

УДК 662.75:621.593.3

doi:10.20998/2413-4295.2023.03.03

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ФУЛЕРЕНОВИХ ПРИСАДОК У СУЧАСНИХ АВІАЦІЙНИХ ОЛИВАХ

**В. В. ЄФІМЕНКО^{1*}, В. П. ОЛЕКСАНДРЕНКО², Н. Г. КАЛМИКОВА¹, В. М. РУДЕНКО¹,
О. В. ЄФІМЕНКО¹**

¹ кафедра хімії і хімічної технології, Національний авіаційний університет, м. Київ, УКРАЇНА

² кафедра галузевого машинобудування та агроінженерії, Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, УКРАЇНА
*e-mail: e.valerij.ua@gmail.com

АНОТАЦІЯ Проаналізовано можливості й доцільність застосування фулеренових присадок та їхній вплив на трибологічні властивості сучасних синтетичних авіаційних олів. Розглянуто метод підвищення протизносних властивостей синтетичних олів Mobil Jet Oil II та Mobil Jet Oil 254 для турбореактивних авіаційних двигунів шляхом добавки фулеренової присадки C₆₀. Показано, що протизносні властивості синтетичної Mobil Jet Oil 254 оливи для турбореактивних авіаційних двигунів перевищують понад 5 % оливу Mobil Jet Oil II, що стало наряду з іншими факторами причиною повного переводу гелікоптерів Airbus Helicopters H-145 на оливу Mobil Jet Oil 254. Збільшення концентрації фулеренової присадки в оливах не значно впливає на величину зносу підшипників кочення вала турбіни гелікоптерів, хоча тенденція зменшення діаметра плями зносу та зростання критичного навантаження переходу до схоплення спостерігається. Це пояснюємо тим, що на відміну від тертя ковзання, при якому коефіцієнт тертя зменшується в десятки разів за рахунок можливості кочення молекул фулерену по графітовій поверхні, яке характеризується значно меншим тертям в порівнянні з ковзанням графітових поверхонь одна відносно іншої в силу більш високої площі контакту в останньому випадку. Із цього слідує, що фулерени виконують роль мікропідшипників кочення, які зменшують коефіцієнт тертя ковзання. Передбачено, що в підшипниках кочення кульки можливо перемелюють фулерени, як кульові млини, тому не спостерігається значного ефекту покращення протизносних властивостей олів при застосуванні фулеренових присадок. Встановлено, що зростання концентрації фулеренової присадки в оливах зміщує критичне навантаження в область більш високих значень. Використання фулеренів в якості протизносної присадки до олів для турбореактивних двигунів потребує проведення подальшого дослідження і обґрунтування

Ключові слова: фулеренові присадки; олива Mobil Jet Oil II; олива Mobil Jet Oil 254; чотирьохкулькова машина тертя; діаметр плями зносу; критичне навантаження

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF FULLERENE ADDITIVES IN MODERN AVIATION OILS

V. YEFYMENKO¹, V. OLEKSANDRENKO², N. KALMYKOVA¹, V. RUDENKO¹, O. YEFIMENKO¹

¹ Department of Chemistry and Chemical Technology, National Aviation University, Kyiv, UKRAINE

² Department of Industrial Mechanical Engineering and Agricultural Engineering, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, UKRAINE

ABSTRAKT The possibilities and expediency of using fullerene additives and their influence on the tribological properties of modern synthetic aviation oils are analyzed. The method of increasing anti-wear properties of synthetic oils for turbojet aircraft engines Mobil Jet Oil II and Mobil Jet Oil 254 by adding fullerene additive C₆₀ is considered. It is shown that the antiwear properties of synthetic Mobil Jet Oil 254 oil for turbojet aircraft engines exceed more than 5% of Mobil Jet Oil II oil, which, along with other factors, was the reason for the complete transfer of Airbus Helicopters H-145 helicopters to Mobil Jet Oil 254 oil. The increase in the concentration of fullerene additives in oils does not significantly affect the amount of wear of the rolling bearings of the turbine shaft of helicopters, although there is a tendency to decrease the diameter of the wear spot and an increase in the critical load of the transition to seizing. This is explained by the fact that, in contrast to sliding friction, in which the coefficient of friction decreases tenfold due to the possibility of rolling of fullerene molecules on the graphite surface, which is characterized by much lower friction compared to the sliding of graphite surfaces relative to each other due to the higher contact area in the last case. It follows that fullerenes act as micro-rolling bearings that reduce the coefficient of sliding friction. It is assumed that the balls in the rolling bearings may grind fullerenes like ball mills, therefore no significant effect of improving the anti-wear properties of oils when using fullerene additives is observed. It was established that an increase in the concentration of the fullerene additive in oils shifts the critical load to higher values. The use of fullerenes as an anti-wear additive to oils for turbojet engines requires further research and justification.

Keywords: fullerene additives; Mobil Jet Oil II oil; Mobil Jet Oil 254 oil; four-ball friction machine; wear spot diameter; critical load

Вступ

Україна, здійснюючи інтеграцію у світове та європейське співтовариство, виконуючи зобов'язання

перед своїми стратегічними партнерами, придбала 10 гелікоптерів фірми «Airbus Helicopters» H-145 для потреб Міністерства внутрішніх справ з метою оперативного реагування на нестандартні ситуації та

використання їх для екстреної медичної допомоги. Сучасні авіаційні газотурбінні двигуни (ГТД) характеризуються великими швидкостями обертання ротора, високою температурою газів та ступенем їх стискування в компресорі. У результаті цього на поверхні деталей тертя двигунів діють значні механічні та теплові навантаження. Тому, основними функціями змащувальних олів є не лише зменшення тертя і зносу поверхонь деталей, а й інтенсивний відвід від них тепла.

