

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.3(108).20447

І.В. МАЛЯРЧУК, О. О. МІКОСЯНЧИК

Державний університет «Київський авіаційний інститут», Україна

ОЦІНКА ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРАНСМІСІЙНОЇ ОЛИВИ З КОМПЛЕКСАМИ МІКРО- ТА НАНОДОБАВОК

Наведено результати дослідження триботехнічних характеристик трансмісійної оливи у граничному режимі мащення в локальному контакті. Досліджено ефективність модифікування мінеральної оливи ТАД-17і антифрикційними та протизношувальними добавками. Показано, що товарна олива забезпечує незначне зниження коефіцієнта тертя в нестационарних режимах мащення, тоді як нанодисперсні добавки Liqui Moly Getriebeoil-Additiv з MoS та XENUM MG GEAR формують стабільні граничні плівки, які зменшують коефіцієнт тертя до 52–56 % і знижують зношування у 2–3 рази. Доведено, що ефективність добавок до мастильних матеріалів у динамічних умовах визначається термостійкістю захисних шарів та здатністю присадок запобігати адгезійному й абразивному зношуванню.

Ключові слова: *мастильні матеріали, нанодобавки, коефіцієнт тертя, зношування, трибологічний контакт.*

Вступ. Сучасні механізми та транспортні системи працюють у широкому діапазоні навантажувально-швидкісних та температурних режимів. При цьому близько 30 % загальної виробленої енергії витрачається на подолання сил тертя. Оптимізація складу мастильних матеріалів є одним із найефективніших шляхів зниження енергетичних втрат і підвищення довговічності вузлів тертя.

Особливої актуальності набувають дослідження у нестационарних умовах роботи (часті пуски-зупинки, змінні навантаження), де реалізується граничний або змішаний режим мащення. Саме в цих умовах проявляється найбільший вплив реологічних властивостей мастильних матеріалів і формування адсорбційних граничних шарів.

Для збільшення ресурсу мастильних матеріалів та сприяння сталому розвитку необхідні подальші вдосконалення та оптимізація їх складу як за фракційними базовими компонентами, так і за наявністю присадок і добавок.

Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем. Сучасні оливи в основному складаються з декількох компонентів – базових олив та присадок або добавок. Базова олива є основним компонентом, в складі рідких мастильних матеріалів її вміст становить від 70 до 99% [1]. Присадки в основному підвищують диспергуючі та протизношувальні властивості, забезпечують зростання температури спалаху, вищий індекс в'язкості та нижчу температуру застигання [2]. Нанодобавки продемонстрували значний потенціал для покращення трибологічних характеристик завдяки своєму малому розміру та здатності заповнювати западини між деталями, що сполучаються [3].

Відомо, що антифрикційні та протизношувальні властивості мастильних матеріалів значною мірою залежать від фракційного складу та наявності присадок, мікро- та нанодобавок [4, 5]. Введення твердих дисперсних добавок (графіт, дисульфід молібдену, фулерен C60 або присадок на їх основі) здатне формувати стабільні граничні плівки, знижувати металевий контакт поверхонь і запобігати зношуванню контактних поверхонь [6, 7].

Разом з тим, ефективність таких присадок у динамічних умовах експлуатації залишається предметом дослідження, оскільки процеси дезорієнтації молекул і руйнування плівок при підвищенні температури можуть зменшувати ресурс захисних шарів.

Метою роботи є оцінка впливу мікро- та нанодобавок на триботехнічні характеристики трансмісійної оливи у нестационарних режимах тертя.

Об'єкт дослідження – кінетика формування граничних шарів та зміна мікротвердості поверхневих шарів металу при терті.

Матеріали та методика дослідження. В якості мастильного матеріалу для досліджень було обрано трансмісійну оливу ТАД-17і за ГОСТ 23652-79 (виробник: завод технічних масел Аріан, Україна) (табл. 1). Дана олива призначена для змащування всіх типів передач, зокрема гіпоїдних, автомобілів та іншої мобільної техніки. Олива ТАД-17і виготовлена з базових компонентів на мінеральній основі, містить багатофункціональну протизношувальну присадку (з підвищеним вмістом сірки та фосфору), депресорну та антипінну присадки. Працездатність оливи ТАД-17і від -25 °С до 130-140 °С.

