

УДК 621.831.004.55

DOI: 10.18372/0370-2197.1(94).16474

*М. В. КИДРАЧУК, В. Б. МЕЛЬНИК, Д. В. ЛЕУСЕНКО**Національний авіаційний університет, Україна***ВПЛИВ ПРИСАДОК КАРБОНОВИХ КИСЛОТ НА ЗМАЩУВАЛЬНИЙ ШАР В ЛОКАЛЬНОМУ КОНТАКТІ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ**

*Проведено дослідження мастильних шарів, утворених мастилами з поверхнево-активними присадками карбонових кислот у локальному контакті зубчастих передач. Надмірне зниження товщини мастильного шару в присутності ПАР може призвести до безпосереднього контакту виступів нерівностей. Захист від схоплювання в цьому випадку забезпечують адсорбційні та окисні плівки. Зокрема, присадка мурашиної кислоти, вочевидь, утворює недостатньо ефективні адсорбційні плівки. Разом з тим, мурашина кислота є гарним відновником і знаходить у цій якості широке застосування в техніці. Зменшення товщини плівки оксидів при невеликій товщині в'язкого та адсорбційних шарів є причиною розвитку схоплювання.*

**Ключові слова:** *змащувальна дія, мастильні матеріали, поверхнево-активні присадки карбонових кислот, адсорбційні та окисні плівки. Товщина гідродинамічного шару.*

**Вступ.** Гідродинамічний шар в контакті займає проміжне положення між граничними шарами, прилеглими до сполучених поверхонь тертя. Товщина і роль такого шару істотно змінюється в залежності від умов навантаження і матеріалів, але цей шар завжди практично має місце в умовах тертя з мастилом. У зв'язку з цим, у рамках проведених досліджень, постає завдання вивчення впливу карбонових кислот на цей шар.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є оцінка впливу мастильних матеріалів з поверхнево-активними присадками карбонових кислот на гідродинамічний шар у локальному контакті зубчастих передач.

**Методика досліджень.** Випробування проводилися на контактньо-роликовій машині тертя за схемою ролик-ролик. Як зразки служили пари роликів діаметром 80 і 85 мм. Матеріал зразків – сталь 45, твердість НВ-200. Тиск у контакті становив 400 і 1000 МПа. Як мастильні матеріали застосовувалося авіаційне масло МС-20, без присадок і з присадками /0,5%/однієї з основних карбонових кислот. Перед випробуваннями зразки попередньо припрацьовували, ретельно промивали в бензині Б-70 і висушували.

**Результати дослідження та їх обговорення.** На рис. 1-4 наведено результати досліджень мастильної дії олії МС-20 з присадками у початковий період – період стабілізації параметрів мастильної дії.

Введення присадок в масло у всіх випробуваннях призводило до зниження товщини мастильного шару (рис. 1) на величину, яка залежить від виду присадки та умов навантаження.

Найбільший вплив мають присадки мурашинової кислоти, які здатні зменшити товщину мастильного шару на 90% і більше – аж до появи та розвитку схоплювання контактних поверхонь.

Зі збільшенням тиску посилюється дія присадок пропорційно їх молекулярній вазі, тобто зі збільшенням тиску з 400 до 1000 МПа товщина шару

зменшувалася приблизно на 0, 0, 7 і 20% відповідно у присутності мурашинової, оцтової та олеїнової кислот.

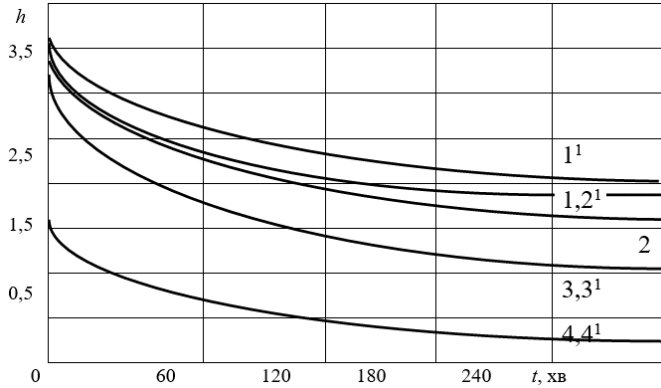


Рис. 1. Зміна товщини гідродинамічного шару у післяпусковий період:  $1-4$  – при тиску в контакті 1000 МПа;  $1^1-4^1$  – при тиску в контакті 400 МПа;  $1,1^1$  – МС-20;  $2,2^1$  – МС-20 з олеїною кислотою;  $3,3^1$  – МС-20 з оцтовою кислотою;  $4,4^1$  – МС-20 з мурашиною кислотою

