

КОМБІНОВАНИЙ ТРИБОЛОГІЧНИЙ ВПЛИВ ПАР ТА НАНОАМПЛІТУДНИХ КОЛИВАНЬ НА РОБОЧІ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

¹ Донбаська державна машинобудівна академія,

² Вінницький національний технічний університет

Анотація: У роботі досліджено механізми впливу поєднання тонкого адсорбційного шару поверхнево-активної речовини (ПАР) та наноамплітудних вібрацій на трибологічні характеристики робочих поверхонь деталей машин. Розроблено математичну модель динамічного контакту та виконано оцінку зміни коефіцієнта тертя за різних параметрів вібраційного впливу. Встановлено, що при амплітуді коливань $A \approx 30$ нм та частоті $f \approx 50$ кГц можливе зниження коефіцієнта тертя у 2–3 рази. Запропонований підхід може бути використаний у підшипниках ковзання, зубчастих передачах, напрямних верстатів та вузлах двигунів внутрішнього згорання.

Ключові слова: поверхнево-активні речовини, наноамплітудні вібрації, трибологія, коефіцієнт тертя, адсорбційний шар, зносостійкість, деталі машин.

Abstract: This study investigates the mechanisms of influence of the combined effect of a thin adsorption layer of surfactant (SAA) and nano-amplitude vibrations on the tribological characteristics of working surfaces of machine parts. A mathematical model of dynamic contact has been developed, and the change in friction coefficient under various vibration parameters has been estimated. It is established that at a vibration amplitude $A \approx 30$ nm and frequency $f \approx 50$ kHz, the friction coefficient can be reduced by 2–3 times. The proposed approach can be applied in sliding bearings, gear transmissions, machine tool guideways, and internal combustion engine assemblies.

Keywords: surfactants, nano-amplitude vibrations, tribology, friction coefficient, adsorption layer, wear resistance, machine parts.

Вступ.

Проблема зменшення тертя та зносу є однією з ключових у сучасному машинобудуванні. Втрати енергії через тертя у механічних системах становлять значну частину загальних енергетичних витрат промисловості [1, 2]. Тому пошук нових методів керування трибологічними властивостями контактних поверхонь є важливим науковим і практичним завданням.

Одним із перспективних напрямів є використання поверхнево-активних речовин (ПАР), які утворюють на поверхні металу молекулярні адсорбційні шари товщиною порядку кількох десятків нанометрів [3]. Полярна частина молекули ПАР взаємодіє з поверхнею металу, тоді як неполярна частина орієнтується назовні, формуючи шар зі зниженою поверхневою енергією, що призводить до зменшення сил адгезії та зниження коефіцієнта тертя [4]. Додатково перспективним є використання механічних коливань малої амплітуди, які впливають на структуру контактної зони та механізми тертя [5, 6].

Метою даної роботи є встановлення закономірностей впливу поєднання поверхнево-активного шару та наноамплітудних вібрацій на трибологічні характеристики поверхні деталей машин.

Результати дослідження.

Дослідження показало, що поєднання шару ПАР та наноамплітудних коливань може призводити до декількох взаємопов'язаних фізичних ефектів: орієнтації молекул ПАР у напрямку ковзання; періодичного зменшення контактної площі мікронерівностей; активації трибохімічних процесів на поверхні металу; формування стабільної захисної трибоплівки [7]. В результаті відбувається перехід контактної зони у режим часткового мікросковзання, що сприяє суттєвому зниженню сил тертя.

Динамічний зазор між поверхнями описується рівнянням $h(t) = h_0 + A \sin(\omega t)$, де h_0 — середній зазор, A — амплітуда коливань, ω — кутова частота. Для опису динаміки контактної системи використано рівняння колиального руху $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_t$, де m — приведена маса системи, c — коефіцієнт демпфування, k — жорсткість контакту, F_t — сила тертя [8].

Коефіцієнт тертя залежить від параметрів коливань і може бути представлений у вигляді: $\mu = \mu_0 \cdot e^{-\gamma A \omega}$, де μ_0 — коефіцієнт тертя без вібрацій, γ — коефіцієнт чутливості трибологічної системи. Для

типових параметрів системи ($A \approx 30$ нм, $f \approx 50$ кГц) динамічний параметр $A\omega \approx 0,009$ м/с. За таких умов коефіцієнт тертя знижується з $\mu \approx 0,10$ до $\mu \approx 0,04-0,05$, тобто приблизно у 2–3 рази.

