УДК 621.891 DOI: 10.18372/0370-2197.1(82). 13480

В. Є. МАРЧУК, Я. В. КРИСАК, В. І. МОРОЗОВ

Національний авіаційний університет, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЛУЧЕННЯ ПРОДУКТІВ ЗНОШУВАННЯ В ТРИБОСИСТЕМАХ З ТЕКСТУРОВАНИМИ ЛУНКОВИМИ ПОВЕРХНЯМИ

Запропоновано математичну модель умови вилучення продуктів зношування у дискретні ділянки в трибосистемах з текстурованими лунковими поверхнями. Встановлено зростання індукції магнітного поля кромок дискретних ділянок при зменшенні коефіцієнта θ і навпаки, що підтверджується експериментальними дослідженнями.

Ключові слова: *трибосистема; індукція магнітного поля; пондеромоторна сила; продукти зношування; кромки дискретних ділянок (лунок)*

Вступ. Підвищення зносостійкості деталей машин і механізмів в трибосистемах сьогодні розглядаються багатьма дослідниками з урахуванням всіх можливих факторів, які впливають і можуть бути вплинути на процеси тертя та зношування. Такими факторами є збудження електричних і магнітних полів в місцях трибоконтакту, що є найменш дослідженими, врахування яких дозволить логічно упорядкувати складні процеси дослідження на спільній методологічній інформаційній базі системного підходу, в основі якого лежать відомі принципи цілеспрямованості, моделювання, фізичності, що визначає основні процедури проведення системних досліджень: декомпозицію, змістовний аналіз, формалізований опис, моделювання, дослідження, вибір оптимального варіанту.

Стан питання. Існує велика кількість наукових публікацій, присвячених дослідженню впливу зовнішнього електромагнітного випромінювання на мастильні матеріали, процеси тертя і зношування. Електромагнітне випромінювання впливає на адсорбційні та дифузійні процеси, прискорюючи чи сповільнюючи їх. Результатами такого впливу є зміна швидкості окислення контактуючих поверхонь, що приводить до зміни інтенсивності розвитку процесів схоплювання, зменшення зносу в 2-3 рази, зниження температури масла і зразків на 25–30% [1-3].

Широко використовуються способи електромагнітної сепарації технологічних мастильно-охолоджуючих рідин, що дозволяє підвищити якість обробки металевих виробів і продовжити термін служби обладнання в процесі експлуатації агропромислового комплексу. В роботі [4] отримано з урахуванням сил, які діють на частинки, диференціальне рівняння руху металевих частинок в магнітному полі по осі ОУ, що дозволяє знайти шукану величину часу руху частинок до концентратора магнітного поля

$$t_2 = -\frac{1}{b-r}\ln\left[-\frac{d_n \cdot r}{(b+r)\cdot h} - \frac{g\cdot(\rho_r - \rho_{ж})\cdot\mu_0\cdot\mu\cdot \mathrm{d}_{\mathrm{n}}^2\cdot r\cdot\cos\alpha}{B_{\max}^2\cdot(b+r)\cdot h} + \frac{2r}{b+r}\right].$$

У роботі [5] розглянута математична модель, яка описує процес магнітної сепарації в сепараторі дискового типу для руху частинки в проекції за осями X та Y.

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{9\eta}{2r^2\rho}\frac{dx}{dt} + \mu_0\chi\alpha H_0^2\exp(-2\alpha l)\cos\beta\,,$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{9\eta}{2r^2\rho}\frac{dx}{dt} + \mu_0\chi\alpha H_0^2 \exp(-2\alpha l)\sin\beta + g\,.$$

Розв'язок системи диференціальних рівнянь при різних початкових умовах дає можливість дослідити траєкторію руху частинок в магнітному дисковому сепараторі та вплив параметрів системи на якість сепарації.

В основному ці дослідження та інші присвячені впливу зовнішнього електромагнітного випромінювання на трибосистему. Як відомо, зону тертя розглядають як джерело внутрішнього електромагнітного випромінювання, яке сприяє зниженню зносу деталей.

