

УДК 621.793.002.3-419

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.36

О.У. Стельмах¹, Р.Є. Костюнік¹, В.А. Радзієвський¹, В.С. Бондар¹, А.Л. Майстренко²
О.Д. Клименко³

Національний авіаційний університет¹
ІНМ НАН України ім. В.Н. Бакуля НАН України²
Луцький національний технічний університет³

МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНО ЕФЕКТИВНИХ ГІБРИДНИХ ПАР ТЕРТЯ КОЧЕННЯ «КЕРАМІКА-СТАЛЬ» В РІЗНИХ УМОВАХ ЗМАЩУВАННЯ

Наведено результати дослідження та зроблено порівняльну оцінку інтенсивності зношування гібридних модельних трибосистем кочення «сталь-кераміка-сталь», з кулями з різних керамічних матеріалів, що дозволило виконати їх ранжування за ефективністю та вдосконалити технологію виготовлення тіл кочення для гібридних шарикопідшипників.

Ключові слова: кераміка, шарикопідшипник, тертя кочення, технології спікання, зношування

А.У. Стельмах, Р.Е. Костюник, В.А. Радзиевский, В.С. Бондарь, А.Л. Майстренко,
А.Д. Клименко

МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКО-ЭФФЕКТИВНЫХ ГИБРИДНЫХ ПАР ТЕРТЯ КАЧЕНИЯ «КЕРАМИКА-СТАЛЬ» В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ СМАЗКИ

Приведены результаты исследования и сделана сравнительная оценка интенсивности изнашивания гибридных модельных трибосистем качения «сталь-керамика-сталь», с шарами из разных керамических материалов, что позволило выполнить их ранжирование по эффективности и усовершенствовать технологию изготовления тел качения для гибридных шарикоподшипников.

Ключевые слова: керамика, шарикоподшипник, трение качения, технологии спекания, изнашивание

A.U. Stelmakh, R.E. Kostyunik, V.A. Radzievsky, V.S. Bondar, A.L. Maistrenko,
A. Klymenko

METHODOLOGY of DETERMINATION of TRIBOLOGICALLY EFFICIENT HYBRID RODS Of ROLLING FRICTION «CERAMIC – STEEL» At DIFFERENT GREASING CONDITION

The results of the study are presented and a comparative assessment of the wear intensity of hybrid model rolling tribosystems "steel-ceramics-steel" with balls made of different ceramic materials is made, which made it possible to rank them in terms of efficiency and improve the technology for manufacturing rolling elements for hybrid ball bearings.

Key words: ceramics, ball bearing, rolling friction, sintering technology, wear

Постановка проблеми.

Особливе місце серед областей застосування технічної кераміки займають високонавантажені вузли тертя, насамперед це підшипники ковзання і кочення які можуть бути виготовлені повністю з кераміки чи комбінованого (гібридного) типу, тобто з металу та кераміки. Вони мають дуже унікальні властивості, такі як висока міцність і твердість, хімічна і термічна стійкість, низька адгезійна здатність. Висока коштовність таких підшипників компенсується більш високими довговічністю (у 3...10 разів) та зносостійкістю (у 10 разів) в порівнянні з металевими, котрі втрачають свою працездатність при температурах експлуатації 600...800°C. В даний час для їх виробництва широко використовуються керамічні матеріали на основі V_4C , Si_3N_4 та Al_2O_3 . Так нітрид кремнію (Si_3N_4) є одним з основних матеріалів при створенні керамічних підшипників кочення, хоча зберігається інтерес і до таких керамічних матеріалів як оксид алюмінію (Al_2O_3), карбід кремнію (SiC) та діоксид цирконію (ZrO_2). Особливо привабливим в керамічних парах тертя є той факт, що вже на стадії отримання матеріалу існує можливість введення в нього твердих мастил, так зокрема, в парах тертя на основі Si_3N_4 в якості твердого мастила використовують графіт та нітрид бору. Виробництво гібридних шарикопідшипників дозволяє використовувати переваги керамічних тіл з високою якістю обробки поверхонь сталевих кілець. Така «гібридна» конструкція дозволяє високонавантаженим керамічним підшипникам забезпечувати більш тривалий термін роботи та кращі робочі характеристики при високих швидкостях обертання. Низький коефіцієнт тертя покращує експлуатацію при мінімальному змащуванні та підвищує як термін працездатності, так і швидкісні характеристики пар тертя. На практиці використовуються

© О.У. Стельмах, Р.Є. Костюнік, В.А. Радзієвський, В.С. Бондар, А.Л. Майстренко
О.Д. Клименко

керамічні матеріали, що виготовляють за по різними технологіями і відрізняються з одного боку щільністю, розміром зерна, складом та твердістю, а з іншого боку – вартістю та можливістю масового використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Авторами даної роботи попередньо отримані численні експериментальні дослідження процесу зношування керамічних матеріалів на лабораторній інформаційно-випробувальній системі АСК-01 [1,2], котра реалізує одностороннє тертя кочення твірною поверхнею циліндричного контрзразка по площині нерухомого сталевого зразка, що відповідає моделі трибологічної випробувальної систем "колодка-кільце" за німецьким промисловим стандартом G176-03 ASTM чи ISO 7148-2 (фізична модель лінійного контакту). За розробленою методикою випробувань п'яти типів керамічних матеріалів при терті ковзання в умовах змащування (масло Turbo Oil 2380) та при сухому терті проведена порівняльна оцінка інтенсивності зношування модельної гібридної пари тертя. Для трибологічних випробувань зразки керамічних контртіл виготовлялись у вигляді кілець розміром $\varnothing 35 \times \varnothing 21 \times 5$ мм з використанням способу електроспінання під тиском (ЕСД), розробленого в ІНМ ім. В.Н. Бакуля НАН України [3], та відомих технологічних способів (гаряче пресування, реакційне спікання та вільне спікання [4-9]).

Матеріал штатних плоских (нерухомих) зразків - сталь ШХ15, шорсткість поверхонь попередньо доводилась на притирах з залученням алмазних паст і не перевищує за R_a 0,02 мкм.

На підставі отриманих результатів випробувань можливо зробити висновок про працездатність гібридних підшипників ковзання в парах тертя з керамічними матеріалами основі карбідів бору чи кремнію для використання не тільки в мастильному середовищі, а й у екстремальних умовах тертя.

Так застосування в гібридних парах тертя керамічних матеріалів на основі ZrO_2 і Al_2O_3 , в порівнянні з контртілами на основі B_4C , SiC та Si_3N_4 , де спостерігається збільшення інтенсивності зношування сталі до 140 разів. При цьому, відсутність змащування гібридної пари тертя « B_4C – сталь ШХ15» призводить до зростання інтенсивності зношування кераміки тільки в 1,5 рази, в той же час, інтенсивність зношування сталі зростає до 40 разів. Більш інтенсивне зношування сталі в парах тертя з матеріалами на основі ZrO_2 і Al_2O_3 ймовірно можуть бути пояснені розвиненістю поверхні робочої частини контрзразків у порівнянні з контр зразками з B_4C , SiC та Si_3N_4 , що обумовлено великою величиною зерен в спечених матеріалах, а отже і їх більш високою абразивною здатністю.

Об'єкти і методи дослідження. В якості змащувального середовища використовувався авіаційний гас ТС-1, як малов'язке середовище та моторне синтетичне масло ИПМ-10.

Доведення робочих поверхонь штатних плоских зразків (вільне кільце серійного упорного шарикопідшипника 8211, сталь ШХ15) проводились на плоскошліфувальному верстаті після чого за допомогою чавунних притирів з використанням алмазних паст проводилось чистове полірування до шорсткості R_a 0,02. Така висока ступінь доведення робочих поверхонь дозволяє мінімізувати можливість мікрорізання та підвищує ймовірність адгезійного зношування шляхом мікросхоплення вторинних структур у граничних шарах змащування.

