

УДК 621.891

**МЕТОДИКА ТА ПРИНЦИПИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАГАЛЬНИХ
ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТЕТРЯ ТА ЗНОШУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ
АВТОМОБІЛЯ**

Аулін В.В., д.т.н., проф.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Ляшук О.Л., д.т.н., проф.

Гупка А.Б., к.т.н., доц.

Тернопільський національний технічний університет

Abstract

The problem of transient friction processes, which determine reliability and durability of machines in real conditions of operation, is considered in the paper. The theoretical basis of the transitional friction processes in the present formally formed. Therefore, only the methodological side of this problem is considered for solving practical problems. The laws of transient processes are essentially kinetic. For them it is most important to take into account thermodynamic constraints. Solving the problem of increasing the reliability and durability of steam friction elements of cars requires a systematic approach with the development of comprehensive research techniques, kinetic criteria for evaluating processes. It is shown that the ways of development and research of designing measures on increasing the tribological reliability of these friction pairs are effective. The necessity of taking into account the influence of the coefficient of mutual overlap on the processes of friction and wear and on the stage of designing and manufacturing of elements of friction pairs of cars, in the choice of optimal friction modes, is substantiated. The proposed parametric model allows to optimize the research process, to develop a complex of technical solutions on the increased durability of friction pairs of cars, to obtain optimal parameters of surface quality, to create a bank of objective tribo technical data for heavy loaded friction pairs.

Key words: friction processes, coefficient of overlap, wear resistance, car tribology.

Вступ

Експлуатаційна надійність технічних трибосистем ковзання деталей автомобілів та сільськогосподарських машин обумовлюється в основному зносостійкістю їх трибоелементів. Конструкторські та технологічні методи зміцнення необхідні, але недостатні, вони обмежені рівнем розвитку галузей техніки і технології, які їх реалізують. У той же час, недостатньо розвиваються способи експлуатаційного зміцнення поверхонь тертя, незважаючи на те, що вони дозволяють модифікувати найтонші поверхневі шари і, тим самим забезпечити вимоги щодо зносостійкості. Вирішення загальної проблеми підвищення ефективності сільськогосподарської техніки, трибологічної надійності її пар тертя потребує подолання існуючого протиріччя між потребою в об'єктивному та обґрунтованому виборі найбільш раціонального та високоякісного комплексу експлуатаційних заходів з одного боку та відсутністю теоретичних основ і методів їх вибору, банку триботехнічних даних (результатів лабораторних, стендових, польових досліджень) з іншого

Аналіз попередніх досліджень

Вирішення проблеми підвищення надійності та довговічності елементів пар тертя автомобілів вимагає системного підходу з розробкою комплексних методик дослідження, кінетичних критеріїв оцінки процесів. Структурно енергетичний підхід дозволив оптимізувати шляхи пошуків оптимальних рішень [1]. Постійно зростає питома потужність процесів тертя, підвищується теплове і механічне навантаження на пари тертя, що веде до ряду негативних наслідків. Ефективними є шляхи розробки та дослідження конструкторських міроприємств по підвищенню трибологічної надійності даних пар тертя. Поряд із технологічними та експлуатаційними засобами це дозволить створити цілісний комплекс, розширити банк трибо технічних даних, розробити практичні рекомендації по вирішенню питань прикладної трибо техніки [2].

Постановка проблеми

Трибологія, як і інші галузі науки і техніки знаходиться в неперервному розвитку. Виходячи з цього в даній роботі розглянуто тільки деякі аспекти проблеми, які доцільно використовувати при дослідженнях в лабораторних умовах. В конкретних випадках, коли необхідно перенести результати лабораторних досліджень на реальні вузли тертя потрібно використовувати елементи теорії моделювання із врахуванням теплової динаміки процесу тертя. Це реалізовано в запропонованій методиці дослідження і підтверджено одержаними результатами.

Мета та завдання

Метою даної роботи є розробка комплексної методики дослідження та критеріїв оцінки для порівняння та аналізу трибо технічних параметрів при терті та зношенні елементів пар тертя автомобілів.