Важливе місце у підвищенні надійності роботи техніки та збільшення термінів її експлуатації займають питання зносостійкості деталей. Протягом експлуатації відбувається інтенсивний знос вузлів тертя у результаті значних навантажень, швидкостей та температур, впливу агресивних середовищ та вібрацій.

Одним з найбільш економічно вигідних шляхів збільшення довговічності вузлів тертя у різних машинах і механізмах є підвищення якості мастильних матеріалів, у першу чергу, їх змащувальних властивостей, що досягається в основному шляхом введення до них протизносних, протизадирних і антифрикційних присадок.

Введення присадок в оливи та мастила дозволяє задовольнити дві основні вимоги техніки: підвищення терміну роботи (надійності) машин і механізмів; збереження енергії палива, тому що близько 30% енергії, що виробляється в промислових країнах світу, в кінцевому рахунку витрачається на тертя.

В останні роки одним з найбільш розвиваючим напрямом науки є вивчення фулеренів та можливостей їх застосування як присадок до змащувальних матеріалів. Це пов'язано з тим, що ці сполуки являють собою унікальні об'єкти з точки зору електронної будови, фізичних та хімічних властивостей. Надзвичайною особливістю також є те, що це єдина розчинна форма карбону у вуглеводневих сполуках, що дозволяє використовувати її у різноманітних напрямках. Проведення експериментальних досліджень з можливості застосування фулеренів та фулереномісної сажі як протизносних присадок є досить актуальним напрямом наукової роботи.

Мета роботи

Дослідження та вивчення можливостей використання та впровадження нових, перспективних комплексних присадок до паливно-мастильних матеріалів які будуть працювали більш тривалий термін, ніж традиційні присадки, а також проведення порівняльного аналізу трибологічних характеристик синтетичних олів Mobil Jet Oil II та Mobil Jet Oil 254 для газотурбінних авіаційних двигунів гелікоптерів.

Для покращання експлуатаційних властивостей паливно-мастильних матеріалів – термоокисної стабільності вуглеводнів, протизносних

характеристик, застосовують антиокисні присадки фенольного характеру – «іонол», протизносні – «Hatec-580», але при підвищених температурах вони швидко окиснюються. Тому, основною задачею даної роботи є проведення досліджень з можливості впровадження нових, перспективних комплексних присадок до паливно-мастильних матеріалів на основі нанорозмірних вуглецевих матеріалів (фулеренів), що більш стійкі до процесу окиснення та дослідження під їх впливом зміни протизносних властивостей змащувальних матеріалів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- визначення трибологічних показників синтетичних олів Mobil Jet Oil II та Mobil Jet Oil 254 для газотурбінних авіаційних двигунів без та з вмістом фулерену C₆₀ на стандартизованій чотирьохкульковій машині тертя;
- вивчення доцільності використання фулеренових присадок у авіаційних синтетичних оливах.

Виклад основного матеріалу

Відомості про дослідження трибологічних властивостей фулеренів дуже нечисельні й стосуються головним чином фулерену C₆₀. Оpubліковано декілька робіт, де фулерен C₆₀ досліджувався у вигляді твердої плівки як тверде змащувальне покриття, тому зроблено висновок про перспективність C₆₀ для вирішення різних трибологічних завдань [1–3].

У нашій роботі [2] проведено трибологічні дослідження синтетичної Mobil Jet Oil 254 і мінеральної МК-8п олів для газотурбінних двигунів гелікоптерів та показані обмеження щодо застосування мінеральної оливи, що робить її непридатною до використання за прямим призначенням після 300 год нальоту. Синтетичні оливи Mobil Jet Oil II та Mobil Jet Oil 254 рекомендовані виробником до використання в двигунах гелікоптерів H-145, тому основним завданням було дослідити, яка з цих двох олів за трибологічними характеристиками є більш придатна до експлуатації.

Як показано в роботах [4–7], що останнім часом відбувся досить значний прогрес в одержанні та дослідженні нанооб'єктів, виникли нові наноматеріали, нанотехнології. Були синтезовані нанокластери ряду металів, фулерени і вуглецеві нанотрубки. Зроблений крок вперед в методах спостереження та вивчення властивостей вуглецевих наноструктур, пов'язаний з розвитком фізико-хімічних методів дослідження їх застосування в змащувальних матеріалах.

Проведено дослідження на основі яких запропоновано використання фулеренів як антиокиснювальної присадки, що значно поліпшує термоокисну стабільність олів у порівнянні з традиційними присадками.

Фулерени відрізняються високою хімічною інертністю по відношенню до процесу мономолекулярного розпаду. Так, молекула C_{60} зберігає свою термічну стабільність до температури понад $1500^{\circ}C$, чого не можливо стверджувати про інші протизносні та антиокисні присадки.

Проте, у присутності кисню окиснення цієї форми карбону до CO і CO_2 спостерігається вже при істотно нижчих температурах (близько $250^{\circ}C$), але така температура в системі змащування сучасних автомобільних та авіаційних двигунів не досягається, хоча в авіаційних надзвукових літаках при зупинці двигуна, внаслідок припинення відводу тепла із зони підшипників турбіни, можливе таке підвищення температури на короткий період часу [4].

Вченими було виконано детальне кількісне дослідження визначення впливу добавки фулерену на робочі характеристики змащувальних композицій на основі графіту. Результати цих досліджень можуть бути покладені в основу розробки «супермастила», яке буде забезпечувати коефіцієнт тертя поверхні нижче 0,001.

У якості змащувальної основи використовувався високоорієнтований піролітичний графіт (НОРГ), який разом з мілкодисперсним графітовим порошком природного походження вводили в суміш концентрованої сірчаної та азотної кислот (у об'ємному співвідношенні 4:1) та перемішували протягом 16 год. Оброблений таким чином порошок промивали водою, просушували за температури $100^{\circ}C$, після чого зразок протягом 15 с піддавали термічній обробці. Це призводило до утворення шаруватих графітових частинок, які потім вводили в 70 %-й спиртовий розчин і піддавали ультразвуковій обробці. Потім шаруваті частинки графіту разом з порошком фулерену C_{60} або C_{70} запаювали в умовах вакууму в кварцову ампулу, яку протягом 15 діб витримували за температури $600^{\circ}C$.

