

**Запорожець В.В.,
Стадніченко В.Н.**

Національний авіаційний університет,
м. Київ, Україна
E-mail: vstadnichenko@bk.ru

**МЕХАНІЗМИ ПРИПРАЦЮВАННЯ ПАР
ТЕРТЯ В ОБ'ЄМНИХ ГІДРОМАШИНАХ
В УМОВАХ "НАНОЗНОШУВАННЯ"
В ПРИСУТНОСТІ ТРИБОВІДНОВЛЮЮЧИХ
СУМІШЕЙ**

УДК.621.891:621.316

В роботі наведено результати досліджень процесів припрацювання пар тертя об'ємних гідромашин в присутності трибовідновлюючих сумішей за сигналами акустичного випромінювання. Отримано закономірності зміни параметрів сигналів акустичної емісії, які відповідають зміні механізмів дисипації енергії поверхневих шарів пар тертя при різних механізмах припрацювання поверхневих шарів трибосистем. На цій основі дана класифікація видів припрацювання.

Ключові слова: акустична емісія, "нанозносне" тертя, метало - керамічний шар.

Вступ

Одним з сучасних напрямків збільшення ресурсу вузлів тертя об'ємних гідромашин [1, 2, 3] є використання трибовідновлюючих сумішей (ТВС). В основі їх дії знаходиться зміна механізмів первинного і вторинного припрацювання (структурної адаптації) трибосистем до зміни умов їх експлуатації. Однак, існуючи рекомендації щодо застосування ТВС не враховують специфіки кінетики та динаміки фізико-хімічних процесів, що протікають у поверхнях контакту при їх первинному та вторинному припрацюванні після введення ТВС у мастильне середовище. У першу чергу, це відноситься до визначення умов виникнення і роботи металокерамічного шару (МКШ), як на стаціонарних, так і нестаціонарних режимах експлуатації вузлів тертя, включаючи первинне і вторинне припрацювання [4].

Для оцінки припрацювання таких пар тертя застосовують різні методи досліджень, зокрема фратографічний аналіз їх поверхонь, електричний, електромеханічний методи оцінки інтенсивності зношування та ін. В той же час, значне поширення одержують методи, які дозволяють отримувати інформацію про кінетику процесів, що протікають в поверхневих шарах матеріалів в реальному часі. Одним з таких методів є метод акустичної емісії (АЕ) [5, 6, 7, 8]. Він має високу чутливість до зміни механізмів зношування деталей, які обумовлені фізико - хімічними процесами, що протікають на границі розділу поверхневих шарів матеріалів [6, 7, 8]. Це дозволяє використовувати АЕ інформацію для розробки методів оцінки стану пар тертя з визначення стадій зношування їх матеріалів.

У даній роботі буде показано, що при введенні ТВС має місце зміна механізму припрацювання трибосистеми з мікроприпрацювання за рахунок мікроструктурних змін у поверхневому шарі на наноприпрацювання за рахунок поворотного - ізомерного руху утворених ультрадисперсних фрагментів різного масштабу відносно один одного. Це приводить до зміни умов контактної взаємодії і переходу пари тертя до "нанозносного" режиму тертя. Під "нанозносним" режимом тертя, розуміють режим тертя, що характеризується аномально низкими значеннями інтенсивності износа 10^{-9} - 0^{-13} м/м (наноізнос) [1, 2, 3, 4].

Також буде визначено основні закономірності зміни акустичного випромінювання як на етапі припрацювання, так і на стаціонарному режимах тертя, які можливо використовувати для розробки методів оцінки стану поверхонь тертя в робочих умовах.

Методика досліджень

Для проведення досліджень на зношування були виготовлені дві пари зразків зі сталі ШХ-15 і 12Х2Н4А. Испити зразків проводилися на універсальній машині тертя на автоматизованій системі трібо-діагностики за конструктивною схемою "диск - диск", з 20 % проковзуванням. При цьому рухомий зразок був виконаний зі сталі ШХ-15, нерухомий – сталі 12Х2Н4А. Розміри досліджуваних зразків складали: діаметр $D_{обр} = 25$ мм, товщина $h = 15$ мм.