Результати вирішення основних завдань

Підвищення надійності та довговічності пар тертя машин та механізмів пов'язано із стабілізацією процесів, які проходять у поверхневих шарах, а саме утворенням, трансформацією та руйнуванням захисних плівок вторинних структур (ВС) в межах певної множини оптимальних кінематичних та динамічних параметрів, що описують цей процес. Відомі динамічні моделі пов'язують зміну площ поверхні деталей пар тертя, які покриті плівками ВС, із швидкістю утворення та руйнування даних плівок та рядом інших вхідних параметрів. Такими моделями досить складно користуватись в процесі експериментальної перевірки, вони не враховують цілий ряд інших факторів, вплив яких носить випадковий характер і які можуть бути враховані тільки при реалізації стохастичної динамічної моделі взаємодії металів поверхонь деталей пар тертя і середовища в зоні фрикційного контакту.

При побудові такої моделі розглянуто можливі стани складної фізико-хімічної системи поверхневого шару матеріалу пари тертя рис. 1.

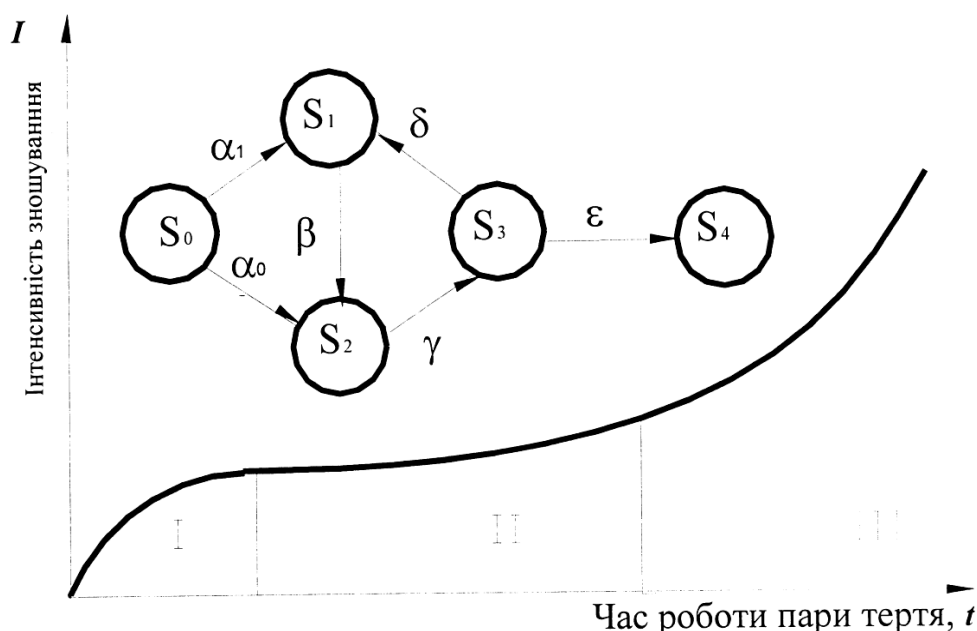


Рисунок 1 - Діаграма можливих станів фізико-хімічної системи поверхневих шарів матеріалу поверхонь тертя: I - етап припрацювання ; II - етап нормального тертя та зношення (динамічна рівновага процесів утворення та руйнування захисних ВС); III - етап об'ємної деструкції (патологічне руйнування основного металу).

Розділимо площу фактичного контакту F_{ϕ} на n ($n \rightarrow \infty$) елементарних площадок dF , яка може перебувати в таких станах: S_0 - початковий стан неприпрацьованої поверхні (рельєф поверхні після технологічної обробки); S_1 - робочий стан поверхні тертя із домінуванням процесу руйнування плівок; ВС; S_2 - стан ювенільної поверхні тертя (поверхня із вихідною шорсткістю після процесу припрацювання. На поверхні відсутні захисні плівки ВС); S_3 - стан утворення (відновлення) захисних плівок ВС; S_4 - ділянки із патологічними процесами трансформації поверхні тертя (об'ємне руйнування основного металу деталей пар тертя).