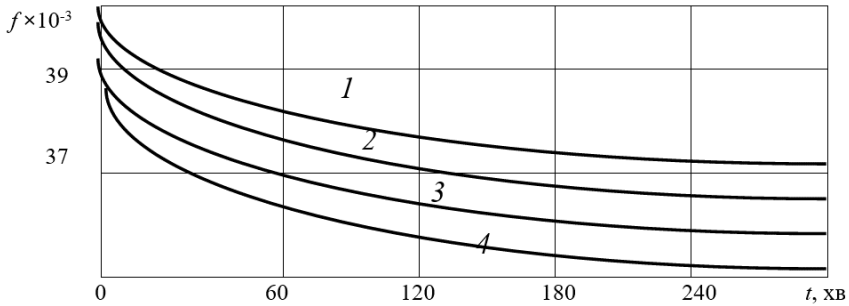


Рис. 2. Зміна коефіцієнта тертя.  $1,1^1$  – МС-20;  $2,2^1$  – МС-20 з олеїною кислотою;  $3,3^1$  – МС-20 з оцтовою кислотою;  $4,4^1$  – МС-20 з мурашиною кислотою

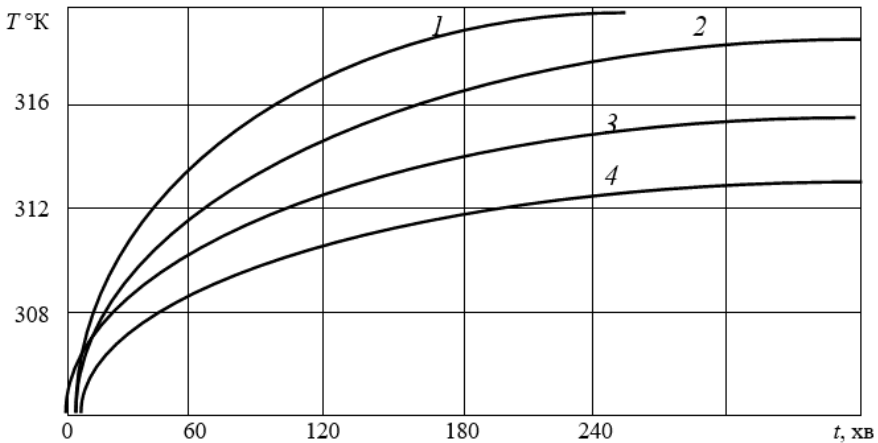


Рис. 3. Зміна температури мастила на вході в контакт:  $1$  – МС-20;  $2$  – МС-20 з олеїною кислотою;  $3$  – МС-20 з оцтовою кислотою;  $4$  – МС-20 з мурашиною кислотою

Зміна коефіцієнта тертя (рис. 2) відбувається відповідно до кривої Герсі-Штрибека – зменшуються втрати на тертя із зменшенням товщини шару, а у разі

надмірного його зниження втрати на тертя збільшуються. Останнє підтверджується появою слідів схоплювання на поверхнях, що труться.

Швидкість зміни та кінцеві значення температури олії якісно узгоджуються з експериментальними даними втрат на тертя рис. 2. та рис. 3.

На рис. 4. наведено графік зміни відношення розрахункових значень кінематичної в'язкості олії МС-20 та МС-20 з присадкою мурашиної кислоти на вході в контакт з урахуванням зміни температури на вході в контакт (крива 1).

