

УДК 621.831.004.55

DOI: 10.18372/0370-2197.2(111).21359

В. Б. МЕЛЬНИК<sup>1</sup>, Д.В.ЛЕУСЕНКО<sup>2</sup>, Д.Р.ГРИБ<sup>1</sup>, Н.О.КОБЗАР<sup>1</sup><sup>1</sup>Національний університет «Київський авіаційний інститут», Україна<sup>2</sup>Національний транспортний університет, Україна

## УПРАВЛІННЯ ІНТЕНСИВНІСТЮ УТВОРЕННЯ ТРИБОПЛІВОК В ПРОЦЕСІ ПРИПРАЦЮВАННЯ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ

Досліджено вплив присадок бензолу та *n*-октадекану на процес припрацювання в середовищі мінеральної оливи МК-8, що інтенсивно утворює самогенеруючі органічні плівки (СОП) уже при кімнатній температурі. Встановлено, що введення бензолу значно знижує час формування оптимальної мікрогеометрії поверхонь тертя, а його пасивність щодо оливи зумовлює меншу залежність дії присадки від відсоткового вмісту та стабілізує процес припрацювання. Нагрівання оливи до температури кипіння бензолу — 353<sup>0</sup>К забезпечує формування цільних шарів СОП, кінцева товщина яких перевищує товщину плівок, утворених в оливі без присадки. Введення після цього 5% *n*-октадекану інтенсифікує утворення СОП: її товщина тимчасово збільшується на 30%, після чого поступово зменшується до початкового значення. Повторне введення *n*-октадекану знову інтенсифікує утворення СОП, що свідчить про зношування СОП під час тертя та обмежену здатність оливи до її утворення через вичерпання активних компонентів. Присадки бензолу та парафінових вуглеводнів забезпечують можливість оптимізації процесу припрацювання, оскільки сприяють інтенсивному вирівнюванню мікронерівностей поверхонь, а після нагрівання до 353<sup>0</sup>К — утворенню СОП, що підвищує зносостійкість і контактну витривалість поверхонь тертя.

**Ключові слова:** ефективність масляної дії оливи, товщина мастильного шару, самогенеруючі органічні плівки (СОП), індивідуальні вуглеводні парафінового, нафтенowego та ароматичного класів, молекулярна вага, діапазон температур, адсорбційні мастильні шари, припрацювання, трибоплівки, присадка, знос.

**Постановка проблеми.** Одним із шляхів підвищення надійності та довговічності машин є оптимальне припрацювання деталей. У процесі припрацювання забезпечуються оптимальні мікрогеометрія, склад, структура та фізико-механічні властивості поверхневих шарів. В основі припрацювання лежать складні механо-фізико-хімічні процеси. Ці процеси докорінно змінюють властивості поверхневих шарів деталей, що перебувають у контакті тертя, і призводять до формування мастильного шару з високими антизношувальними властивостями.

Якісна обробка поверхонь тертя підвищує граничну несучу здатність оливної плівки мастильного шару, забезпечуючи надійність і довговічність роботи машин [1, 2].

**Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем.** Дослідженню процесів припрацювання присвячені роботи багатьох авторів [1–11]. У них вивчалися рельєф, структура, хімічний склад, механічні властивості металів, а також вторинні структури, що виникають у процесі тертя. Сформовано певні уявлення про процеси, які відбуваються в період припрацювання і призводять до формування специфічного поверхневого шару металу [2, 4–6]. Попри це, стан і роль мастильного шару при припрацюванні вивчені недостатньо.

Поведінка мастильного шару під час припрацювання досліджувалась у роботах [2, 4–6]. У цих роботах використано метод дослідження процесу припрацювання шляхом вимірювання товщини мастильного шару.

Результати проведених досліджень дали змогу скоротити час припрацювання та підвищити його якість шляхом оптимізації режиму за умови контролю якості.

Оптимальним з погляду якнайшвидшого згладжування та узгодження контактних поверхонь є режим припрацювання, за якого підтримується товщина мастильного шару, здатного запобігати заїданню. Мінімальну товщину мастильного шару підтримують безперервно від початку припрацювання до досягнення номінального навантаження шляхом її безперервного регулювання. Відповідне цій товщині мастильного шару значення падіння електричної напруги на ньому для кожної конструкції визначається експериментально на дослідних парах.