Температура мастильного середовища складала 373К і підтримувалася сталюю. Це досягалося за допомогою системи терморегулювання. Дана температура відповідає робочим температурам мастильного середовища вертолітних редукторів і підшипникових опор вертолітних газотурбінних двигунів. Швидкість обертання приводного вала машини тертя також вибиралася з умови максимального наближення до умов експлуатації моделюючих вузлів і складала 500 об/хв.

На зношування під навантаженням випробувалась як пара тертя без ТВС, так і пара тертя з МК шаром. МК шар на поверхнях тертя утворювався після введення між поверхнями зразків, що контактують, мастильної ТВС типу "Комбат", відповідно до методики викладеної в роботі [3].

Дослідження виконувалися в два етапи. Спочатку до пар тертя прикладалося навантаження, яке перераховувалося в прикладене напруження з урахуванням розмірів досліджуваних зразків відповідно до прийнятих методик [5, 7, 8]. Первісне прикладене напруження складало $\sigma_{\max} = 1000$ МПа. Після виходу пари тертя на режим сталого зношування і тривалої роботи на цьому режимі (не менш 30 годин) проводилося миттєве зменшення напруження до значення: $\sigma_{\max} = 600$ МПа. Діапазон зміни контактних навантажень на зразки вибирався з умови їх відповідності експлуатаційним навантаженням, що виникають на плямах контакту зубів шестерень редукторів і тіл котіння опор вертолітних газотурбінних двигунів.

На другому етапі після не менш 5 годин роботи під напруженням у $\sigma_{\max} = 600$ МПа проводилось раптове навантаження пар тертя до рівня первісного прикладеного напруження $\sigma_{\max} = 1000$ МПа з їх подальшою роботою на згаданому режимі.

Основними параметрами, що характеризували зносостійкість досліджуваних пар тертя, були момент тертя і вага зразків, значення яких визначалися відповідно до методики, викладеної в роботі [5].

В процесі тертя також проводилась реєстрація і обробка сигналів акустичної емісії (АЕ). Первинне перетворення інформації виконувалося за допомогою датчика, який був виготовлений з п'єзокераміки ЦТС-19. Частотний діапазон реєстрованих сигналів АЕ знаходився в межах 500 кГц – 1 МГц. В якості основних оброблюваних параметрів сигналів АЕ, що реєструються, були: усереднена амплітуда, усереднена потужність і усереднена накопичена потужність. Час усереднення складав 0,2 с.

Після проведення випробувань на тертя та знос були виконані фрактографічний аналіз структурного стану та хімічного складу МКШ. Для цього використовувався растровий електронний мікроскоп-аналізатор "CamScan- 4DV" при збільшенні $\times 3500$.

Результати досліджень

Результати випробувань пар тертя без МК шару на зношення показали наступне. У процесі контактної взаємодії при прикладеній нарузі в 1000 МПа відбувається поступовий перехід вузла тертя з режиму припрацювання (макроприціювання) за рахунок оптимізації шорсткості поверхонь фрикційного контакту в режим сталого зношування (рис. 1).

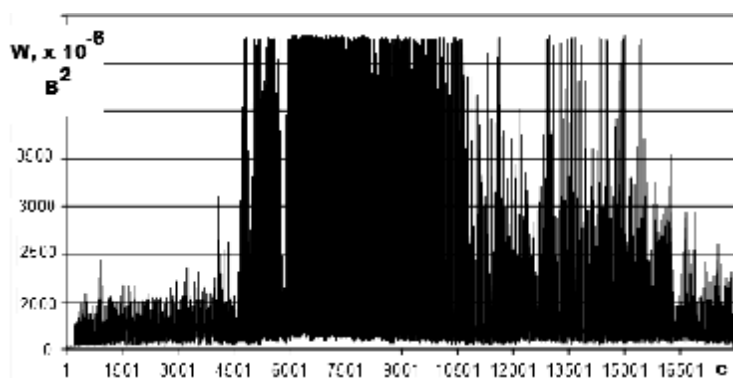


Рис. 1 – Характер зміни усередненої потужності акустичної емісії під час макроприпрацювання