Таблиця 1

Фізико-хімічні показники трансмісійної оливи ТАД-17і

Найменування показника	Норма
В'язкість кінематична за температури 100 °С, мм ² /с	≥17,5
В'язкість кінематична за температури 50 °С, мм ² /с	110-120
Індекс в'язкості	≥100
Вміст механічних домішок, %	немає
Температура спалаху, що визначається у відкритому тиглі, °С	≥200
Температура застигання, °С	≤-25
Кислотне число, мг КОН на 1 г оливи	≤2,0
Зольність, %	≤0,3
Колір на колориметрі ЦНТ, одиниць ЦНТ	≤5,0
Густина за 20 °С, кг/м ³	≤907
Вміст води, %	сліди

В якості добавок для покращення триботехнічних властивостей оливи ТАД-17і використовували інноваційні добавки відомих виробників, які поширені на українському ринку:

- антифрикційна добавка Liqui Moly Getriebeoil-Additiv з MoS₂;
- добавка XENUM MG GEAR, що містить компоненти нанографіту та розчинного Мо-комплексу (дисульфиду молібдену);
- XADO 1 Stage Transmission — продукт 3-го покоління активованих наночастинок ревіталізантів, призначених для відновлювального ремонту,

захисту від спрацювання і збільшення ресурсу механічних і роботизованих трансмісій, роздавальних коробок та диференціалів автомобіля;

– добавки графіту марки С-1 та ГСМ (за ГОСТ 17022-81).

Дослідження мастильних матеріалів проводилось на програмно-апаратному комплексі для оцінки триботехнічних характеристик пар тертя [8].

Максимальна частота обертів для досліджуваних зразків становила 700 об/хв (випереджаюча поверхня) та 500 об/хв (відстаюча поверхня). Проковзування – 30%. Максимальне контактне навантаження по Герцу – 400 МПа.

Вимірювали коефіцієнт тертя, товщину мастильного шару, лінійний знос та мікротвердість поверхневих шарів.

Результати досліджень та їх аналіз. Дослідження товарної оливи ТАД-17і встановило, що у процесі припрацювання коефіцієнт тертя знизився на 33 %, однак при підвищенні температури спостерігалися піки дезорієнтації граничних шарів, що призводило до нестабільності процесу мащення. Це спричинює реалізацію першого етапу протікання мікропластичної деформації, який характеризується в більш полегшеному утворенні і русі дислокацій в приповерхневих шарах кристалічних матеріалів. Згідно гіпотезі Смекаля, в реальних кристалах є порожнини, які підвищують хімічну активність довколишніх атомів і викликають посилення адсорбційної дії. Наслідком процесів активації поверхневих шарів в режимі частих пусків-зупинок є утворення граничних адсорбційних плівок на контактуючих поверхнях, встановлених в ході експерименту.

Різний характер зміни мікротвердості і зносу на відстаючій і випереджаючій поверхнях, обумовлений складним напруженим станом матеріалу поверхневого шару, що виникає в результаті поєднання контактних напружень від нормального навантаження і тангенціальних сил (рис.1).

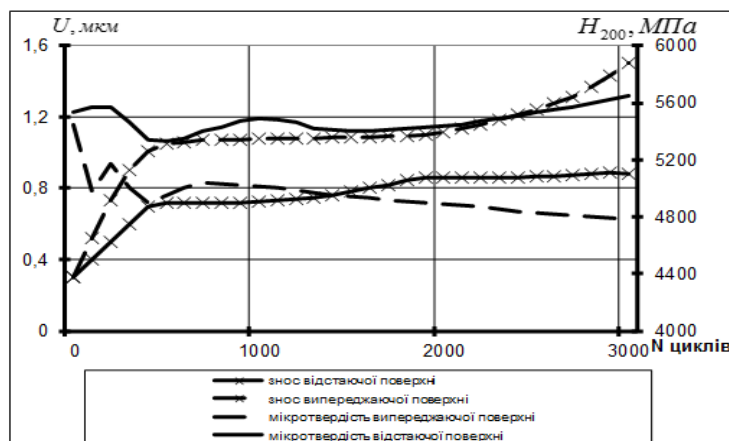


Рис. 1. Зміна мікротвердості та лінійного зносу в умовах частих пусків – зупинок при змащуванні ТАД-17і.