Дослідженнями [8–13] встановлено, що ефективність дії мастильних матеріалів, призначених для роботи в умовах граничного та гідродинамічного мащення, визначається не тільки їхніми реологічними властивостями, а й схильністю до утворення в контакті тіл тертя СОП, з одного боку, та здатністю забезпечувати оптимальну мікрогеометрію поверхонь тертя — з другого.

Однак як утворення СОП, так і формування оптимальної мікрогеометрії поверхонь тертя відбуваються на початковій стадії експлуатації, тобто на стадії припрацювання. Тому утворення СОП є небажаним у період зношування на початковій стадії, оскільки це збільшує тривалість припрацювання і погіршує якість поверхонь, що припрацьовуються. Для запобігання утворенню СОП у період зношування на початковій стадії припрацювання та прискорення процесу застосовують присадки поверхнево-активних речовин (ПАР) [11].

Введення ПАР в оливи пригнічує процес утворення СОП, що призводить до прискореного припрацювання контактних поверхонь. Подальше, після отримання контактної плями, нагрівання оливи до температури десорбції або розкладання ПАР [11] інтенсифікує утворення СОП. Прискорення припрацювання контактних поверхонь передбачає швидкий перехід у діапазон навантажень, що відповідають мінімальним значенням темпу зношування контактних поверхонь.

Варто зауважити, що прискорене припрацювання нерідко призводить до погіршення якості контактних поверхонь, а зрештою — до зниження контактної витривалості. Крім того, нагрівання оливи до температури десорбції або розкладання ПАР не завжди є допустимим для неметалевих елементів конструкції випробуваних вузлів машин. У зв'язку з цим доцільно використовувати в техніці можливості інтенсифікації приробітного зношування, не вдаючись до присадок ПАР.

**Мета дослідження.** Факт значного підвищення контактної витривалості поверхонь тертя за наявності на них СОП встановлено в роботах [8–13].

Дедалі більшого поширення набувають методи припрацювання, що забезпечують тривалу контактну витривалість поверхонь, які працюють в умовах рідинного тертя, шляхом утворення на їхніх поверхнях СОП. Однак СОП, що утворюється ще до отримання контактної плями, значно уповільнює процес припрацювання.

Явища блокування утворення СОП і полірувальної дії деяких ароматичних вуглеводнів [9] дають змогу використовувати їх для оптимізації процесу припрацювання в період згладжування та узгодження поверхонь тертя, а

інтенсифікацію утворення СОП парафіновими вуглеводнями — у період формування мастильного шару.

З цією метою досліджено вплив присадок бензолу та н-октадекану на процес припрацювання в середовищі мінеральної оливи МК-8, що інтенсивно утворює СОП уже при кімнатній температурі.

**Матеріали та методика дослідження.** Випробування проводили на роликкових зразках, виготовлених із нормалізованої сталі 45 твердістю НВ 220, з вихідною шорсткістю робочих поверхонь Rz 4...3,2 мкм. Сумарна швидкість кочення зразків становила 1,41 м/с, відносно проковзування — 20 %, а контактна напруга, що відповідає номінальному навантаженню, — 500 МПа.

Присадку бензолу в оливу МК-8 вводили безпосередньо перед випробуванням. За основні параметри, що характеризують процес припрацювання, було прийнято товщину мастильного шару, момент тертя та кінцеву величину шорсткості. Товщину мастильного шару визначали за величиною падіння електричної напруги в режимі нормального тліючого розряду. Шорсткість контактних поверхонь на початку та в кінці припрацювання визначали профілографуванням на профілографі-профілометрі. Проміжну шорсткість визначали профілографуванням зліпків, знятих з мікрорельєфу контактних поверхонь зразків.

**Результати досліджень та їх аналіз.** На рис. 1 та 2 наведено графіки зміни товщини мастильного шару, моменту тертя та шорсткості поверхонь у процесі припрацювання.

При припрацюванні в оливі МК-8 без присадки бензолу (криві 1 і 1') СОП утворювалася з першої хвилини випробування і щільно покривала поверхні, що контактують. Постійність товщини мастильного шару (СОП) встановлювалася через 40 хвилин. Шорсткість поверхонь Rz становила 1,8 мкм за наявності на них СОП.

Після видалення СОП слабким розчином сірчаної кислоти шорсткість поверхонь Rz становила 2,5 мкм. Збільшення шорсткості поверхонь після видалення СОП пояснюється тим, що матеріал плівки до видалення заповнював западини поверхонь контакту та нівелював поверхні.