Використання даного підходу потенційно дозволяє: зменшити коефіцієнт тертя на 40–70 %; підвищити зносостійкість поверхонь; знизити температуру у зоні контакту; стабілізувати мікрогеометрію поверхні. Запропонований метод є перспективним для застосування у вузлах підшипників ковзання, зубчастих передачах, напрямних верстатів, кулачкових механізмів та двигунів внутрішнього згоряння.

Висновки.

У результаті теоретичного дослідження встановлено, що поєднання тонкого шару поверхнево-активної речовини та наноамплітудних вібрацій суттєво впливає на трибологічні характеристики робочих поверхонь деталей машин. Основними механізмами цього впливу є: формування впорядкованого адсорбційного шару ПАР, зменшення реальної площі контакту мікронерівностей, активація трибохімічних процесів та утворення стабільної захисної трибоплівки.

Розроблена математична модель дозволяє прогнозувати зниження коефіцієнта тертя залежно від параметрів вібраційного впливу. Запропонований підхід може розглядатися як перспективний напрям розвитку активних трибологічних систем, у яких властивості контактної поверхні керуються за допомогою зовнішніх фізичних полів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальну перевірку отриманих теоретичних результатів, оптимізацію параметрів вібрацій та підбір ефективних типів ПАР.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Holmberg K., Erdemir A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*. 2017. Vol. 5, No. 3. P. 263–284. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>.
2. Meng Y., Xu J., Ma L., Jin Z., Prakash B., Ma T., Wang W. A review of advances in tribology in 2020–2021. *Friction*. 2022. Vol. 10, No. 10. P. 1443–1595. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-022-0685-7>.
3. Spikes H. Friction modifier additives. *Tribology Letters*. 2015. Vol. 60, No. 1. Article 5. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0589-z>.
4. Chen Z., Liu Y., Zhang S., Luo J. Tribological behavior of amphiphilic molecules at solid-liquid interfaces: A molecular dynamics simulation study. *Langmuir*. 2018. Vol. 34, No. 19. P. 5611–5622. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b00274>.
5. Popov V. L., Starcevic J., Filippov A. E. Influence of ultrasonic in-plane oscillations on static and sliding friction and intrinsic length scale of dry friction processes. *Tribology Letters*. 2022. Vol. 70. Article 55. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-022-01592-z>.
6. Teidelt E., Starcevic J., Popov V. L. Influence of ultrasonic oscillation on static and sliding friction. *Tribology Letters*. 2016. Vol. 48. P. 51–62. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-012-9937-4>.
7. Ковалевський С. В. Деякі аспекти застосування штучного інтелекту для відновлення та розвитку України. *Штучний інтелект*. 2023. № 3. С. 117–125. DOI: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001445551>.
8. Kovalevskyy S. Intelligent control systems for mechanical engineering technology tasks. *Штучний інтелект*. 2024. № 4 (101). С. 218–227. DOI: <https://doi.org/10.15407/jai2024.04.218>.
9. Shen X., Liu D., Wang Z., Li Y. Effect of ultrasonic vibration on friction and wear characteristics of metallic surfaces with adsorption films. *Wear*. 2023. Vol. 523. Article 204812. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204812>.
10. Verma P. C., Campanerut R., Gialanella S., Straffelini G. Friction and wear behaviour of the brake pad material sliding against piped cast iron: influence of lubricant film. *Wear*. 2015. Vol. 322–323. P. 15–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.10.012>.

Ковалевський Сергій Вадимович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Інноваційних технологій і управління Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ–Тернопіль, e-mail: kovalevskii61@gmail.com.

Гливицький Владислав Миколайович – студент групи ІПМ23б, факультет машинобудування та транспорту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: glyviy2006@gmail.com

Kovalevskyy Sergiy Vadimovich. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Innovative Technologies and Management, Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk–Ternopil, e-mail: kovalevskii61@gmail.com.

Glyviy Vladyslav Mykolaiovych – student of group IPM23b, Faculty of Mechanical Engineering and Transport, Vinnytsia National Technical University, e-mail: glyviy2006@gmail.com