структури у поверхневому шарі металу [2].

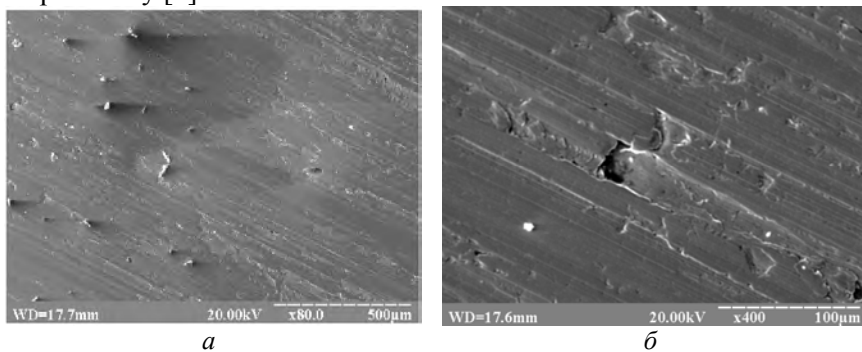


Рис. 2. Мікрофотографії поверхні тертя текстурованої лункової поверхні 30ХГСА+Л: *а* – загальний вигляд поверхні тертя з лункою; *б* – поверхня тертя у між лунковому просторі

У трибоконтакті прикладене навантаження сприймається вершинами мікронерівностей у міжлунковому просторі і фактична площа контакту буде представляти собою загальну площину деформованих вершин цих нерівностей. Процес тертя буде представляти собою деформування тонких поверхневих шарів контактуючих мікронерівностей, яке супроводжується руйнуванням граничної мастильної плівки, вторинних структур за рахунок багаторазового переддеформування, виникненням внутрішніх напружень у плівках вторинних структур з подальшим створенням і розвитком мікро-

тріщин, їх об'єднанням, відшаруванням плівки і виникненням мікроранок і мікропор, розмір і глибина яких складає 0,5–2,0 мкм (рис. 2, б). За даними роботи М.В. Райко [14], механічні властивості граничної мастильної плівки залежать від попередніх впливів. Так, при повторному навантаженні відбувається зміцнення граничного мастильного шару, зростання опору її руйнування.

Як відомо [15], при терті різних металів виникає різниця потенціалів електромагнітного поля, а відповідно і різна робота виходу електронів на поверхню. Основний внесок у зміну роботи виходу електронів при терті вносять деформаційні ефекти, а точніше зміна концентрації місць виходу дислокацій на поверхню, поверхневих точкових дефектів, а також атомарна шорсткість. Крім того, зменшення роботи виходу електронів настає практично одночасно зі зменшенням параметру шорсткості R_a , що також говорить про зв'язок роботи виходу електронів з пластичною деформацією у трибоконтакті [16].

Залежно від хімічного складу і структурних особливостей вуглеводневих сполук, що входять до складу мастильних матеріалів, магнітна сприйнятливність нафтопродуктів буде різною. Вуглеводневий склад в основному має діамагнітні властивості, а вільні радикали, розчинені в ПММ кисень і киснеутворюючі елементи володіють парамагнітними властивостями. Внаслідок цього у неоднорідному магнітному полі на компоненти мастильних матеріалів будуть діяти електромагнітні сили, які для вуглеводневих рідких систем з різною магнітною сприйнятливністю будуть відрізнятися за величиною і напрямком дії, що в свою чергу має впливати на швидкість і глибину окислювальних перетворень вуглеводнів [17].

За рахунок того, що краях лунки буде виникати найбільша напруженість електромагнітного поля, у порівнянні з виступами нерівностей поверхні тертя у між лунковому просторі, на них будуть накопичуватися парамагнітні частки (наприклад, водень як продукт деструкції масла) і продукти зношування (ферромагнетик), які притягуються до електромагнітного поля з більшим потенціалом (рис. 3, а). Ці процеси будуть сприяти вилученню часток з поверхні тертя, їх накопичуванням на краях лунок, що запобігатиме виникненню недопустимих процесів пошкодження поверхневого шару у між лунковому просторі в місцях фактичного контакту.