Зобразимо діаграму можливих переходів системи у вигляді графу у вершинах якого розміщені можливі стани S_i , а дуги якого відповідають переходам між станами з відомими ймовірностями P_{ij} розглядуваних процесів, які характеризуються відповідними параметрами процесу. Тут a_1 та a_2 відповідно параметри переходу від початкового стану S_0 до станів S_1 та S_2 ; β - параметр, який оцінює ймовірність переходу від стану S_1 до появи ювенільної поверхні і відповідно, визначає тривалість періоду руйнування захисних плівок ВС; γ - параметр переходу від ювенільного стану поверхні S_2 до стану утворення захисних плівок S_3 ; δ - параметр переходу від стану поверхні S_3 до стану S_1 , який визначає тривалість утворення захисних плівок ВС; ϵ - параметр, який визначає ймовірність переходу до патологічних умов тертя та зношення і появи стану поверхні S_4 .

При допущенні, що всі стани, які визначені як вузлові вершини діаграми є незалежні, можна визначити перехідні ймовірності P_{ij} , із врахуванням яких складаємо марківську модель системи із n елементів у вигляді диференціальних рівнянь.

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum P_{ij}(t)P_j(t) \quad (1)$$

де $P_i(t)$ - ймовірність перебування системи в i -ому стані.

Для переходу до нормальної експлуатації системи із усталеним процесом утворення та руйнування захисних плівок ймовірності реалізації станів S_0 та S_4 та перехідні ймовірності P_{ij} , пов'язані з цими станами рівні нулю, тобто $P_0 = P_4 = 0$; $P_{01} = P_{02} = P_{24} = 0$. У цьому випадку модель системи значно спрощується, а її діаграма має вигляд циклічного графу з вершинами S_1 , S_2 і S_3 , ймовірності яких $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$ утворюють повну ймовірність, тобто

$$P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = 0 \quad (2)$$

Розглянемо спрощену модель процесу, згідно якої час перебування виділеного елемента площі dF у кожному із станів підпорядковується показниковій залежності.

Тоді параметр β є параметром розподілу часу руйнування плівки (інтенсивністю найпростішого потоку відказу системи захисту площадки плівкою); γ, δ - відповідно параметри розподілу часу перебування площадки у ювенільному стані та стані відновлення захисної плівки. В цьому випадку диференціальні рівняння Колмогорова для ймовірностей станів n - виділених елементів поверхні тертя записується у вигляді:

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = \delta P_3(t) - \beta P_1(t); \quad (3)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = \beta P_1(t) - \gamma P_2(t); \quad (4)$$

При розв'язанні системи рівнянь за початкові умови приймаємо стан поверхні на початку роботи спряження, або на початку проведення експериментів, коли практично вся поверхня контакту покрита захисною плівкою ВС і під час тертя вона може тільки зменшуватися (за рахунок процесу руйнування). В цьому випадку початкові ймовірності перебування довільної виділеної площадки dF в станах S_1 , S_2 та S_3 становитимуть відповідно:

$$P_1(0) = 1 \text{ та } P_2(0) = P_3(0) = 0. \quad (5)$$

В результаті розв'язування системи визначаємого ймовірності перебування довільної площадки dF у відповідних станах:

$$P_2(t) = \beta \left(\frac{e^{x_1 t} - e^{x_2 t}}{x_1 - x_2} \right) + \frac{\beta \delta}{x_1 x_2} \left(1 + \frac{x_2 e^{x_1 t} - x_1 e^{x_2 t}}{x_1 - x_2} \right) \quad (6)$$

$$P_3(t) = \frac{\beta \gamma}{x_1 x_2} \left(1 + \frac{x_2 e^{x_1 t} - x_1 e^{x_2 t}}{x_1 - x_2} \right) \quad (7)$$

$$P_1(t) = 1 - P_2(t) - P_3(t)$$

$$\text{де } x_{1,2} = \frac{(\beta + \gamma + \delta) \mp \sqrt{(\beta + \gamma + \delta)^2 - 4(\beta \delta + \beta \gamma + \gamma \delta)}}{2}$$

На час встановлення динамічної рівноваги процесів утворення та руйнування ВС приймаємо $t \rightarrow \infty$ і залежності (4) приймуть вигляд:

$$P_1 = \frac{\gamma \delta}{\beta \delta + \beta \gamma + \gamma \delta}$$

$$P_2 = \frac{\beta \delta}{\beta \delta + \beta \gamma + \gamma \delta} \quad (8)$$

$$P_3 = \frac{\gamma\beta}{\beta\delta + \gamma + \gamma\delta} \quad (9)$$

Якщо в заданий момент часу $t = t_\phi$ ймовірність перебування кожної із n елементарних поверхонь у ювенільному стані буде $P_2(t_\phi)$, то сумарна площа $F_{ю}$ ювенільних ділянок буде становити:

$$F_{ю}(t) = \int_{F_{mm}} P_2 dF = P_2(t_{TM}) F_{TM} \quad (10)$$

де F_ϕ - сумарна площа контактної поверхні. Тобто в момент встановленої динамічної рівноваги сумарна площа ювенільних ділянок становить:

$$F_{ю} = \frac{\beta\delta}{\beta\delta + \beta\gamma + \gamma\delta} F_{TM} \quad (11)$$