В роботі [6] теоретично обґрунтовано вплив внутрішнього електромагнітного поля дискретних поверхонь на процеси тертя та зношування трибосистеми. Показано, що висока зносостійкість текстурованих 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 і в подальшому вилучати парамагнітні частинки деструкції мастильного матеріалу і частинки продуктів зношування у лунки.

Експериментальними дослідженнями встановлено [7], що найбільша напруженість магнітного поля виникає на кромках лунок дискретної поверхні, яка на 10–26% вища, у порівнянні з величиною напруженості магнітного поля у між лунковому просторі. В процесі зношування дискретної поверхні, коли кромки лунок поступово згладжуються, напруженість магнітного поля на зношених кромках падає до величини напруженості магнітного поля між лункового простору.

Проведені дослідження впливу постійного магнітного поля на діелектричну проникність і тангенс кута діелектричних втрат масла МК-8. Встановлено [6], що у певних умовах при підвищенні температури і взаємодії з киснем нестабільні вуглеводні і гетерогенні органічні сполуки окислюються, що призводить до збільшення їх молекулярної ваги, а отже і до зміни діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат.

У зв'язку з вищевикладеним наукові дослідження магнітних явищ у трибоконтакту з дискретними поверхнями є актуальними. Крім того, необхідно відмітити, що дослідження магнітних явищ у дискретних поверхнях в літературі майже відсутні. Наукове значення, на нашу думку, представляє визначення умови вилучення продуктів зношування у дискретні ділянки з метою подальшого практичного застосування дискретних поверхонь.

Результати досліджень та їх обговорення. Продукти зношування, потрапляючи в магнітне поле між двома контактуючими поверхнями тертя намагнічується і створюють власне магнітне поле. На кромках дискретних ділянок створюється внутрішнє магнітне поле, яке значно перевищує магнітне поле частинки продуктів зношування і шорсткості поверхні тертя у між лунковому просторі. В результаті силової взаємодії між двома магнітними полями утворюється неоднорідне результуюче поле, яке призводить до виникнення пондеромоторної сили $F_П$, спрямованої в бік більшої напруженості магнітного поля кромок дискретних ділянок. Таким чином, пондеромоторна сила в магнітному полі являє собою силу, що діє на частинку, яка утворюються в процесі тертя, в неоднорідному магнітному полі.

Основою математичної моделі процесу вилучення продуктів зношування у дискретні ділянки в загальному випадку є векторне рівняння рівноваги частинки у вигляді

$$\vec{F}_{П} + \vec{F}_{C} + \vec{F}_{T} = 0 . \quad (1)$$

Отже, при проходженні частинки між двома контактуючими поверхнями, можливість захоплення її лунками, залежить від конкуренції сил, які діють на частинку масою m: пондеромоторної сили $\vec{F}_{П}$, сили опору мастила (стокової сили) $\vec{F}_{C}$ та сили земного тяжіння $\vec{F}_{T}$.

Пондеромоторна сила в магнітному полі являє собою силу, яка утворюється в процесі тертя двох поверхонь в неоднорідному магнітному полі і визначається, виходячи з потенційної енергії

$$F_{П} = -\frac{V}{2\mu_0\mu}\vec{B}\cdot grad\vec{B}, \quad (2)$$

де V – об'єм частинок, що знаходиться в магнітному полі; B – індукція магнітного поля; μ_0 – магнітна постійна(μ_0=4$\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м); μ – відносна магнітна проникність молекул мастильного матеріалу, яка показує, у скільки разів індукція магнітного поля в мастильному матеріалі відрізняється від індукції цього ж поля на кромках дискретних ділянок.