Результати вимірювань поліровки робочих поверхонь штатних плоских зразків їх контролю якості, лінійне зношування досліджувались на лазерному скануючому диференційно-фазовому мікроскопі-профілометрі ЛСДФМП (рис. 1а)), растровому електронному мікроскопі РЕМ-10БИ (рис. 1б)) та профілографі «Калібр - М201» у вигляді профілограм, 3D графічних зображень та параметрів шорсткості заносились в базу.

До та після проведення лабораторних триботехнічних випробувань проведено металографічні дослідження, а саме фізико-хімічний експрес-аналіз робочих поверхонь двох типів дослідних керамічних куль на растровому електронному мікроскопі РЕМ-10БИ, результати заносились в базу даних, для подальшого порівняння та аналізу.

Постановка завдання.

Мета роботи полягає в проведенні порівняльної оцінки зносостійкості двох типів керамічних матеріалів при терті коченні модельного упорного шарикопідшипника, де точковий контакт реалізували дослідні кулі, виготовлені з карбїду бора та карбїду кремнію [10,11], із плоским рухомим сталевим кільцем, при сухому терті та в умовах змащування, шляхом проведення лабораторних триботехнічних випробувань.

За результатами досліджень виконати ранжування за трибологічною ефективністю керамічних матеріалів для подальшого вдосконалення технології виготовлення тіл кочення дослідних гібридних шарикоідшипників.



Рис. 1. Зовнішній вигляд приладів для проведення досліджень робочих поверхонь тертя: а) лазерний скануючий диференційно-фазовий мікроскоп-профілометр ЛСДФМП; б) растровий електронний мікроскоп РЕМ-106И

Для досягнення даної мети вирішувались такі завдання:

- модернізувати прилад однонаправленого тертя кочення КИИГА-1М;
- розробити і створити методики досліджень впливу змащувальних та конструкційних матеріалів у трибосистемах кочення, у тому числі при виборі кераміки для гібридних підшипників;
- провести апробацію модернізованого приладу однонаправленого тертя кочення КИИГА-1М та розробленої методики випробувань конструкційних матеріалів куль модельного шарикоідшипника за їх протизносними властивостями;
- виконати за результатами лабораторних випробувань порівняльну оцінку зносостійкості двох типів керамічних матеріалів при терті коченні модельного упорного шарикоідшипника;
- надати рекомендації щодо подальшого вдосконалення технології виготовлення досліджуваних тіл кочення для гібридних шарикоідшипників.

Викладення основного завдання.

Для досягнення поставленої мети на першому етапі роботи було створено алгоритм (рис. 2), та розроблено методику проведення порівняльних лабораторних триботехнічних випробувань дослідних зразків куль, виготовлених з двох типів керамічних матеріалів (карбіду бора і карбіду кремнію), при терті кочення по рухомому кільцю (сталь ШХ15) в умовах сухого тертя та при змащуванні. Проведена апробація розробленого та створеного триконтактного випробувального вузла тертя кочення на базі модернізованого лабораторного приладу тертя КИИГА-1М, де в якості випробувальних зразків використовувались штатні кільця упорних шарикоідшипників 8211, що серійно випускаються.

Лабораторні триботехнічні випробування модельної пари тертя з керамічними тілами кочення

Для експериментального визначення зносостійкості двох типів керамічних матеріалів виготовлених зразків куль, щодо подальшого застосування в якості дослідних гібридних шарикоідшипників, що працюють в реальних умовах змащування удосконалена схема випробувального вузла лабораторного приладу тертя кочення (рис. 3,а)). Конструкція механізму модельного вузла тертя та кожної позиції деталей камери попередньо продумана та розроблена з урахуванням: швидкості кочення, навантаження, температуру середовища, режим роботи та виконана на основі відомого лабораторного приладу КИИГА-1 [12-14], що моделює точкову геометрію контакту «куля – плоска поверхня». Лабораторний прилад однонаправленого тертя кочення, принципова схема котрого представлена на рисунку 1, складається з модельного випробувального вузла тертя, головного приводу та вузла осьового навантаження важільного типу. Головний привід виконано у вигляді системи шківів 1 та електродвигуна 2. Для забезпечення плавності пускових режимів роботи і автоматичного відключення головного приводу за таймером модернізований прилад тертя був оснащений модулем управління 3. Вузол осьового навантаження важільного типу 5 дозволяє здійснювати високі початкові контактні напруження - до 2500МПа.

Головною частиною лабораторного приладу являється випробувальний вузол тертя кочення. Модельна пара тертя складається з нижнього плоского зразка 6 (зішліфована та полірована поверхня кільця упорного шарикопідшипника 8211), що обертається в процесі випробувань, сепаратора 8, дослідних куль 7 та нерухомого кільця 4 того ж підшипника 8211, котрий своєю штатною доріжкою кочення забезпечував центрування всіх трьох дослідних куль по одній траєкторії бігової доріжки плоского рухомого зразка 6.

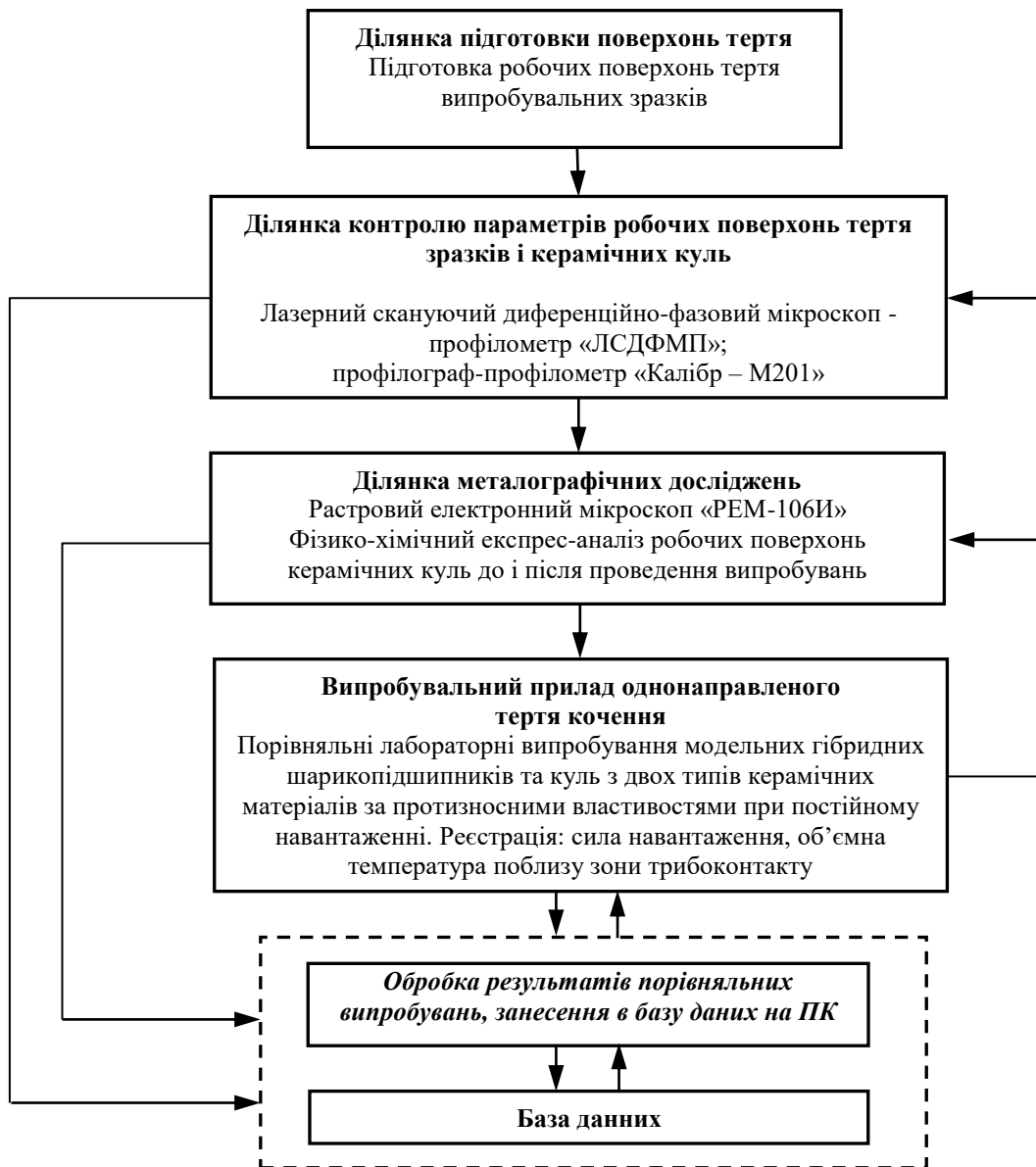


Рис. 2. Алгоритм проведення порівняльних випробувань гібридних шарикопідшипників

Сепаратор 8 модельного шарикопідшипника виготовлявся спеціально із трьома вікнами еквідистантного позиціонування трьох куль. Така конструкція сепаратора забезпечує рівномірне розподілення навантаження та роботи швидку та зручну заміну модельних куль практично без їх зміщення після кожного випробування.