$\lg v_1 / \lg v_2$

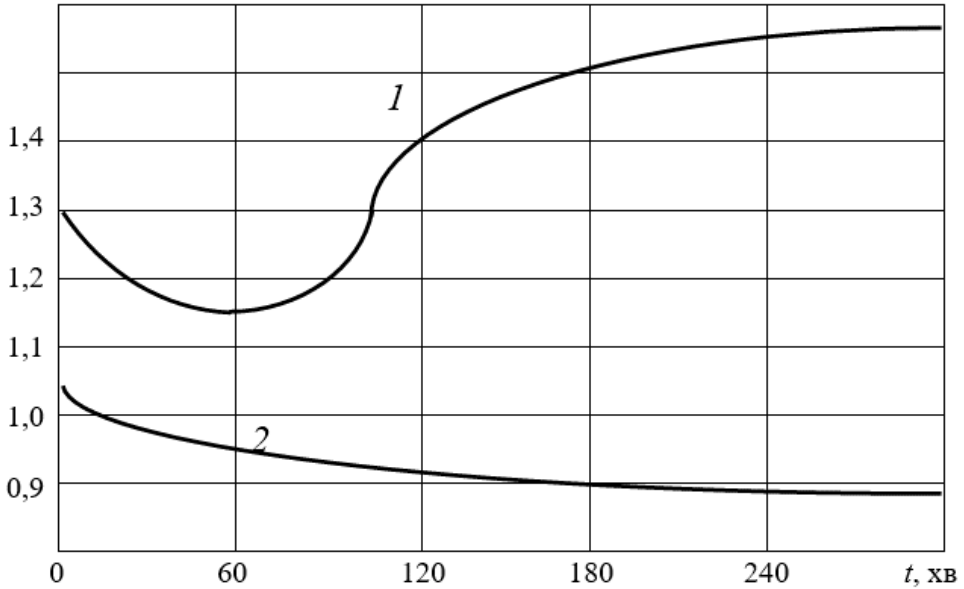


Рис. 4. Зміна величини відношення середньої кінематичної в'язкості мастила МС-20 до аналогічної величини мастила МС-20 з присадкою мурашиної кислоти та контакті 1 та величини відношення в'язкості цих мастильних матеріалів на вході в контакт 2 в період стабілізації параметрів мастильного шару.

На рис. 4. наведено також криві для середньої кінематичної в'язкості в контакті, яка визначалася відповідно до формули Ньютона [1]

$$v = \mu h / V_{ск} \quad (1)$$

де  $\mu$  – напруга зсуву у шарі олії в контакті;  $v$  – кінематична в'язкість;  $h$  – товщина мастильного шару у контакті;  $V_{ск}$  – швидкість

З аналізу отриманих відносин випливає, що в'язкість базової олії на вході в контакт нижче в'язкості олії з присадками, що пояснюється тепловими явищами.

$$\lg v_1 / \lg v_2 \leq 1 \quad (2)$$

Однак одні теплові явища не в змозі пояснити той факт, що за меншої температури масла з присадкою мурашиної кислоти, в'язкість в контакті нижче, ніж у масла без присадок.

Для аналізу співвідношень теоретичних та експериментальних параметрів мастильної дії відповідно до даних температури проведено розрахунок товщини контактної-гідродинамічного мастильного шару за формулою Петрусевича А.І.,

$$h = C v_0^\beta V_{сум} P^{-\beta} a^\epsilon \rho^\tau E^m \quad (3)$$

де  $C$  – коефіцієнт,  $\nu$  – кінематична в'язкість;  $V_{\text{сум}}$  – сумарна швидкість кочення;  $P$  – погонне навантаження;  $a$  – п'єзоефект в'язкості;  $\rho$  – наведений радіус кривизни;  $E$  – модуль пружності, а також коефіцієнт тертя відповідно до формули запропонованої Дроздовим Ю.М. [5,6,7].

$$f = \frac{A_{\text{п}}^{0,1} \left[ 10 + \lg \left( \frac{HB \cdot R_a}{E_{\text{пр}} E_{\text{пр}}} \right) \right]}{V_{\text{к}}^{0,07} \cdot \vartheta_{\text{ск}}^{0,35} \cdot \vartheta_e^{0,1} \cdot R_{\text{пр}}^{0,25}} \quad (4)$$

