

УДК 669.13.56.9:621.891

Л.П. КЛИМЕНКО, В.І. АНДРЕЄВ, О.І. СЛУЧАК
Чорноморський Національний університет імені Петра Могили

ДИФУЗІЙНА МОДИФІКАЦІЯ ПОВЕРХОНЬ ПАР ТЕРТЯ З ЗАСТОСУВАННЯМ ТИТАНОВОЇ ГУБКИ

В статті розглядаються базові аспекти модифікації поверхонь тертя для експлуатації в умовах значних механічних навантажень. Дифузійну модифікацію з застосуванням титанової губки визначено як один з найбільш перспективних методів механічної поверхневої модифікації металів пар тертя. Визначено, що застосування низькотемпературної витримки зразків (вдвічі нижче температури рекристалізації титанової губки) в комбінації з механічною трибомодифікацією з застосуванням титанової губки в якості модифікатора, який добре проявив себе в якості ферритизатора та елемента захисного покриття, може забезпечити подрібнення перлітної структури графітових включень у сумі з формуванням поверхневої композитної структури підвищеної міцності з жаростійкими включеннями TiC підвищеної міцності. Основним показником зносостійкості на проміжному етапі досліджень було обрано втрату маси роликком (модифікований матеріал) та колодкою (контр тіло). Було виділено три дослідні групи: 1) контрольна, до якої входили звичайні необроблені сталеві колодки; 2) експериментальна група А, до якої входили колодки натерті титановою губкою та спечені в муфельній печі за температури 300 °С протягом 6 годин з 12 годинною витримкою в вимкненій печі; 3) експериментальна група Б, до якої входили колодки натерті титановою губкою та спечені в муфельній печі за температури 300 °С протягом 18 годин з 54 годинною витримкою в вимкненій печі. Отримані результати продемонстрували високий рівень кореляції між втратою маси зразком та контртілом для контрольної групи та групи Б, що вказує на непередбачуваність процесу зношування при застосуванні розробленого методу з малою витримкою зразка в умовах високих температур, в наслідок чого локальні процеси дифузії не було завершено. Перспективними визнано дослідження секативних властивостей отриманих поверхонь тертя, їх комбінування з іншими модифікаторами, та розширений аналіз їх фізико-хімічних властивостей.

Ключові слова: дифузійна модифікація, титанова губка, ферритизатор, тертя, трибомодифікація, зношування.

Л.П. КЛИМЕНКО, В.И. АНДРЕЕВ, А.И. СЛУЧАК
Черноморский Национальный университет имени Петра Могили

ДИФУЗИОННАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАР ТРЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТИТАНОВОЙ ГУБКИ

В статье рассматриваются базовые аспекты модификации поверхностей трения для эксплуатации в условиях значительных механических нагрузок. Диффузионная модификация с применением титановой губки определена как один из наиболее перспективных методов механической поверхностной модификации металлов пар трения. Определено, что применение низкотемпературной выдержки образцов (вдвое ниже температуры рекристаллизации титановой губки) в комбинации с механической трибомодификацией с применением титановой губки в качестве модификатора, который хорошо проявил себя в качестве ферритизатора и элемента защитного покрытия, может обеспечить измельчения перлитной структуры графитовых включений в сумме с формированием поверхностной композитной структуры повышенной прочности с жаростойкими включениями TiC повышенной прочности. Основным показателем износостойкости на промежуточном этапе исследований была выбрана потеря массы роликком (модифицированный) и колодкой (контр тело). Было выделено три опытных группы: 1) контрольная, в которую входили обычные необработанные стальные колодки 2) экспериментальная группа А, в которую входили колодки натертые титановой губкой и спеченные в муфельной печи при температуре 300 °С в течение 6 часов с 12 часовой выдержкой в выключенной печи; 3) экспериментальная группа Б, в которую входили колодки натертые титановой губкой и испеченные в муфельной печи при температуре 300 °С в течение 18 часов с 54 часами выдержки в выключенной печи. Полученные результаты продемонстрировали высокий уровень корреляции между потерей массы образцом и контртелом для контрольной группы и группы Б, указывает на непредсказуемость процесса изнашивания при применении разработанного метода с малой выдержкой образца в условиях высоких температур, в результате чего локальные процессы диффузии не было завершено. Перспективными признаны исследования секативных свойств полученных поверхностей трения, их комбинирования с другими модификаторами, и расширенный анализ их физико-химических свойств.

Ключевые слова: диффузионная модификация, титановая губка, ферризатор, трение, трибомодификация, износ.

L.P. KLIMENKO, V.I. ANDREIEV, O.I. SLUCHAK
Black Sea National Petro Mohyla University