Для експотенціального закону розподілу часу перебування системи в стані S_i , яке є граничним для пуасонівського і геометричного розподілів і яке може бути отримане також на основі моделі утворення-руйнування [4], при якому ймовірність переходу системи із стану S_i в стан S_j описується залежністю $F(t) = 1 - e^{-\alpha_i t}$, де $\alpha_i = \{\beta; \gamma; \delta\}$ математичне сподівання часу такого переходу.

$$\bar{t}_i = \frac{1}{\alpha_i} \quad (12)$$

Тобто математичне сподівання часу знаходження площадки dF в стані руйнування плівок (S_1) буде $\bar{t}_1 = \frac{1}{\beta}$, в ювенільному стані $\bar{t}_2 = \frac{1}{\gamma}$, в стані утворення плівки $\bar{t}_3 = \frac{1}{\delta}$

Тоді залежність (7) для визначення площ ювенільних ділянок при встановленому процесі тертя можна переписати у вигляді:

$$F_2 = F_{ю} = \frac{\bar{t}_2}{\bar{t}_1 + \bar{t}_2 + \bar{t}_3} F_{TM} \quad (13)$$

Відповідно площа ділянок, в яких проходить руйнування та відновлення захисних плівок буде відповідно:

$$F_1 = \frac{\bar{M}_1}{\bar{t}_1 + \bar{t}_2 + \bar{t}_3} F_{TM} \quad (14)$$

$$F_3 = \frac{\bar{t}_3}{\bar{t}_1 + \bar{t}_2 + \bar{t}_3} F_{TM} \quad (15)$$

а відношення сумарної площі, покритою плівкою $F_{пл}$ до загальної площі F_{TM} буде постійним:

$$\frac{F_{пл}}{F_{TM}} = \frac{\bar{t}_2 + \bar{t}_3}{\bar{t}_1 + \bar{t}_2 + \bar{t}_3} F_{TM} \quad (16)$$

В залежності від параметрів навантаження, і в першу чергу від швидкості ковзання V та питомого тиску P часи перебування системи тертя в станах S_i , а відповідно і параметри β, γ, δ змінюються і така зміна описується загальними рівняннями (1). Виведені залежності (4-7) та (9-11) пов'язують такі інтегральні параметри, як площі ділянок поверхонь пар тертя, які перебувають в різних фізико-хімічних станах із диференціальними статистичними параметрами

розподілу часу перебування системи в цих станах, що залежать від конкретних умов навантаження.

Оскільки захисні плівки вторинних структур ВС [3-8] є діелектриками, то динаміку зміни площі ювенільних ділянок, в залежності від умов навантаження і, в першу чергу V та P можна оцінити за величиною струму I , який проходить через зону контакту пари тертя і змінюється пропорційно зміні площі ювенільних ділянок.

$$I = kF_{ю}. \quad (17)$$

Ця закономірність може бути покладена в основу дослідної перевірки розробленої математичної моделі процесу динамічної взаємодії складових системи та ефективної експериментальної оцінки параметрів розподілу.

Так, коли досліджувані процеси тертя та зношення при певних базових показниках навантаження P_0 та швидкості ковзання V_0 поверхонь тертя і характеристичній величині струму I_0 , то при зміні цих параметрів на іншому рівні (P_1, V_1) із характеристичним струмом I_1 , співвідношення між струмами відповідає співвідношенню площ ювенільних ділянок для обох випадків:

$$\frac{I_1}{I_0} = \frac{F_1}{F_0} = \frac{\frac{\gamma_0 + \gamma_0 + 1}{\delta_0 + \beta_0}}{\frac{\gamma_1 + \gamma_1 + 1}{\delta_1 + \beta_1}} \quad (18)$$

Правомірність запропонованих моделей підтверджена результатами багаточисельних досліджень як лабораторних зразків, так і реальних вузлів тертя машин і механізмів.