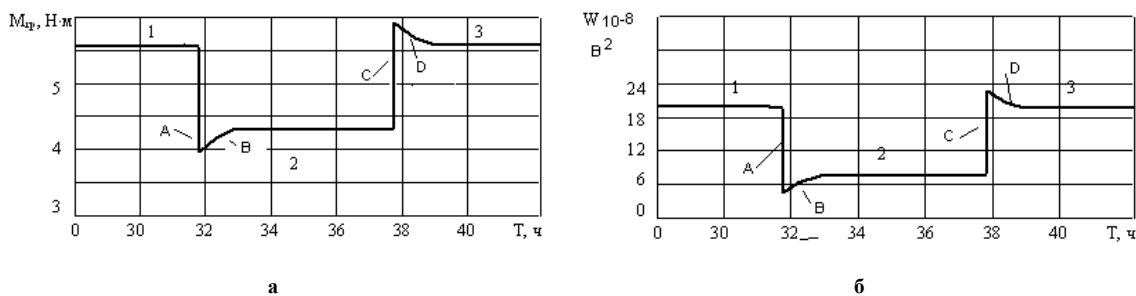


Рис. 2 – Залежності зміни $M_{тр}$ (а) і усередненої потужності W (б) у звичайних парах тертя (без МК шару).

Значення прикладеного напруження:

1, 3 – $\sigma_{\max} = 1000$ МПа;

2 – $\sigma_{\max} = 600$ МПа

Останній режим характеризується стабілізацією значень моменту тертя на рівні $M_{mp} \approx 5,6$ Н/м (стадія 1, рис. 2, а). Після зниження напруження до 600 МПа спостерігається миттєве падіння моменту тертя до значення $M_{mp} \approx 4,3$ Н/м (А, рис. 2, а).

Надалі спостерігається поступове зростання моменту тертя (В, рис. 2, а), що є характерним для вторинного припрацювання (мікроприпрацювання) трібосистеми за рахунок мікроструктурних змін у поверхнях фрикційного контакту. Дане збільшення протікає в плинні приблизно однієї години контактної взаємодії поверхонь досліджуваних зразків. Після цього відбувається стабілізація моменту тертя на новому рівні, значення якого складало: $M_{mp} \approx 4,5$ Н/м (стадія 2, рис. 2, а).

З отриманих результатів видно, що різниця між миттєвим значенням M_{mp} у момент часу після зменшення напруження і його стабілізованим значенням на новому рівні складає: $\Delta M_{mp} \approx 0,2$ Н/м. Після 5 годин роботи пари тертя без МК шару на новому режимі стабілізації, проводилося миттєве збільшення прикладеного напруження до первісного значення ($\sigma_{max} = 1000$ МПа). На діаграмі зміни M_{mp} даний перехід характеризується різким стрибкоподібним зростанням моменту тертя (С, рис. 2, а) до рівня $M_{mp} \approx 5,9$ Н/м, що перевищує рівень первісної стабілізації при тому ж самому значенні напруження.

Надалі при тій же нарузі спостерігається плавне зменшення M_{mp} (D, рис. 1, а) з поступовим його виходом на режим стабілізації (стадія 3, рис. 2, а). Стадія стабілізації характеризується значенням моменту тертя, що незначно перевищує первісний рівень стабілізації. Як показали результати обробки даних, середнє відхилення моменту тертя ΔM на стадії 3 для всіх проведених випробувань складає приблизно 0,5 - 0,7 %.

Плавна зміна M_{mp} із виходом на режим стабілізації, як і у випадку зменшення, так і у випадку збільшення прикладеного напруження (В, D, рис. 2, а), очевидно, пов'язано з виникненням і протіканням процесу мікроприпрацювання, що є наслідком структурного пристосування поверхневих шарів працюючих матеріалів у нових умовах навантаження. Це співпадає з результатами досліджень, що отримані в роботах [12, 13].

З отриманих даних також випливає, що структурна пристосовуваність при зміні напруження не відбувається миттєво, а протікає в плинні деякого, досить тривалого проміжку часу. Слід зазначити, що даний проміжок часу у випадку збільшення і зменшення навантаження приблизно однаковий. Це дозволяє припустити, що механізми мікроприпрацювання поверхневих шарів матеріалів пар тертя при зміні зовнішніх факторів подібні між собою.