DIFFUSION MODIFICATION FOR THE SURFACES OF FRICTION JOINTS WITH TITANIUM SPONGE APPLICATION

The article deals with the basic aspects of friction surfaces modification for operation in significant mechanical loads conditions. The diffusion modification with the use of a titanium sponge is defined as one of the most promising methods of mechanical surface modification for metal friction joints. It has been determined, that the use of low temperature specimen exposure (twice the temperature of the recrystallization of the titanium sponge) in combination with mechanical tribo-modification using a titanium sponge as a modifier, which has proved to be a ferritizer and a protective coating element, can provide the grinding of the perlite structure with graphite inclusions in a sum of the formation for superficial composite high strength structure with heat-resistant TiC increased strength inclusions. The main indicator of wear resistance at the intermediate stage of the research was the mass loss of the roller (modified material) and the pad (counter body). Three experimental groups were identified: 1) control, which consisted of ordinary untreated steel pads; 2) Experimental group A, which included pads tinted with a titanium sponge and sintered in a muffle furnace at a temperature of 300 °C for 6 hours with a 12 hour standstill in the off kiln; 3) Experimental group B, which included pads tinted with a titanium sponge and sintered in a muffle furnace at a temperature of 300 °C for 18 hours with a 54 hour shut-off time in the off furnace. The obtained results demonstrated a high correlation between the weight loss of the sample and the counterfilm for the control group and group B, indicating the unpredictability of the wear process when applying the developed method with a low sample exposure in high temperature conditions, as a result of which the local diffusion processes were not completed. Promising is the study of the cross-sectional properties of the friction surfaces obtained, their combination with other modifiers, and an extended analysis of their physical and chemical properties.

Keywords: diffusion modification, titanium sponge, ferritizer, friction, tribomodification, wear.

Постановка проблеми

Проблема трибодиструкції в парах тертя є важливим аспектом розвитку будь-якої галузі, в якій відбувається робота з металічними деталями. Фізико-хімічна природа процесів зношування є питанням, що розглядається протягом всієї історії інтенсивного розвитку механіки. На даний момент не існує загально визнаної теорії зношування. Створено безліч моделей взаємодії пар тертя та методів вдосконалення їх поверхонь для продовження термінів експлуатації. Механічна трибомодифікація у вигляді таких методів, як геотрибомодифікація (ГТМ) та фінішна без абразивна обробка (ФАБО) є однією з найбільш дешевих та практичних методів, що не вимагають спеціального інструментарію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Ефективність впровадження будь-якої перспективної технології завжди пов'язана з енерго та матеріалоємністю прототипу при реалізації розробки на практиці. Швидкість зносу деталей прямо залежить як від навантажень, яким вони піддаються при експлуатації, так і від матеріалів, що застосовувались при їх створенні.

Незважаючи на велику кількість фундаментальних робіт як у нашій країні (і в колишньому СРСР), так і в далекому зарубіжжі (у першу чергу, Англії та США), не існує єдиної загально визнаної теорії тертя. Це пов'язано зі складністю і швидкоплинністю процесів, що протікають на фрикційному контакті, і неможливістю їх безпосереднього спостереження. Різні вчені схильні розглядати переважання механічних, фізико-хімічних, втомлених, окислювальних та інших процесів у тонкому поверхневому шарі. За уявленням Дмитриченка М.Ф.[1], зовнішня поверхня металу пар тертя, являє собою пористу структуру з великою кількістю включень у вигляді окисів металу, легувальних елементів та ін., що відрізняються за своїми властивостями від основного металу та за рахунок мікроструктури і хімічних властивостей здійснюють роль сикативів. Мікосянчик, О. О.[2], розглядаючи процеси в граничних шарах на електронно-молекулярному рівні, підтверджує гіпотезу електромагнітного характеру сил, що формують поверхневі структури. Аулін В.В. [3] розглядає пластинчато-шарувату структуру граничних шарів з точки зору трибосистем, враховуючи властивості і рельєф реальної поверхні тертя. Теорія зношування тонких поверхневих шарів в умовах граничного тертя знайшла розвиток у роботах українських учених Мнацаканова Р.Г.[4], Соловійова С.М.[5], Шевелі В.В. [6] та Климентя Л.П. [7].

Аналіз характеру зносу робочих поверхонь типових циліндричних виробів з циклічними термічними навантаженнями(направляючі циліндри для двигунів внутрішнього згорання, копрів, дизель-молотів, компресорів тощо) свідчить про їх нерівномірний знос[7]. Вузли тертя виходять з ладу при

досягненні допустимих зносів в окремих точках, хоча більшість робочої поверхні знаходиться в працездатному стані.

Маса матеріалу, вилученого з поверхні тертя в процесі зношування, пропорційна площі під кривою на рис. 1, яка визначається інтегралом:

$$M = A \int_0^{180^\circ} I(\alpha) d\alpha,$$

де A – коефіцієнт пропорційності;

$I(\alpha)$ – залежність інтенсивності зношування циліндра від кута повороту колінчастого вала;

M – маса металу, віддаленого з поверхні тертя в процесі зношування.

Оптимальною частотою обертання колінчастого вала буде така частота, при якій M буде мінімальна і становить $420 \frac{1}{\text{хв}}$ (рис. 1).

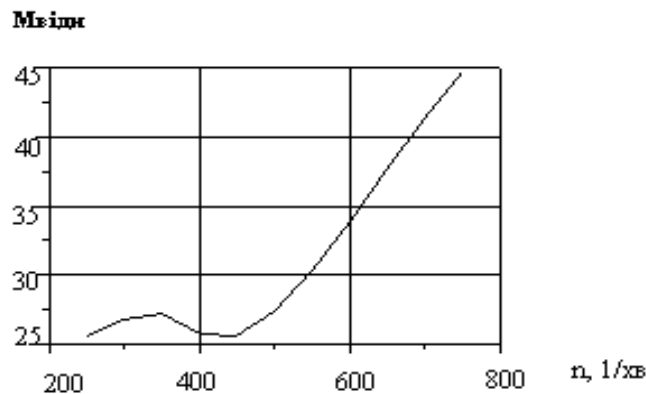


Рис. 1. Сумарний масовий знос циліндра в залежності від частоти обертання колінчастого вала

Враховуючи вищевказані факти, основним показником для визначення ефективності розробленого методу модифікації поверхні пар тертя було обрано порівняльний аналіз втрати маси роликом (модифікований зразок) та колодкою (контр тіло) при випробуваннях на машині тертя СМЦ-3.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження: Розробка методу модифікації поверхонь пар тертя за допомогою механічного титанування з дифузійним насиченням

Завдання:

- Розробка методу дифузійної модифікації металу;
- Проведення аналізу оброблених поверхонь на машині тертя СМЦ-3;
- Математичний аналіз отриманих даних.