Додавання антифрикційних добавок Liqui Moly Getriebeoil-Additiv з MoS₂ та XENUM MG GEAR показало найкращі результати – сталий коефіцієнт тертя зменшився на 52–56 %, знос знизився у 2–3 рази, порівняно з базовою оливою ТАД-17і. При цьому сформовані граничні шари відзначалися високою термостійкістю. Додавання присадок підвищує зносостійкість пар тертя -

інтенсивність зношування в період припрацювання зменшується до $5,432 - 2,879 \cdot 10^{-8}$, а сталі значення цього параметру складають $0,613 \cdot 10^{-8}$. Якщо загальний лінійний знос в процесі експерименту для даних добавок однаковий, то знос випереджаючої і відстаючої поверхонь характеризується протилежними якісними і кількісними показниками (рис.2).

Домінуючим видом зносу в період припрацювання при змащуванні трансмісійною оливою з добавкою Liqui Moly Getriebeoil-Additiv з MoS₂ та XENUM MG GEAR є, як і для базової оливи ТАД-17і, адгезійний, а утворення текстурованих граничних плівок по мірі напрацювання зменшує імовірність протікання окислювальних реакцій в приповерхневих шарах металу з підвищенням температури, що знижує інтенсивність окисного зношування.

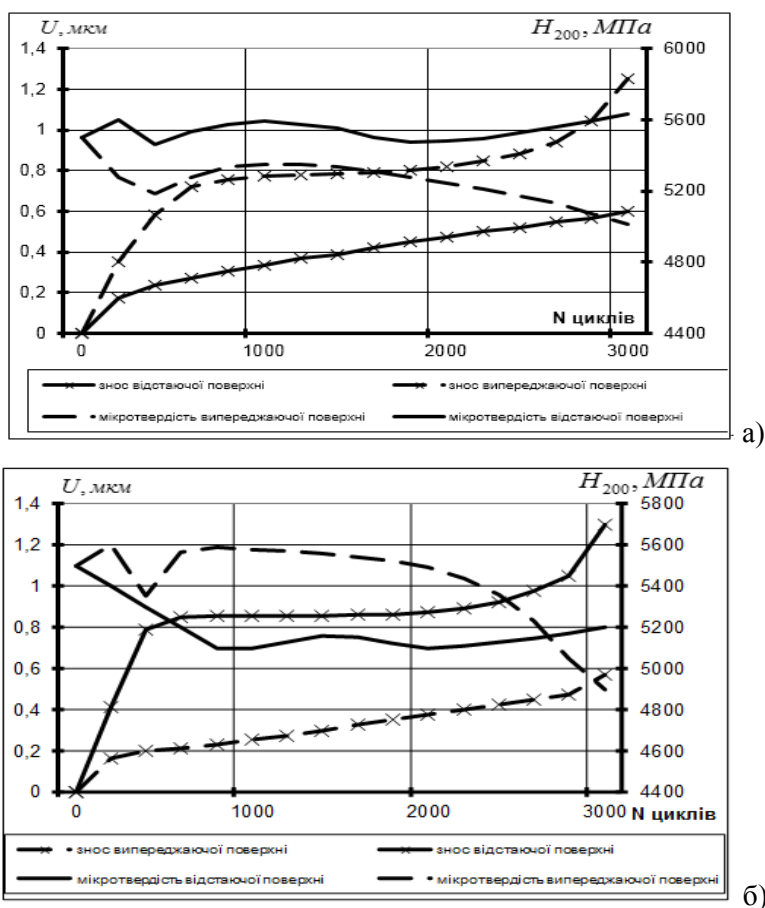


Рис. 2. Кінетика зміни мікротвердості поверхневих шарів металу і лінійного зносу для XENUM MG GEAR (а) та Liqui Moly Getriebeoil-Additiv з MoS₂ (б).

Додавання добавок графіту марок С-1 та ГСМ характеризується низькою ефективністю через великі розміри частинок, що призводило до підвищеного абразивного зносу зразків і підвищенням зносостійкості.