Після введення в оливу присадки бензолу утворення СОП припинялося. Припинення утворення СОП контролювали шляхом вимірювання падіння напруги та візуального спостереження. У наших експериментах припинення утворення СОП починалося при введенні в оливу МК-8 не менше ніж 5 % бензолу. При меншому вмісті присадки утворення СОП повністю не припинялося, а лише сповільнювалося. При цьому СОП з'являлася в зоні тертя у вигляді окремих смужок на поверхнях тертя, орієнтованих у напрямку тертя.

Припрацювання в оливі МК-8 з присадкою бензолу закінчувалося формуванням мастильного шару (крива 2) значно меншої товщини, ніж в оливі МК-8 без присадки. При цьому стала товщина цього шару встановлювалася через 25 хвилин. Контактні поверхні набували дзеркального блиску. Шорсткість поверхонь Rz становила 0,87 мкм.

При збільшенні вмісту присадки бензолу до 10 % погіршення шорсткості поверхонь не спостерігалось, тоді як незначне збільшення присадки ПАР від 1 % до 2 %, як показано в роботі [11], призводило до різкого зростання шорсткості.

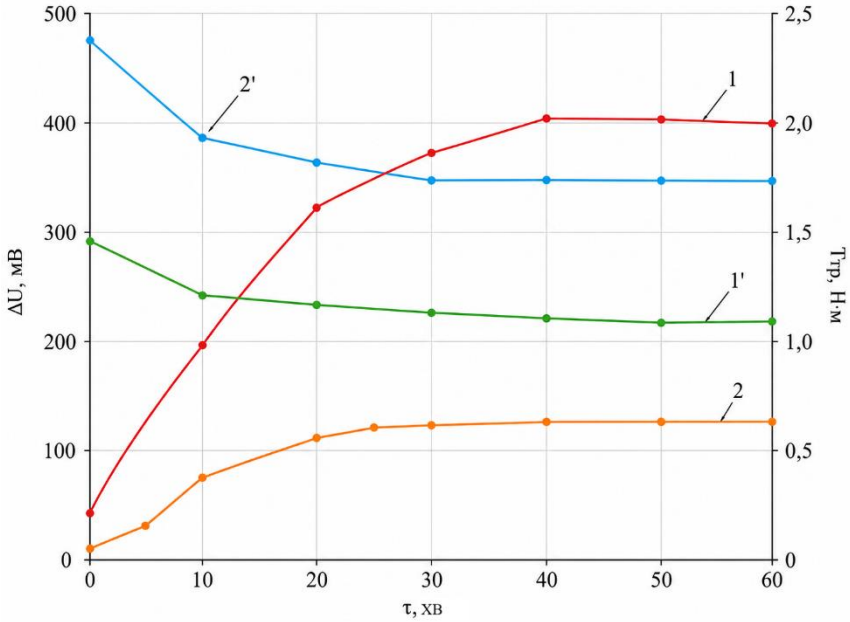


Рис. 1. Зміна товщини мастильного шару та моменту тертя в процесі припрацювання. Товщина мастильного шару: 1 — олива МК-8; 2 — олива МК-8 + 10 % бензолу. Момент тертя: 1' — олива МК-8; 2' — олива МК-8 + 10 % бензолу.

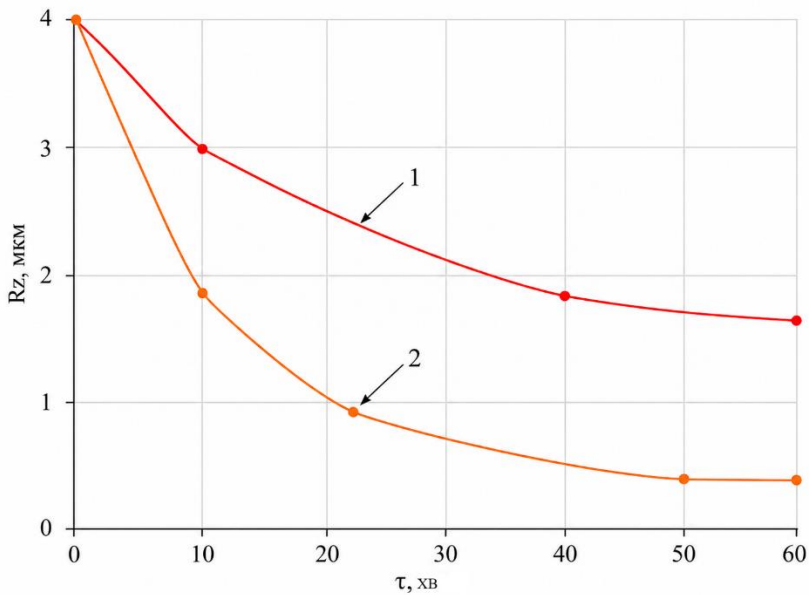


Рис. 2. Зміна шорсткості в процесі припрацювання роликів: 1 — в оливі МК-8; 2 — в оливі МК-8 + 10 % бензолу.

