Е. Вайс

Доцент, канд. техн. наук

Н. Радек

Інженер

Політехнічний інститут,
м. Кельце, Польща

М. Свирид

Доцент, канд. техн. наук

В. Паращанов

Аспірант

С. Задніпровська

Магістр

Національний авіаційний університет,
м. Київ, Україна

УДК 681

ТРИБОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ТИТАНУ І МОЛІБДЕНУ

Äîñë³äæåíî ñóì³ñí³ñòü òðèáîëîã³÷íèõ ñèñòåì òà àíàëîã³÷í³ñòü ðåçóëüòàò³â. Ïîêàçàíî òåõíîëîã³÷í³ ìîæëèâîñò³ ìîí³òîðèíãó òîïîãðàô³¿ ïîâåðõí³ òåðòÿ ³ ìîæëèâîñò³ âèêîðèñòàííÿ åëåêòðî³ñêðîâèõ ïîêðèòò³â äëÿ ï³äâèùåííÿ ïðàöåçäàòíîñò³ âóçëà òåðòÿ.

вузол тертя, електроіскрове покриття, топографія поверхні тертя

Однією з нагальних наукових проблем в дослідженнях взаємодії поверхонь тертя є методична частина випробувань на стійкість проти спрацювання. Трибологічні властивості матеріалів, залежно від умов і схеми тертя, ведуть себе неоднозначно як в процесі взаємодії, так і відносно розбіжності результатів. Враховуючи, що відновлення трибологічних пар є одним зі шляхів продовження працездатності деталей машин, найдоступнішою методикою відновлення поверхонь тертя є електроіскрове легування.

Електроіскрове легування належить до методів, які базуються на використанні конденсованих потоків енергії. Метод електроіскрового зміцнення був розроблений у колишньому СРСР в 40-х роках, одночасно з електроерозійним обробленням під керівництвом В. Р. Лазаренка і Н. І. Лазаренка. Пік розвитку електроіскрового оброблення припадає на 60-ті й 70-ті роки, для легування використовували електроди твердих сплавів (наприклад, WC, TiC) для нанесення на робочі поверхні вуглецевої сталі.

У Польщі розвиток електроіскрових покриттів припадає на 80-ті роки. Засновником цього методу був Центр експлуатації машин при Політехнічному інституті в м. Радом. У 1982 польські вчені та інженери сконструювали ручний пристрій для електроіскрового нанесення покриттів (ESH-Elektro Spark Hardening), який було впроваджено у виробництво, при нанесенні покриттів на швидкорізальні сталі, з метою підвищення їхніх експлуатаційних властивостей [1].

Технології нанесення електроіскрових покриттів (ЕІП) переслідують розв'язання таких задач: захист від спрацювання поверхонь нових елементів; повернення попередніх властивостей спрацьованим елементам.

Метою застосування методу електроіскрового нанесення покриттів є: істотне підвищення твердості покриттів (за рахунок локального термічного оброблення),

підвищення стійкості проти спрацювання (особливо при абразивному стиранні), зростання жаростійкості (при нанесенні покриттів тугоплавких металів), збільшення корозійної стійкості (при зміцненні корозійностійкими елементами), зменшення тенденції до схоплювання (при створенні додатних градієнтів), зменшення коефіцієнта тертя (за рахунок мінімізації площі контакту і пористості), зміна електричних і променевих властивостей (в основному емісії), біоактивація, декоративні властивості, формування поверхні, здатної працювати в розрахункових параметрах (за рахунок зміцнення поверхневого шару).

У наш час електроіскрове оброблення динамічно розвивається, про що свідчать промислові застосування, починаючи від зміцнення різних інструментів, а закінчуючи виробництвом імплантів. У США дослідження цієї технології проводять інститути, що працюють для NASA, AIR FORCE, US NAVY.