Одержаний у результаті описаної процедури графіт, інтеркалірований фулеренами, використовували для одержання антифрикційного покриття, яке являло собою плівку площею $2,3 \times 2,3 \text{ м}^2$ і товщиною 0,2 мм.

Фулереномісна сажа та сам порошкоподібний фулерен C_{60} дають помітне покращення антифрикційних та протизносних властивостей пар тертя сталь–сталь та мідь–сталь, особливо в області великих навантажень і тисків на контакт. Найбільше покращення відбувається при парі тертя сталь–сталь. Для мідних пар було визначено, що наявність фулерену C_{60} у чистому вигляді або у фулереновій сажі призводить до утворення на поверхні тертя фулеренополімерної плівки значної товщини, яка відіграє захисну роль [8-10].

Коефіцієнт тертя цієї плівки μ виміряли стандартним методом, як відношення сили тертя до прикладеного бокового навантаження. У результаті вимірювання отримані величини $\mu < 0,001$, вдвічі менше, ніж у стандартного мастила на основі MoS_2

($\mu \approx 0,002$) та для графітового мастила ($\mu \approx 0,001$). В якості фізичного механізму, який визначає характеристики змащувальної плівки на основі піролітичного графіту, інтеркалірованого фулеренами, вчені розглядають можливість кочення молекул фулерену по графітовій поверхні, яке характеризується значно меншим тертям в порівнянні з ковзанням графітових поверхонь одна відносно іншої в силу більш високої площі контакту в останньому випадку. Із цього слідує, що фулерени виконують роль мікропідшипників кочення, які зменшують коефіцієнт тертя ковзання [8, 11].

Межі застосування фулеренів дуже широкі. Що стосується безпосередньо змащувальних матеріалів, то на базі фулеренів розробляють багато присадок до змащувальних олів і мастил, останнім часом перспективним є вироблення мастил на основі фулеренів, які характеризуються надзвичайними характеристиками [2, 12].

Основними вузлами змащування в турбореактивних авіаційних двигунах є підшипники кочення, на відміну від вузлів змащування поршневих двигунів в яких переважає тертя ковзання. Температура зовнішньої обойми таких підшипників досягає $125-150^{\circ}C$, яка в основному створюється за рахунок тепла, що надходить від крильчатки турбіни. Після зупинки двигуна, коли зменшується обдув повітрям, тепловий потік, що йде від крильчатки, розігріває обойму підшипника і оливу, що його змащує і відводить тепло із зони тертя, до температури $200^{\circ}C$.

У турбореактивних двигунах надзвукових літаків різко збільшується температура у вузлах тертя як за рахунок зростання навантаження на підшипники турбіни, так і за рахунок тепла, що надходить від камери згоряння та крильчатки турбіни. Одночасно з цим підвищується температура оливи.

У перспективних надзвукових турбореактивних двигунах температура у вузлах тертя може досягати 400 і навіть $540^{\circ}C$, а температура оливи до $200^{\circ}C$. Для роботи за таких температур рідкі мінеральні оливи непридатні, а синтетичні оливи повинні містити протизносні та антиокисні присадки, які виконували б свої функції за таких умов. Тому дослідження спрямовані на одержання та використання нових присадок до змащувальних матеріалів, які працювали б за високих температур і значних навантажень є досить актуальними.

Розробка та впровадження в експлуатацію нових змащувальних олів з метою розширення сировинної бази для їх виробництва та підвищення експлуатаційних властивостей здійснювалось одночасно з розвитком двигунобудування.

Велика потужність авіаційних редукторів, що передається, у поєднанні з їх невеликими масою й габаритами призводить до посилення умов роботи пар тертя, зростання теплової та динамічної напруженості деталей та вузлів двигуна. Шестерні редукторів, як зазначалося вище, працюють за умов високих

контактних навантажень. Міцність плівок малов'язких авіаційних олів, придатних для змащування опор турбореактивних двигунів за даних умов виявляється недостатньою. Для забезпечення надійного змащування шестерень редуктора потрібні оливи з більшою в'язкістю і вищою змащувальною здатністю.

Протиріччя у вимогах до якості мінеральних олів, що повинні поєднувати високу змащувальну здатність із задовільними в'язкісно-температурними характеристиками для забезпечення надійного запуску двигуна за низьких температур, призвели до необхідності використання для змащування редукторів гвинта гелікоптерів та турбогвинтових двигунів суміші з малов'язких мінеральних та високов'язких олів. Причому співвідношення вказаних олів у сумішах є різним для різних типів двигунів.

Альтернативою вирішення цього протиріччя є використання в двигуні та редукторній системі гелікоптерів H-145 «Airbus Helicopters» синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254.

Mobil Jet Oil 254 – це надзвичайно високоефективна синтетична олива для газотурбінних двигунів третього покоління, розроблена відповідно до їхніх вимог та використання у комерційній і військовій авіації. Цей продукт виготовлений із спеціально підготовленої базової синтетичної оливи із складним естером та збагачений пакетом присадок. Олива має чудову термічну та окиснювальну стабільність, що протистоїть руйнуванню та утворенню відкладень, зберігаючи фізичні характеристики, що вимагаються специфікаціями виробників та військових. Фізичні властивості Mobil Jet Oil 254 подібні до наявних на даний момент мастильних матеріалів для газових турбін попереднього покоління. Ефективний робочий діапазон оливи становить від мінус 40 °С до плюс 230–250 °С.

