

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.4(93).16275

М. В. КИНДРАЧУК<sup>1</sup>, В. В. ХАРЧЕНКО<sup>1</sup>, І. А. ГУМЕНЮК<sup>2</sup>, Н. О. НАУМЕНКО<sup>1</sup>,  
М. А. ГЛОВИН<sup>1</sup>, І. В. КОСТЕЦЬКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний авіаційний університет, Україна

<sup>2</sup>ПАТ “Укртелеком”, Київ

## ЗОВНІШНЬОСИЛОВИЙ ВПЛИВ НА ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРИПРАЦЮВАННЯ АНТИФРИКЦІЙНИХ СИСТЕМ

*Навантаження має суттєвий вплив на якість і тривалість припрацювання. Зі збільшенням навантаження в початковий момент зростає частка пластичної деформації тонкого поверхневого шару, що призводить до збільшення кількості тепла, що виділяється, і поглиненої енергії. Високі механічні напруження, зумовлені збільшенням тиску на площадках контакту, зумовлюють дефектність структури поверхонь тертя, що збільшує активність металу. Експериментальні дослідження, проведені різними вченими, показують, що зі збільшенням навантаження до величини, що не перевищує деякого критичного значення, якість припрацювання поверхні поліпшується. В роботі наведено результати дослідження зовнішньосилового впливу на процес формування трибологічних структур етапу припрацювання системи «БрАЖМц10-3-1,5-АМГ-10-30ХГСА». Показано, що ступінчасте збільшення навантаження та постійна швидкість ковзання активізують процес припрацювання, при цьому зменшується час та знос від припрацювання за рахунок механодеструкції мастила, що супроводжується збагаченням вуглецем поверхонь тертя.*

**Ключові слова:** *5тертя, припрацювання, трибологічна система, знос, коефіцієнт тертя, перенос, ступінчасте навантаження*

**Вступ.** Одним із напрямів збільшення ресурсу вузлів тертя є не тільки використання матеріалів з підвищеною зносостійкістю, але й оптимізація експлуатаційних режимів роботи трибосистем. Більшість робіт охоплюють дослідження даного явища на етапі стаціонарної роботи, хоча близько 70% зносу припадає на етап припрацювання трибологічних систем (ТС) при початковій роботі та при кожному запуску [1]. Поверхня, сформована під час тертя, має відмінні від вихідної структури властивості та визначає триботехнічну поведінку всього матеріалу. На етапі припрацювання формуються тонкі поверхневі шари, які забезпечують стійкість роботи у подальшій експлуатації. Трибологічні структури отримані від етапу припрацювання потім функціонують в стаціонарному режимі за нелінійним законом синергетики, їх надмірний ріст обмежений ентропією, а мінімальний рівень – вільною енергією [2, 3].

На сьогоднішні режими припрацювання агрегатів букс-шток амортизаційних стійок, силових циліндрів гідравлічних систем авіаційної техніки встановлюються, як правило, досвідом експлуатації. Тому дослідження впливу режимів тертя на механізм утворення трибологічних структур етапу припрацювання і пошук шляхів зниження часу припрацювання є актуальною задачею. В даних вузлах використовується трибологічна система «БрАЖМц10-3-1,5 – АМГ-10 –30ХГСА». Початкова робота агрегатів за невідповідних режимів тертя може призводити до підвищеного зносу пар тертя та збільшення ймовірності прояву процесів схоплювання та відмов [3]. Керуючи режимними параметрами, можна впливати на етап припрацювання та стаціонарний процес.

**Аналіз літературних даних і постановка проблеми.** У процесі тертя та зношування твердих тіл, під впливом зовнішніх факторів і самого тертя, відбуваються чисельні фізичні та механічні процеси [4 – 7]. До основних факторів, що визначають фізико-хімічні явища припрацювання можна віднести питоме навантаження –  $P$  (МПа) та швидкість ковзання –  $v$  (м/с).

Навантаження має суттєвий вплив на якість і тривалість припрацювання. Зі збільшенням навантаження в початковий момент зростає частка пластичної деформації тонкого поверхневого шару, що призводить до збільшення кількості тепла, що виділяється, і поглиненої енергії. Високі механічні напруги, зумовлені збільшенням тиску на площадках контакту, зумовлюють дефектність структури поверхонь тертя, що збільшує активність металу. Експериментальні дослідження, проведені різними вченими, показують, що зі збільшенням навантаження до величини, що не перевищує деякого критичного значення, якість припрацювання поверхні поліпшується.

