

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.4(109).20754

В.Є. МАРЧУК¹, О.О. МІКОСЯНЧИК², В.В. МАРЧУК²¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна²Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ПОВЕДІНКИ МАСТИЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ В ТЕКСТУРОВАНИХ ЗАГЛИБИНАХ ПРИ ГРАНИЧНОМУ ТЕРТІ

Проаналізовано перспективи формування текстурованої поверхні на елементах трибоспряження. Метою роботи є побудова математичної моделі розташування краплини мастильного матеріалу в лунках текстурованої поверхні та поза її межами залежно від кінематичних чинників, конструктивних характеристик поверхні та властивостей мастильного матеріалу. Математична модель руху краплини оливи в одній лунці текстурованої поверхні ґрунтується на впливі на краплину відцентрової сили, сили земного тяжіння та сили поверхневого натягу оливи при терті. Встановлено граничну умову при частоті обертання зразка більше 27 об/хв, при якій краплина оливи «покидає» лунку у верхньому положенні зразка і залишається у просторі між зразком і поверхнею контртіла, забезпечуючи регенерацію граничної мастильної плівки на поверхні трибоконтакту при її руйнуванні. При зменшенні частоти обертання зразка 26,8 об/хв краплина оливи залишається в лунці і не впливає на процеси регенерації мастильної плівки. Результати моделювання дозволяють прогнозувати маслоємність лунок текстурованої поверхні, що сприятиме підвищенню зносостійкості контактних поверхонь при регенерації граничного мастильного шару.

Ключові слова: текстурована поверхня, математична модель, лунка, граничне тертя, краплина мастильного матеріалу.

Вступ. Хоча більшість механізмів працює в режимах гідродинамічного чи змішаного змащення, критична увага має бути приділена граничному тертю. Слід пам'ятати, що знос вузлів тертя під час пуску та зупинки обладнання часто дорівнює сукупному зносу за весь час його стабільної роботи. Найбільше критичне пошкодження відбувається саме під час першого пуску, особливо коли знижені температури загострюють умови граничного тертя. У цьому режимі товщина мастильної плівки мінімальна, а подача мастила – обмежена. Зношування в таких екстремальних умовах є багатофакторним процесом, який має свої особливості для кожного типу вузла. Щоб забезпечити надійність роботи в умовах граничного тертя, необхідно вдосконалити системи подачі мастила до контактних зон і впровадити нові технології для зміцнення поверхні. Тому дослідження трибологічних характеристик змащення текстурованих поверхонь стає ключовим напрямком у прикладній трибології.

Огляд публікацій та аналіз невіршених проблем. Широкі можливості відкривають технологічні методи створення текстурованих поверхонь, які представляють собою спеціально створені на трибоповерхнях чітко організованих заглиблень, лунок або ямок для покращення працездатності вузлів тертя. Ці мікроямки працюють, з однієї сторони, як мікрорезервуари, утримуючи мастило, що зменшує ризик пошкодження трибоконтакту, особливо коли механізм запускається чи зупиняється [1]. З іншої сторони, вони збирають частинки зносу, не даючи їм руйнувати поверхневий шар поверхні завдяки

збудження внутрішніх магнітних полів, що виникають на кромках дискретних ділянок, які вносять свою частку у формування механізму вилучення продуктів зношування. В результаті утворюється неоднорідне результуюче магнітне поле, що призводить до виникнення пондеромоторної сили, яка діє на частинку зношування і спрямовує її в бік більшої індукції магнітного поля - кромки лунки, що призводить до запобігання виникнення недопустимих процесів руйнування контактуючих поверхонь [2].

Зовнішнє електромагнітного випромінювання також має свій вплив на процеси тертя та зношування. Дослідженню опорного підшипника, де мастилом виступає магнітореологічна рідина присвячена робота [3]. Локальне постійне магнітне поле використовується для активації та керування товщиною мастильної плівки. Зокрема, для мінімізації втрат на тертя при високих швидкостях автори пропонують послаблювати магнітне поле. Це ефективно зменшує в'язкість рідини, забезпечуючи оптимальну роботу.