Інтенсивність зношування 1% суспензій графіту С-1 та ГСМ не відрізняється від даного параметра при змащуванні товарною оливою ТАД-17і при перших циклах, а у міру напрацювання встановлено її збільшення на 40%. Дослідження мікротвердості поверхневого шару металу пар тертя дозволяє

припустити про переважання в контакті напруженого механо-фізико-хімічного стану через значні зміни процесів знеміцнення - зміцнення поверхневого шару (рис.3). Зміни мікротвердості відстаючої поверхні аналогічні для марок графіту, що використовуються, внаслідок чого знижується імовірність утворення насиченого текстурованого граничного адсорбційного шару з включеннями частинок графіту. Це призводить до більш швидкого стирання граничної плівки, утвореної компонентами оливи, в результаті проковзування.

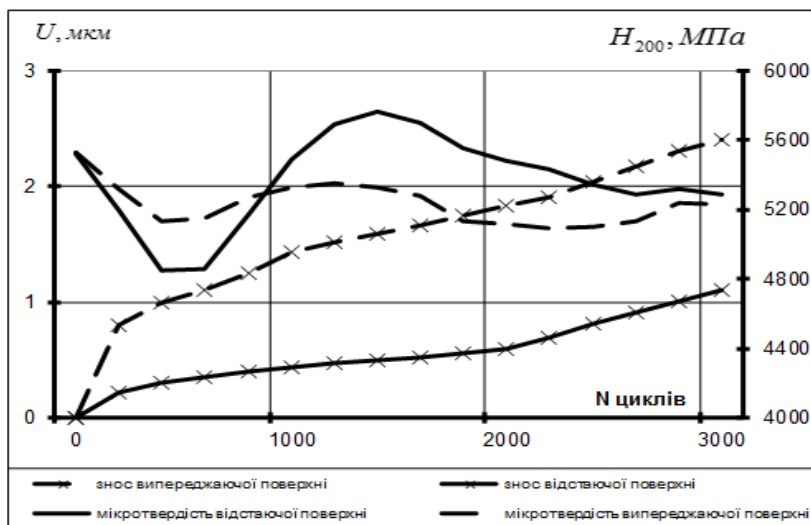


Рис. 3. Кінетика зміни мікротвердості та зносу в динамічних умовах навантаження для графіту марки С-1 та ГСМ (за ГОСТ 17022-81).).

Добавка XADO 1 Stage Transmission: на початковій стадії припрацювання забезпечує збільшення зношування (через крупні абразивні частинки), проте в процесі напрацювання відбувалося ущільнення поверхневого шару і часткове зростання зносостійкості.

Таким чином, домінуючі види зносу змінювалися від адгезійного (на початковому етапі) до окислювального та корозійно-механічного при підвищенні температури й впливу добавки та присадок. 0,25% суспензія XADO 1 Stage Transmission на 15% підвищує інтенсивність зношування в період припрацювання, в порівнянні з товарною оливою ТАД-17і. Це зв'язано, перш за все, з переважанням в контакті на початковому етапі експерименту абразивного зношування: компоненти використаної добавки - досить крупні частинки розміром 1-10 мкм.

Наявність таких частинок збільшує лінійний знос як випереджаючої, так і відстаючої поверхонь, а також приводить до синхронного знеміцнення поверхневих шарів зразків внаслідок постійного стирання металу в зоні трибологічного контакту (рис.4).

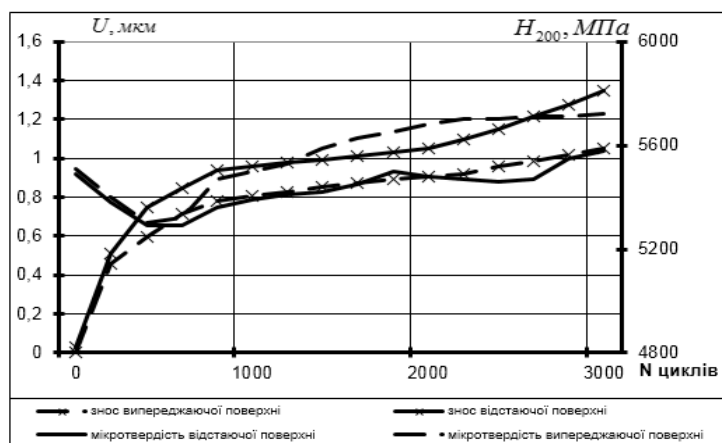


Рис. 4. Зміна мікротвердості поверхневих шарів та зносу в режимі частих пусків-зупинок при використанні присадки XADO 1 Stage Transmission.