На передній панелі бортового модуля управління розташовано індикацію контролю значень текучої об'ємної температури випробувального мастильного матеріалу, частоти обертання головного валу приводу дослідного зразка та таймеру зворотного рахунку часу щодо автоматичної зупинки випробувань (рис. 3, б).

Технічні характеристики приладу тертя та умови випробувань:

Камера	герметична;
Обертання	однонаправлене;
Швидкість обертання, об/хв.....	1500;
Об'єм середовища в камері, мл.....	150 – 200;
Максимальне осьове навантаження, Н.....	2000;
Матеріал плоских зразків.....	сталь ШХ15;
Шорсткість плоских зразків за Ra, мкм.....	≤ 0,02;
Критерій зношування.....	глибина доріжки тертя кочення, об'єм та маса зношеного матеріалу куль;
Відносна похибка випробувань, %.....	6 – 13.

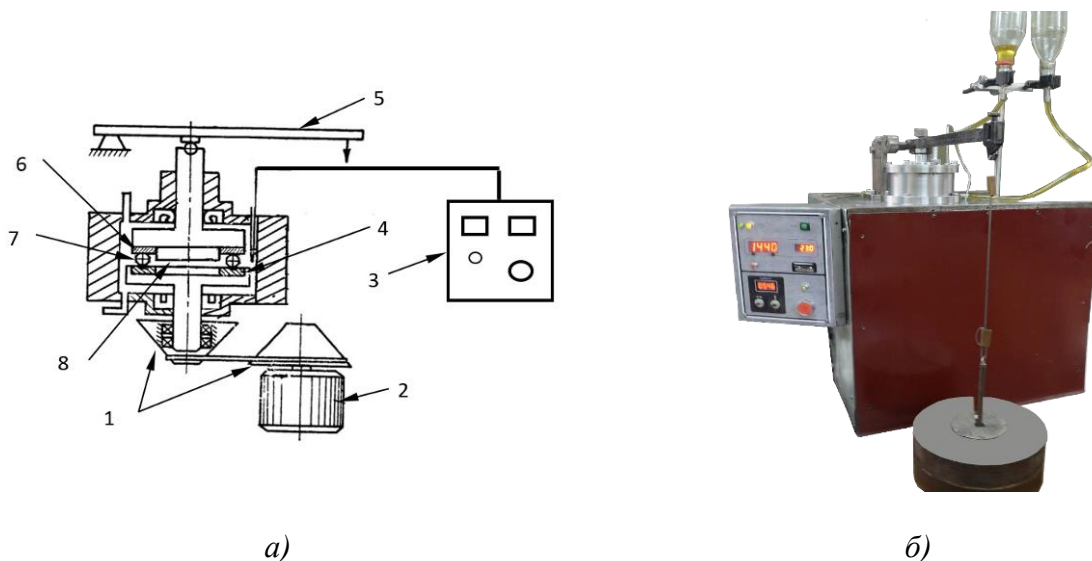


Рис. 3. Модернізований прилад однонаправленого тертя кочення КИИГА-1 [4]:
а) принципова схема; б) зовнішній вигляд

Методика проведення випробувань

Камера, деталі кріплення зразків та самі зразки ретельно промивались в бензині Б-70 та протиралися чистим ганчір'ям насухо. На посадковому місці утримувача дослідного зразка проміжного валу 1 (рис. 4, а)) встановлювався нерухомий зразок 2 - кільце упорного шарикопідшипника 8211 вгору поверхнею з центруючою штатною доріжкою кочення. На проміжному валу, на його верхній поверхні фіксувався рухомий зразок 3 – з плоскою поверхнею вгору, з раніше підготовленою шліфованою та полірованою робочою поверхнею (рис. 4, б)). На доріжку кочення рухомого плоского зразку позиціювався сепаратор із дослідними зразками куль (рис. 4, в)).

Сепаратор з кулями (рис. 4, в)) встановлювався на робочу поліровану поверхню плоского зразка (рис. 4, б)), на котрий встановлювався утримувач із зразком направляючою доріжкою на дослідні кулі (рис. 4, а)), після чого камера герметично закривалась та заповнювалась мастильним матеріалом. Осьове навантаження випробувального вузла тертя здійснювалося за допомогою гирок та штатної системи важільної типу.

На передній панелі модулю управління за допомогою відповідних кнопок встановлювався час тривалості проведення випробувань, що забезпечував таймер пуску та зупинки електродвигуна головного приводу валу лабораторного приладу тертя. Оптимальна тривалість випробувань визначалася експериментальним шляхом в залежності від мастильного середовища і рівня навантаження та не перевищувала 6 годин. Після закінчення часу випробувань головний привід автоматично вимикався та охолоджувався до кімнатної температури для безпечного вилучення з камери приладу дослідних зразків.

Апробація методики випробувань проводилась з використанням еталонних сталевих куль діаметром $12,700 \pm 0,0005$ мм серійного шарикопідшипника 8211 (не нижче четвертого класу точності) в середовищі авіагасу ТС-1 (рис. 5). Роботи відносно попередньої підготовки робочих

поверхонь плоских рухомих зразків (кільце серійного упорного шарикопідшипника 8211, сталь ШХ15), проводились на плоско шліфувальному верстаті з наступним фінішним доведенням на чавунних притирах шляхом використання алмазних паст до шорсткості $Ra < 0,02$ мкм. Контроль вихідної шорсткості у процесі фінішного полірування плоских зразків проводився на лазерному скануючому диференційно-фазовому мікроскопі «ЛСДФМП» у вигляді графічних зображень та параметрів шорсткості (рис.8, табл.3). Така висока ступінь доведення робочих поверхонь дозволить виявити ймовірність мікрорізання а підвищує ймовірність адгезійного зношування шляхом мікросхоплювання вторинних структур в граничних шарах мастила.

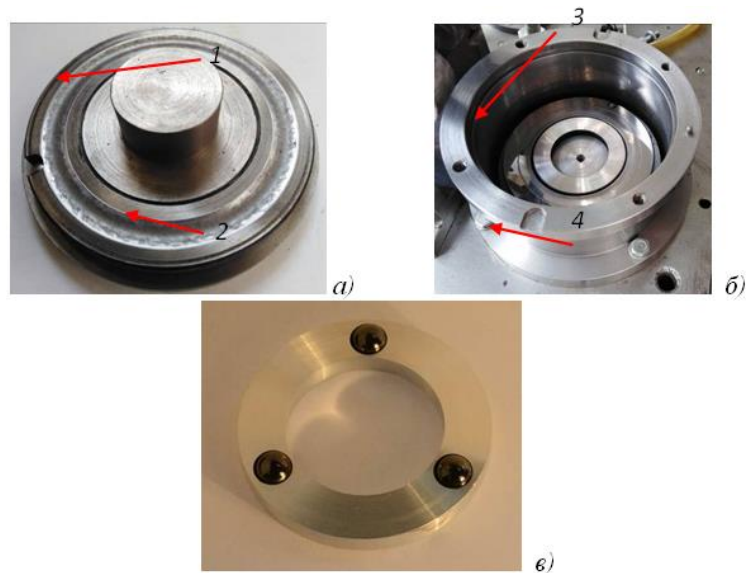


Рис. 4. Зовнішній вигляд деталей випробувального вузла тертя: а) - кріплення нерухомого сталюго зразка: 1 – утримувач дослідного зразка; 2 - нерухомий зразок (ШХ15) з центруючою доріжкою; б) - камера з встановленим рухомих нижнім плоским кільцем шарикопідшипника 3 в камері 4; в) - сепаратор з встановленими модельними зразками керамічних куль

Порівняльна оцінка зносостійкості керамічних матеріалів зразків куль в умовах змащення при сухому терті кочення проводилась з рівною кількістю повторних випробувань (не менше трьох).