**Висновки.** Введення в оливу присадки бензолу значно знижує час формування оптимальної мікрогеометрії поверхонь тертя. Оскільки бензол є пасивним щодо оливи, його вплив на поверхні, що припрацьовуються, меншою

мірою залежить від відсоткового вмісту в оливі та сприяє стабілізації процесу припрацювання, що підвищує його якість.

Утворення СОП на поверхнях тертя забезпечується нагріванням оливи до температури кипіння бензолу — 353 К. У результаті нагрівання бензол повністю випаровується, після чого на поверхнях тертя утворюються щільні шари СОП темно-коричневого кольору. Кінцева товщина СОП, утвореної після припрацювання в оливі МК-8 з присадкою бензолу, перевищує кінцеву товщину СОП, утвореної в оливі без присадки бензолу. Це пояснюється більшою активацією поверхневих шарів у процесі припрацювання за відсутності СОП.

Виключається необхідність нагрівання оливи до температури понад 373 К, як це потрібно у разі використання присадки ПАР [11]. Введення в оливу після випаровування бензолу 5 % н-октадекану інтенсифікує утворення СОП. Через 5 хвилин товщина СОП збільшується на 30 %. Її товщина залишається сталою протягом 1 години, а потім зменшується до початкового значення. Повторне введення 5 % н-октадекану знову інтенсифікує утворення СОП. Це свідчить про те, що, по-перше, СОП під час тертя зношується, а по-друге, здатність оливи утворювати СОП є обмеженою, очевидно, через вичерпання її активних компонентів, що беруть участь в утворенні СОП.

Присадки бензолу та парафінових вуглеводнів є ефективними засобами оптимізації процесу припрацювання, оскільки, з одного боку, виключається утворення СОП, що забезпечує інтенсивне вирівнювання мікронерівностей поверхонь, а з другого — після нагрівання до 353 К забезпечується інтенсивне утворення СОП, що підвищує зносостійкість і контактну витривалість поверхонь тертя.

### Список літератури

1. Мехдізаде, М., Акбарзаде, С., Шамс, К., та Хонсарі, М. М. Експериментальне дослідження впливу робочих умов на поведінку змащених еліптичних контактів під час припрацювання. *Tribology Letters*, 2015, 59, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0538-x> [Англійська]
2. Тарек М. А. Аль-Кураан, Фаді Альфакс, Ібрагім Ф. С. Альрефо, Віктор Войтов, Антон Войтов, Андрій Кравцов, Олександр Мірошник, Андрій Кондратьєв, Павло Кучера, Вацлав Піштек. Методологічний підхід до моделювання меж робастності трибосистем за умов граничного змащування. *Мастильні матеріали*, 2023, 11, 17. <https://doi.org/10.3390/lubricants11010017> [Англійська]
3. Гарбар І. Мікроструктурні зміни поверхневих шарів металу під час процесів тертя при припрацюванні. *Mechanica*, 2001, 36, 631-639. <https://doi.org/10.1023/A:1016392618802> [Англійська]
4. Войтов А. Математична модель припрацювання трибосистем за умов граничного змащування. Частина 1. Розробка математичної моделі. *Проблеми трибології*, 2023, т. 28, №1/107, с. 25-33. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-107-1-25-33> [Англійська]
5. Войтов А. Математична модель припрацювання трибосистем за умов граничного змащування. Частина 2. Результати моделювання. *Проблеми трибології*, 2023, т. 28, №2/108, с. 44-55. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-108-2-44-43> [Англійська]
6. Аулін В.В., Лисенко С.В., Гриньків А.В., Слонь В.В., Створення теоретичних основ триботехнологій обкатки та відновлення як засобу ефективного підвищення експлуатаційної зносостійкості автотранспорту та мобільної сільськогосподарської техніки. *Проблеми трибології*, Т. 26, № 1/99-2021, 51-58 <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-99-1-51-5>

7. Войтов В.А., Войтов А.В. Обґрунтування раціональної програми обкатки трибосистем. Проблеми трибології, т. 28, № 1/109-2023, 6-17. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-109-3-6-17>