Результати обробки сигналів АЕ показали, що характер зміни їхньої усередненої потужності цілком повторює характер зміни моменту тертя. При цьому на акустичній діаграмі також виділяються три характерні стадії, а також стадії, що відповідають стадіям виникнення і протікання вторинного прироблення пар тертя (1, 2, 3, В, D, рис. 2, б). Однак, час плавної зміни потужності реєстрованих сигналів на стадії прироблення більше часу плавної зміни моменту тертя (В, D, рис. 2, б). Обробка отриманих результатів показала, що тривалість вторинного прироблення, яка фіксується за моментом тертя, при зменшенні навантаження на 3 % менша, ніж при збільшенні навантаження. Однак на відміну від стадій стабілізації моменту тертя, що розрізняються за своїми числовими значеннями (стадії 1, 3, рис. 1, а), усереднена потужність сигналів АЕ на даних стадіях практично залишається постійною і має значення $W = 22 \cdot 10^{-8}$ В². Це вказує на те, що при поверненні максимального напруження, прикладеного до пар тертя їхнє зношування відбувається за єдиним механізмом.

Результати випробувань пар тертя з МК шаром при тих же режимах зміни прикладеного напруження показали, що діаграми зміни моменту тертя й усередненої потужності сигналів АЕ відрізняються від діаграм, отриманих при випробуваннях пар тертя без МК шару. При цьому на діаграмі зміни M_{mp} фіксуються ділянки миттєвої зміни навантаження і переходу до стабілізаційних "нанозносних" стадій (рис. 2, а) з відсутністю ділянок вторинного припрацювання.

Як і у вище описаних дослідженнях повернення напруги до первісного значення ($\sigma_{max} = 1000$ МПа) супроводжується збільшенням M_{mp} на стадії стабілізації 3 (рис. 3, а). Дане збільшення ΔM для всіх проведених випробувань складає приблизно 0,3 - 0,6 %, відносно до стадії стабілізації 1 (рис. 3, а). Відсутність ділянок плавної зміни M_{mp} при зміні навантаження, ймовірно, пояснюється новим механізмом припрацювання, що забезпечує близьку до "миттєвої" структурну пристосованість МК шару до нового режиму роботи.

У той же час, на діаграмах зміни потужності сигналів АЕ спостерігаються короткочасні сплески акустичного випромінювання, які складають приблизно 6 - 8 с (С, В, рис. 3, б). Вони фіксуються в моменти часу зміни прикладеного напруження на ділянках стабілізації M_{mp} (2, 3, рис. 3, а). В подальшому акустичне випромінювання відсутнє.

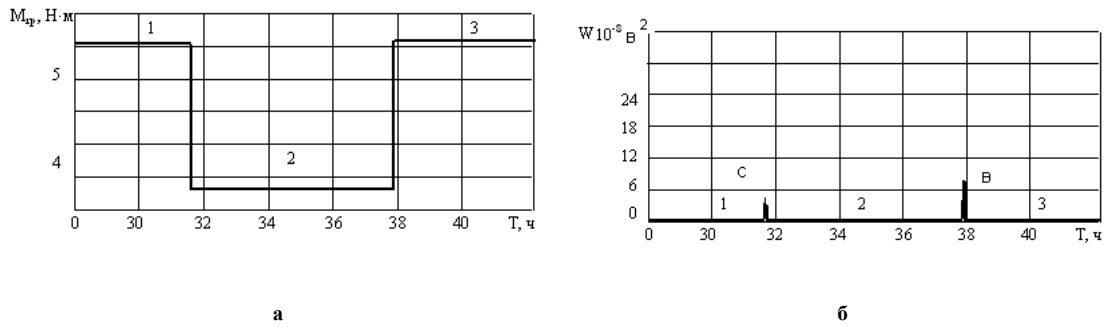


Рис. 3 – Залежності зміни $M_{тр}$ (а) і усередненої потужності W сигналів АЕ (б) в парах тертя з МК шаром. Значення прикладеного напруження: 1, 3 – $\sigma_{max} = 1000$ МПа; 2 – $\sigma_{max} = 600$ МПа