Пондеромоторна сила, що діє на частинку, розкладається на вертикальну і горизонтальну складові

$$\vec{F}_{П} = \vec{F}_{П\,y} + \vec{F}_{П\,x}$$

Так як горизонтальна складова $\vec{F}_{П\,x}$ набагато менша вертикальної $\vec{F}_{П\,y}$, то нею можна знехтувати. Тоді з урахуванням маси частинки m та її щільності ρ_m пондеромоторна сила буде дорівнювати

$$\vec{F}_{П} = \vec{F}_{Пy} = -\frac{m}{\mu_0 \cdot \mu \cdot \rho_m}\vec{B}\frac{\partial B}{\partial y}, \quad (3)$$

Для визначення подеромоторної сили необхідно визначити індукцію магнітного поля. Величина індукції магнітного поля між контактуючими поверхнями, з урахуванням розмірів дискретної ділянки, буде визначатися як

$$B = B_{кр}e^{-2\theta y}, \quad (4)$$

де $B_{кр}$ – індукція магнітного поля на кромках дискретних ділянок; θ – коефіцієнт, який визначається як відношення ширини лунки до її глибини (рис. 1); y – відстань між контактуючими поверхнями.

Підставивши (4) у (3) отримаємо вертикальну складову пондеромоторної сили

$$F_{Пy} = \frac{2m \cdot \theta \cdot B_{кр}^2}{\mu_0 \cdot \mu \cdot \rho_m}e^{-4\theta y} . \quad (5)$$

Крім того, на частинки буде діяти сила опору рідини. Опір рідини можна визначається за допомогою формули Стокса

$$\vec{F}_{C} = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot \vec{v}, \quad (6)$$

де r – наближений радіус частинки; v – швидкість руху частинки; η – динамічна в'язкість рідини.

На частинки уздовж осі OY діє сила тяжіння

$$F_T = mg,$$

де m – маса частинки; g – прискорення вільного падіння тіла.

Враховуючи дуже малі розміри частинок, силою її тяжіння нехтуємо. Тому рівняння рівноваги запишеться

$$\vec{F}_П + \vec{F}_C = 0.$$

В скалярному вигляді, з урахуванням (5) і (6), отримаємо таке рівняння рівноваги

$$-\frac{2m \cdot \theta \cdot B_{кр}^2}{\mu_0 \cdot \mu \cdot \rho_m} e^{-4\theta y} + 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v = 0 \qquad (7)$$

Тоді умовою притягування кромками лунок і подальшого вилучення частинок продуктів зношування у дискретні ділянки в трибосистемах з текстурованими лунковими поверхнямии буде

$$F_П > F_C,$$

або з урахуванням (7)

$$\frac{m \cdot \theta \cdot B_{кр}^2}{3\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot \rho_m \cdot \eta \cdot r \cdot v} e^{-4\theta y} > 1 \qquad (8)$$

Знайдемо залежність індукції магнітного поля кромки лунки від безрозмірної величини θ. Для цього розв'яжемо рівняння (7) відносно $B_{кр}$, отримаємо

$$B_{кр}(\theta) = \sqrt{\frac{6\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot \rho_m \cdot \eta \cdot r \cdot v}{m \cdot \theta}} e^{2\theta y}$$

Побудуємо криву залежності $B_{кр}$ від θ (рис. 2). Аналіз отриманих даних показав, що зі зростанням коефіцієнта θ індукція магнітного поля кромок лунок зменшується по експоненті. Наслідком такої поведінки є збільшення кута α до 180º (див. рис. 1).

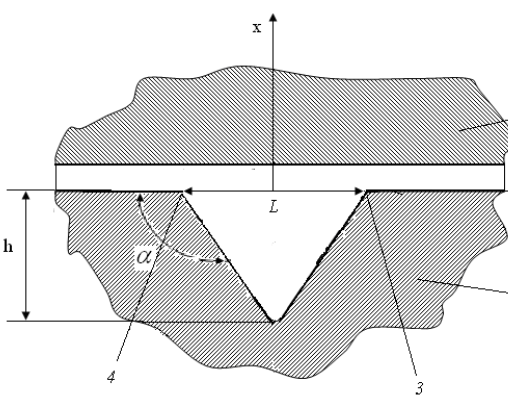

Рис. 1. Схема дискретної ділянки: *1* – зразок; *2* - контрзразок; *3*, *4* – кромки; *h* – глибина лунки; *L* – ширина лунки