Отримані результати підтвердили, що найбільш перспективним шляхом підвищення довговічності вузлів тертя є застосування нанодисперсних компонентів, зокрема антифрикційних добавок Liqui Moly Getriebeoil-Additiv з MoS₂ та XENUM MG GEAR. Вони формують стабільні граничні плівки, які витримують знакозмінні навантаження, забезпечують рівномірний розподіл тиску в зоні контакту та значно знижують інтенсивність зношування.

Практичне впровадження таких композицій можливе у під час експлуатації трансмісійних оли, що підтверджується апробацією результатів на підприємствах машинобудівної галузі.

Висновки

1. Установлено, що ефективність мастильних матеріалів у нестационарних умовах визначається реологічними властивостями граничних шарів та здатністю присадок формувати стабільні адсорбційні плівки.

2. Найбільший антифрикційний ефект забезпечують антифрикційна присадка Liqui Moly Getriebeoil-Additiv з MoS₂ та XENUM MG GEAR – зниження коефіцієнта тертя до 56 % та зменшення зносу у 2–3 рази.

3. Графіт С-1 виявив обмежену ефективність через нестійкість утворених шарів.

Список літератури

1. Malik M. A. I., Kalam M.A., Mujtaba M.A., Almomani F. A review of recent advances in the synthesis of environmentally friendly, sustainable, and nontoxic bio-lubricants: Recommendations for the future implementations. *Environmental Technology & Innovation*. 2023. Vol. 32. 103366. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103366>

2. X. Lyu, P. Xu, Y. Wang, W. Bao et al. Review: The anti-friction and anti-wear mechanism of lubricate oil additives in the piston ring-cylinder liner system of engines.. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2025. <https://doi.org/10.1108/ILT-12-2024-0496>

3. Uflyand I.E., Zhinzhiro V.A., Burlakova V.E. Metal-containing nanomaterials as lubricant additives: State-of-the-art and future development. *Friction*. 2019. 7 (2). P. 93-116. <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0261-y>

4. Mukhortov I., Zadorozhnaya E., Levanov I., Surovtcev S. On the Difference in the Action of Anti-Wear Additives in Hydrocarbon Oils and Vegetable Triglycerides. *Lubricants*. 2023. 11(12). P. 499. <https://doi.org/10.3390/lubricants11120499>

-
5. Oleksandrenko V.P., Yefymenko V.V., Kalmykova N.G. Resistant properties of lubricating materials with fullerene nanoadditives. *Problems of Tribology*. 2023. V. 28, 2/108. P. 28-36 <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-108-2-28-36>
 6. Jedliński Ł. Analysis of the influence of gear tooth friction on dynamic force in a spur gear. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1736. 012011.
 7. Vazirisereshk MR, Martini A, Strubbe DA, Baykara MZ. Solid lubrication with MoS₂: A review. *Lubricants* 2019;7:57. <https://doi.org/10.3390/LUBRICANTS7070057>
 8. T. M.A. Al-Quraan, Ilin O., Kulyk M., Mnatsakanov R., Mikosianchyk O., Melnyk V. Dynamic processes of self-organization in non-stationary conditions of friction. *Advances in Tribology*. 2023. Vol. 2023. Article ID 6676706. P. 13. <https://doi.org/10.1155/2023/6676706>

Стаття надійшла до редакції 23.09.2025.

Малярчук Ігор Володимирович – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 067 419 86 12 E-mail: 4619672@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0008-7953-6209>.

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>

I. MALYARCHUK, O. MIKOSIANCHYK

ASSESSMENT OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF TRANSMISSION OIL WITH COMPLEXES OF MICRO- AND NANOADDITIVES

This paper presents an in-depth experimental study of how micro- and nanoadditives influence the tribological performance of transmission oils under boundary lubrication in non-stationary friction regimes. The motivation stems from the fact that up to 30% of total energy losses in mechanical systems are caused by friction, and the optimization of lubricant formulations is one of the most effective ways to improve energy efficiency and extend the durability of friction units. Particular attention was paid to the comparative behavior of base mineral oil TAD-17i and its modified compositions.