В'язкість синтетичних олів за температур 250–300 °С, вище ніж у рівнов'язких їм за температури 100 °С мінеральних, вони мають кращу термічну стабільність, низьку випаровуваність та малу схильність до високотемпературних відкладень та піноутворення.

Синтетичні оливи перевершують мінеральні по антиокиснювальним властивостям, мають рівні або кращі протизносні і протизадірні властивості. У зв'язку з цим термін їх експлуатації в кілька разів перевищує термін експлуатації мінеральних олів.

Останнім часом у синтетичні оливи вводять ефективні антифрикційні присадки (модифікатори тертя), що сприяють покращенню їх працездатності у зоні високих температур та протизносних властивостей.

Нові синтетичні матеріали, експлуатаційні характеристики яких значно перевершують природні, є основою просування людства по шляху прогресу. Фулерен є новою формою карбону по суті. Молекула

C_{60} містить фрагменти з п'ятикратною симетрією, які не зустрічаються в природі для неорганічних сполук (рис. 1). Тому слід визнати, що молекула фулерену є органічною молекулою, а кристал, утворений такими молекулами (фулерит) – це молекулярний кристал, що є зв'язуючою ланкою між органічною і неорганічною речовиною.

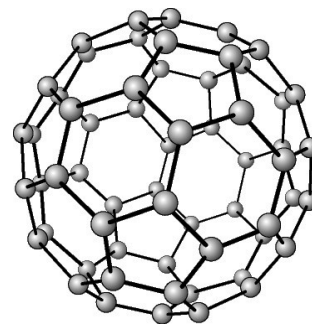


Рис. 1 – Молекула фулерену C_{60}

Кожний атом карбону в молекулі C_{60} знаходиться у вершинах двох шестикутників і одного п'ятикутника і принципово не відрізняється від інших атомів карбону. Атоми карбону які створюють сферу, зв'язані між собою сильним ковалентним зв'язком. Товщина сферичної оболонки 0,1 нм, радіус молекули C_{60} 0,357 нм. Довжина зв'язку C–C в п'ятикутнику – 0,143 нм, в шестикутнику – 0,139 нм.

Молекула фулерену C_{60} зберігає свою термічну стабільність до 1700 К, що значно перевищує температуру у вузлі тертя підшипника кочення газової турбіни двигуна гелікоптера чи в його редукторі.

Проте, у присутності кисню окиснення цієї форми карбону до CO і CO₂ спостерігається вже за істотно нижчих температурах (близько 500 К). Процес приводить до утворення аморфної структури, в якій на одну молекулу C_{60} припадає дванадцять атомів кисню, при цьому молекула фулерену практично повністю втрачає свою форму. При подальшому підвищенні температури до 700 К відбувається інтенсивне утворення CO і CO₂ і остаточне руйнування впорядкованих структур фулеренів.

Зацікавленість представляє галогенування фулерену, особливо його фторування. У перших роботах, присвячених фторидам фулерену, використовувалася реакція його взаємодії з газоподібним фтором, внаслідок якої утворювалася суміш продуктів. Розчинність самого фулерену C_{60} в розчинниках неароматичного характеру низька, тоді як його фториди достатньо добре розчинні в гексані, хлороформі, ацетоні, а з ароматичними сполуками утворюють стійкі за звичайних умов кристалосольвати.

Дослідження проводили використовуючи синтетичні оливи Mobil Jet Oil II і Mobil Jet Oil 254 з добавками різного вмісту фулерену. Контроль вмісту

та розчинності фулерену C_{60} в оливах визначали за методикою описаною у роботі [4].

Досліджувані фулеренові присадки у різних масових співвідношеннях мілкодисперсного порошку додавали в оливу і механічно перемішували до однорідної суспензії.

Якість змащувальних матеріалів визначається їх в'язкістю та протизносними властивостями в робочому діапазоні температур. З хімічної точки зору ці властивості забезпечуються, в першу чергу, молекулярною масою і ступенем розгалуження вуглеводневих ланцюгів. Однією з основних експлуатаційних властивостей, що висувається до олив, є висока стійкість до окиснення та протизносні властивості.

Для оцінки впливу фулерену на протизносні властивості олив проводили трибологічні випробування на стандартизованій чотирьохкульковій машині тертя відповідно до ГОСТ 9490 (ASTM D2783) (рис. 2).

За результатами досліджень визначали знос, який оцінювали за діаметром плями зносу d та критичному навантаженню P_k переходу до схоплення.

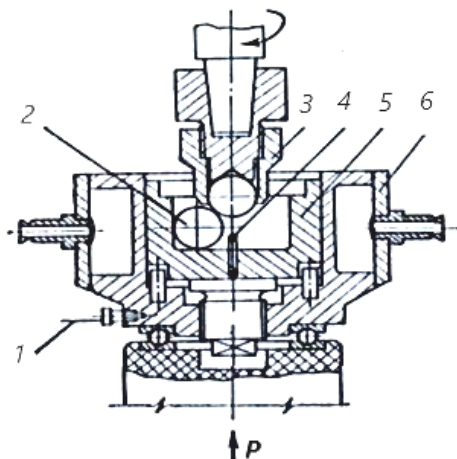


Рис. 2 – Чотирьохкулькова машина тертя ЧКМ-1: 1 – шпинт; 2 – кулі; 3 – вузол тертя; 4 – акустичний зонд; 5 – стакан; 6 – корпус

Три нижні кульки закріплюються нерухомо у чашці машини із змащувальним матеріалом, що випробовують. Верхня кулька, яка закріплена у шпинделі машини, обертається відносно трьох нижніх при заданому навантаженні з частотою обертання 1460 ± 70 об/хв. Провертання кульок у процесі випробування не допускається.

Кульки повинні бути виготовлені із підшипникової сталі ШХ-15 не нижче II ступеня точності, клас В, діаметром 16 або 20 мм. Можливо використовувати для випробування кульки з нових реальних підшипників.