8. Мельник В., Леусенко Д., Радько О. Аналіз хімічного складу поверхневих трибоплівків, утворених в локальному контакті зубчастих передач після припрацювання в масляному середовищі з карбонофторидними присадками. // Проблеми тертя та зношування, 2025, №1 (106) с. 105-111. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(106\).19819](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(106).19819)

9. Мельник В., Леусенко Д., Савчук А., Гриб Д., Кобзар Н. Масляна дія індивідуальних вуглеводнів та їх вплив на утворення трибоплівків при терті поверхонь з локальним контактом // Проблеми тертя та зношування, 2025, №4 (109) с. 105-111. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(109\).20752](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(109).20752)

10. Мельник В., Леусенко Ю. Вплив карбонофторидних присадок на показники якості змащувальної дії мастильних матеріалів в процесі припрацювання зубчастих передач. // Проблеми тертя та зношування, 2013, №1 (60) с.74-78. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(60\)](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(60))

11. Кіндрачук М., Мельник В., Леусенко Д. Вплив присадок карбонових кислот на змащувальний шар в локальному контакті зубчастих передач. Проблеми тертя та зношування, 2022, № 1 (94) с.83-89. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(109\).16474](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(109).16474)

12. Кадомський В.П. Дослідження змащувальних шарів і твердо-пластичних плівок, що утворюються в контакті деталей при коченні з ковзанням. - Дисертація на пошук учен. ступеня к.т.н., Київ, КПЦА, 1971, 140 с.

13. Райко М.В. Дослідження мастильної дії нафтових олів за умов роботи зубчастих передач. Дисертація на здобуття вченого. ступеня д.т.н., Київ, КПЦА, 1974, 369 с.

Отримано: 22 травня 2026

Прийнято: 25 травня 2026

Опубліковано: 31 травня 2026

**Мельник Володимир Борисович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ Україна, [nau12@ukr.net](mailto:nau12@ukr.net). <https://orcid.org/0000-0003-4379-654X>

**Леусенко Дар'я Володимирівна** — доктор філософії, доцент кафедри «Виробництво, ремонт та матеріалознавство», Національний транспортний університет, вулиця Омеляновича-Павленка 1, Київ, Україна, 01010. <https://orcid.org/0000-0001-8024-6104>

**Гриб Дмитро Русланович** — аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ Україна, [nau12@ukr.net](mailto:nau12@ukr.net)

**Назарій Олегович Кобзар** – здобувач вищої освіти освітнього ступеня магістр за освітньо-професійною програмою G9 «Прикладна механіка, стандартизація та оцінка якості технічних систем» Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ Україна, [nau12@ukr.net](mailto:nau12@ukr.net)

V. MELNYK, D. LEUSENKO, D. HRYB, N. KOBZAR

## CONTROL OF TRIBOFILM FORMATION INTENSITY DURING THE RUNNING-IN OF GEAR TRANSMISSIONS

The effect of benzene and n-octadecane additives on the running-in process in MK-8 mineral oil, which intensively forms self-generating organic films (SGOFs) even at room temperature, was investigated. It was established that the addition of benzene significantly reduces the time required to form the optimal microgeometry of friction surfaces, while its inertness with respect to the oil makes the additive effect less dependent on its percentage content and stabilizes the running-in process. Heating the oil to the boiling point of benzene, 353 K, ensures the formation of dense SGOF layers, whose final thickness exceeds that of the films formed in the oil without the additive. Subsequent addition of 5% n-octadecane intensifies SGOF formation: the film thickness temporarily increases by 30% and then gradually decreases to its initial value. Repeated addition of n-octadecane again intensifies SGOF formation, indicating that the films wear during friction and that the oil has a limited capacity to form them because of the depletion of active components. Benzene and paraffinic hydrocarbon additives make it possible to optimize the running-in process, since they promote intensive smoothing of surface micro-roughnesses and, after heating to 353 K, ensure SGOF formation, thereby increasing the wear resistance and contact fatigue strength of friction surfaces.

**Key words:** lubricating oil effectiveness, lubricating film thickness, self-generating organic films (SOP), individual hydrocarbons of the paraffinic, naphthenic, and aromatic classes, molecular weight, temperature range, adsorbed lubricating films, running-in, tribofilms, additive, wear.