Концентрація часток на краях лунок призведе до їх поступового руйнування, згладжування і зношування (рис. 3, б, 2, а).

З іншої сторони, у лунках і у западинах мікронерівностей будуть зберігатися мастильні матеріали, які використовуються для відновлення граничної мастильної плівки при її руйнуванні. В процесі тертя, при обертанні контртіла поверхня тертя зразка (зразок нерухомий) буде постійно змашуватись мастилом, що зберігається у лунці, під дією сили P_p , забезпечуючи в подальшому регенерацію граничної мастильної плівки на поверхні контрзразка. Резульгуюча сила буде складатися із сил поверхневого натягу рідини і відцентрової сили, за допомогою яких мастильний матеріал буде притягуватися до поверхні зразка. В сукупності ці процеси роблять тертя при граничному мащенні текстурованої лункової поверхні більш стійким, а також призводить до зменшення коефіцієнта тертя (див. рис. 1, б).

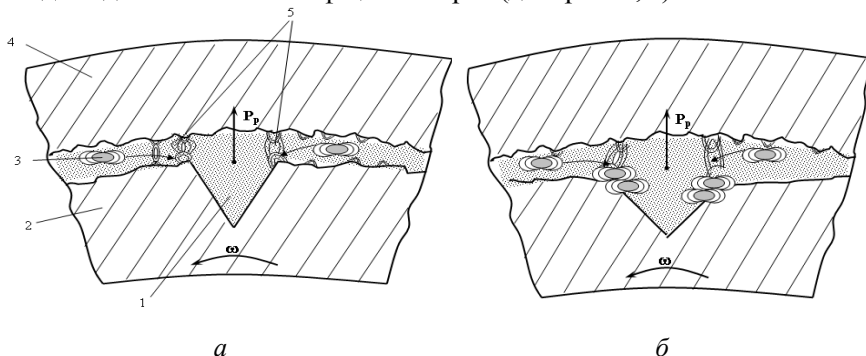


Рис. 3. Фізична модель зношування окремої дискретної ділянки в умовах граничного мащення: 1 – лунка; 2 – контртіло; 3 – продукт зношування; 4 – зразок; 5 – лінії електромагнітного поля; P_p – резульгуюча сила

Для зміцнення поверхневого шару дискретних ділянок лункової поверхні був застосований метод ПТА. Висока зносостійкість текстурованої лункової поверхні (30ХГСА+Л+А) в цілому, так і окремих дискретних ділянок обумовлена високою захисною дією поверхневих азотованих шарів та їх високою твердістю (до 9500 МПа), що посилює ефект гальмування дефектів у поверхневих шарах трибоконтакту. Це призводить до зменшення інтенсивності утворення продуктів зношування у поверхневому шарі, що підтверджується відсутністю на поверхні тертя слідів пошкоджень від недопустимих процесів зношування

(рис. 4). Крім того, висока твердість азотованого шару призводить підвищеного зношування поверхневого шару зразка і до зростання коефіцієнта тертя (див. рис. 1, б).

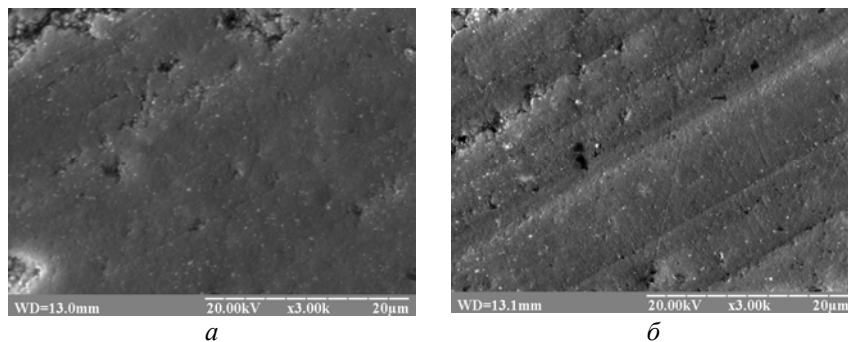


Рис. 4. Мікрофотографії поверхні тертя текстурованої лункової поверхні 30ХГСА+Л+А в умовах граничного мащення: *а* – поверхня тертя перед лункою; *б* – поверхня тертя за лункою