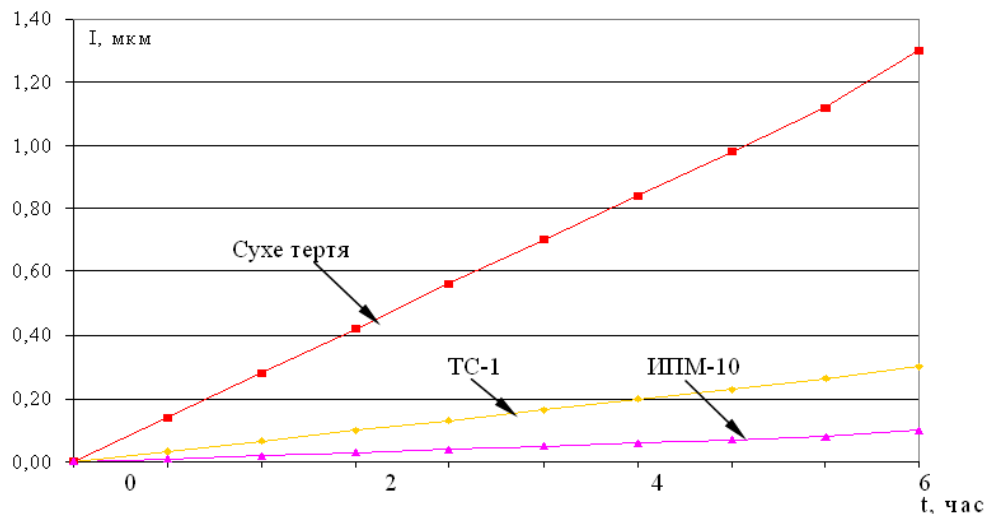


Рис. 5. Інтенсивність зношування еталонної пари тертя сталь ШХ15 по ШХ15 у часі у різних середовищах

Застосування керамічних матеріалів при виготовленні куль для гібридних шарикопідшипників потребує нових підходів до методик лабораторної оцінки їх довговічності та зносостійкості, оскільки ці матеріали мають малу масу і значно більш високу твердість, ніж підшипникова сталь ШХ15. Тому у процесі відпрацювання і апробації методики лабораторних триботехнічних випробувань зразків серійних куль шарикопідшипника 8211 і дослідних зразків керамічних куль були визначені початкові умови, а саме: - швидкість тертя кочення; - час проведення випробувань; - осьове навантаження в різних середовищах: - у середовищі авіагасу ТС-1; в мастилі ИПМ-10 та в умовах сухого тертя. Критеріями зношування модельної трибосистеми кочення слугували: величина лінійного зношування робочої поверхні плоского рухомого полірованого зразка та величина зміни маси модельних куль.

Випробувались зразки двох типів керамічних матеріалів: карбід бора и карбід кремнію, з яких були виготовлені кулі для модельного вузла тертя кочення, діаметром $12,700 \pm 0,0005$ мм, фізико-механічні властивості котрих представлені в таблиці 1.

Табл. 1

Фізико-механічні властивості керамічних матеріалів [1,2]

Матеріал керамічної кулі	Спосіб спікання	Щільність, г/см ³	Модуль пружності Е, ГПа	Твердість по Кнуппу 9,8 Н, ГПа	Міцність на вигин, МПа
SiC	Реакційне спікання: T=2150°C; $\tau_{\text{вигр.}}=20$ хв.	3,03-3,10	390-410	12-15	230-245
B ₄ C	Гаряче пресування: P=35 МПа; T=2200°C $\tau_{\text{вигр.}}=20$ хв.	2,45-2,49	410-430	26-27	330-340

Дослідження якості полірування робочих поверхонь зразків керамічних куль проводились на растровому електронному мікроскопі РЕМ 106И (рис. 6-7), а параметри їх шорсткості і мікрогеометрії плоских рухомих зразків визначалися на «ЛСДФМП», представлені у вигляді графічних зображень та параметрів шорсткості (рис. 8).

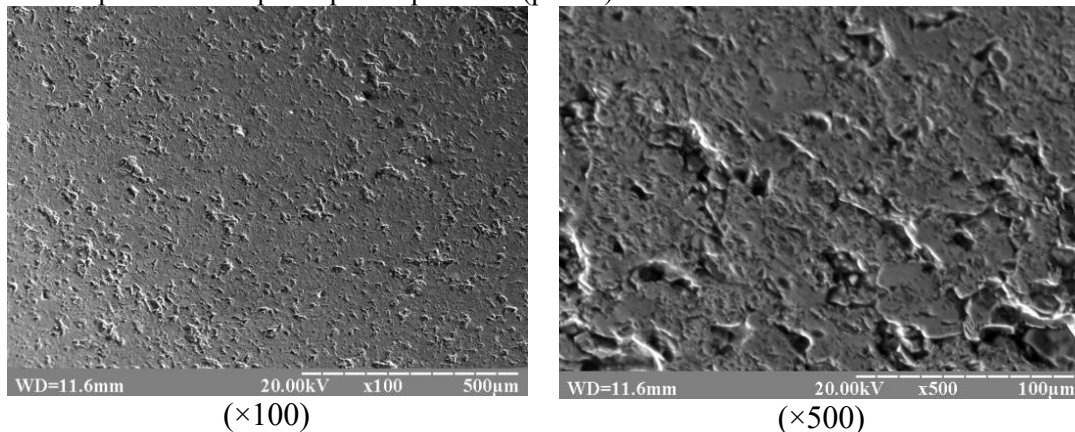


Рис. 6. Зовнішній вигляд поверхонь куль з карбиду кремнію (SiC)

У зв'язку з зношуванням матеріалу поверхонь модельної пари тертя «шар - плоска поверхня» у процесі тертя, відбувається швидке зменшення контактних напружень, що, в свою чергу, утруднює виконати коректу оцінку фактичних значень поточних контактних питомих напружень. Тому величина розрахункових максимальних початкових контактних напружень, що характерна пусковим значенням, що визначаються за формулою Г. Герцу [15-17] за допомогою програмного забезпечення (вікно інтерфейсу представлено на рис. 9) були головним критерієм початкових умов (таблиця 2). Тобто величини максимальних контактних напружень, що визначаються величиною навантаження, фізико-механічними властивостями матеріалів та

геометрією контакту, котрі виникають в одному контактї за схемою «куля - плоска поверхня», приймалися, як головними початковими умовами тертя кочення при однаковій і постійній частоті обертання валу.