### References

1. Mehdizadeh, M., Akbarzadeh, S., Shams, K., & Khonsari, M. M. Experimental investigation on the effect of operating conditions on the running-in behavior of lubricated elliptical contacts. *Tribology Letters*, 2015, 59, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0538-x>[English]
2. Tareq M. A. Al-Quraan, Fadi Alfaqs, Ibrahim F. S. Alrefo, Viktor Vojtov, Anton Voitov, Andrey Kravtsov, Oleksandr Miroschnyk, Andrii Kondratiev, Pavel Kučera, Václav Pištěk. Methodological Approach in the Simulation of the Robustness Boundaries of Tribosystems under the Conditions of Boundary Lubrication. *Lubricants*, 2023, 11, 17. <https://doi.org/10.3390/lubricants11010017>[English]
3. Garbar I. Microstructural changes in surface layers of metal during running-in friction processes. *Meccanica*, 2001, 36, 631-639. <https://doi.org/10.1023/A:1016392618802>[English]
4. Voitov A. Mathematical model of running-in of tribosystems under conditions of boundary lubrication. Part 1. Development of a mathematical model. *Problems of Tribology*, 2023, V. 28, No1/107, P. 25-33. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-107-1-25-33>[English]
5. Voitov A. Mathematical model of running-in of tribosystems under conditions of boundary lubrication. Part 2. Simulation results. *Problems of Tribology*, 2023, V. 28, No2/108, P. 44-55. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-108-2-44-43>[English]
6. Aulin V.V., Lysenko S.V., Hrinkiv A.V., Slon V.V, Creation of theoretical bases of tribotechnologies of running-in and restoration as means of effective increase of operational wear resistance of motor transport and mobile agricultural machinery *Problems of Tribology*, V. 26, No 1/99-2021, 51-58 <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-99-1-51-58>
7. Voitov V.A., Voitov A.V. Substantiation of a rational program for the running-in of tribosystems. *Problems of Tribology*, V. 28, No 1/109-2023, 6-17 <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-109-3-6-17>
8. Melnyk V., Leusenko D., Radko O. Analysis of the chemical composition of surface tribofilms formed in local contact of gear transmissions after running in an oil environment with

carbonfluoride additives // Problems of friction and wear, 2025, №1 (106) p.105-111. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(106\).19819](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(106).19819)

9. Melnyk V., Leusenko D., Savchuk A., Hryb D., Kobzar N. Oiliness of individual hydrocarbons and its influence on the formation of surface tribofilms under friction in locally contacting surfaces // Problems of friction and wear, 2025, №4 (109) p.105-111. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(109\).20752](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(109).20752)

10. Melnyk V., Leusenko U. The influence of carbonofluoro additives on the quality indicators of the lubricating action of lubricants during the running-in of gears // Problems of friction and wear, 2013, №1 (60) p.74 - 78. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(60\)](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(60)).

11. Kindrachuk M, Melnyk V, Leusenko D. Effect of carbonic acid additives on lubricant layer in the local contact of gear transmissions. Problems of friction and wear, 2022, № 1 (94) p.83- 89. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(109\).16474](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(109).16474)

12. Kadomsky V.P. Research of lubricating layers and hard-plastic films formed in contact of parts during rolling with sliding. - Dissertation for the degree of Ph.D., Kyiv, Kyiv Institute of Civil Aviation Engineers, 1971, 140 p.

13. Raiko M.V. Research of lubricating action of petroleum oils under operating conditions of gear gears. Dissertation for the degree of Ph.D., Kyiv, Kyiv Institute of Civil Aviation Engineers, 1974, 369 p.

**Volodymyr Melnyk** — Candidate of Technical Sciences (Engineering), Associate Professor; Associate Professor, Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National University “Kyiv Aviation Institute”, 1 Liubomyra Huzara Ave., Kyiv, Ukraine. E-mail: [nau12@ukr.net](mailto:nau12@ukr.net). <https://orcid.org/0000-0003-4379-654X>

**Daria Leusenko** — PhD, Associate Professor, Department of Production, Repair and Materials Science, National Transport University, 1 Omelianovycha-Pavlenka St., Kyiv, 01010, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0001-8024-6104>

**Dmytro Hryb** — PhD Student, Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National University “Kyiv Aviation Institute”, 1 Liubomyra Huzara Ave., Kyiv, Ukraine, E-mail: [nau12@ukr.net](mailto:nau12@ukr.net)

**Nazariy Kobzar** – Master's Degree Candidate in the Educational and Professional Program G9 "Applied Mechanics, Standardization and Quality Assessment of Technical Systems" State University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lyubomyr Huzar Ave., Kyiv Ukraine, [nau12@ukr.net](mailto:nau12@ukr.net)