Вплив швидкості виражається через співрозмірність часу існування плями фактичного контакту з часом релаксації виникаючих на плямі контакту напружень.

Слід зазначити, що на сьогодні процес припрацювання поверхонь в присутності мастильного матеріалу, за режимами, які б зменшували як час, так і знос від даного етапу є питанням, одним з найменш вивчених. Актуальність дослідження процесу припрацювання та впливу на нього режимів тертя обумовлена тим, що оптимізація цього процесу сприяє підвищенню довговічності вузлів тертя.

**Мета дослідження.** Метою даної роботи є вибір оптимальних режимів етапу припрацювання та дослідження закономірностей механохімічних перетворень мікроструктури поверхонь тертя сталі та бронзи в умовах початкової роботи – припрацювання на прикладі класичної трибологічної системи «БрАЖМц10-3-1,5 – АМГ-10 – 30ХГСА».

**Методика дослідження.** Властивості трибологічної пари «зразок – сталь (контртіло)» досліджували для випадку бронзи БрАЖМц10-3-1,5 та сталі 30ХГСА за умов однобічно направленого ковзання в середовищі гідравлічної рідини АМГ-10 за кінематичною схемою «площина – площина» з коефіцієнтом перекриття 0,25 на розробленому лабораторному пристрої торцевого тертя.

Режимні параметри встановлювали за коефіцієнтом варіації сили тертя ( $V$ ). Режими, в яких коефіцієнт варіації сили тертя перевищував 40% до уваги не брались, оскільки це свідчить про процес схоплення, заїдання та відмову на етапі припрацювання.

Поверхні тертя бронзи та сталі вивчали методами оптичної мікроскопії на приладі Неофот-21, растрової електронної мікроскопії та рентгенівського енергодис-персійного мікроаналізу на приладі SELMI PEM-106 I, електронної Оже-спектроскопії на Оже-мікрозонді JEOL JAMP-10S.

На основі аналітичної моделі процесу тертя та зношування визначили характеристики припрацювання: час та знос від початкового етапу роботи (рис. 1).

Формули для швидкості зносу  $i_t = dl/dT$  та зносу  $I(t)$ , як функції часу  $t$ , мають вигляд:

$$i(t) = (i_0 - |i_t|) \exp(-t |T|) + |i_t|, \quad (1)$$

$$I(t) = (i_0 - |i_t|) T [1 - \exp(-t |T|)] + |i_t| t, \quad (2)$$

де  $i_0$  та  $\langle i_t \rangle$  – початкове і середнє стаціонарне значення швидкості зносу;  $T$  – час релаксації припрацювання;  $I(t)$  – знос.

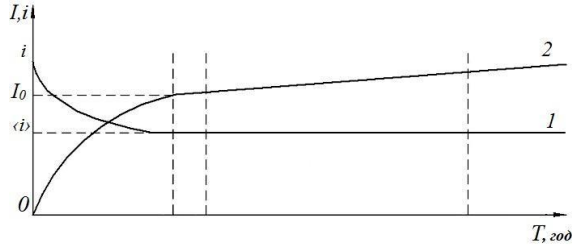


Рис. 1. Залежність інтенсивності зношування  $i$  та зносу  $I$  від часу  $T$

На рис. 1 функції (1) і (2) представлені в графічній формі. Експоненти в лівій частині описують еволюційний процес припрацювання, при цьому тривалість припрацювання оцінює час релаксації  $T$ , а внесок припрацювання у знос – функціонал  $I_0 = (i_0 - \langle i_t \rangle) T [i_t - \exp(-t/T)]$ . У формуванні потоків речовини основну роль відіграють процеси самоорганізації, які відбуваються в контактній трибологічній структурі дисипативного типу.

**Результати дослідження.** Встановлено, що припрацювання трибологічної системи 30ХГСА – АМГ-10 – БрАЖМц 10–3–1,5 з коефіцієнтом варіації сили тертя 10 – 30% відбувається при навантаженні  $P = 2,2$  МПа. Процес припрацювання при даному навантаженні характеризується трьома періодами початкової роботи трибологічної системи (рис. 2), а саме:

- протягом першого періоду відбувається оптимізація якості поверхні, тобто має місце мікрогеометричне припрацювання, яке супроводжується згладжуванням поверхні і якому відповідає коефіцієнт варіації 30% (рис. 2). Етап відрізняється підвищеною швидкістю зношування, яскраво вираженим порушенням суцільності масляної плівки в зазорі трибопари. Це може бути підтвердженням того, що на початковій стадії переважають умови інтенсивного зношування захисних плівок м'якої структурної складової і одночасно умови для виходу їх на поверхню.