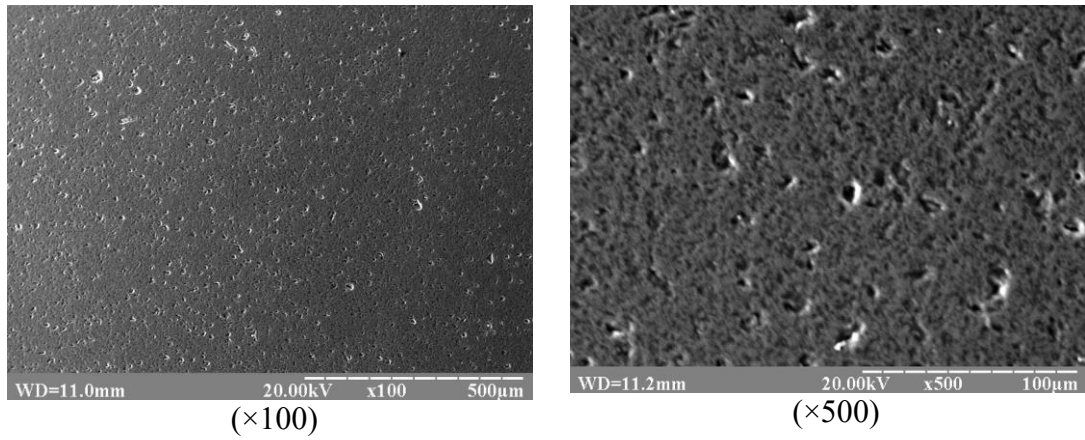
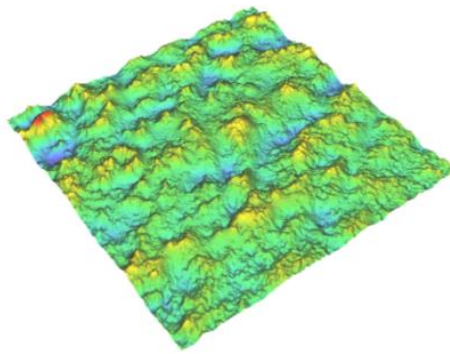


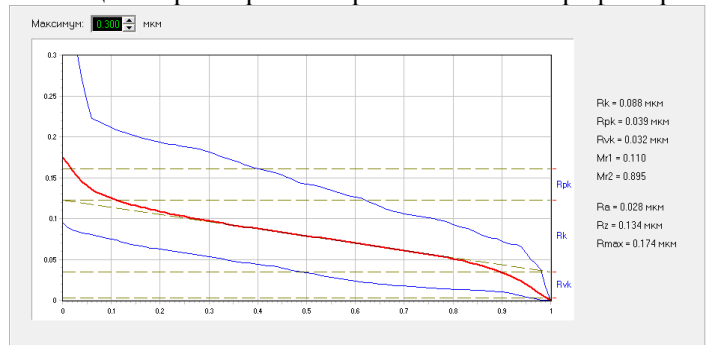
Рис. 7. Зовнішній вигляд поверхонь куль з карбиду бора (В₄С)



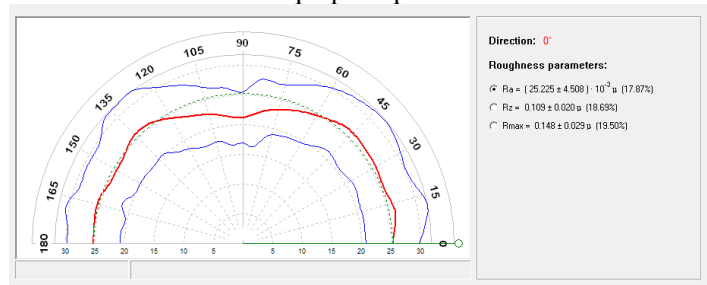
Тривимірний вигляд робочої поверхні

Параметри	Кількість измерений	Среднее значение	Среднеквадратическое отклонение	Доверительные границы интервала значений параметра при P=0.970
Ra, мкм	512	0.028	6.366 · 10 ⁻³ (22.73%)	0.012 (42.85%)
Rz, мкм	512	0.134	0.029 (21.42%)	0.054 (40.38%)
Rmax, мкм	512	0.174	0.051 (29.12%)	0.096 (54.83%)
Rk, мкм	512	0.078	0.022 (28.23%)	0.042 (53.22%)
Rvk, мкм	512	0.035	0.017 (48.07%)	0.032 (90.62%)
Prk, мкм	512	0.043	0.023 (54.00%)	0.044 (101.79%)
Sp, мкм	512	33.378	7.482 (22.41%)	14.103 (42.25%)

Таблиця з параметрами шорсткості за 512 профілограмам



Розподілення шорсткості Аббота-Файрстоуна за 512 профілограмам



Векторне розподілення робочої поверхні за 512x512 профілограмам

Рис. 8. Результати дослідження вихідної поверхні рухомого зразка (сталь ШХ15) на ЛСДФМП

Після проведення триботехнічних випробувань куль на зносостійкість, виготовлених з керамічних матеріалів, отримані результати досліджень шляхом вимірювання параметрів доріжки кочення визначався знос шляхом профілографування та математичних розрахунків, які у вигляді величини середнього лінійного зносу матеріалу заносились до таблиці. Середнє значення масового зносу зразків куль оцінювалась з точністю 0,0001 г., за допомогою аналітичних ваг моделі ВЛА-200г-М.



Рис. 9. Зовнішній вигляд контакту та вікна інтерфейсу програми розрахунку початкових контактних напружень точкового контакту

Порівняльна оцінка зношування плоского рухомого зразка (ШХ15) та зносостійкості конструкційних матеріалів куль, як при терті кочення в мастильному середовищі, так і при сухому терті, проводилася на підставі графіків, де на осі абсцис відкладався час випробувань, а на осі ординат – глибина чи об’єм зношеного матеріалу.

У зв’язку з тим, що руйнування керамічних тіл кочення (куль) в шарикопідшипнику найбільш небезпечний фактор для будь-якого ротора та машини в цілому, то проведення порівняльних випробувань керамічних матеріалів при виготовленні куль потребує нових підходів до методики лабораторної оцінки впливу компонентів гібридних шарикопідшипників на їх довговічність та зносостійкість.

Табл. 2.

Розрахункові параметри

Пара тертя (куля - поверхня)	E ₁ , ГПа	E ₂ , ГПа	ν ₁	ν ₂	E _{пр} , МПа	M, кг	F(N)	H _к , Мм	S _к , mm ²	S _{gm} (МПа)
ШХ15 – ШХ15	211	211	0,3	0,3	115934	1	16,345	0,0012	0,04817	339,269
						10	163,45	0,0056	0,22361	730,934
						20	326,9	0,00889	0,35497	920,92
В ₄ С – ШХ15	211	430	0,3	0,21	151549	1	16,345	0,00101	0,04029	405,608
						10	163,45	0,00468	0,18704	873,857
						20	326,9	0,00744	0,29691	1100,99
SiC – ШХ15	211	410	0,3	0,25	151456	1	16,345	0,00101	0,04031	405,443
						10	163,45	0,00469	0,18712	873,501
						20	326,9	0,00744	0,29703	1100,54

Оцінка зношування керамічних куль в умовах тертя кочення в середовищі авіа гасу

ТС-1

Вимірювання зношування робочих поверхонь плоских нерухомих зразків, а саме геометричних параметрів кожної доріжки тертя та визначення шорсткості робочих поверхонь, проводились за допомогою профілографа - профілометра «Калібр - М201» і лазерного мікроскопу ЛСДФМП. Результати наведені у таблиці 3.

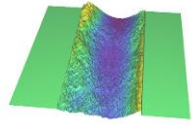
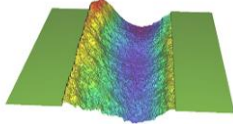
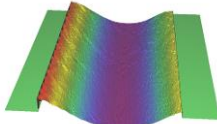
Вимірювання маси серійних куль (сталь ШХ15) та дослідних куль з двох типів керамічних матеріалів, виконувались на аналітичних вагах моделі ВЛА-200г-М з точністю до 0,0001 г. Результати зважування маси до та після проведення випробувань наведено у таблиці 4. Перед

зважуванням зразки куль ретельно промивали в бензині Б-70 та и осушувалися при температурі +100°C на протягом однієї години.

На (рис. 10-11) представлені фотографії поверхні тертя куль та плоских нерухомих зразків с продуктами зношування для кожного типу керамічних матеріалів після триботехнічних випробувань при терті кочення в авіагасі ТС-1 .

Табл. 3.

Результати вимірювань розмірів доріжки тертя кочення на плоскому рухомому зразку

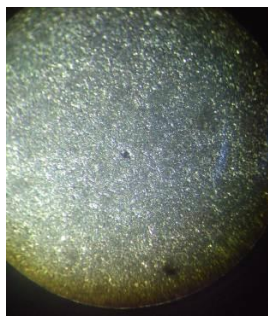
Матеріали зразків пари тертя	Лінійний знос, мкм	3D зображення сліду зношування	Температура $T_{сер}$ °C (початок-кінець)
ШХ15 – ШХ15	0,30		20-26
SiC – ШХ15*	1,28		19-23
B ₄ C – ШХ15	2,53		20-26

*- відбулась примусова зупинка випробувань через 15 хв., через виникнення надмірних вібрацій, стуку та шуму

Табл. 4.