Рентгеноструктурний аналіз структури азотованих шарів виявив наявність у них двох зон: основної нітридної (карбонітридної) зони, що складається з нітриду основного металу і легуючих елементів, і зони внутрішньої азотування. За структурою перша зона ультрадріб-нозерниста і включає монофазний гранецентрований нітрид $Fe_4N - \gamma'$ -фаза, яка має чисто нітридний характер через низьку розчинність у цій фазі вуглецю. Нітридна зона забезпечує не тільки високі захисні властивості дискретних ділянок, але і усуває різного роду поверхневі дефекти, які виникали під час формування дискретних ділянок. Внутрішня зона складається з $\alpha-Fe(N)$ фази, яка представляє собою твердий розчин (об'ємноцентрований азотистий ферит).

Аналіз структури азотованих шарів дозволив виявити також наявність на поверхні азотованого шару карбонітридних фаз $Fe_{2-3}(NC)$ і $Fe_3(N,C)$, а також невеликої кількості твердого розчину $\alpha-Fe(NC)$, які забезпечують високі значення мікротвердості азотованих шарів. Утворення карбонітридних фаз пояснюється особливістю технологічного процесу ШТА при додаванні до складу насичуючої суміші вуглецю у вигляді пропану C_3H_8 . Кількість карбонітридних фаз зменшується у глибину азотованого шару.

Висновки

Встановлено закономірності зношування текстурованих лункових поверхонь, сформовано фізичну модель зношування окремої дискретної ділянки. Показано, що висока зносостійкість лункових поверхонь обумовлена високою здатністю лунок запобігати виникненню недопустимих процесів пошкодження поверхневого шару у між лунковому просторі в місцях фактичного контакту за рахунок здатності притягувати парамагнітні частинки деструкції мастильного матеріалу і феромагнітні частинки продуктів зношування. Крім того, у лунках будуть зберігатися мастильні матеріали, які забезпечують постійну регенерацію граничної мастильної плівки.

Список літератури

1. *Ахматов А. С.* Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов– М.: Гос. изд-во физ. - мат. л-ры, 1963. – 472 с.
2. *Крагельский И. В.* О природе заедания при сухом и граничном трении / И. В.Крагельский, Н. М.Алексеев, Л. Е. Фисун // Трение и износ. – 1980. – Т. 1, № 2, – С. 197–208.
3. *Костецкий Б. И.* Механохимические процессы при граничном трении / Б. И.Костецкий, М. Э.Натансон, Л. И. Бершадский. – М.: Наука, 1972. – 170 с.
4. *Комбалов В. С.* К вопросу нормирования протяженности фактического контакта и шага микроканалов поверхностей с частично-регулярным микрорельефом (ЧРМР) / В. С.Комбалов, М. В. Зайцев // Трение и износ. – 1992. – Т. 13, №1. – С. 110–115.
5. *Матвеевский Р. М.* Противозадирная стойкость смазочных сред при трении в режиме граничной смазки / Р. М.Матвеевский, И. А.Буяновский, О. В.Лазовская. – К. : Наука, 1978. – 192 с.
6. *Гитис Н. В.* О роли микрогеометрии в развитии атермического заедания при граничной смазке / Н. В.Гитис // Машиноведение. – 1982. – №1. – С. 86–91.
7. *Цыбанев Г.В.* Фреттинг-усталость поверхностей с дискретными покрытиями / Г.В.Цыбанев, В.Е.Марчук, О.Н. Герасимчук // Проблемы трибологии. – 2009. – №1. – С. 97–104.
8. Дискретні покриття для підвищення зносостійкості деталей машин і механізмів [Б. А.Ляшенко, В. Є.Марчук, В. І.Калініченко, Ю. О.Градиський] // Вісник Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка. – Харків: Вид-во Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка, 2010. – Вип. 94. – С. 324–335.