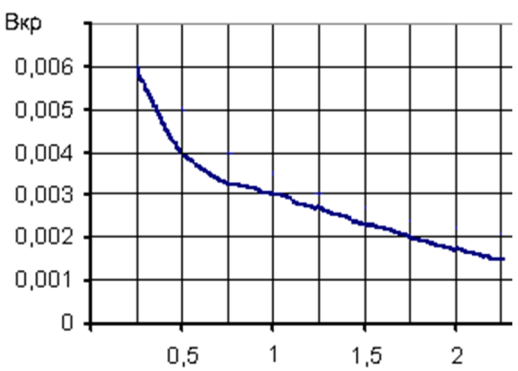

Рис. 2. Залежність індукції магнітного поля кромок лунок від коефіцієнта θ

Висновок. Таким чином, встановлено умову (8), відносно до якої феромагнітні частинки будуть притягуватися до кромок лунок і потрапляти в них, запобігаючи виникненню недопустимих процесів пошкодження в місцях трибоконтакту в міжлуночному просторі. Також встановлено залежність індукції магнітного поля кромки $B_{кр}$ від θ (відношення ширини лунки до її глибини) і побудовано графік. З графіку випливає, що $B_{кр}$ зростає, якщо θ прямує до нуля, тобто α прямує до кута 90º і спадає, якщо θ зростає, тобто кут α прямує до 180º, що підтверджується експериментальними дослідженнями [7].

Список літератури

1. Канарчук В.Е. Исследование противоизносных свойств топлив и масел после ЕФВ / Канарчук В.Е., Морозов В.И., Дмитриев Н.Н. // Эксплуатация автомобильной техники : межвузов. наук.-техн. зб. – М.: МАМИ, 1991.

2. Краля В.А. Влияние магнитного поля на износ α - железа при фреттинг-коррозии / Краля В.А., Морозов В.И. // Материалы IV научно-технической конференции. - Эксплуатационные свойства топлив, смазочных материалов и спецжидкостей. – Киев, 1977.

3. Голего Н.Л. Фреттинг-коррозия / Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В. – К. : Техніка, 1974. – 272 с.

4. Евдокимов А.А. Теоретическое обоснование критерия эффективности извлечения ферромагнитных частиц из потока жидкости в электромагнитном сепараторе УМС-4М [Текст] / А. А. Евдокимов, В. И. Чарыков // Вестник Алтайского ГАУ. – 2013. – № 9 (107). – С. 106–110.

5. Мисіна О.І. Математична модель процесу магнітного очищення речовин від домішок / О.І.Мисіна // Збірник тез доповідей І науково-практичної конференції з міжнародною участю „Комп'ютерне моделювання в хімії та технологіях". — Черкаси: 2008. – С. 71– 74.

6. Марчук В.Є. Зносостійкість текстурованих лункових поверхонь з дискретно-орієнтованою структурою в умовах граничного мащення / В.Є. Марчук, О.І. Духота, В.І. Морозов //Проблеми тертя та зношування : наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2012. – Вип. 57. – С. 128–138.

7. Процеси тертя та зношування у трибосистемах з дискретно-орієнтованою структурою. Повідомлення 1. Магнітні явища при терті поверхонь з дискретно-орієнтованою структурою / [Марчук В.Є., Морозов В.І., Духота О.І., Морозова І.В.] // Проблеми трибології. – 2012. - №4. – С. 53–57.

Стаття надійшла до редакції 17.12.2018.

Марчук Володимир Єфремович - доктор технічних наук, доцент, професор кафедри логістики Національного авіаційного університету.

Морозов Володимир Іванович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізики Національного авіаційного університету.

Крисак Яків Васильович - доцент НАУ, доцент кафедри економічної кібернетики Національного авіаційного університету.