Результати зважування маси досліджуваних зразків куль

Вимірювання зразків куль	№ куль	Тип матеріалу кулі		
		Сталь (ШХ15)	Карбід кремнію (SiC)	Карбід бору (B ₄ C)
Маса зношеного матеріалу, г	1	0,0061	0,0078	0,0006
	2	0,0094	0,0005	0,0018
	3	0,0091	0,0003	0,0006



Куля (SiC)

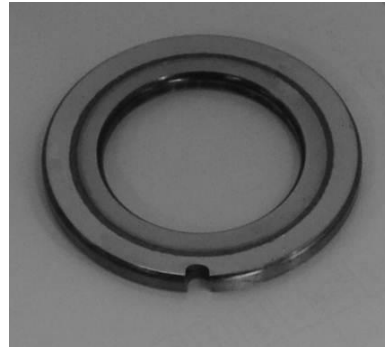


Плоский зразок (ШХ15)

Рис. 10. Пара тертя: куля - карбіду кремнію; плоский зразок – сталь ШХ15 (через 15 хвилин випробування прилад примусово зупинено – стук, сильна вібрація)



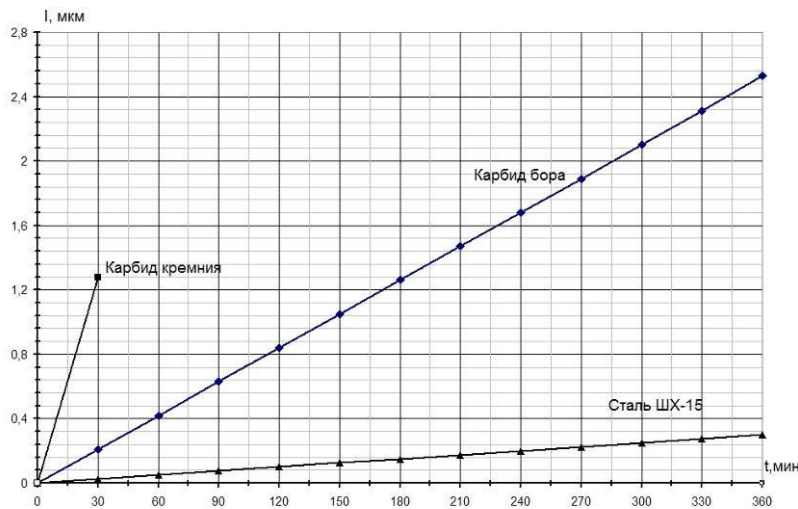
Куля (В4С)



Плоский зразок (ШХ15)

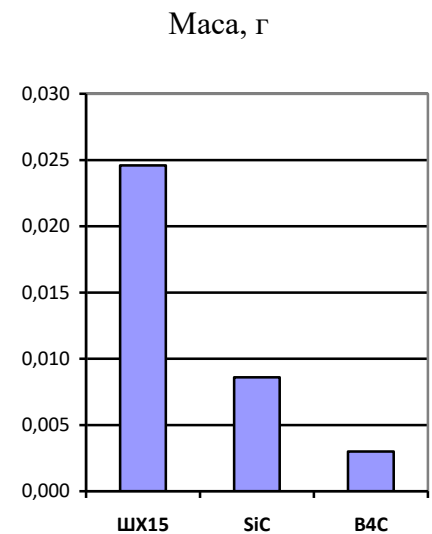
Рис. 11. Пара тертя: куля - карбід бору В4С; плоский зразок – ШХ15

Середня сумарна втрата маса трьох куль після тертя кочення в авіагасі ТС-1 для: штатних куль ШХ15 – 0,0246 г.; SiC – 0,0086* г.; В4С – 0,003 г.



*SiC – випробувальний прилад примусово зупинено через 15 хвилин після пуску. Через стук в камері та підвищену вібрацію системи навантаження.

а)



б)

Рис.12. Лінійне зношення плоского сталюго зразка (а) та діаграми масового зносу 3-х куль з різних матеріалів у середовищі авіагасу ТС-1 під навантаженням 490 Н.

Аналіз показав, що поверхневий шар кулі з реакційно-спеченого карбїду кремнію руйнується в результаті вимивання вільного кремнію з міжзеренного простору та оголення гострих і дуже твердих зерен карбїду кремнію, утворюючи в результаті абразивну поверхню що зношує сталєне кільце ШХ15 (рис.10). На поверхні кулі з гаряче-пресованого карбїду бору утворюються ізольовані каверни, спричинені локальним схоплюванням із поверхнею сталєвого кільця. При цьому втрата маси куль з карбїду бору в 2,87 рази менше ніж куль з карбїду кремнію і в 8,2 рази менше ніж куль зі сталі ШХ15.

Оцінка зношування керамічних матеріалів при терті кочення в мастильному середовищі ИПМ-10.

Для визначення величини зношування плоского зразка після випробування двох типів керамічних зразків куль в умовах тертя кочення в маслі ИПМ-10 також використовувався метод профілографування («Калїбр - М201») та лазерний мікроскоп ЛСДФМП). Результати вимірювань плоских зразків для різних типів матеріалів модельної пари тертя наведено у табл. 5.

Масу досліджуваних куль до і після випробувань визначали ваговим методом з точністю 0,0001 г., результати наведені у таблиці 6.

На (рис. 13-14) представлені зображення робочих поверхонь куль та плоских рухомих зразків кожного типу керамічних матеріалів після проведення порівняльних триботехнічних випробувань.

Аналіз показав, що поверхневий шар кулі з карбіду кремнію руйнується в результаті вимивання вільного кремнію з міжзеренного простору та оголення гострих і дуже твердих зерен карбіду кремнію, утворюючи в результаті абразивну поверхню, що зношує сталеве упорне кільце (рис.13). На поверхні кулі з карбіду бору в результаті дії великих контактних напружень утворюються ізольовані кратери, обумовлені локальним схоплюванням із поверхнею сталевих кільця з наступним крихким сколом (рис.14). При цьому втрата маси кулі з карбіду бору в 15 раз менше ніж кулі з карбіду кремнію і в 9 раз менше ніж штатних сталевих кулі (ШХ15).

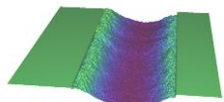
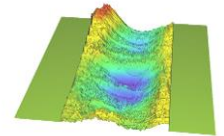
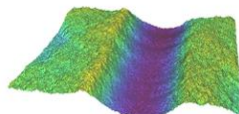
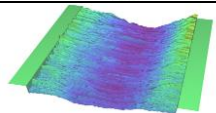
Оцінка зношування керамічних кулі в умовах сухого тертя кочення

Для проведення порівняльних лабораторних випробувань в умовах сухого тертя кочення відібрані серійні кулі упорного шарикопідшипника 8211 (сталь ШХ15) і кулі з двох типів керамічних матеріалів: карбід бору та карбід кремнію. Результати вимірювань зношення робочих поверхонь плоских сталевих зразків при сухому терті кочення наведені у таблиці 7.

На (рис. 16-17) представлені фотографії поверхонь тертя кулі і плоских зразків з продуктами зношення для кожного типу керамічних матеріалів після проведення лабораторних триботехнічних випробувань в умовах сухого тертя кочення.

Табл. 5.