Об'єкт дослідження: Трибонавантажені поверхні пар тертя.

Предмет дослідження: Дифузійна модифікація пар тертя з застосуванням титанової губки.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для визначення зносостійкості матеріалів використовувалась машина тертя СМЦ-3, яка давала змогу точно керувати режимами тертя. Як піддослідні зразки було взято сталь 40Х (далі ролик), чавун СЧ30 від автомобільної гільзи [12] (далі колодка). Виміри зносу в цих експериментах відбувалися зважуванням зразків на лабораторних електронних вагах ТВЕ-0,21- 0,001, з точністю 0,001 грами.

Методи отримання титанових покриттів на роликах, відбувався механічним способом, за наступною послідовністю:

1. Пресування губчастого титану у прес формі
2. Натирання на станку відбувається стисненням титанової губки з роликом та прокручуванням останнього при не великих обертах 15 – 18 об/хв.

Таким чином титановий порошок налипає на ролик та в деякій мірі проникає до пор сталі. Шар натертого титану складає в 20 – 50 мк мікрон

Сплави на основі титану мають в 4...6 разів меншу теплопровідність у порівнянні із чавунами, а спресована титанова губка ще менш теплопровідна. Шар карбідів титану (TiC), що має високу міцність і більшу температуру плавлення (3150 °С), різко підвищує тепловий опір титанового покриття й обмежує фізико-хімічну ерозію поверхні металу [8].

Методи отримання титанових покриттів в плані взаємодії з поверхнею металу часто включають формування дифузійного шару та відповідно легування поверхні за рахунок її насичення легуючим елементом. Дифузійне титанування чавунної поверхні можна поділити на насичення з твердої фази (твердофазний) метод та насичення з парової (парофазний). В обох методах насичення потребує високої температури (615 °С) рівної або вище температури евтектики для Fe. За таких умов гранична розчинність титану в Fe складає ~ 3,8 % та значно падає з зниженням температури[9]. Висока температура в сумі з підвищеною хімічною активністю титану в подібних умовах вимагають проведення процесу титанування в вакуумі чи нейтральному середовищі.

Першим етапом даного дослідження стала розробка методики відновлення чавунної деталі шляхом нарощування[10-11]. В ході досліджень у даному напрямку було зроблено припущення, що застосування в механічній трибомодифікації титанової губки, яка добре проявила себе в якості ферритизатора та елемента захисного покриття, може забезпечити подрібнення перлітної структури графітових включень у сумі з формуванням поверхневої композитної структури підвищеної міцності з жаростійкими включеннями TiC підвищеної міцності. Було проведено ряд експериментів з застосуванням 8 типів зразків (рис. 2).