де  $A = 0,09$ . Формула використовується при виконанні наступних умов:

в'язкість –  $\nu > 1$  ст, навантаження  $R_{\text{п}} \geq 300$  Кгс/см, тиск у контакт  $\rho \geq 4000$  Кгс/см<sup>2</sup>, швидкість кочення  $V_{\text{кач}} \geq 100$  см/с; швидкість ковзання  $V_{\text{ск}} > 20$  см/с, наведений радіус кривизни  $R_{\text{пр}} > 0,5$  см, шорсткість  $R_a > 10-5$  см. Твердість  $HB > 5000$  кг/см<sup>2</sup>.

Функціональна схема (рис. 5) відображає причини та хід зміни товщини мастильного шару та коефіцієнта тертя відповідно до КГТС. При заданих умовах мастила  $N$ ,  $V$ ,  $T$  і матеріалах  $C$  збільшення температури  $T$  супроводжується зменшенням в'язкості; (динамічної та кінематичної) та п'єзоефіцієнта в'язкості  $\alpha$ , що відповідно до виразів (4) та (5), викликає збільшення коефіцієнта тертя та зменшення товщини гідродинамічного шару. Такі зміни призводять до збільшення деформації контактних поверхонь та прискорюють їх зношування. Стабілізація параметрів у цих умовах можлива через збільшення тепловідведення поперек мастильного шару.

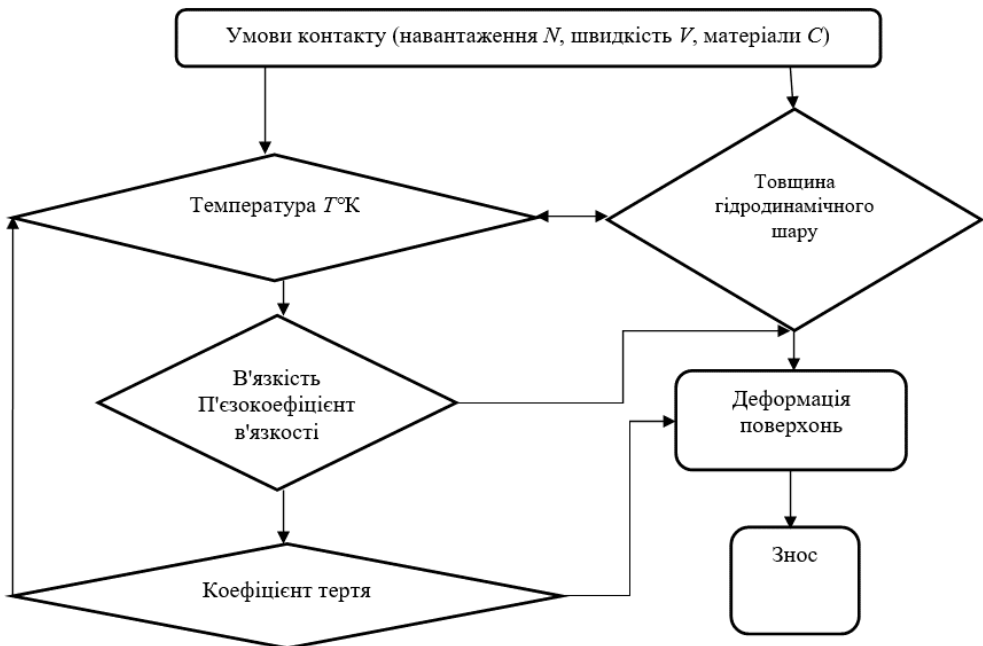


Рис. 5 Функціональна схема механізму стабілізації товщини гідродинамічного шару та коефіцієнта тертя відповідно до контактно-гідродинамічної теорії змащування за заданих умов навантаження.

Зміни експериментальних і розрахункових кривих мастильних шарів якісно збігаються, тобто. мають спадаючий характер (рис. 2. та рис. 6).

З величини відношення експериментальних товщин до розрахункових випливає, що найкраща збіжність відповідає випробуванням з маслом без присадок при

встановлених параметрах / відношення у відсотках становить 77% /. Найгірша збіжність спостерігалася при додаванні мурашиної кислоти (близько 11%).