Слід зазначити, що поняття "миттєва" зміна прикладеного напруження є досить умовним. З урахуванням його стабілізації встановлення нового значення напруження може відбуватися в плінні 2 - 3 с. У той час, АЕ випромінювання фіксується на значно більшому проміжку часу. Це вказує на те, що при миттєвій зміні прикладеного напруження в парах тертя з МК шаром так само відбувається вторинне припрацювання, але за іншим механізмом, який в подальшому будимо називати наноприпрацюванням. При цьому дисипація енергії поверхонь тертя проходить за зміни механізму розсіювання енергії поверхневим шаром з мікропластичної деформації на механізм ротаційної пластичності пов'язаної з проковзуванням утворених ультрадисперсних фрагментів різного масштабу відносно один одного, тобто наноприпрацювання.

Цьому висновку відповідають і результати аналізу фрактограм поверхонь зразків пар тертя, які отримані для різних стадій прикладеного напруження (рис. 3). Як видно з рис. 4 на всіх стадіях тертя спостерігаються полоси ротаційної рухомості. При цьому деформації, які спостерігаються для стадій 1, 3 (рис. 4, а) значно більші, ніж для стадії 2 (рис. 4, б) (наявність характерних ротаційних смуг).

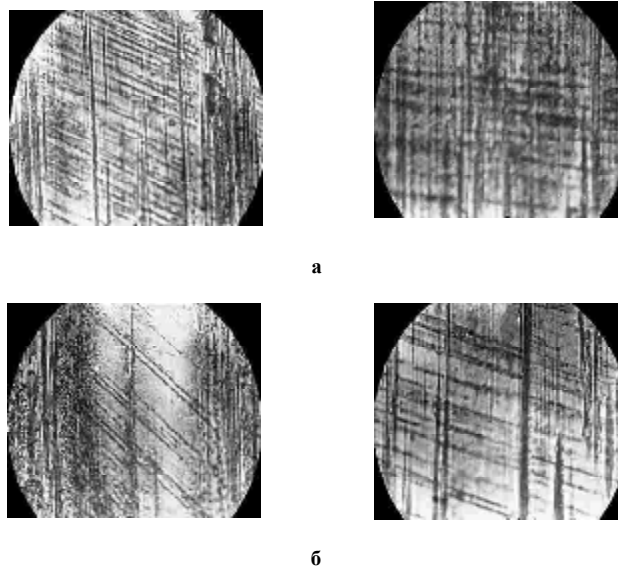


Рис. 4 – Фрактографія поверхні МК шару при миттєвій зміні робочого навантаження ($\times 290$): а – $\sigma_{max} = 1000$ МПа; б – $\sigma_{max} = 600$ МПа

Висновки

Таким чином, в результаті проведених досліджень встановлені основні закономірності зміни усередненої потужності сигналів АЕ при різних механізмах припрацювання пар тертя. Показано, що для пар тертя без уведеного ТВС характер зміни АЕ діаграм повторює характер діаграм зміни моменту тертя.

Відповідність тимчасових ділянок вторинного приробляння, що фіксуються за сигналами АЕ, а також стабільність величини акустичного випромінювання при тому самому значенні прикладеного навантаження свідчить про схожість механізмів структурної пристосованості матеріалів пар тертя в процесі їх експлуатації.

Наявність сплесків акустичного випромінювання, реєстрованого на малих проміжках часу при зміні умов навантаження пар тертя пар тертя з МКШ, при відсутності зміни моменту тертя, дозволяє зробити висновок про існування нанозносного механізму припрацювання. Однак воно відбувається зі значною швидкістю в проміжку короткого часу за рахунок ротаційної пластичності пов'язаної з проковзуванням утворених ультрадисперсних фрагментів різного масштабу відносно один одного, тобто наноприпрацювання. Це підтверджується результатами фрактографічного аналізу.