Протизносні властивості на чотирьохкульковій машині тертя визначаються для олив та пластичних змащувальних матеріалів, що використовуються для

змащення поверхонь тертя.

Метод полягає у випробуванні змащувального матеріалу на машині тертя при заданих осьових навантаженнях та визначенні основних трибологічних характеристик змащувальних матеріалів: несучої здатності – за критичним навантаженням P_k , протизадирних властивостей за індексом задиру – I_z , граничної навантажувальної здатності – за навантаженням зварювання P_z та протизносних властивостей – за діаметром плями зносу (d).

Перед початком випробування кожного зразка змащувального матеріалу всі деталі машини, з якими стикається змащувальний матеріал під час випробування (чашка з деталями кріплення нижніх кульок і деталі кріплення верхньої кульки), промивають бензином або бензолом і просушують на повітрі. Кульки, які використовуються при випробуванні, також промивають бензином і просушують на повітрі.

Випробування кожного змащувального матеріалу проводять за температур, встановлених у нормативно-технічній документації.

Випробування складається із серії визначень. Кожне визначення проводять на новій пробі випробуваного змащувального матеріалу з чотирма новими кульками.

Для проведення випробування кульки закріплюють у шпинделі машини і чашці для змащувального матеріалу. При випробуванні оливу її заливають так, щоб кульки були цілком покриті нею. Потім встановлюють чашку із змащувальним матеріалом у машину, задають навантаження і включають електродвигун. Для того, щоб уникнути деформації кульок, необхідно уникати ударних навантажень.

При проведенні випробування при підвищених температурах попередньо включають електронагрівач. Після досягнення заданої температури створюють необхідне навантаження і включають електродвигун. Температура випробування повинна підтримуватися з похибкою не більше $\pm 5^\circ\text{C}$.

Тривалість випробування від моменту вмикання до моменту вимикання електродвигуна при визначенні критичного навантаження, навантаження зварювання та індексу задиру повинна бути $10 \pm 0,2$ с, при визначенні показника зносу – $60 \pm 0,5$ хв.

При визначенні критичного навантаження, що характеризує здатність змащувального матеріалу запобігати виникненню задиру поверхонь тертя, попередньо проводять ряд послідовних випробувань зі зниженням або зростанням навантаження відповідно до ряду навантажень, приведених у стандарті на випробування.

Проводять два паралельних випробування.

При зварюванні необхідно негайно виключити електродвигун, щоб уникнути пошкодження машини.

Показник зносу, що характеризує вплив мастильного матеріалу на знос поверхонь тертя,

визначають при постійному навантаженні, встановленому у нормативно-технічній документації на мастильний матеріал.

Після закінчення випробування та охолодження вузла тертя нижче температури 40 °С, зливають оливу та протирають кульки бензином, або спиртом.

Потім вимірюють діаметри плям зносу кожної з трьох нижніх кульок у напрямку ковзання і перпендикулярно йому у площині, перпендикулярній осі об'єктива мікроскопа. За результат виміру приймають середнє арифметичне значення вимірів плям зносу нижніх кульок у двох напрямках.

Результати вирішення основних завдань та їхнє обговорення

Об'єктом дослідження даної роботи є процес впливу нанорозмірних вуглецевих матеріалів (фулерену C_{60} та графіту) на протизносні властивості синтетичних Mobil Jet Oil II та Mobil Jet Oil 254 олив турбореактивних авіаційних двигунів.

Предметом дослідження є основні трибологічні характеристики авіаційних олив з добавками фулеренових нанорозмірних вуглецевих матеріалів, визначені за стандартною методикою на чотирьохкульковій машині тертя.

Ресурс та надійність роботи двигунів здебільшого залежить від того, в якій мірі авіаційна олива, що застосовується, відповідає експлуатаційним вимогам її використання.

Після відкриття фулеренів з'явилася можливість створювати нові змащувальні матеріали. На таку можливість вказували як ідеальна сферична форма молекул фулеренів C_{60} , так і основа цих молекул (карбон), який у вигляді графіту давно і широко використовується в якості антифрикційного компоненту цілого класу змащувальних матеріалів. Численні експерименти, проведені останнім часом, вказують на підвищені змащувальні характеристики олив у результаті додавання до них невеликої кількості фулеренів.

Характерною особливістю сучасних реактивних авіаційних двигунів є відсутність підшипників ковзання. В якості опор валу ротора двигуна и валів приводу агрегатів застосовують підшипники кочення. Коефіцієнт тертя кочення знаходиться в межах 0,001-0,003 для кулькових і 0,002-0,005 для роликів підшипників, тоді як для підшипників ковзання ця величина в десятки разів більша (приблизно 0,01).

Ротори сучасних авіаційних двигунів добре збалансовані і, не дивлячись на їх великі швидкості обертання та значну вагу, максимальне радіальне навантаження на підшипник не перевищує 1500 Н.

Протизносні властивості досліджували за допомогою чотирьохкулькової машини тертя по ASTM D2783 за параметрами діаметр плям зносу (d) та критичного навантаження (P_R). Останній показник

характеризує максимальну величину навантаження, за якого ще не виникає металевих контактів (задирів) при терті стандартизованих металевих кульок.

При визначенні показника граничного зносу (d) тривалість випробування від моменту вмикання до моменту вимикання двигуна становить 60 ± 0.5 хв, за стандартного навантаження 20 кгс (196 Н) та кімнатної температури. Взагалі, для кожного змащувального матеріалу вказуються умови випробування в нормативно-технічній документації. У даному випадку вибрані однакові умови випробування для синтетичних олив для зручності порівняння їх властивостей.

За показник зносу (d) у міліметрах приймають середнє арифметичне значення діаметрів плям зносу нижніх кульок двох паралельних випробувань при сталому навантаженні.