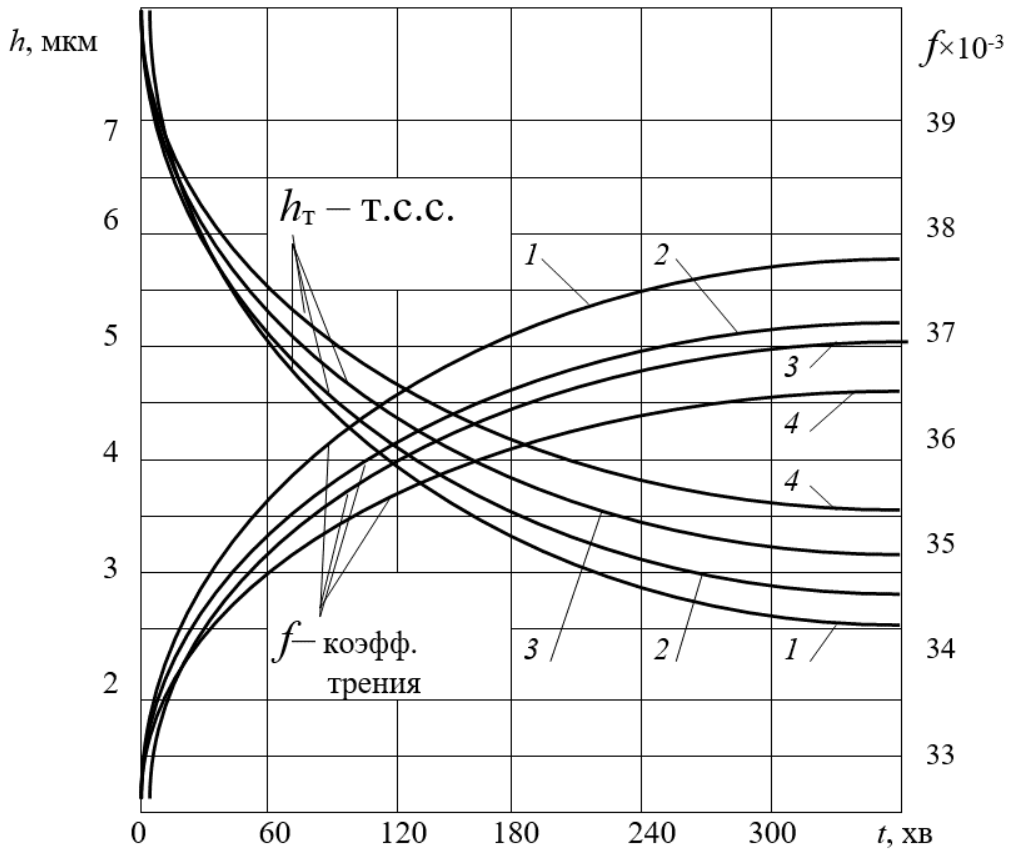


Рис. 6 Зміна коефіцієнта тертя  $f$  і товщини мастильного шару  $h$  у відповідність до формулами контактної гідродинаміки в післяпусковий період при тиску в контакті 1000 МПа; 1 – МС-20; 2 – МС-20 з олеїною кислотою; 3 – МС-20 з оцтовою кислотою; 4 – МС-20 з мурашиною кислотою

Зростаючий характер втрат тертя протилежний аналогічним експериментальним характеристикам, де спостерігалася зниження втрат тертя з початку випробувань. У міру зростання температури збільшення розрахункових значень коефіцієнта тертя обумовлено зниженням в'язкості олії, значення якої перебувають у знаменнику виразу (5).

Якісно подібні результати отримані і при випробуваннях вазелінової олії, масел І-40А, І-50А, МК-8, а також присадок шавельної, бурштинової, циклобутанкарбонової, циклопентанкарбонової та циклогексанкарбонової кислот. Виявлене явище зниження товщини мастильного шару з одночасним зниженням втрат на тертя у присутності присадок поверхнево-активних речовин виявлялося так само і при великих швидкостях кочення – до 25 м/с.