Таким чином, можливим є класифікація різних механізмів припрацювання трибосистем відповідно до механізму дисипації енергії, що підводиться при терті. А саме, існує макроприпрацювання, де адаптація трибосистем до умов експлуатації відбувається за рахунок оптимізації рельєфу поверхонь фрикційного контакту. Мікроприпрацювання, де адаптація трибосистем до умов експлуатації відбувається за рахунок мікроструктурних змін у поверхнях фрикційного контакту, та наноприпрацювання, де адаптація трибосистем до умов експлуатації відбувається за рахунок проковзуванням утворених ультрадисперсних фрагментів різного масштабу відносно один одного.

Переніс речовини у термодинамічній системі вузлів тертя в процесі "нанозносного" зношування опосередован щільністю потоку теплоутворення, дисипацією енергії та хімічним потенціалом елементів системи. Використання цього підходу дозволяє пояснити поведінку МКШ, отриманого при використанні трибівідновлюючих сумішей та дозволяє визначити технологічні, науково-обґрунтовані рекомендації по його використанню.

Література

1. Аратский П.Б., Капсаров А.Г. Применение геомодификаторов трения для увеличения ресурса работы металлообрабатывающего инструмента. – Электронный журнал «Трение, износ, смазка», 2001, т. 3, №1.
2. Половинкин В.Н., Лянной В.Б., Аратский П.Б. Применение геомодификаторов трения для восстановления изношенных поверхностей узлов трения при эксплуатации. – Электронный журнал «Трение, износ, смазка», 2000, т. 2, № 2.
3. Булатов В.П., Киреенко О.Ф. Структурное исследование механизмов безызносного трения конструкционных материалов на основе синергетических представлений // Проблемы машиностроения и надежности машин. – №2. – 1991. – С. 56-61.
4. Аналіз стану питання та визначення можливих напрямків продовження ресурсу парку літальних апаратів ВПС України (шифр "Ресурс"). Підвищення надійності та довговічності трибосполучень авіаційної техніки модифікацією їхнього поверхневого шару. (Заключний). – Т. 2: Отчет о НИР / Харьковский институт ВВС Украины. – Инв. №48282. – Харьков, 2003. – 151 с.
5. Стадниченко В.Н., Стадниченко Н.Г., Джус Р.Н., Трошин О.Н. Об образовании и функционировании МК покрытия, полученного с помощью ревитализантов // Вестн. науки и техн. – Харьков: ХДНТ и НТУ "ХПИ". – 2004. – Вып. 1(16). – С. 18-27.
6. Джус Р.М., Стадниченко В.М., Стадниченко М.Г. Пристрій для беззупинної реєстрації динаміки зміни геометрії зразків при випробуваннях на тертя і знос // Вісн. НТУ "ХПИ". Зб. наук. пр. Темат. вип.: Динаміка і міцність машин. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2003. – Т.1, №12. – С. 58-64.
7. Справочник по триботехнике / Под общ. ред. Хебды М., Чичинадзе А.В.: В 3 т. – М.: Машиностроение, 1989.– Т. 1: Теоретические основы. – 400 с.
8. Чихос Х. Системный анализ в триботехнике. – М.: Мир, 1982.– 352 с.
9. Богданов А.К. Оптико-структурный машинный анализ лейкоцитов: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. – М., 1983. – 122 с.
10. О структуре поверхностного слоя стали 100Cr6, обработанной лезвийным инструментом из композита 10. / Розенберг О.А., Делеви С.Е., Шейкин В.Н. и др. // Сверхтвердые материалы. – 1999. – №5. – С. 57-62.
11. Fisher R.A. Statistical methods for research works. – Edinburgh: Oliver and Royard, 1958. – 261 p.
12. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
13. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. – К.: Техника, 1970. – 263 с.
14. Николис Дж. Динамика неравновесных систем. – М.: Мир, 1989. – 486 с.
15. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин \ Справочник \ И.А.Биргер, Б.Ф. Шор, Г.Б.Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.