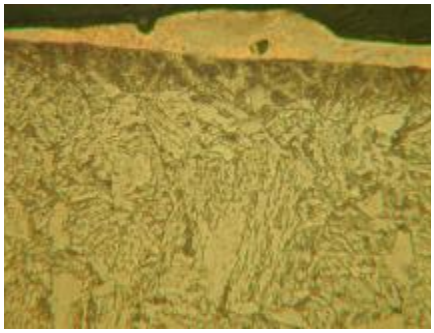
Метою статті було: створити покриття для відновлення поверхонь тертя, що працюють в умовах тертя ковзання без мащення; провести трибологічний порівняльний аналіз результатів спрацювання за однаковою схемою тертя на різних машинах.

Матеріали й методика дослідження. Для досліджень використовували Mo і Ti, що наносили як анод на кільцеві зразки зі сталі 45. Для нанесення використовували болгарську установку ELFA-541. В ході роботи застосовані такі параметри процесу: струм I=16 А; швидкість руху робочого стола V=0,5 мм/с; швидкість утримувача з електродом n= 4200 об/хв; кількість циклів накладення покриття L=2; ємність групи конденсаторів С=0,47 мФ; час одного імпульсу Ti= 8 мс; перерва між імпульсами Tp= 32 мс; частота f= 25 кГц.

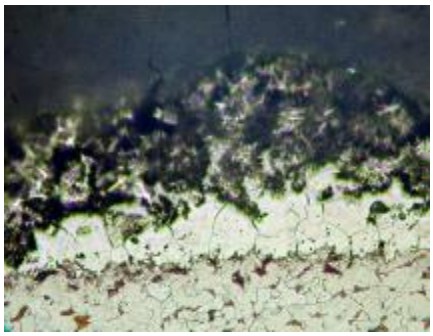
Дослідженню піддавали зразки з нанесеними покриттями без кінцевого оброблення. Оцінку експлуатаційних властивостей здійснювали на основі дослідження мікротвердості й трибологічних властивостей.

Результати. Вимірювання мікротвердості проведене за допомогою методу Вікерса (Vickersa) з використанням мікротвердоміра Ханемана (Hanemana) при навантаженні 40 Н. Вимірювали ділянки покриття з великим впливом температури (SWC), а також матеріал основи (рис. 1). Середня товщина покриттів Ti і Mo складала близько 10 мкм, область впливу температурного чинника складала близько 30 мкм.

Застосування електроіскрового оброблення привело до змін мікротвердості в обробленому матеріалі. Мікротвердість основи після електроіскрового оброблення склала в середньому біля 412 $HV_{0,04}$ (така ж мікротвердість матеріалу в початковому стані). В результаті електроіскрового оброблення отримали покриття на основі Mo з мікротвердістю 824 $HV_{0,04}$ і покриття на основі Ti, для якого мікротвердість склала 688 $HV_{0,04}$. Мікротвердість покриття Mo була біля 194 %, а покриття Ti — біля 146 % вищою за мікротвердість матеріалу основи області впливу температури SWC після електроіскрового оброблення підвищилася на 88 % (покриття Ti) і на 76 % (покриття Mo). Більше значення мікротвердості в SWC покриття Ti порівняно з покриттям Mo можна пояснити отриманими в ній карбідами титану. Ретельніші дослідження задачі



а)



б)

Рис. 1. Мікроструктура покриття Ti (а) і покриття Mo (б) на сталі 45, х500

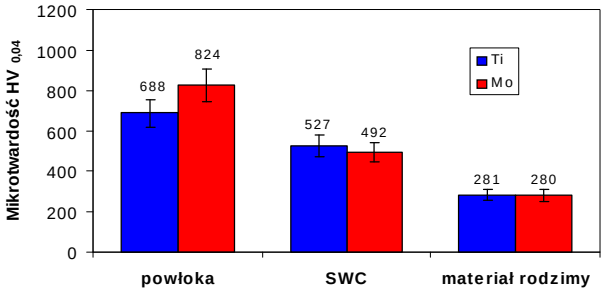


Рис. 2. Мікротвердість покриттів Ti і Mo

будуть реалізувані в подальших етапах цієї роботи. Результати визначення мікротвердості подані на рис. 2.