Текстурована поверхня сприяє підвищенню маслоємності трибоконтакту, підвищує імовірність постійного підводу мастильного матеріалу в зону тертя, забезпечує ефективний розподіл мастильного матеріалу і навіть створює ефект підйому (гідродинамічний тиск), що формує стійку плівку. В роботі [4] встановлено умову ефективного протікання механізму змащення поверхні трибоконтакту при руйнуванні граничної плівки, яка забезпечує переміщення мастильного матеріалу з лунки в проблемну зону, відновлення граничної мастильної плівки на поверхні трибоконтакту та забезпечення безперебійної роботи трибовузла.

Механізм зношування дискретної поверхні істотно залежить від напружено-деформованого стану окремих дискретних ділянок, що виникає внаслідок силового або температурного впливу на поверхню. Мінімізація напружено-деформованого шару за рахунок підбору розмірів та конфігурації цих ділянок дозволяє багатократно підвищити граничний стан поверхні [5].

Слід зазначити, що механізм зношування текстурованих поверхонь під час граничного тертя є комплексним і визначається великим спектром факторів. Тому ця проблематика потребує подальшого, більш ретельного дослідження.

Метою роботи є побудова математичної моделі розташування краплини мастильного матеріалу в лунках текстурованої поверхні та поза її межами залежно від кінематичних чинників, конструктивних характеристик поверхні та властивостей мастильного матеріалу.

Аналіз результатів та обговорення. Для дослідження механізму дії мастильного матеріалу всередині і зовні окремих лунок текстури, розглянемо модель руху краплини оливи в одній з цих лунок (рис. 1). На краплину з масою m , розташовану в лунці під час обертання контрзразка, діятиме комплекс сил: відцентрова сила ($F_B = m\omega^2 R$), сила земного тяжіння ($F_g = mg$) та сила поверхневого натягу оливи ($F_{n.n.} = \sigma l$).

Згідно закону Ньютона:

$$\vec{F} = m\vec{a} = \vec{F}_y + \vec{F}_x + \vec{F}_{n.n.}$$

$$\begin{cases} y = -\frac{gt^2}{2} - R \sin(\omega t) + \frac{\sigma l}{m\omega^2} \sin(\omega t) + C_1 t + C_2; \\ x = -R \cos(\omega t) + \frac{\sigma l}{m\omega^2} \cos(\omega t) + C_1' t + C_2'. \end{cases} \quad (4)$$

Для визначення сталих величин C_1 , C_2 , C_1' , C_2' врахуємо початкові умови: при значеннях часу $t = 0$ (положення лунки в точці А) $\dot{x} = 0$, $\dot{y} = 0$, а також $x = R$, $y = 0$.

З системи (3) визначаємо C_1 та C_1' при $t=0$. Отримали:

$$\begin{cases} 0 = -\omega R + \frac{\sigma l}{m\omega} + C_1; \\ 0 = C_1'; \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} C_1 = \omega R - \frac{\sigma l}{m\omega}; \\ C_1' = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Відповідно з системи (4) при $t=0$, $C_2=0$ та $C_2' = 2R - \frac{\sigma l}{m\omega^2}$. Таким чином, частинний розв'язок системи (4) запишемо:

$$\begin{cases} y = -\frac{gt^2}{2} - R \sin(\omega t) + \frac{\sigma l}{m\omega^2} \sin(\omega t) + \left(\omega R - \frac{\sigma l}{m\omega}\right)t; \\ x = -R \cos(\omega t) + \frac{\sigma l}{m\omega^2} \cos(\omega t) + 2R - \frac{\sigma l}{m\omega^2}. \end{cases} \quad (7)$$

Проводили оцінку руху краплини мастильного матеріалу в заглибині текстурованої поверхні при 1/4 оберту. Знаходили координати краплини для $n = 50, 40, 35, 30, 25$ об/хв. Так, наприклад, для частоти обертання $n = 50$ об/хв, період обертання становив $T = 1/50$ с, $R = 0,1$ м, $\omega = 2\pi/T = 100$ об/с, $l = 0,008$ м, $\sigma = 26 \times 10^{-3}$.