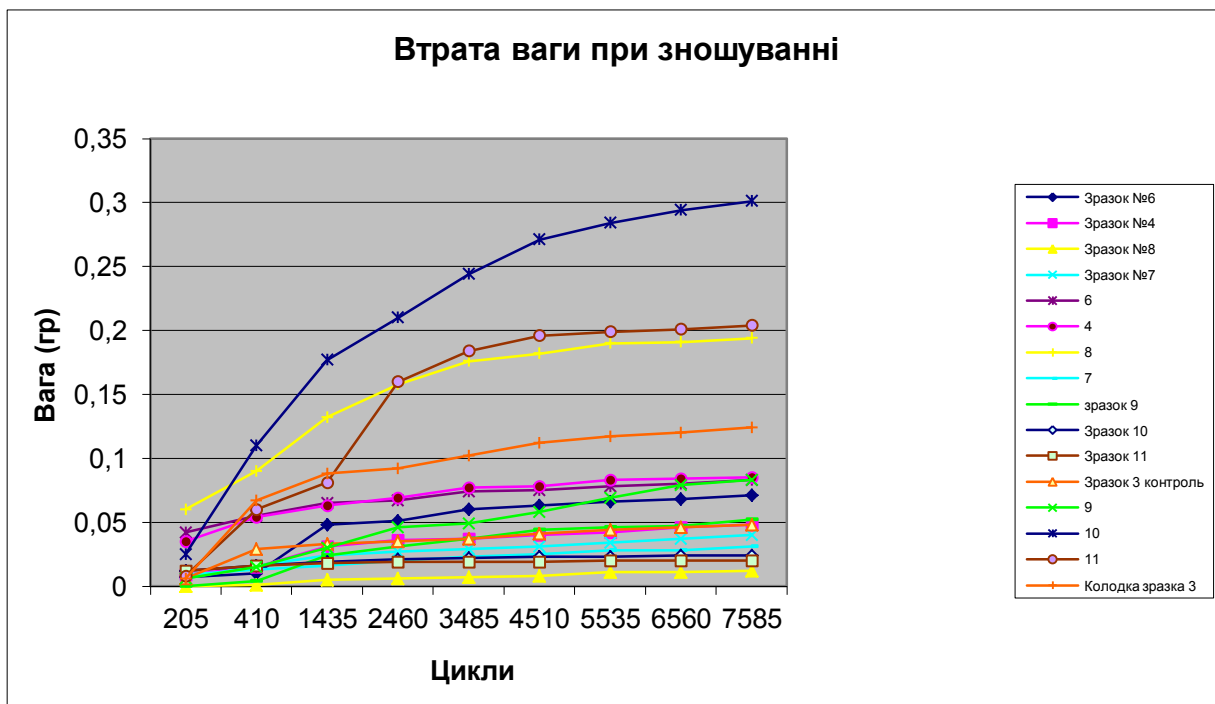


Рис. 2. Втрата ваги зразками та контроліом при певній кількості обертів

Таблиця 1

Коефіцієнти регресії в графіках кореляції

	Heat Capacity Model: $y = a + bx + \frac{c}{x^2}$	Quadratic Fit: $y = a + bx + cx^2$	Logarithm Fit: $y = a + b \ln x$
Контроль	0,9981	0,9438	0,9847
Група А	0,9972	0,9669	0,9898
Група Б	0,9798	0,9843	0,9990
Колодка Контроль	0,9974	0,9249	0,9682
Колодка А	0,9817	0,9828	0,9979
Колодка Б	0,9823	0,9852	0,9930
Корел. Контроль	0,9964	0,9957	0,9847
Корел А	0,99	0,9911	0,9831
Корел Б	0,9926	0,9925	0,9787

Для розрахунку кореляції між втратою маси зразками та кількістю обертів при випробуваннях, між втратою маси колодками та кількістю обертів при випробуваннях, а також між втратами маси зразка та колодки було застосовано програмне середовище CurveExpert. Створено таблицю з найвищими коефіцієнтами регресії для отриманих функцій (табл.1) та ряд графіків (рис. 5, 7, 9) в яких відображено математичні залежності в досліджуваних процесах.

При аналізі отриманої інформації багато уваги було приділено локальним проявам зносу у вигляді втрати маси через визначені проміжки часу. Крім графіків загального зносу, співвідношення в яких чітко видно навіть візуально, було побудовано графіки локальної втрати маси (рис.3).

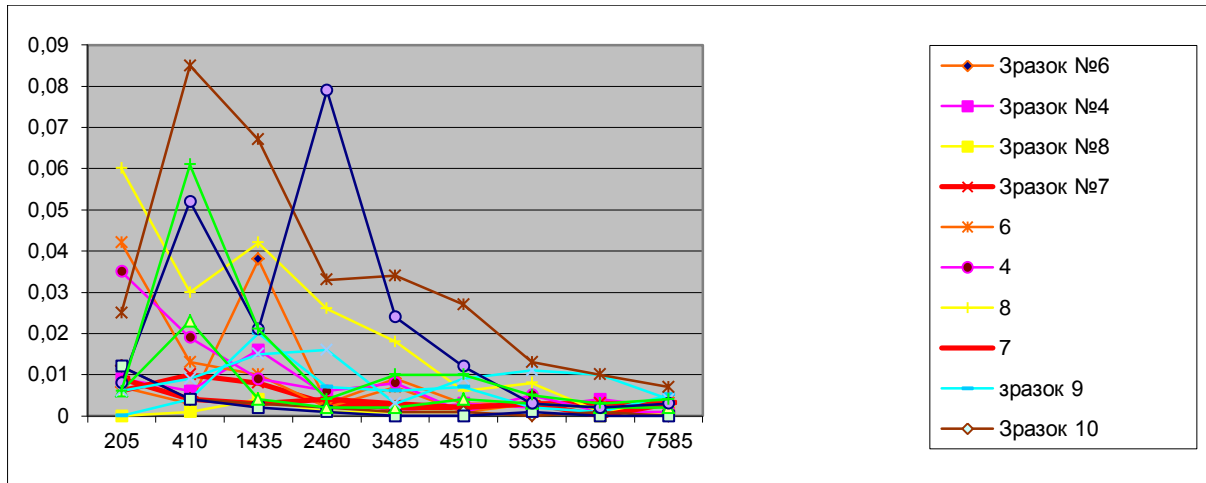


Рис. 3. Втрата маси при кожному циклі без сумування з попередньою втраченою масою

Зразки було поділено на три групи:

- 1) контрольна, до якої входили звичайні необроблені сталеві колодки (рис. 4-5);
- 2) експериментальна група А, до якої входили колодки натерті титановою губкою та спечені в муфельній печі за температури 300 °С протягом 6 годин з 12 годинною витримкою в вимкненій печі (рис. 6-7);
- 3) експериментальна група Б, до якої входили колодки натерті титановою губкою та спечені в муфельній печі за температури 300 °С протягом 18 годин з 54 годинною витримкою в вимкненій печі (рис. 8-9).