Такі явища суперечать поглядам, що встановилися, і не можуть бути пояснені з позицій класичної контактної-гідродинамічної теорії мастила, що враховує лише стисливість контактних поверхонь і зміну в'язкості відповідно до температури в контакті.

Однією з причин значного зниження товщини мастильного шару в присутності поверхнево-активних речовин може бути зміна в'язкості масел в об'ємі відповідно до номограми Семенідо або формули Штаудінгера [8] для мастил. Однак розрахунки показують, що в'язкість сумішей масла і присадок, що застосовувалися, незначно відрізняється від в'язкості базового масла.

В'язкість застосовуваних кислот на два-три порядки нижче в'язкості базової олії МС-20, тому можливість зниження товщини мастильного шару відповідно до цього механізму цілком реальна. Для перевірки такого припущення з поверхні зразків у процесі випробувань в режимі тертя за зоною контакту, що встановився, відбиралися проби масла. Методом інфрачервоного спектрального аналізу визначалося вміст присадок у цих пробах і порівнювалося з вмістом в обсязі. Істотної різниці у в'язкості, здатної вплинути помітно на товщину мастильного шару, не спостерігалось.

На відсутність значного впливу в'язкості присадок на в'язкість мастильних сумішей вказує також той факт, що в'язкість оцтової кислоти на 25% при 200С менше в'язкості мурашиної, а товщина мастильного шару в останньому випадку була значно нижчою на всьому протязі випробувань (рис. 1).

У роботі [8] вказується на можливість ламінізації потоку мастильного шару присадками, що мають ниткоподібну або пластинчасту структуру, внаслідок їх орієнтації вздовж потоку. Однак довжина молекули олеїнової кислоти значно перевищує довжину молекули оцтової або мурашиної кислот, але останні мають великий вплив на мастильний шар і на коефіцієнт тертя. У дослідженнях швидше спостерігалася зворотна залежність між величиною зміни мастильних властивостей і довжиною молекул.

**Висновки.** Проведені дослідження узгоджуються з положеннями КГДТС, в якій вказується, що в умовах контактано-гідродинамічного тертя виявляються не тільки в'язкісні властивості мастила та пружні – твердих тіл, але й вплив процесів адсорбції, що реалізують умови прояву ефекту, званого автором [8], гідродинамічний стан мастильного шару. Така дія підтверджується тим, що зі збільшенням навантаження на контакт збільшується вплив присадок. Відомо, що навантаження має першорядну роль деструкційних процесах [8], у яких утворюються вільні радикали молекул з адсорбційної активністю.

Надмірне зниження товщини мастильного шару у присутності ПАР може призвести до безпосереднього контакту виступів нерівностей. Захист від схоплювання в цьому випадку забезпечують адсорбційні та окисні плівки. Зокрема, присадка мурашиної кислоти, вочевидь, утворює недостатньо ефективні адсорбційні плівки. Разом з тим, мурашина кислота є гарним відновником і знаходить у цій якості широке застосування у техніці. Зменшення товщини плівки оксидів при невеликій товщині в'язкого та адсорбційних шарів є причиною розвитку схоплювання.

#### Список літератури

1. Райко М.В. Исследование смзочного действия нефтяных масел в условиях работы зубчатых передач. Диссертация на соискание учёной степени доктора техн. Наук. Киев; КИИГА, 1974, 369с.
2. Мельник В.Б. Реология смазочного слоя в локальном контакте зубьев зубчатых передач. Проблеми тертя та зношування: зб. наук.праць.- К.:НАУ, 2008.- № 49.- С.185-189