Проведено оцінку розташування краплі оливи в лунці текстурованої поверхні або поза лункою залежно від частоти обертання і часу t , при значеннях $t = 0$ с, $t = 1/600$ с, $t = 1/300$ с, $t = 1/200$ с. Отримані дані представлено в табл. 1.

Аналізуючи отримані дані, встановлено, що краплина «покидає» лунку у верхньому положенні зразка (точка на осі Y, рис. 1) при $n = 26,8 - 27$ об/хв і вище та залишається у просторі між зразком і поверхнею контртіла. Це забезпечує регенерацію зруйнованої граничної мастильної плівки на поверхні трибоконтакту при її руйнуванні. Відновлення граничної мастильної плівки за таких умов буде сприяти реалізації граничного, змішаного та частково гідродинамічного режиму мащення в трибоконтакті. Якщо змінювати частоту обертання (значення n), то при $n < 26,8$ об/хв краплина залишається в лунці. Регенерація мастильної плівки не відбувається. За таких умов відбувається деструкція граничного шару мастильного матеріалу, перехід трибосистеми в режим тертя без мастильного матеріалу, що призводить до зниження зносостійкості трибосистеми.

Таблиця 1

**Положення краплі мастильного матеріалу
для $R = 0,1$ м і заданого поверхневого натягу**

$n=50$ об/хв	t, с	1/200	1/300	1/600	0	<i>Крапля залишає лунку</i>	
	y_m	0,1412	0,0971	0,0452	0		
	x_m	0,0131	0,0434	0,0872	0,1		
$n=40$ об/хв	t, с	1/160	1/240	1/480	0		
	y_m	0,1311	0,0952	0,0451	0		
	x_m	0,0072	0,0431	0,0876	0,1		
$n=35$ об/хв	t, с	1/140	1/210	1/420	0		<i>Крапля залишається у лунці</i>
	y_m	0,1235	0,0901	0,0427	0		
	x_m	0,0054	0,043	0,0862	0,1		
$n=30$ об/хв	t, с	1/120	1/180	1/360	0		
	y_m	0,1127	0,0841	0,049	0		
	x_m	0,0023	0,0441	0,0847	0,1		
$n=25$ об/хв	t, с	1/100	1/150	1/300	0		
	y_m	0,1	0,0834	0,048	0		
	x_m	0	0,0467	0,0841	0,1		

Висновки

Висока зносостійкість текстури поверхонь з лунками обумовлена високою маслоємністю лунки, в яких будуть зберігатися мастильні матеріали для відновлення граничної мастильної плівки при її руйнуванні в місцях трибоконтакту. При умові $n = 26,8-27$ об/хв і вище поверхня нерухомого зразка буде постійно змащуватись потоком мастильного матеріалу, що зберігається у лунці, забезпечуючи регенерацію граничної мастильної плівки на поверхні трибоконтакту, яка визначається часом адсорбційного заповнення розривів її ділянок. Ці процеси будуть покращувати триботехнічні характеристики тертя і сприятимуть зниженню зносу контактуючих поверхонь.

Список літератури

1. C. Gachot, A. Rosenkranz, S.M. Hsu, H.L. Costa. A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement // *Wear* 372-373. 2017. 21–41. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.11.020>
2. V. Marchuk, M. Kindrachuk, Ya. Krysak, and others, The Mathematical Model of Motion Trajectory of Wear Particle Between Textured Surfaces, *Tribology in Industry*, v. 43, no. 2, pp. 241–246, 2021, doi: [10.24874/ti.1001.11.20.03](https://doi.org/10.24874/ti.1001.11.20.03).
3. F. Quinci, W. Litwin, M. Wodtke, and R. van den Nieuwendijk. A comparative performance assessment of a hydrodynamic journal bearing lubricated with oil and magnetorheological fluid. *Tribology International*, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107143>.
4. V. Marchuk, M. Kindrachuk, O. Harmash, and V. Kharchenko, Determining features in the wear resistance characteristics of tribocompounds with a textured hole surface under conditions of boundary friction, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023, 6/12 (126), P. 22-29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.291785>.
5. V. Marchuk, M. Kindrachuk, O. Tisov et.al. Stress-strained state of textured surfaces with selectively indented regions. *Functional Materials*. 2019. 26(4). P. 773-778. <https://doi.org/10.15407/fm26.04.773>.