Було проведено випробування зносостійкості отриманих зразків на машині тертя СМЦ-3 В результаті спостерігалось значні відмінності в цих групах:

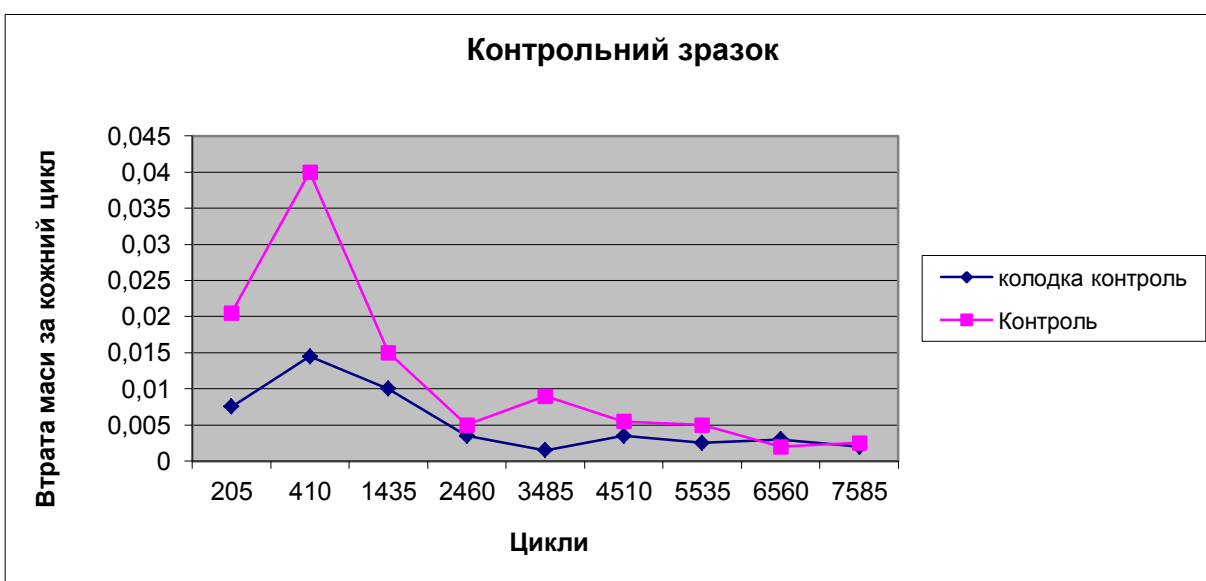


Рис. 4. Втрата маси контрольний зразок та колодка

Перша група дала первинний результат, в якій колодка стиралася в два рази більше, ніж ролик, розрив між ним 0,052 грами.

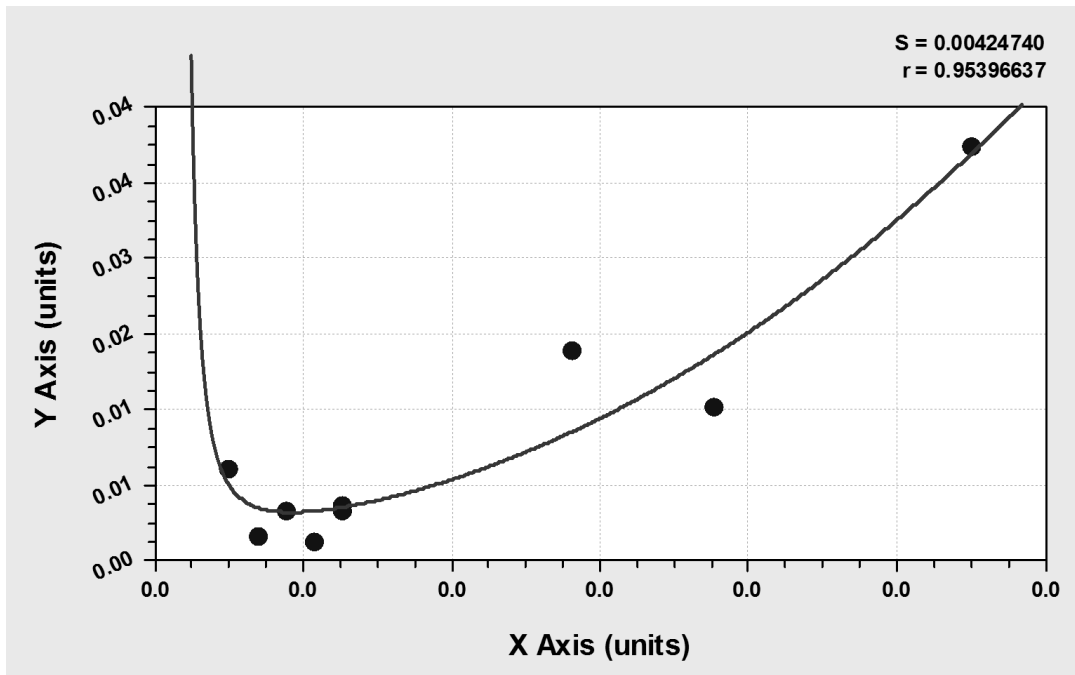


Рис. 5. Графік кореляції між втратою маси зразком та колодкою

Vapor Pressure Model: $y = e^{\frac{b}{a + c \ln x}}$
 Coefficient Data:
 a = 6.11781519191E+000
 b = 5.94853532637E-003
 c = 2.30575040574E+000