- під час другого етапу спостерігається стабілізація моменту тертя, коефіцієнт варіації рівний 15%, що сприяє зміцненню поверхневого шару та стабілізації геометричних показників. За цей період знос незначний, при цьому коефіцієнт тертя сягав мінімальної величини 0,015-0,022, що відповідає нормальному тертю пари бронза-сталь.

- третій етап тривав до повного завершення формування стабільних характеристик якості обох зв'язаних поверхонь, при цьому коефіцієнт варіації становить 10%. Стабілізація варіацій коефіцієнта тертя вважається закінченням припрацювання.

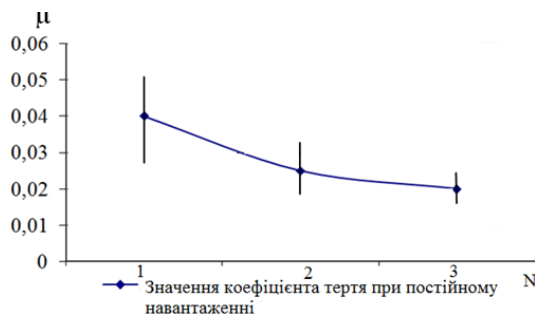


Рис. 2. Значення коефіцієнта тертя  $\mu$  за періоди припрацювання  $N$  системи 30ХГСА–АМГ-10 – БрАЖМц10-3-1,5, при навантаженні  $P=2,2$  МПа, оброблених методом найменших квадратів

Швидкість, як і навантаження, обиралась за поведінням коефіцієнта варіації сили тертя і для навантаження  $P = 2,2$  МПа, становила  $v = 2$  м/с.

Знос від припрацювання визначався у відповідності з методикою (рис. 1) Вклад зносу від припрацювання при навантаженні  $P = 2,2$  МПа сягав 52 мкм. При цьому час припрацювання становив 4 години (рис. 3).

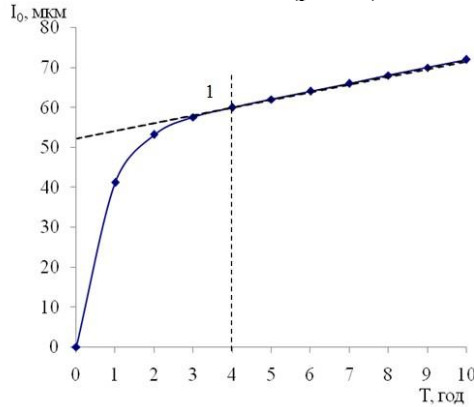


Рис. 3. Зміна зносу  $I_0$  в часі  $T$  трибологічної системи 30ХГСА-АМГ-10-БрАжМц10-3-1,5 при постійному навантаженні: 1 – вклад зносу в припрацювання

Чим далі система знаходиться від стаціонарного процесу, тим швидше буде проходити процес припрацювання, актуальним є процес зміни зовнішньосилового впливу в процесі еволюційного етапу припрацювання [8]. Тому з метою зменшення часу припрацювання, розширення діапазону граничних значень навантаження, зносу від даного етапу було обрано ступінчасте збільшення навантаження. Початкове навантаження становило 2,2 МПа та швидкість 2 м/с. Через час ( $T = 45$  хв), який відслідковувався у відповідності з коефіцієнтом варіації сили тертя, навантаження підвищувалось на одну сходинку. Для трибологічної системи 30ХГСА-АМГ-10-БрА жМц10-3-1,5, на першому етапі припрацювання  $V = 30\%$ , після 45 хвилин роботи, коли  $V = 24\%$  навантаження збільшували до максимально допустимого 2,8 МПа, при цьому коефіцієнт варіації складав 28 %, через час  $T$ , коефіцієнт варіації сили тертя був рівний 21 % після чого навантаження збільшували до 3,1 МПа, відповідно спостерігалось збільшення коефіцієнта варіації до 25%, та особливому аналізу підлягали водночас високоенергетичні та низькоенергетичні ділянки спектрів, враховували перекриття та накладення спектральних ліній різних елементів. Несподіваним став висновок про відсутність достатньої концентрації міді на поверхнях тертя сталі в зонах її візуально «мідного» відтінку. В усіх досліджених випадках пари тертя, концентрація міді в поверхневих шарах мікроструктур тертьової поверхні сталі не перевищувала 4,7 ат. %. Водночас, концентрація заліза та кисню у вказаних поверхневих шарах досягала значень 36-44 та 46-54 ат. % відповідно. Навіть за умови тривалого розпорощення поверхонь тертя сталі іонами аргону, що сприяло дослідженню суттєво віддалених від поверхні вглиб металу поверхневих прошарків, концентрація кисню залишалась доволі значною (рис. 4). Це засвідчило, що «мідний» відтінок поверхонь тертя сталі, утворених у досліджуваній парі бронза-сталь, обумовлено кольором поверхневих плівок оксидів заліза субмікронної товщини.