3. Мельник В.Б. Метод оцінки складових змащувального шару в локальному контакті зубчатих передач / В.Б. Мельник, Д.В. Леусенко // Проблеми тертя та зношування: зб. наук.праць.- К.:НАУ, 2012.- № 58.- С.165-168.
4. Мельник В.Б. Вплив карбонофторидних присадок на показники якості змащувальної дії мастильних матеріалів в процесі припрацювання зубчатих передач / В.Б Мельник, Ю.С Леусенко// Проблеми тертя та зношування: зб. наук.праць.- К.:НАУ, 2013 - № 1(60).- С. 74-78
5. Петрусевич А.И. Роль гидродинамической масляной плёнки в стойкости и долговечности поверхностей контакта деталей машин. – Вестник машиностроения, 1963, №1 с.20-26.
6. Дроздов Ю.Н., Решиков В.Ф. О коэффициенте трения и толщине масляной плёнки в тяжело нагруженном контакте.– Вестник машиностроения,1968,№2,с.9-12.
- 7.Дроздов Ю.Н., Смирнов В.И. Исследование коэффициента трения скольжения при высоких температурах контакта.– Вестник машиностроения,1977, №6, с.19-23.
8. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз, 1963, 472с.

Стаття надійшла до редакції 31.03.2022.

**Кіндрачук Мирослав Васильович** – докт. техн. наук, член-кореспондент НАН України, професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національного авіаційного університету, м.Київ Україна, [nau12@ukr.net](mailto:nau12@ukr.net).

**Мельник Володимир Борисович** – канд.. техн. наук, доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національного авіаційного університету, м.Київ Україна, [nau12@ukr.net](mailto:nau12@ukr.net).

**Леусенко Дар`я Володимирівна** – аспірантка кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національного авіаційного університету, м.Київ Україна, [nau12@ukr.net](mailto:nau12@ukr.net).

M.KINDRACHUK, V.MELNYK, D.LEUSENKO

### EFFECT OF CARBONIC ACID ADDITIVES ON LUBRICANT LAYER IN THE LOCAL CONTACT OF GEAR TRANSMISSIONS

A study was made of lubricating layers formed by oils with surface-active additives of carboxylic acids in the local contact of gears. The studies have established high running-in properties of such additives, which are due to both the adsorption plasticizing effect and the reduction in the thickness of the hydrodynamic layer. Excessive reduction in the thickness of the lubricating layer in the presence of surfactants can lead to direct contact of the bumps. In this case, protection against setting is provided by adsorption and oxide films. In particular, the formic acid additive obviously forms insufficiently effective adsorption films. At the same time, formic acid is a good reducing agent and is widely used in engineering as such. A decrease in the thickness of the oxide film with a small thickness of the viscous and adsorption layers is the reason for the development of setting.

**Key words:** lubricating layer thickness, local contact, adsorption, contact-hydrodynamic theory of lubrication, carboxylic acids.

#### References

1. Raiko M.V. Investigation of the lubricating effect of petroleum oils in the conditions of gear operation. Dissertation for the degree of Doctor of Engineering. Sciences. Kyiv; KIIGA, 1974, 369s.
2. Melnik V.B. Rheology of the lubricating layer in the local contact of gear teeth. Problems terya that znoshuvannya: zb. science.practice.- K.: NAU, 2008.- No. 49.- P.185-189.
3. Melnik V.B. A method for assessing a storage ball in the local contact of gears / V.B. Melnik, D.V. Leusenko // Problems of the rubbish that znoshuvannya: zb. science.practice.- K.: NAU, 2012.- No. 58.- P.165-168.
4. Melnik V.B. Injection of carbon fluoride additives on indicators of the strength of the lubricant and lubricant materials in the process of gearing / V.B. Melnik, Yu.S. Leusenko // Problems of wear and tear: zb. nauk.prats.- K.: .NAU, 2013 - No. 1(60).- P. 74-78.
5. Petrusovich A.I. The role of hydrodynamic oil film in the resistance and durability of contact surfaces of machine parts. - Bulletin of mechanical engineering, 1963, No. 1 p.20-26.
6. Drozdov Yu.N., Reshchikov V.F. On the coefficient of friction and the thickness of the oil film in a heavily loaded contact. - Bulletin of Mechanical Engineering, 1968, No. 2, pp. 9-12.
7. Drozdov Yu.N., Smirnov V.I. Study of the coefficient of sliding friction at high contact temperatures. - Bulletin of Mechanical Engineering, 1977, No. 6, pp. 19-23.
8. Akhmatov A.S. Molecular physics of boundary friction. Moscow: Fizmatgiz, 1963, 472p