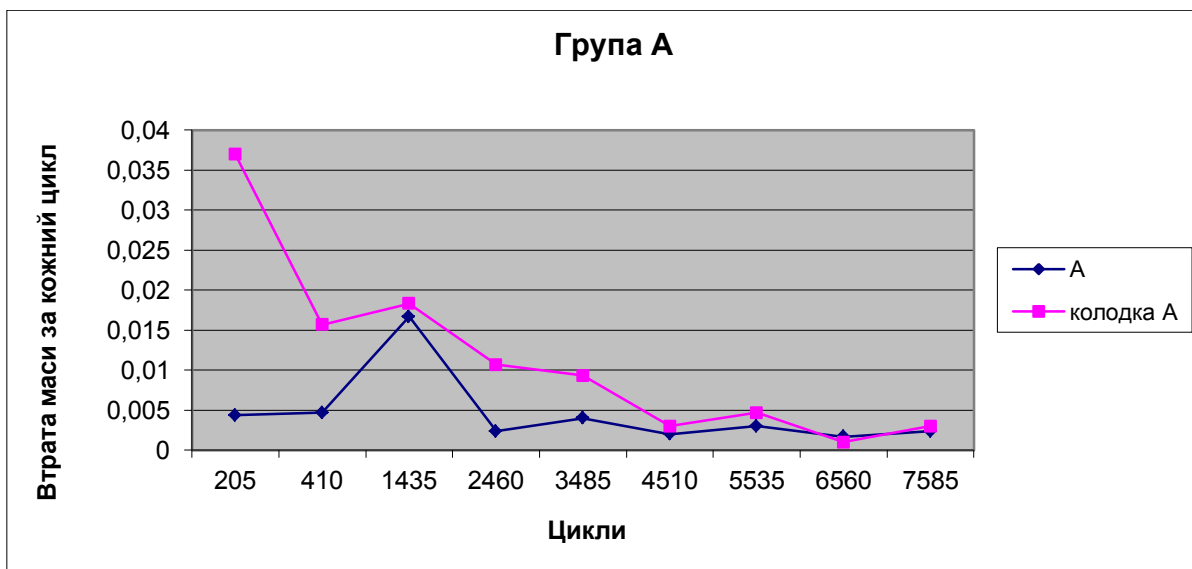


Рис. 6. Втрата маси зразок А та контргіло

В другій групі втрата ваги колодки і ролика відбувалася в меншій степені, ніж у третій та другій групах, тобто показники знаходилися у стабільнішому стані, розрив лише 0,018 грам.

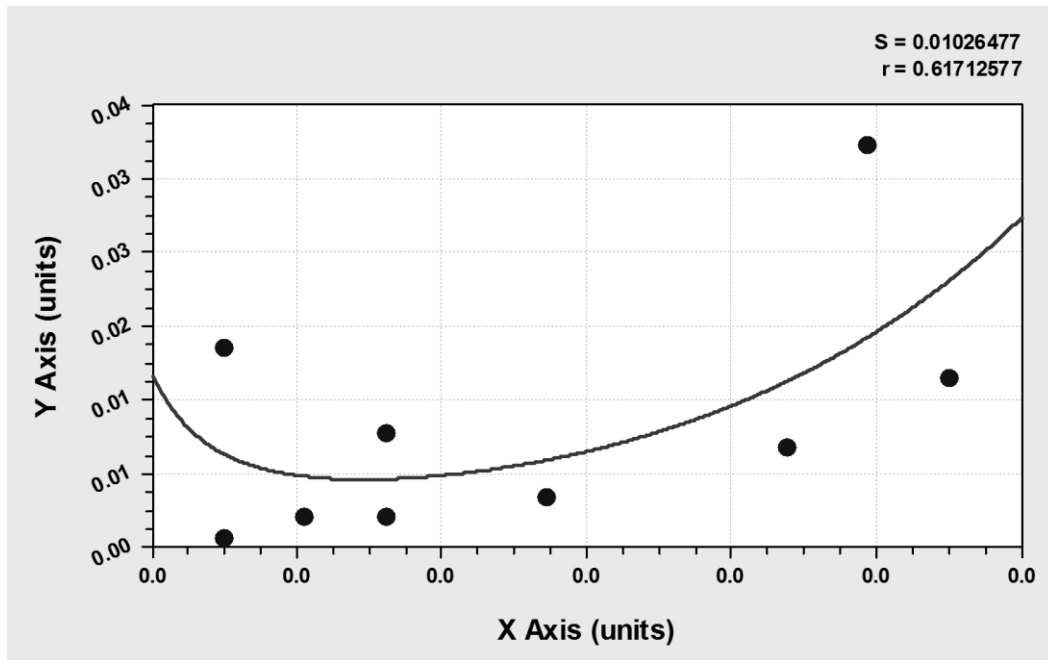


Рис. 7. Графік кореляції між втратою маси зразком А та контртілом

Vapor Pressure Model: $y = e^{\frac{b}{a + c \ln x}}$

Coefficient Data:

a = 2.70799210124E+001

b = 1.40938080768E-002

c = 6.29846328597E+000

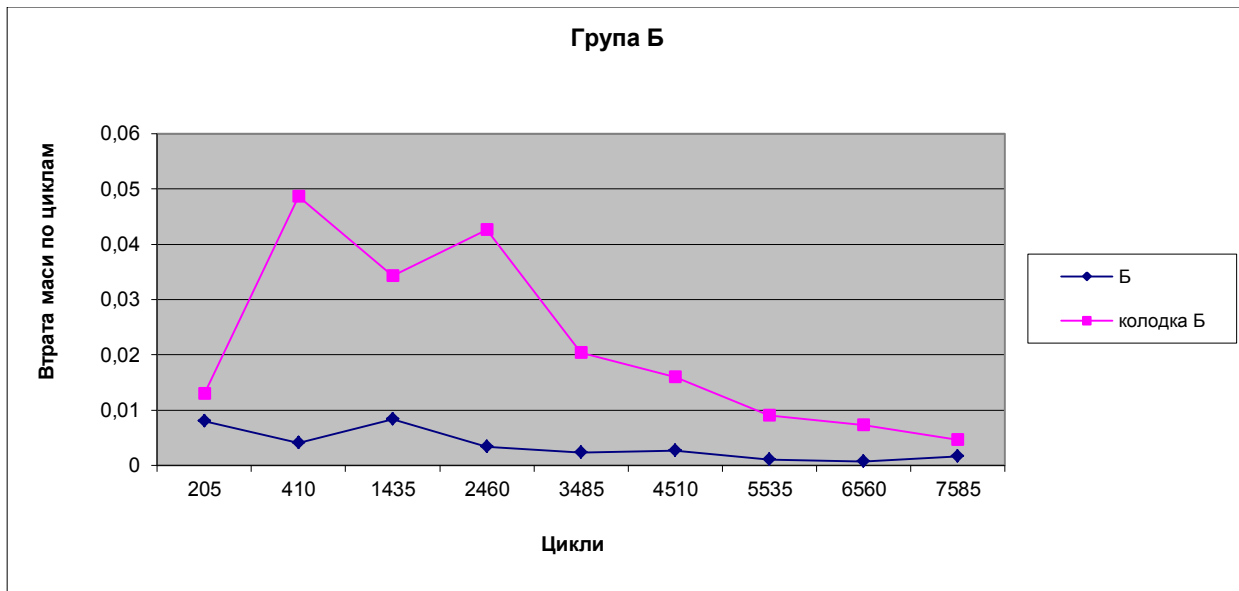


Рис. 8. Втрата маси зразком Б та контртілом

У третій групі зносостійкість ролика збільшилася в два рази порівняно з першою та третьою групами.

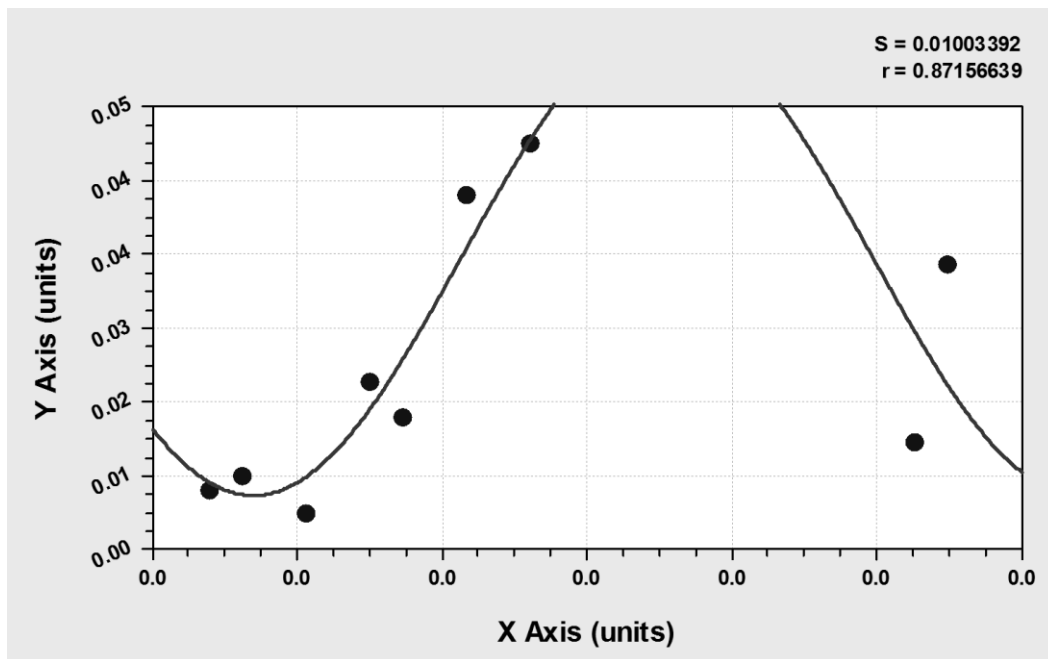


Рис. 9. Графік кореляції між втратою маси зразком Б та контртілом

Sinusoidal Fit: $y = a + b \cdot \cos(cx + d)$

Coefficient Data:

$a = 3.49126828230E-002$

$b = 2.81653701521E-002$

$c = 7.31063015766E+002$

$d = -3.95415403232E+000$

Можна прослідкувати тенденцію та зв'язок між термообробкою та зносостійкістю роликів. Чим більший час термообробки тим міцнішим стає ролик, який в свою чергу більш інтенсивніше стирає колодку.

Спираючись на літературні дані[1-9], було визначено ряд напрямків подальших досліджень даного методу модифікації: 1) дослідження на предмет секативних властивостей отриманого покриття (є непідтвержені дані про ускладнення процесів утворення масляних плівок в присутності титану та його оксидів); 2) можливість формування включень карбідів титану, що потребує спектроскопічного аналізу, та дослідження їх впливу на модифіковану поверхню; 3) перспектива застосування складних композитних структур, до складу яких, крім титанової губки входять геотрибомодифікатори (червоний боксидний шлам, серпентини, глинозем, рідке скло), інші метали (ПМУ – порошок мідний універсальний, чавунна стружка, алюміній і ін.).