У порівнянні зі сталевими відповідні мікроділянки поверхонь тертя бронзи в усіх випадках є значно менш окисненими (рис. 4). Натомість, вони насичені

вуглецем, концентрація якого залишається значною в межах поверхневого шару мікронної товщини та в декілька разів вищою за концентрацію кисню. Суттєве насичення в парах тертя поверхневого шару мідних сплавів вуглецем, не зважаючи на відсутність чисто хімічної взаємодії між ним та міддю, раніше вже виявляли в [10].

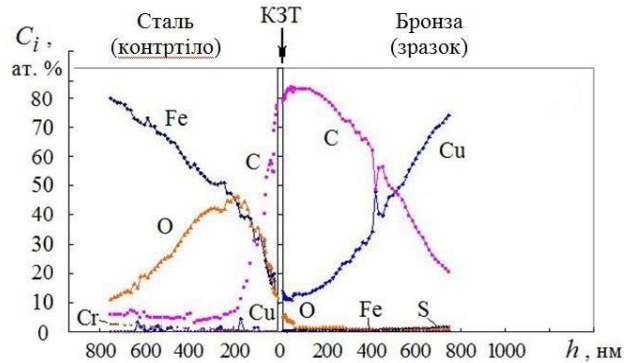


Рис. 4. Концентраційні профілі  $C_i$  елементів у поверхневих шарах пари «бронза (зразок) – сталь (контртіло)»: КЗТ – межа поділу між зразком та контртілом у контактній зоні;  $h$  – відстань від КЗТ

Другий несподіваний результат дав аналіз змін складу мікродомішок у поверхневих шарах бронзи. Дані, наведені на рис. 4, свідчать про наявність у всій мікронній товщині досліджуваних поверхневих шарів бронзи поряд з йонами вуглецю також карбідотвірних елементів хрому та титану, притаманних виключно сталі. Водночас, у цих поверхневих шарах виявлено значно зменшені концентрації «рідних» домішок бронзи БрАЖМц, таких як алюміній та марганець. Натомість, концентрація домішки заліза суттєво збільшена. Причини присутності карбідотвірних елементів сталі та підвищеної концентрації заліза в «глибинних» поверхневих шарах бронзи потребують детальнішого аналізу.

Відповідно, на мікроділянках поверхонь тертя сталі, спостерігаємо збіднення на хром та, певною мірою, вуглець (відносно об'ємної концентрації 4,3-4,7 ат. %). У межах мікрозон, де не зафіксовано наявності хрому, спостерігаємо сегрегацію марганцю, який, однак, може бути перенесеним у поверхневий шар сталі також як мікродомішка бронзи. На можливість останнього вказує наявність у деяких точках поверхні тертя сталі характерної для даної бронзи мікродомішки олова.

Паралельно з усіма вказаними мікродомішками в поверхневих шарах обох сплавів у зоні тертя зареєстровано присутність у певних концентраціях мікродомішок сірки, що можуть надходити з зон неконтрольованих забруднень поверхонь пари тертя та оливи, а також від фарбника останньої. Сірка, однак, є в певних межах (до 0,03 ат. %) допустимою мікродомішкою сталі, але в найбільших концентраціях зафіксована в поверхневих шарах бронзи (до 6,4 ат. %). Азот, найшвидше, є наслідком впливу антиокиснювального додатку до оливи. Інші можливі легівні мікродомішки даної пари бронза-сталь (Zn, Pb, Ni, Si, P) в підвищених концентраціях не виявлені, хоча неявні сліди трьох останніх з них реєстрували на окремих границях різних фаз поверхонь тертя сталі (Ni, P) та бронзи (Si, P).