Заміри діаметрів плям зносу проводяться під мікроскопом у двох взаємно перпендикулярних напрямках з точністю до 0,01 мм.

На рис. 3. показано плями зносу при нормальному терті коченні (а) підшипникової сталі ШХ-15 в середовищі оливи та аномального (б) за рахунок збільшення критичного навантаження на вузол тертя. Під час цього спостерігається в точці критичного навантаження вирив та намазування (перехід) одного матеріалу на іншу поверхню. Критичне навантаження характеризує максимально можливе навантаження роботи вузла тертя в середовищі оливи.

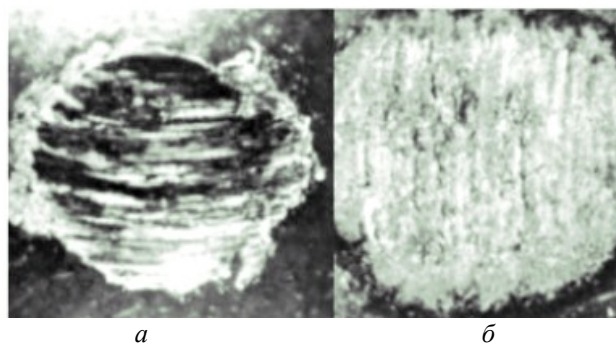


Рис. 3 – Плями зносу сталі ШХ-15 за нормального (а) та критичного навантаження (б)

Залежність діаметра плями зносу від концентрації фулеренової присадки для авіаційних олив Mobil Jet Oil II та Mobil Jet Oil 254 наведена на рис. 4.

Як показали результати досліджень, що зростання концентрації фулеренової присадки в оливах не значно впливає на величину зносу, хоча тенденція зменшення діаметра плями зносу спостерігається. Слід також відмітити, що більш інтенсивно зменшення зносу спостерігається в оливі Mobil Jet Oil II, ніж у Mobil Jet Oil 254. Природа такої дії фулереновмісних присадок поки не зовсім з'ясована.

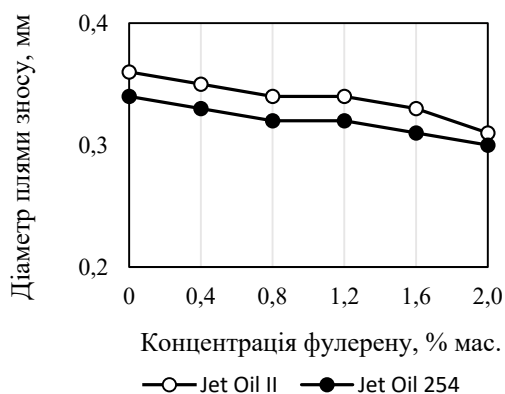


Рис. 4 – Залежність показника зносу від вмісту фулерену C_{60} в оливах

Критичним навантаженням (P_k , кгс) вважають навантаження, при якому середній діаметр плям зносу нижніх кульок знаходиться у межах значень величини граничного зносу для даного навантаження, що наводиться у таблиці ASTM D2783, збільшення якого на величину наступного навантаження за рядом навантажень викликає збільшення середнього діаметра плям зносу на величину, більшу ніж 0,1 мм.

За результат випробування приймають меншу величину критичного навантаження з двох отриманих величин (табл. 1 та табл. 2).

Таблиця 1. – Визначення критичного навантаження (P_k) для оливи Mobil Jet Oil II

Навантаження, кгс	Навантаження, Н	Середній діаметр плям зносу нижніх кульок, мм	Критичне навантаження, кгс
160	1568	0.65	-
200	1960	0.82	-
240	2352	0.94	(P_k) 240
280	2744	0.96	+

Таблиця 2. – Визначення критичного навантаження (P_k) для оливи Mobil Jet Oil 254

Навантаження, кгс	Навантаження, Н	Середній діаметр плям зносу нижніх кульок, мм	Критичне навантаження, кгс
160	1568	0.61	-
200	1960	0.65	-
240	2352	0.68	-
280	2744	0.71	-
320	3136	0.89	P_k (320)

Із вищевикладених таблиць видно, що критичне навантаження для оливи Mobil Jet Oil II за однакових умов випробування становить 2352 Н, тоді як для оливи Mobil Jet Oil 254 критичне навантаження становить 3136 Н. Це можна пояснити тим, що остання олива містить вдосконалений пакет присадок, які значно покращують її протизносні властивості.

Залежність критичного навантаження від вмісту фулеренової присадки в оливах наведена на рис. 5.

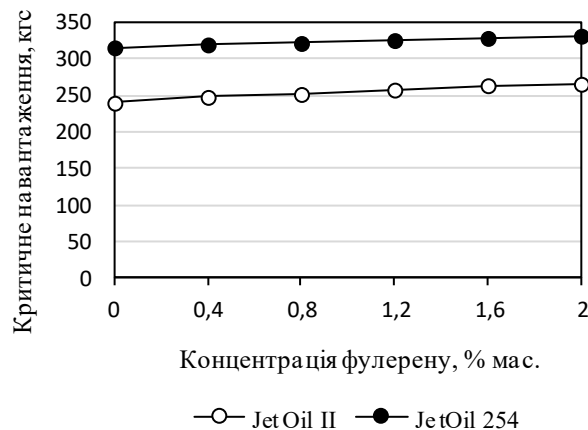


Рис. 5 – Залежність критичного навантаження від вмісту фулерену в оливах

Як показали результати досліджень, що зростання концентрації фулеренової присадки в оливах зміщує критичне навантаження в область більш високих значень. Слід також відмітити, що інтенсивність цього зростання в обох оливах практично однакова.