Поступила в редакцію 14.11.2013

Zaporozhetz V.V., Stadnychenko V.N. **Mechanisms of run-in processes of friction pairs of reciprocating pumps in the conditions of "nano-wear" at the presence of tryboretrofitting mixes.**

The experimental and theoretical researches of run-in processes of friction pairs of reciprocating pumps at the presence of tryboretrofitting mixes (TRM) on the base of analysis acoustic emission signals are presented. The dependences of parameters of acoustic emission which correspond to the alteration of energy dissipation mechanism at different mechanisms of run-in of superficial layers are obtained. The classification of run-in regimes is given.

Keywords: acoustic emission, "nano-wear" friction metal – ceramic layer

References

1. Aratskiy P.B., Kapsarov A.G. Primenenie geomodifikatorov treniya dlya uvelicheniya resursa raboty matalloobrabatyvaushogo instrumenta. *electronniy jurnal «Trenie, sznos, smazka»*, 2001, t. 3, №1.
2. Polovinkyn V.N., Lannoy V.B., Aratskiy P.B. Primenenie geomodifikatorov treniya dlya vosstanovleniya iznoshennikh poverkhnostey uzlov treniya pri ekspluatatsii. *electronniy jurnal «Trenie, sznos, smazka»*, 2000, t. 2, №2.
3. Bulatov V.P., Kireenko O.F. Strukturnoye issledovanie mekhanizmov bezызносного treniya konstruktsionnykh materialov na osnove synergiticheskikh predstavleniy. *Problemy mashinostroeniya i nadejnosti mashin*. №2. 1991. s. 56-61.
4. Analiz stanu pitannya ta viznachennya mozhlivikh napryamkiv prodovjennya resursu parku litalnykh aparativ VPS Ukrainy (shifr "Resurs"). Pidvishennya nadiynosti ta dovgovicnosti tribospoluchen aviatziynoi tekhniki modifikatcey ykhnego poverkhnovego sharu. (Zakluchniy). T.2 Otchet o NIR. Kharkovskiy institute VVS Ukraini. Inv. №48282. Kharkov, 2003. 151 s.
5. Stadnychenko B.N., Stadnychenko N.G., Djus R.N. Ob obrazovanii i funktsionirovanii MK pokritiya, poluchennogo s pomoshuyu revitalizantov. *Vestn. nauki i tekhniki. Kharkov KhDNT i NTU "KhPI"*. 2004. Vyp. 1(16). c. 18-27.
6. Djus R.M., Stadnychenko V.M., Stadnychenko M.G. Prystriy dlya bezzupinnoy reestratsii dinamiki zminy geometrii zrazkiv pri viprobuvannyakh na tertya i znos. *Visn. NTU "KhPI". Zb. nauk. pr. Temat. vip.: Dinamika i mitznist mashin. Kharkiv NTU "KhPI". 2003. T.1, №12. s. 58-64.*
7. *Sprovochnik po tribotekhnike. Pod obsh. red. Khebdy M., Chichinadze A.V. V 3 t. – M.: Mashinostroenie, 1989. T. 1: Teoreticheskie osnovi. 400 s.*
8. Chikhos X. *Systemniy analiz v tribotekhnike. M. Mir, 1982. 352 s.*
9. Bogdanov A.K. *Optiko-strukturniy mashinnyy analiz leykozitov. Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk. M., 1983. 122 s.*
10. O strukture poverkhnostnogo sloya stali 100Cr6, obrabotannoy lezviyniy instrumentov iz kompozita 10. / Rozerbeng O.A., Delevi S.E., Sheykin V.N. i dr. *Sverkhtverdie materialy. 1999. №5. s. 57-62.*
11. Fisher R.A. *Statistical methods for research works. Edinburgh: Oliver and Royard, 1958. 261 p.*
12. Garkunov D.N. *Trybotekhnika– 2-e izd., pererab. i dop. M. Mashinostroenie, 1989. 328 s.*
13. Kostetzkiy B.I. *Trenie, smazka i iznos v mashinakh. K. Tekhnika, 1970. 263 s.*
14. Nikolis Dzh. *Dinamika neravnovesnikh system. M. Mir, 1989g. 486str.*
15. Birger I.A., Shor B.F., Ioselevitch G.B. *Raschet na prochnost detaley mashin. Spravochnik. M.: Mashinostroenie, 1979. 702 s.*