За результатами виконаного Оже-аналізу мікроелементного складу поверхонь тертя пари бронза-сталь навуглецьований поверхневий шар бронзи за

умов тертя, є збагаченим на карбідотвірні мікродомішки сталі (Cr, Ti, а також Fe) та збідненим на власні мікродомішки бронзи (Al, Mn), а окиснений поверхневий шар сталі, навпаки, хоча й меншою мірою, збіднений на власні мікродомішки (Cr, C), але збагачений на мікродомішки бронзи (Al, Sn, Mn, а також Cu).

Натомість, має місце взаємне перенесення елементів спряжених поверхонь контактної зони з однієї на іншу без утворення на кожній з них плівок іншого металу. Швидше слід стверджувати про утворення в контактній зоні тертя доволі товстої (мікронної та субмікронної товщини) та високо концентраційної поверхневої плівки вуглецю, що розчиняє інші елементи, або, щонайменше, плівки сильно навуглецьованих поверхневих структур.

**Висновки.** Ефективність процесу припрацювання в значній мірі визначається режимом навантаження. Припрацювання протікає більш ефективно за постійної швидкості ковзання і ступінчастого збільшення навантаження.

Ступінчасте навантаження і одночасне регулювання фрикційного тепловиділення пари тертя призводить до розширення області гранично-допустимих навантажень, зменшення часу та зносу від припрацювання.

Виявлено, що в результаті припрацювання утворюються трибологічні структури насичені вуглецем, за рахунок механодеструкції мастила та перенесення позитивно заряджених елементів з поверхні на поверхню.

### Список літератури

1. Кузьменко, А. Г. Износ узлов трения двигателей при граничной смазке (обзор) [Текст] / А. Г. Кузьменко, О. П. Бабак. // Проблемы трибологии. – 2007. – №3. – С. 61 – 93.
2. Костецкий, Б. И. Трение, смазка и износ в машинах [Текст] / Б. И. Костецкий. – К. Техника, 1970. – 396 с.
3. Кульгавий, Э. А. Триботехнические характеристики и их применение [Текст] / Э. А. Кульгавий // Проблемы трибологии. – 2003. – № 3. – С. 51 – 61.
4. Дроздов, Ю. Н. Трение и износ в экстремальных условиях [Текст] / Ю. Н. Дроздов, В. Г. Павлов, В.Н. Пучков. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
5. Маслов, Н. Н. Исследование влияния режимов технологических процессов на качество ремонта машин [Текст] / Н. Н. Маслов. – Л.: ВАТТ, 1968. – 272 с
6. Буяновский, И. А. Развитие трибологии в России [Текст] / И. А. Буяновский // Трение и смазка в машинах и механизмах. Приложение к журналу «Сборка в машиностроении, приборостроении». – 2005. – № 2 (8). – С. 12-18.
7. Бриггс, Д. Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии [Текст] / Д. Бриггс, М. П. Сих. – М.: Мир, 1987. – 600 с.
8. Карасик, И. И. Прирабатываемость, закономерности и методы оценки влияния приработки и изнашивания на триботехнические характеристики опор скольжения [Текст]: дис. док. техн. наук: 05.02.04/ И. И. Карасик. – М., 1983. – 450 с.
9. Фёдоров, С. В. Основы трибоэргодинамики и физико-химические предпосылки теории совместимости [Текст] / С. В. Фёдоров. – Калининград: Изд-во КГТУ, 2003. – 400 с.
10. Мишук, О. А. Легирование поверхности металлов при трении под влиянием органических поверхностно-активных веществ [Текст]: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.18/ О. А. Мишук. – К., 1996. – 194 с.

Стаття надійшла до редакції 07.12.2021.