За сукупністю отриманих результатів можна передбачити та спрогнозувати механізм антифрикційної і протизносної дії фулеренів наступним чином. У процесі трибopolімеризації мінеральної оливи на тертьових поверхнях утворюється покриття у вигляді просторової трибopolімерної сітки, зв'язаної з підкладкою хімічними зв'язками. Це покриття захищає поверхні, що труться від безпосереднього контакту, і в той же час, будучи просторовою полімерною сіткою, утримує оливу, забезпечуючи таким чином і малозносний режим тертя, і малий коефіцієнт тертя. Цей процес може відбуватися і без присутності C_{60} . Однак без фулерену для формування трибopolімерного покриття потрібні, мабуть, більше часу і більш специфічні умови. Присутність фулерену завдяки його великій реакційній спроможності різко прискорює процес трибopolімеризації і призводить до утворення трибopolімерної сітки, у вузлах якої знаходяться переважно молекули C_{60} .

Тому трибоконтат є досить потужним реактором для різного роду структурних перетворень

і можна очікувати появи в зоні тертя тих модифікацій фулерену, які володіють підвищеною твердістю і можуть визначати властивості поверхневих плівок, що утворюються в процесі трибозносу.

Висновки

Набули подальшого розвитку експериментальними підтвердженнями теоретичні положення трибології. Як показали результати досліджень, збільшення концентрації фулеренової присадки в оливах не значно впливає на величину зносу, хоча тенденція зменшення діаметра плями зносу спостерігається. Це можливо пояснити тим, що на відміну від тертя ковзання, при якому коефіцієнт тертя зменшується в десятки разів за рахунок можливості кочення молекул фулерену по графітовій поверхні, яке характеризується значно меншим тертям в порівнянні з ковзанням графітових поверхонь одна відносно іншої в силу більш високої площі контакту в останньому випадку. Із цього слідує, що фулерени виконують роль мікропідшипників кочення, які зменшують коефіцієнт тертя ковзання. Але в підшипниках кочення кульки можливо перемелюють фулерени, як кульові млини, тому не спостерігається значного ефекту покращення протизносних властивостей олив при застосуванні фулеренових присадок.

Показано, що протизносні властивості – діаметр плями зносу (d), визначений на чотирьохкульковій машині тертя, синтетичної оливи для газотурбінних авіаційних двигунів Mobil Jet Oil II перевищує понад 5 % діаметра плями зносу оливи Mobil Jet Oil 254, що пояснюється більш високою якістю останньої та вдосконаленням і оптимізацією пакету присадок.

Встановлено, що зростання концентрації фулеренової присадки в оливах зміщує критичне навантаження в область більш високих значень для обох марок синтетичних олив.

Список літератури

1. Tóth-Nagy C., Szabó A. I. Experimental Investigation of the Friction Modifying Effects of Graphene and C60 Fullerene Used as Nanoadditives in Engine Lubricating Oil Performed on an Oscillating Tribometer. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 2023, 51(3). P. 257–262. doi: 10.3311/PPtr.20594.
2. Oleksandrenko V. P., Yefymenko V. V., Kalmykova N. G., Yefimenko O. V. Resistant Properties of Lubricating Materials with Fullerene Nano additives. *Problems of Tribology*, 2023, Vol. 28, № 2/108. P. 28–36. doi: 10.31891/2079-1372-2023-108-2-28-36.
3. Дмитриченко Н. Ф., Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. А., Куц А. І. Кінетика зношування контактних поверхонь із застосуванням присадки фулерену C_{60} до моторної оливи. *Журнал тертя та зношування*, 2009, 30 (6). С. 399–403.
4. Єфименко В. В., Єфименко О. В., Калмикова Н. Г. Контроль та визначення концентрації фулеренових

- присадок у вуглеводневих рідинах. *XV Міжнародної науково-техн. конф. «Авіа-2021»*, (20–21 квітня 2021 р.) тези доп. Київ: НАУ, 2021. С.19.10–19.13.
5. Fang J., Chen B., Pan H. Anomalous friction of graphene nanoribbons on wavy graphenes. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2015, 5(6). P. 212–215. doi: 10.1016/j.taml.2015.09.001.
 6. Дмитриченко М. Ф., Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О., Туриця Ю. О. Закономірності зношування пар тертя в умовах динамічного навантаження. *Вісник Національного транспортного університету*, 2010, № 21(2). С. 48–52.
 7. Dai W., Kheireddin B., Gao H., Liang H. Roles of nanoparticles in oil lubrication. *Tribology International*, 2016, 102. P. 88–98. doi: 10.1016/j.triboint.2016.05.020.
 8. Vacher B., Le Mogne T. Boundary lubrication: Influence of the size and structure of inorganic fullerene-like MoS_2 nanoparticles on friction and wear reduction. *Wear*, 2014, 320. P. 161–178. doi: 10.1016/j.wear.2014.09.001.
 9. Rasheed A. K., Khalid M., Rashmi W., Gupta T. C. S. M., Chan A. Graphene based nanofluids and nanolubricants – Review of recent developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 63. P. 346–362. doi: 10.1016/j.rser.2016.04.072.
 10. Zhang Z. J., Simionesie D., Schaschke C. Graphite and Hybrid Nanomaterials as Lubricant Additives. *Lubricants*, 2014, 2(2). P. 44–65. doi: 10.3390/lubricants2020044.
 11. Tóth-Nagy C., Szabó Á. I. Experimental investigation of the friction modifying effects of different nanoforms of graphene additives in engine lubricating oil. *FME Transactions*, 2022, 50(2). P. 248–259. doi: 10.5937/fme2201248T.
 12. Shahnazar S., Bagheri S., Hamid S. B. A. Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(4). P. 3153–3170. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.12.040.