Для випадку, коли в процесі навантаження параметри розподілу, α, β, γ і відповідно t_1, t_2, t_3 залежать від певних експлуатаційних параметрів роботи пари тертя, то при умові довгострокової рівноваги (стабільності параметрів тертя та зношення) існує стабілізуючий фактор, який задає середній рівень співвідношення площ відповідних ділянок покритих і непокритих плівками ВС (та їх відношення до номінальної площі контакту). В короткостроковому періоді можливі певні коливання характеристик поверхневого стану відносно їх середнього значення. Амплітуда таких коливань характеризує рівень стабільності процесів утворення, трансформації та руйнування ВС.

При граничному терті в місцях контакту робочих поверхонь відбувається безперервне руйнування і відновлення змащувальних шарів і плівок ВС. У випадку їх повного руйнування (змащувальних шарів і ВС) має місце адгезійне схоплювання поверхонь тертя, яке приводить до підвищеного їх зношення. При терті поверхонь, розділених ВС і змащувальними шарами, параметри тертя та зношення оптимальні і стабільні. Плівки ВС формуються у результаті синергетичної взаємодії деформаційних, теплових, адсорбційних, дифузійних і хімічних процесів, які і забезпечують локалізацію всіх видів взаємодії в тонкоплівочному об'єкті, володіють більш високими параметрами міцності в порівнянні з основним матеріалом (в 4- 12 разів).

Висновки

1. Встановлено, що використання лише структурних критеріїв для оцінки стану трибосистеми при реалізації структурної пристосованості (СП) недостатньо, оскільки тонкоплівочний об'єкт руйнування (ВС) зазнає в процесі

тертя корінних структурно-енергетичних перетворень і в момент руйнування відокремлений від основного матеріалу.

2. Обґрунтовано, що структурно-енергетичні і ентропійні (накопиченої ентропії) критерії є кумулятивними, несуть інформацію лише про окремі елементи (матеріали) трибосистеми і можуть бути використані переважно для прогнозування її довговічності.

Література

1. Аулін, В. В., Гупка, Б. В., Гупка А. Б., Гриньків, А. В. Методика дослідження перехідних процесів в зоні фрикційного контакту важконавантажених пар тертя сільськогосподарських машин. Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». 18-19 травня 2016р. : тези допов. Тернопіль : ТНТУ, 2016. С. 93-94.

2. Каплун, В. Г., Гупка, Б. В., Гупка, А. Б., Оксентюк, А. О. Трибологічні аспекти експлуатаційної надійності важко навантажених пар тертя. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Серія: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві. Харків, 2012. № 122. С. 26-34.

3. Ляшук, О.Л., Гупка, А.Б., Левкович, М.Г., Гупка, В.В. Вплив коефіцієнту взаємного перекриття на процеси тертя та зношування трибосистем автомобіля. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, Проблеми трибології (Problems of Tribology). Хмельницький, 2018, № 4 С. 59-59.

4. Гриньків, А. В. Використання методів прогнозування в керуванні технічним станом агрегатів та систем транспортних засобів. Збірник наукових праць КНТУ. Техніка в сільськогосп. виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. 2016. №29. С. 25-32.

5. Аулін, В. В., Гриньків, А. В. Использование теоретико-информационного подхода для анализа технического состояния топливной системы автомобиля. "MOTROL" journal according of the Commission of Motorization and Energetic in Agriculture, CULS. 2016. Vol.18. №2. p.63-69.

6. Аулін, В. В., Гриньків, А. В. Проблеми і задачі ефективності системи технічної експлуатації мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки. Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія технічні науки. 2016. №2 (77). С.36-41.

7. Аулін, В. В., Лисенко, С. В., Кузик, О. В., Гриньків, А. В., Голуб, Д. В. Трибофізичні основи підвищення надійності мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки технологіями триботехнічного відновлення. Монографія. Кропивницький: видавець Лисенко В.Ф., 2016. 304с.

8. Аулін, В. В., Гриньків, А. В. Методика вибору діагностичних параметрів технічного стану транспортних засобів на основі теорії сенситивів. Науковий журнал "Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів". №5. Харків: ХНТУСГ, 2016. С. 109-116