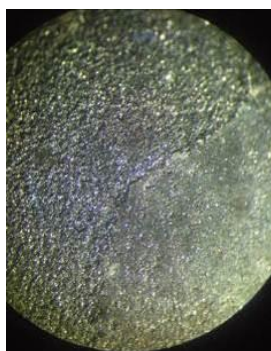
Результати вимірювань доріжки тертя плоских рухомих зразків

№ Випр.	Матеріали зразків пари тертя (шар - поверхня)	Лінійний знос, мкм	3D зображення сліду зношення	T _{сер} °C (початок-кінець)
1	ШХ15 – ШХ15	0,1 (0,085; 0,105; 0,101)		20-28
2	SiC – ШХ15	3,25* (3,0; 3,25; 3,5)		18-25
3	B ₄ C – ШХ15	14,4** (14,5; 15,2; 13,6)		18-36
4	B ₄ C – ШХ15	10,0*** (9,75; 9,3; 11,00)		19-29

*- примусова зупинка випробувань через 13 хв. (стук, вібрація вузла навантаження)

** - примусова зупинка випробувань через 3 год. 30 хв. (стук, вібрація вузла навантаження)

*** - примусова зупинка випробувань через 1 год. (стук, вібрація вузла навантаження)



Кулі (SiC)



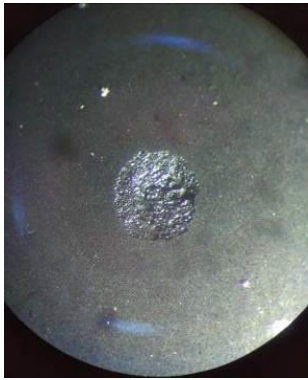
Рухомий зразок (ШХ15)

Рис. 13. Пара тертя: кулі - SiC; плоский зразок – сталь ШХ15, (примусова зупинка випробувань через 13 хв., стук, вібрація вузла навантаження)

Табл. 6.

Результати зважування 3-х зразків куль

Вимірювання зразків куль	№ кулі	Тип матеріалу зразків куль			
		Сталь (ШХ15)	(SiC)	(B ₄ C)	(B ₄ C)
Маса зношеного матеріалу, г	1	0,0100	0,0092	0,0009	0,0018
	2	0,0252	0,0474	0,003	0,0012
	3	0,0106	0,0222	0,0012	0,0053

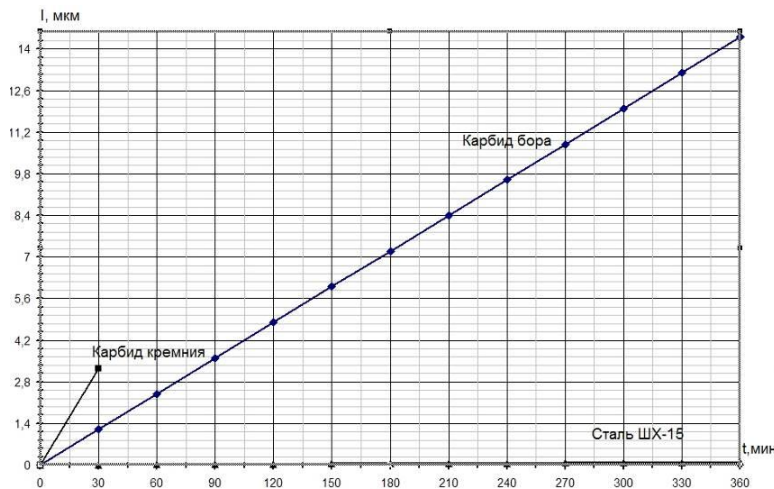


Куля (B₄C)



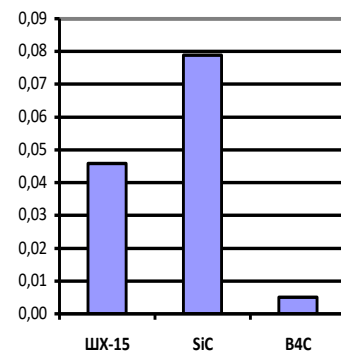
Рухомий зразок (ШХ15)

Рис. 14. Пара тертя: кулі – B₄C; плоский зразок – сталь ШХ15



а)

Маса, г



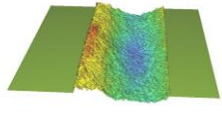
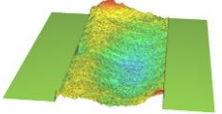
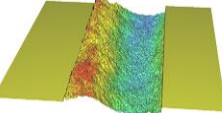
б)

Рис.15. Лінійний знос плоского рухомого зразка (а) та діаграма масового зносу 3-х куль у середовищі масла ІПМ-10 під навантаженням 980 Н (Середня сумарна втрата маси трьох куль пари тертя для: штатних куль ШХ15 – 0,0458 г.; SiC – 0,0788* г.; B₄C – 0,0051 г.)

Аналіз показав, що поверхневий шар куль з кремнію руйнується через вимивання вільного кремнію із міжзеренного простору та оголення гострих і дуже надтвердих зерен карбіду кремнію, утворюючи в результаті абразивну поверхню, що зношує сталеве упорне кільце ШХ15 (рис.16). На поверхні кулі з карбіду бору в результаті дії великих контактних напружень утворюються ізольовані кратери, обумовлені локальним схоплюванням з поверхнею сталевого кільця з наступним крихким сколом (рис.17). При цьому втрата маси куль з карбіду бору в 4,2 рази менше чим куль з карбіду кремнію і в 60,8 рази менше чим куль зі сталі ШХ15.

Табл. 7.

Результати вимірювань доріжки тертя на плоскому рухомому сталевому зразку

№ Випр.	Матеріали зразків пари тертя (куля-поверхня)	Лінійний знос, мкм	3D зображення доріжки кочення	T _{сер} °C (початок-кінець)
1	ШХ15 – ШХ15	1,3 (1,28; 1,35; 1,27)		18,5-29,2
2	SiC – ШХ15	4,1* (3,6; 4,5; 4,2)		18,9-24,2
4	B ₄ C – ШХ15	1,45 (1,51; 1,20; 1,63)		18,2-36,3

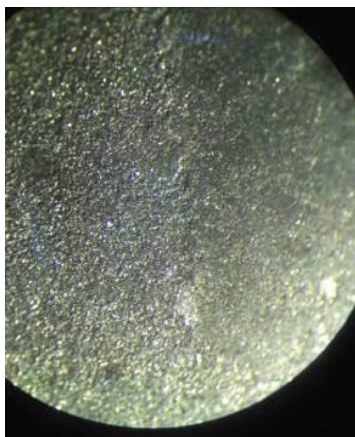
*- примусова зупинка випробувань через 37 хв. (стук, вібрація вузла навантаження)

Результати зважування маси до та після випробувань наведено у таблиці 8.

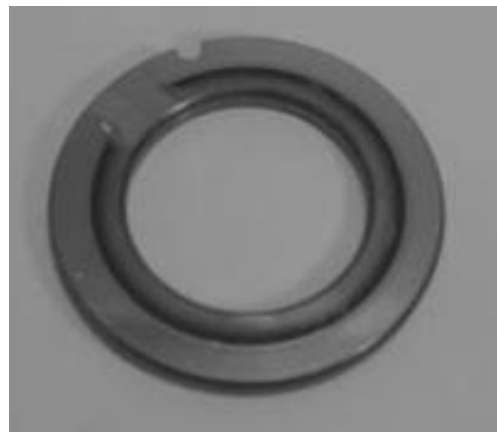
Табл. 8.

Результати зважування зразків куль

Вимірювання зразків куль	№ Кулі	Тип матеріалу куль		
		Сталь ШХ15	Карбід кремнію (SiC)	Карбід бору (B ₄ C)
Маса зношеного матеріалу, г	1	0,0337	0,0018	0,0004
	2	0,019	0,0034	0,0006
	3	0,0264	0,0003	0,0003

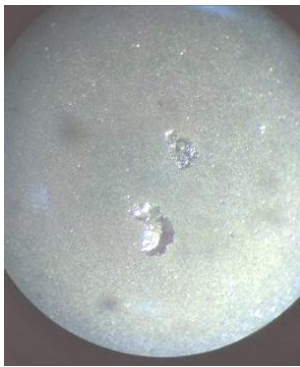


Куля (SiC)



Плоский зразок (ШХ15)

Рис. 16. Пара тертя: кулі - карбід кремнію; плоский рухомий зразок - сталь ШХ15, (Примусова зупинка випробувань через 37 хв. - стук, вібрація)



Куля (B4C)



Плоский зразок (ШХ15)

Рис. 17. Пара тертя: куля – карбід бору; плоский рухомий зразок зі сталі ШХ15

Середня сумарна втрата маси трьох куль пари тертя при сухому терті кочення для: штатних зразків – 0,0791 г.; SiC – 0,0055* г.; B₄C – 0,0013 г.