The experimental program involved rolling with sliding and pure sliding tests, measuring friction coefficients, linear wear, and surface microhardness. The results revealed that the base oil TAD-17i alone provides only partial friction reduction (about 33%), while the addition of nanodispersed components significantly enhances lubricant efficiency. Specifically, MoS₂ and XENUM MG GEAR demonstrated the highest effectiveness: they reduced the steady-state friction coefficient by 52–56% and decreased wear by a factor of 2–3 compared to the unmodified base oil. These additives formed stable, thermally resistant boundary films capable of withstanding variable loads, start-stop conditions, and elevated temperatures.

By contrast, graphite S-1 showed limited effectiveness due to the large particle size, which contributed to abrasive wear, while XADO 1 Stage Transmission initially increased wear because of coarse active particles, although a partial improvement in surface protection was observed after a running-in period. The study further established that the dominant wear mechanisms shifted from adhesive at the early stage to oxidative, abrasive, and corrosion-mechanical types depending on the applied additive and operating conditions.

Overall, the findings highlight that the efficiency of transmission oils in dynamic operating modes is largely determined by the rheological stability of boundary layers and the ability of additives to form protective adsorption films. Nanodispersed additives, especially MoS₂ and composite formulations like XENUM MG GEAR, proved to be the most promising for extending the service life of friction pairs, ensuring smoother transmission operation, and reducing energy losses. The practical implementation of such additives in the production of automotive and aviation transmission oils opens prospects for developing advanced lubricant formulations with enhanced reliability, wear resistance, and long-term stability under non-stationary conditions.

Keywords: lubricants, nanodispersed additives, friction coefficient, wear, tribological contact.

References

1. Malik M. A. I., Kalam M.A., Mujtaba M.A., Almomani F. A review of recent advances in the synthesis of environmentally friendly, sustainable, and nontoxic bio-lubricants: Recommendations for the future implementations. *Environmental Technology & Innovation*. 2023. Vol. 32. 103366. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103366>
2. X. Lyu, P. Xu, Y. Wang, W. Bao et al. Review: The anti-friction and anti-wear mechanism of lubricate oil additives in the piston ring-cylinder liner system of engines.. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2025. <https://doi.org/10.1108/ILT-12-2024-0496>
3. Uflyand I.E., Zhinzhiro V.A., Burlakova V.E. Metal-containing nanomaterials as lubricant additives: State-of-the-art and future development. *Friction*. 2019. 7 (2). P. 93-116. <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0261-y>
4. Mukhortov I., Zadorozhnaya E., Levanov I., Surovtcev S. On the Difference in the Action of Anti-Wear Additives in Hydrocarbon Oils and Vegetable Triglycerides. *Lubricants*. 2023. 11(12). P. 499. <https://doi.org/10.3390/lubricants11120499>

-
5. Oleksandrenko V.P., Yefymenko V.V., Kalmykova N.G. Resistant properties of lubricating materials with fullerene nanoadditives. *Problems of Tribology*. 2023. V. 28, 2/108. P. 28-36 <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-108-2-28-36>
 6. Jedliński Ł. Analysis of the influence of gear tooth friction on dynamic force in a spur gear. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1736. 012011.
 7. Vazirisereshk MR, Martini A, Strubbe DA, Baykara MZ. Solid lubrication with MoS₂: A review. *Lubricants* 2019;7:57. <https://doi.org/10.3390/LUBRICANTS7070057>
 8. T. M.A. Al-Quraan, Ilina O., Kulyk M., Mnatsakanov R., Mikosianchyk O., Melnyk V. Dynamic processes of self-organization in non-stationary conditions of friction. *Advances in Tribology*. 2023. Vol. 2023. Article ID 6676706. P. 13. <https://doi.org/10.1155/2023/6676706>

Igor Malyarchuk – graduate student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, «State university «Kyiv aviation institute», 1 LubomyraHuzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: 4619672@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0008-7953-6209>

Oksana Mikosianchyk - 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>