9. Цыбанев Г. В. Управление свойствами поверхностей трения при обработке дискретных покрытий в условиях фреттинга / Г. В. Цыбанев, В. Е. Марчук, В. И. Калининченко // Проблемы трибологии. – 2011. – №1. – С. 52–57.

10. Дослідження впливу іонного азотування на структуру і властивості дискретних поверхонь в умовах трибоконтакту [Г. В. Цыбаньов, В. Є. Марчук, В. І. Калініченко, О. В. Радько] // Проблеми трибології. – 2011. – №4. – С. 33–39.

11. Материалы антифрикционные порошковые. Метод определения триботехнических характеристик : ГОСТ 26614-85. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 9 с.

12. Пат. Україна, F01L 1/20, F01L 1/46. Пристрій для утворення на плоскій поверхні тертя рельєфу заглибин, що утримують мастильні матеріали / Марчук В. Є., Шульга І. Ф., Шульга О. І., Плоснін О. Є. (Україна); НАОУ. – № 13762; Заявл. 24.10.2005; Опубл. 17.04.2006. Бюл. №4.

13. Пат. 44643 Україна, F01L 1/20 C23C 8/02. Спосіб отримання рельєфних зносостійких азотованих шарів сталей деталей / В. Є. Марчук, І. Ф. Шульга, Б. А. Ляшенко, Г. В. Цыбаньов, А. В. Рутковський, В. В. Калініченко; заявник та патентовласник Національний авіаційний університет. – № u200904236; заявл. 29.04.2009; опубл. 12.10.2009, Бюл. №19.

14. Райко М. В. Смазка зубчатых передач / М. В. Райко. – К.: Техника, 1970. – 196 с.

15. Жарин А. Л. Кинетические и физико-химические процессы в тонких поверхностных слоях металлов и сплавов при трении скольжения ; автореф. дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук: спец. 05.02.04 «Трение и износ в машинах» / Жарин А. Л. – Минск, 1994. – 38 с.

16. Шипица Н. А. Исследование поверхности сканирующим датчиком Кельвина / Н. А. Шипица // VIII Международный семинар, (Минск, 1–3 ноября 2006 г.). – М., 2006. – С. 178–183.

17. Морозов В. И. Влияние магнитного поля на физические свойства углеводородных гидроксидов / В. И. Морозов, С. Т. Усатенко, О. В. Савчук. – ХТТМ. – 1977. – №10. – С. 52–54.

Марчук В. Е., Духота А. И., Морозов В. И. Износостойкость текстурированных луночных поверхностей с дискретно-ориентированной структурой в условиях граничной смазки // Проблемы трения та зношування: наук. техн. зб. – К.: НАУ, 2012. – Вип 57. – С. 128–138.

Експериментально досліджено зносостійкість текстуризованих луночних поверхонь з дискретно-орієнтованою структурою в умовах граничної смазки. На основі фрактографічних досліджень по-

верхности трения и физической модели установлены закономерности изнашивания дискретных поверхностей с лунками.

Рис. 4, список лит.: 17 наим.

Marchuk V., Dukhota A., Morozov V. **Durability courses textured surfaces with holes discrete-oriented structure in a boundary lubrication conditions**

It was experimentally investigated the durability courses textured surfaces with holes discrete-oriented structure in a boundary lubrication conditions. On the basis of fractographic investigations of the friction surface and a physical model established regularity of discrete surfaces with holes.

Стаття надійшла до редакції 06.03.2012