V. Ye. MARCHUK, Ya. V. KRISAK, V. I. MOROZOV

MATHEMATICAL MODEL FOR THE REMOVAL OF WEAR PRODUCTS IN TRIBOSYSTEMS WITH TEXTURE DIMPLE SURFACES

It has been shown that the excitation of electric and magnetic fields in the places of tribocontact is the least studied, the consideration of which will allow to logically organize complex research processes on the common methodological information base of the system approach. Electromagnetic radiation affects adsorption and diffusion processes, accelerating or slowing down them. The results of this influence are the change in the oxidation rate of contacting surfaces, which leads to a change in the intensity of the development of the processes of shrinkage, reducing wear, reducing the temperature of the oil and samples. In addition, it has been shown that the study of magnetic phenomena in discrete surfaces in the literature is almost absent. The scientific significance, in our opinion, is the definition of the conditions for the removal of products of wear in discrete areas with a view to further practical application of discrete surfaces.

A mathematical model of the conditions for extracting products of wear in a discrete area in tribosystems with textured dimple surfaces is proposed. The basis of the mathematical model of the process of removing wear products in discrete areas is the vector equation of the equilibrium forces acting on the particles. The growth of the magnetic field induction of the edges of discrete regions with decreasing the ratio of the width of the well to its depth and vice versa is confirmed, which is confirmed by the preliminary experimental research.

Keywords: tribosystems; magnetic field induction; ponderomotive force; wear products; edges of discrete areas.

References

1. Kanarchuk V.E. Y`ssledovany`e proty`voy`znosnыx svojstv toply`v y` masel posle EFV / Kanarchuk V.E., Morozov V.Y`., Dmy`try`ev N.N. // Эkspluatacy`ya avtomoby`l`noj texny`ky` : mezhvuzov. nauk.-texn. zb. – M.: MAMY`, 1991.

2. Kralya V.A. Vly`yany`e magny`tnogo polya na y`znos - zheleza pry` fretty`ng-korrozy`y` / Kralya V.A., Morozov V.Y`. // Matery`alы IV nauchno-texny`cheskoj konferency`y`. - Эkspluatacy`onnыe svojstva toply`v, smazochnыx matery`alov y` speczzhy`dkostej. – Ky`ev, 1977.

3. Golego N.L. Fretty`ng-korrozy`ya / Golego N.L., Alyab`ev A.Ya., Shevelya V.V. – K. : Texnika, 1974. – 272 s.

4. Evdoky`mov A.A. Teorety`cheskoe obosnovany`e kry`tery`ya эffekty`vnosty` y`zvlecheny`ya ferromagny`tnыx chasty`cz y`z potoka zhy`dkosty` v эlektromagny`tnom separatore UMS-4M [Tekst] / A. A. Evdoky`mov, V. Y`. Charыkov // Vestny`k Altajskogo GAU. – 2013. – # 9 (107). – S. 106–110.

5. My`sina O.I. Matematy`chna model` procesu magnitnogo ochy`shhennya rechovy`n vid domishok / O.I.My`sina // Zbirny`k tez dopovidej I naukovo-prakty`chnoyi konferenciyi z mizhnarodnoyu uchastyu „Komp'yuterne modelyuvannya v ximiyi ta texnologiyax“. — Cherkasy`: 2008. – S. 71– 74.

6. Marchuk V.Ye. Znosostijkist` teksturovany`x lunkovy`x poverxon` z dy`skretno-oriyentovanoyu strukturoyu v umovax grany`chnogo mashhennya / V.Ye. Marchuk, O.I. Duxota, V.I. Morozov //Problemy` tertya ta znoshuvannya : nauk.-texn. zb. – K.: NAU, 2012. – Vy`p. 57. – S. 128–138.

7. Procesy` tertya ta znoshuvannya u try`bosy`stemax z dy`skretno-oriyentovanoyu strukturoyu. Povidomlennya 1. Magnitni yavy`shha pry` terti poverxon` z dy`skretno-oriyentovanoyu strukturoyu / [Marchuk V.Ye., Morozov V.I., Duxota O.I., Morozova I.V.] // Problemy` try`bologiyi. – 2012. - #4. – S. 53–57.