* (SiC) – примусова зупинка випробувань через 37 хв. (стук, вібрація вузла навантаження)

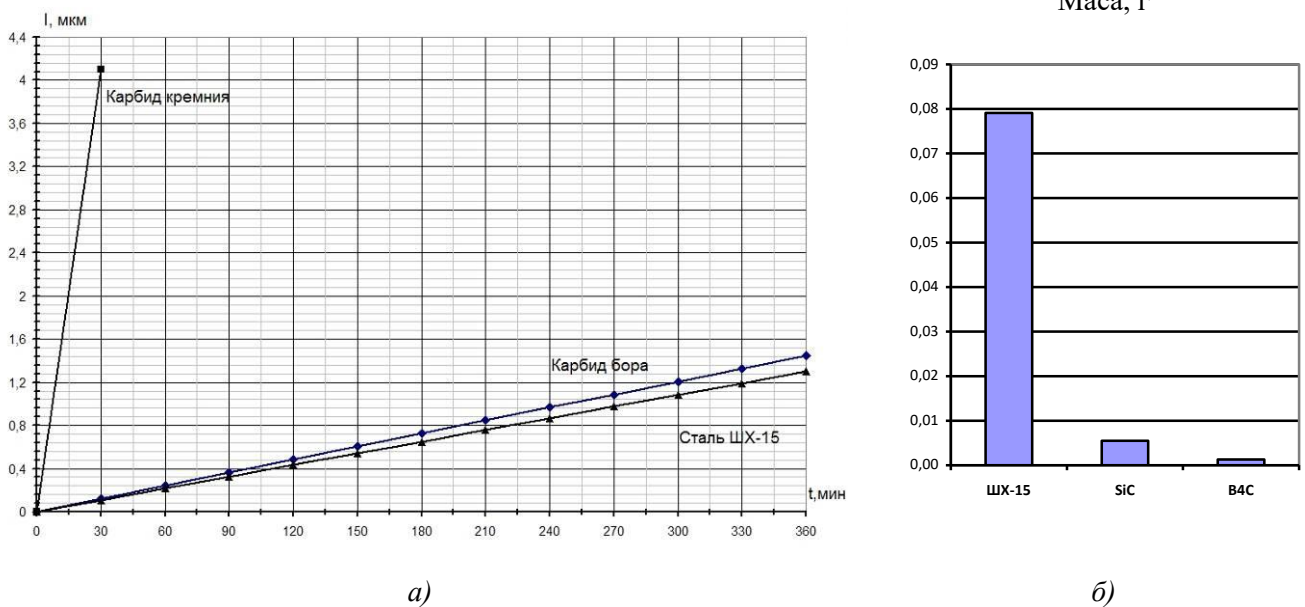


Рис.18. Лінійний знос плоского сталевго зразка (а) і діаграма масового зносу 3-х куль при сухому терті кочення під навантаженням 49Н

Висновки:

1. Розроблена і апробована спеціальна методика лабораторних триботехнічних випробувань гібридних пар тертя кочення на модернізованого приладу тертя КИИГА-1М;

2. Аналіз даних отриманих при триботехнічних випробуваннях гібридних модельних трьох точкових упорних шарикопідшипників «сталь ШХ15 – керамічні кулі – сталь ШХ15» дозволив зробити наступні висновки:

- показано, що використання куль з карбиду бору в гібридних шарикопідшипниках кочення являється перспективним напрямком у трибологічному матеріалознавстві, особливо для газотурбінних двигунів та інших енергосилових роторних установок;

- суттєвий вплив середовища мастила на інтенсивність зношування компонентів пари тертя, зокрема, мінімальна інтенсивність зношування спостерігається в змащувальному середовищі масла ИПМ-10, однак, показана можливість роботи гібридної пари тертя кочення і в умовах сухого тертя, що особливо актуально для газотурбінних двигунів вертольотів;

- встановлено істотний вплив вихідної шорсткості поверхонь керамічних куль, що формується не тільки в процесі механічної обробки, а й на стадії спікання. Таким чином показано, що для гібридних пар тертя необхідно формувати структуру керамічних матеріалів для

подальшого виготовлення куль з дрібнішим зерном, що підвищить їх зносостійкість та знизить абразивність поверхонь по відношенню до сталевих поверхонь кілець підшипників кочення.

Література

1. Трибология легких полимерных материалов применяемых в узлах трения машин /В.Хуфенбах, А.Стельмах, К.Кунце, Н.Модлер // Міжвузівський збірник "Наукові нотатки", м.Луцьк, 2011. – Вип. №34 . - с.303-321
2. Костюник Р.Е. Трибологические исследования адгезионного изнашивания на машине трения АСК-01// Сільськогосподарські машини. -2015. - Вип. 31.- с.88-94
3. Пат. 37069 Украина, МПК С04В 35/565. Спосіб виготовлення карбідокрем-нієвих виробів / І. П. Криворучко, А. Л. Майстренко, В. Г. Кулич. – Заявл. 07.06.01; Опубл. 15.03.02, Бюл. № 3.
4. Skorokhod V.(Jr), Krstic V.D. High strength-high toughness W_4C-TiB_2 composites.// J. Mat. Sc. Letter. – 2000. – No. 19 . – p. 237 – 239.
5. Електроспінання під тиском кераміки на основі карбіду бору / Майстренко А. Л., Боримський О. І., Дутка В. А., Кулич В.Г.// Академкнига. Збірник до 100-річчя НАН України. - 2018
6. Гнесин Г.Г. Бескислородные керамические материалы // Киев: «Техника» -1987. – 37 с.
7. 3275722 U.S. Patent / Popper P.P., Production of Dense Bodies of Silicon Carbide / Sept. 27, 1966.
8. Microstructure and Mechanical Properties of Silicon Carbide Processed by Spark Plasma Sintering (SPS) /S. Hayun, V. Paris, R. Mitrani, et.al.//Ceramics International DOI 10.1016 / j.ceramint. 2012.05.03
9. Celik Y, Goller G, Yucel O, Sahin FC / Spark Plasma Sintering of Boron Carbide and Effects of Various Additives on Sintering and Material Properties/ 12th International Ceramic Congress CIMTEC. Naziran 2010, Montecatini Terme/Italya.
- 10.Закономерности формирования высокоплотной структуры самосвязанного карбида кремния / А.Л.Майстренко, В.Г.Кулич, Ткач В.Н. // Сверхтвердые материалы. - 2009. - №1. - с. 18 - 35.
11. Електроспінання під тиском кераміки на основі карбіду бору /Майстренко А. Л., Боримський О. І., Дутка В. А. и др. // Наука про матеріали: досягнення та перспективи. У 2-х томах. //Київ: Академперіодика. -2018. - с. 276-294.
12. Аксёнов А. Ф. Трение и изнашивание металлов в углеводородных жидкостях// М. : Машино-строение, 1977. – 149 с.
- 13.Стельмах А. У. Исследование процессов трения и изнашивания в углеводородных средах при использовании некоторых металл-органических соединений и разработка путей повышения износостойкости трибосистем: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.04. – Київ. -1993. – 20 с.
14. Крагельский И.В., Алисина В.В. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2 книгах // М.: Машиностроение, 1978. - 400 с.
15. Иванов А. С. Конструируем машины шаг за шагом: в 2 ч. // М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2-е изд., перераб. - 2003. — Ч. 1. - 328 с.
16. Афанасьев А.И., Федосеев А.П. Контактные напряжения в эллиптическом рабочем инструменте машины для разрушения негабаритов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9-3. – С. 497-500;
17. Popov Valentin L. Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications // Springer-Verlag, - 2010. -362 p.