References (transliterated)

1. Tóth-Nagy C., Szabó A. I. Experimental Investigation of the Friction Modifying Effects of Graphene and C60 Fullerene Used as Nanoadditives in Engine Lubricating Oil Performed on an Oscillating Tribometer. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 2023, 51(3), pp. 257–262, doi: 10.3311/PPtr.20594.
2. Oleksandrenko V. P., Yefymenko V. V., Kalmykova N. G., Yefimenko O. V. Resistant Properties of Lubricating Materials with Fullerene Nanoadditives. *Problems of Tribology*, 2023, Vol. 28, no. 2/108-2023, pp. 28–36, doi: 10.31891/2079-1372-2023-108-2-28-36.
3. Dmytrychenko N. F., Mnaçakanov R. G., Mikosyanchik O. A., Kushh A. I. Kinytyka znoshuvannya kontaktnyx poverxon iz zastosuvannyam prysadky fulerenu S_{60} do motornoyi olyvy [Kinetics of wear of contact surfaces with the use of C60 fullerene additive to motor oil]. *Journal of friction and wear*, 2009, 30 (6), pp. 399–403.
4. Yefymenko V. V., Yefimenko O. V., Kalmykova N. G. Kontrol ta vyznachennya koncentraciyi fulerenvykh prysadok u vuglevodnevykh ridynax [Control and determination of the concentration of fullerene additives in hydrocarbon liquids]. *XV Int. sci.-pract. conf. «Avia-2021»*, (April 20-21, 2021). Kyiv: NAU, 2021, pp. 19.10–19.13.
5. Fang J., Chen B., Pan H. Anomalous friction of graphene nanoribbons on wavy graphenes. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2015, 5(6), pp. 212–215, doi: 10.1016/j.taml.2015.09.001.

6. Dmytrychenko M. F., Mnaczkhanov R. G., Mikosyanchyk O. O., Turycya Yu. O. Zakonomirnosti znoshuvannya par tertya v umovax dynamichnogo navantazhennya [Patterns of wear of friction pairs under dynamic load conditions]. *Bulletin of the National Transport University*, 2010, no. 21(2), pp. 48–52.
7. Dai W., Kheireddin B., Gao H., Liang H. Roles of nanoparticles in oil lubrication. *Tribology International*, 2016, 102, pp. 88–98, doi: 10.1016/j.triboint.2016.05.020.
8. Vacher B., Le Mogne T. Boundary lubrication: Influence of the size and structure of inorganic fullerene-like MoS₂ nanoparticles on friction and wear reduction. *Wear*, 2014, 320, pp. 161–178, doi: 10.1016/j.wear.2014.09.001.
9. Rasheed A. K., Khalid M., Rashmi W., Gupta T. C. S. M., Chan A. Graphene based nanofluids and nanolubricants – Review of recent developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 63, pp. 346–362, doi: 10.1016/j.rser.2016.04.072.
10. Zhang Z. J., Simionesie D., Schaschke C. Graphite and Hybrid Nanomaterials as Lubricant Additives. *Lubricants*, 2014, 2(2), pp. 44–65, doi: 10.3390/lubricants2020044.
11. Tóth-Nagy C., Szabó Á. I. Experimental investigation of the friction modifying effects of different nanoforms of graphene additives in engine lubricating oil. *FME Transactions*, 2022, 50(2), pp. 248–259, doi: 10.5937/fme2201248T.
12. Shahnazar, S., Bagheri, S., Hamid, S. B. A. Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(4), pp. 3153–3170, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.12.040.

Відомості про авторів (About authors)

Єфименко Валерій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Національний авіаційний університет, доцент кафедри хімії і хімічної технології; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4903-6173>; e-mail: e.valerij.ua@gmail.com

Valerij Yefymenko – candidate of technical sciences, associate professor, National Aviation University, associate professor of the Department of Chemistry and Chemical Technology; Kyiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-4903-6173>; e-mail: e.valerij.ua@gmail.com

Олександренко Віктор Петрович – доктор технічних наук, професор, Хмельницький національний університет, декан факультету інженерії, транспорту та архітектури; м. Хмельницький, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2404-2104>; e-mail: oleksandrenko_vp@ukr.net

Viktor Oleksandrenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Khmelnytskyi National University, Dean of the Faculty of Engineering, Transport and Architecture; Khmelnytskyi, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2404-2104>; e-mail: oleksandrenko_vp@ukr.net

Калмыкова Наталія Григорівна – аспірант PhD, Національний авіаційний університет, аспірант кафедри хімії і хімічної технології; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5553-5721>; e-mail: kalmykova82@ukr.net

Natalii Kalmykova – PhD candidate, National Aviation University, graduate student of the Department of Chemistry and Chemical Technology; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5553-5721>; e-mail: kalmykova82@ukr.net

Руденко Віра Миколаївна – доктор технічних наук, професор, Національний авіаційний університет, професор кафедри хімії і хімічної технології; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4052-6053>; e-mail: veranikrud@gmail.com

Vira Rudenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Aviation University, Professor of the Department of Chemistry and Chemical Technology; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4052-6053>; e-mail: veranikrud@gmail.com

Єфименко Олександр Валерійович – аспірант, Національний авіаційний університет, аспірант кафедри хімії і хімічної технології; м. Київ, Україна; e-mail: S94000@ukr.net

Oleksandr Yefymenko – graduate student, National Aviation University, graduate student of the Department of Chemistry and Chemical Technology; Kyiv, Ukraine; e-mail: S94000@ukr.net

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Єфименко В. В., Олександренко В. П., Калмыкова Н. Г., Руденко В. М., Єфименко О. В. Перспективи застосування фулеренових присадок у сучасних авіаційних оливах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 3 (17). С. 17-25. doi:10.20998/2413-4295.2023.03.03.

Please cite this article as:

Yefymenko V., Oleksandrenko V., Kalmykova N., Rudenko V., Yefymenko O. Prospects for the use of fullerene additives in modern aviation oils. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, no. 3(17), pp. 17-25, doi:10.20998/2413-4295.2023.03.03.

*Надійшла (received) 08.08.2023
Прийнята (accepted) 08.09.2023*