M. V. KINDRACHUK, V. V. KHARCHENKO, I. A. HUMENIUK, N. O. NAUMENKO,  
M. A. GLOVIN, I. V. KOSTETSKY

### EXTERNAL FORCE INFLUENCE ON THE REGULARITY OF ANTIFRICTION SYSTEMS

The load has a significant impact on the quality and duration of running-in. As the load increases, the proportion of plastic deformation of the thin surface layer increases at the initial moment, which leads to an increase in the amount of heat released and the energy absorbed. High mechanical stresses caused by increasing pressure at the contact sites cause a defect in the structure of the friction surfaces, which increases the activity of the metal. Experimental studies conducted by various scientists show that with increasing load to a value not exceeding some critical value, the quality of surface running-in improves. The article presents the results of the study of external force influence on the process of formation of tribological structures of the stage of running-in of the system "BrAZhMts10-3-1,5-AMG-10-30HGSA". It is shown that a stepwise increase in load and a constant sliding speed activate the running-in process, while reducing the time and wear from running-in due to mechanical destruction of the oil, which is accompanied by carbon enrichment of the friction surfaces.

**Keywords:** friction, running-in, tribological system, wear, coefficient of friction, transfer, step load.

#### Referenses

1. Kuz'menko, A. G. Iznos uzlov treniya dvigatelej pri granichnoj smazke (obzor) [Tekst] / A. G. Kuz'menko, O. P. Babak. // Problemi tribologii. – 2007. – №3. – S. 61 – 93.
2. Kosteckij, B. I. Trenie, smazka i iznos v mashinah [Tekst] / B. I. Kosteckij. – K. Tekhnika, 1970. – 396 s.
3. Kul'gavij, E. A. Tribotekhnicheskie karakteristiki i ih primenenie [Tekst] / E. A. Kul'gavij // Problemi tribologii. – 2003. – № 3. – S. 51 – 61.
4. Drozdov, YU. N. Trenie i iznos v ekstremal'nyh usloviyah [Tekst] / YU. N. Drozdov, V. G. Pavlov, V.N. Puchkov. – M.: Mashinostroenie, 1986. – 224 s.
5. Maslov, N. N. Issledovanie vliyaniya rezhimov tekhnologicheskikh processov na kachestvo remonta mashin [Tekst] / N. N. Maslov. – L.: VATT, 1968. – 272 s
6. Buyanovskij, I. A. Razvitie tribologii v Rossii [Tekst] / I. A. Buyanovskij // Trenie i smazka v mashinah i mekhanizmah. Prilozhenie k zhurnalu «Sborka v mashino-stroenii, priborostroenii». – 2005. – № 2 (8). – S. 12-18.
7. Briggs, D. Analiz poverhnosti metodami ozhe- i rentgenovskoj fotoelektronnoj spektroskopii [Tekst] / D. Briggs, M. P. Sih. – M.: Mir, 1987. – 600 s.
8. Karasik, I. I. Prirabatyvaemost', zakonmernosti i metody ocenki vliyaniya prirabotki i iznashivaniya na tribotekhnicheskie karakteristiki opor skol'zheniya [Tekst]: dis. dok. tekhn. nauk: 05.02.04/ I. I. Karasik. – M., 1983. – 450 s.
9. Fyodorov, C. B. Osnovy triboergodinamiki i fiziko-himicheskie predposylki teorii sovmestivosti [Tekst] / C. B. Fyodorov. – Kaliningrad: Izd-vo KGTU, 2003. – 400 s.
10. Mishchuk, O. A. Legirovanie poverhnosti metallov pri trenii pod vliyaniem organicheskikh poverhnostno-aktivnyh veshchestv [Tekst]: dis. kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.18/ O. A. Mishchuk. – K., 1996. – 194 s.

**Кіндрачук Мирослав Васильович** – член-кореспондент НАН України, докт. техн. наук, професор, професор кафедри механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна; E-mail: [nau12@ukr.net](mailto:nau12@ukr.net).

**Харченко Володимир Володимирович** – молодший науковий співробітник, завідувач лабораторії новітніх триботехнологій кафедри механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, проспект Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, +38(044)4067773, E-mail: [nau12@ukr.net](mailto:nau12@ukr.net).

**Гуменюк Ігор Анатолійович** – канд. техн. наук, ПАТ Укртелеком, mail: [nau12@ukr.net](mailto:nau12@ukr.net).

**Науменко Ніла Олександрівна** – провідний інженер, Національний авіаційний університет, mail: [nau12@ukr.net](mailto:nau12@ukr.net).

**Гловин Михайло Андрійович** - студент, Національний авіаційний університет.

**Костецький Іван Володимирович** - студент, Національний авіаційний університет.