Оцінюючи ефективність методу дифузійної модифікації поверхні металу титановою губкою, варто зазначити, що комбіновані структури є найбільш адаптивними та можуть використовуватись в широкому діапазоні умов експлуатації. Згідно з СНП від 23-02-2003, матеріали для зовнішньої обробки, в частості для покриттів, повинні володіти теплопровідністю не менше, ніж 3,078 Вт/(м*К). Виходить, що наш метод модифікації відповідає даним нормам, адже має в основі титанову губку, що на 98% складається з титану з теплопровідністю 21,9 Вт/(м*К), що нижче такої для сталі, коефіцієнт теплопровідності якої становить 58 Вт/(м*К), більш ніж вдвічі, але має нижчу теплопровідність, за рахунок власної пористої структури та утворення менш теплопровідних структур.

Висновки

Створено інноваційну технологію механічної модифікації поверхонь пар тертя. Проведено дослідження зразків модифікованих поверхонь пар тертя. Виявлено, що для забезпечення зміцнення поверхні тертя необхідна довготривала термічна обробка натертої деталі, що забезпечить дифузю складових покриття-модифікатора, рекристалізацію самого металу та формування включень карбиду титану (що потребує додаткових досліджень, в тому числі спектроскопічного аналізу зразків різних типів даного покриття).

Отримані результати продемонстрували високий рівень кореляції між втратою маси зразком та контр тілом для контрольної групи та групи Б, що вказує на непередбачуваність процесу зношування при застосуванні розробленого методу з малою витримкою зразка в умовах високих температур, в наслідок чого локальні процеси дифузії не було завершено.

Список використаної літератури

1. Дмитриченко М. Ф. Динаміка зношування контактних поверхонь при змащуванні моторною оливою з додаванням фулерену C_{60} / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, І. М. Козоріз // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2010. – Вып. 51. – С. 49-52. http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/Vestnik_51.pdf
2. Микосянчик О. А. Оценка структурно-энергетических показателей пар трения при работе в режиме пуск – остановка / Микосянчик, О. А.; Мнацаканов, Р. Г.; кумуржи, А. Ю.; Шакулиев, С. В. // Problems of Friction & Wear . 2016, Vol. 1 Issue 70, p11-19. 9p. ISSN 03702197 Режим доступу: <http://web.a.ebscohost.com>
3. Аулін В. В. Обґрунтування природи і характеристик явищ зношування поверхневих шарів трибоелементів з трибофізичної точки зору / В. В. Аулін, О. В. Кузик, С. В. Лисенко // Трибологія, енерго- та ресурсозбереження (в рамках Міжнародної науково-практичної конференції «Ольвійський форум – 2015: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі»): тези. – Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2015. – С 5-7.
4. Мнацаканов, Р. Г. Моделювання інтенсивності зношування / Микосянчик, О. О.; Мнацаканов, Р. Г.; Хімко, М. С. // Problems of Friction & Wear . 2015, Vol. 1 Issue 66, p140-145. 6p Режим доступу: <http://web.a.ebscohost.com>
5. Соловйов С.М. Розрахунки очікуваної точності при механічній обробці деталей на металорізальних верстатах : Навчальний посібник / С. М. Соловйов, О. Л. Чупріков; В.о. Укр. держ. морський техн. ун-т ім. адм. Макарова.– Миколаїв : УДМТУ, 2013.– 136 с
6. Шевеля В.В., Купец Б., Соколан Ю.С., Калда Г.С. Склерометрические показатели и акустико-эмиссионная активность термически упрочненной стали // Проблемы трибологии. – 2016. – № 1. – С. 6-15.
7. Клименко Л. П. Ресурс двигателей внутреннего сгорания и пути его повышения / Клименко Л.П. Прищепов О.Ф. Андреев В.И. / видання ЧДУ імені Петра Могили. – Миколаїв, 2015 – 196 с. - ISBN 966-7458-27-x
8. Фізико-технологічні основи виробництва металів [Текст] : навч. посіб. / Нац. трансп. ун-т ; [уклад.]: М. Ф. Дмитриченко [та ін.]. - К. : НТУ, 2010. - 168 с. : рис., табл. - Бібліогр.: с. 168 . - 500 экз. - ISBN 978-966-632-136-0
9. Клименко Л. П. Управління процесами формування пористих поверхневих структур на стадії отримання заготовок / Клименко Л.П. Прищепов О.Ф. Андреев В.И., Случак О. І., Шугай В. В. / видання ЧДУ імені Петра Могили. – Миколаїв, 2016 – 145 с.
10. Заявка на винахід а201709365 Україна. Спосіб відновлення поверхні тетра металічної деталі ДВЗ шляхом нарощування з нанесеним покриттям-модифікатором $Ti-TiO_2-Cu_2O$ / Л. П. Клименко, О. Ф. Прищепов, В. І. Андреев, О. І. Случак, В. В. Шугай; Чорноморський національний університет імені Петра Могили. – заявл. 25.09.2017.
11. Клименко Л. П., Головка А. Е., Андреев В. И., Дыхта Л. М., Соловьёв С. Н. Расчет параметров восстановления внутренней поверхности гильзы цилиндра. Двигатели внутреннего сгорания. 2015. № 2. С 82-85. http://nbuv.gov.ua/UJRN/dvs_2015_2_16
12. Патент на винахід № 109913 Україна, МПК (2006.01) H02K 49/06, B23B 29/02, B23B 29/03, F16F 9/53, F16D 37/02. Автомобільна гальмівна система / С. М. Соловйов, Л. П. Клименко, А. М. Гурський; Чорноморський національний університет імені Петра Могили. – а201305137; заявл. 22.04.2013; опубл. 26.10.2015, бюл. № 20/2015