Марчук Володимир Єфремович – докт. техн. наук, професор, професор кафедри міжнародного бізнесу та логістики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський проспект, 37, Київ, 03056, E-mail: v.marchuk.kpi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0140-5416>

Мікосянчик Оксана Олександрівна – докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: oksana.mikos@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2438-1333>

Марчук В'ячеслав Володимирович – здобувач вищої освіти 2-го курсу ОС «Магістр» спеціальності 275 «Транспортні технології (на повітряному транспорті)», освітньо-професійна програма «Мультимодальний транспорт і логістика», Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: 9001778@stud.kai.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0002-7742-3549>

Volodymyr Marchuk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of International Business and Logistics, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Beresteyskyi Avenue, 37, Kyiv, 03056, E-mail: v.marchuk.kpi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0140-5416>

Oksana Mikosianchuk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State University “Kyiv Aviation Institute”, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: oksana.mikos@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2438-1333>

Vyacheslav Marchuk – higher education student of the 2nd year of the OS "Master" in the specialty 275 "Transport Technologies (in air transport)", educational and professional program "Multimodal Transport and Logistics", State University "Kyiv Aviation Institute", Lubomyr Huzar Ave., 1, Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: 9001778@stud.kai.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0002-7742-3549>

V.E. MARCHUK, O.O. MIKOSIANCHYK, V.V. MARCHUK

FEATURES OF THE BEHAVIOR OF LUBRICANT MATERIAL IN TEXTURED REGIONS UNDER BOUNDARY FRICTION

Prospects for the formation of a textured surface on tribological elements (tribo-pairs) were analyzed. The goal of this work is to construct a mathematical model for the location of a lubricant droplet both within the depressions (dimples) of the textured surface and outside of them, depending on kinematic factors, structural characteristics of the surface, and properties of the lubricant. The mathematical model for the movement of an oil droplet in a single dimple of the textured surface is based on the influence of centrifugal force, the force of gravity, and the surface tension force of the oil on the droplet during friction. A limit condition has been established at a sample rotation frequency greater than 27 rpm , under which the oil droplet "leaves" the dimple at the upper position of the sample and remains in the space between the sample and the counter-body surface, ensuring the regeneration of the boundary lubricating film on the tribocontact surface when it breaks down. When the sample rotation frequency is reduced to 26.8 rpm , the oil droplet remains in the dimple and does not affect the processes of lubricating film regeneration. The modeling results will make it possible to predict the oil-holding capacity (oil retention) of the textured surface dimples, which will contribute to increasing the wear resistance of the contact surfaces during the regeneration of the boundary lubricating layer.

Key words: textured surface, mathematical model of a hole, boundary friction, drop of lubricant.

References

1. C. Gachot, A. Rosenkranz, S.M. Hsu, H.L. Costa. A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement. *Wear*. 2017. 372-373. 21–41. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.11.020>
2. V. Marchuk, M. Kindrachuk, Ya. Krysak, and others, The Mathematical Model of Motion Trajectory of Wear Particle Between Textured Surfaces. *Tribology in Industry*. 2021. v. 43, no. 2, P. 241–246. doi: [10.24874/ti.1001.11.20.03](https://doi.org/10.24874/ti.1001.11.20.03).
3. F. Quinci, W. Litwin, M. Wodtke, R. van den Nieuwendijk. A comparative performance assessment of a hydrodynamic journal bearing lubricated with oil and magnetorheological fluid. *Tribology International*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107143>.
4. V. Marchuk, M. Kindrachuk, O. Harmash, and V. Kharchenko, Determining features in the wear resistance characteristics of tribocompounds with a textured hole surface under conditions of boundary friction, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. 6/12 (126). P. 22-29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.291785>.
5. V. Marchuk, M. Kindrachuk, O. Tisov et.al. Stress-strained state of textured surfaces with selectively indented regions. *Functional Materials*. 2019. 26(4). P. 773-778. <https://doi.org/10.15407/fm26.04.773>.