Трибологічні дослідження. Трибологічні дослідження електроіскрових покриттів були проведені за допомогою установки Т-01М (рис. 3) типу площина — палець, схема якої зображена на рис. 4. Установка забезпечувала постійне вимірювання сили тертя при заданому навантаженні. Вкладка розміром ϕ4×20 мм була виготовлена зі сталі NC 6.

Дослідження на установці проводились за таких параметрів тертя: швидкість обертання n=637 об/хв; кількість обертів i=5305 об/хв; час t=600 с; навантаження 5 — 15 Н.

На рис. 5 подана сила тертя у функції часу при навантаженні 10 Н. Крива А стосується дослідження матеріалу основи — сталі 45; крива В відображає результат дослідження покриття Ti, а крива С — покриття Mo. Під час сухого тертя покриттів Ti і Mo (див. рис. 5,В і рис. 5,С) спостерігається вплив контакту атмосфери з поверхнями, внаслідок чого створена окислювальна

Рис. 3. Трибологічна установка Т-01М типу вкладка-торець

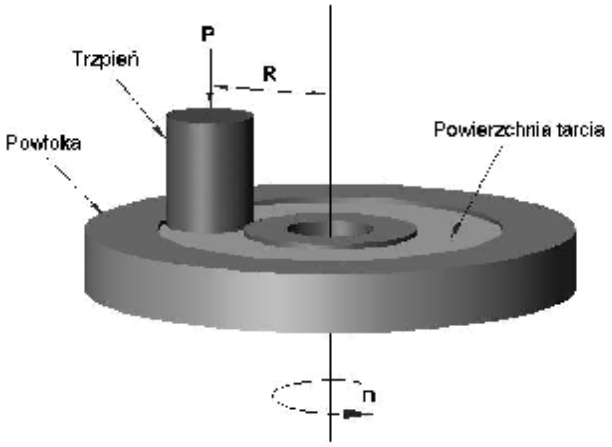


Рис. 4. Схема дії установки Т-01М

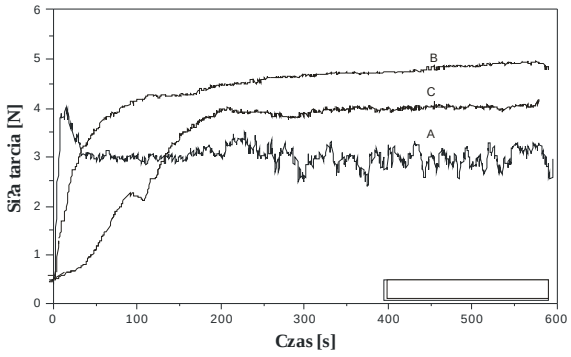


Рис. 5. Залежність сили тертя від часу: Q=10 Н; А — матеріал підкладки сталь 45, В — покриття Ті, с — покриття Мо

плівка, яка забезпечує стійкість проти спрацювання пар тертя.

Інший характер спостерігається для $F=f(t)$ у випадку без покриття (див. рис. 5, крива А), де стабілізація сили тертя відбувається тільки в інтервалі від 50 до 150 с. Середня сила тертя для сталі 45 склала $F\acute{S}r$=3,01 Н, для покриття Ті — $F\acute{S}r$=4,65 Н, а для покриття Мо — $F\acute{S}r$=3,05 Н. У табл. 1 вказані втрати маси досліджених матеріалів.

Таблиця 1

Втрати маси досліджених матеріалів

Навантаження, Н	Матеріал			
	Сталь 45	Покриття Ті	Покриття Мо	Сталь 45 по склу
5	0,2682	0,0021	0,0015	0,2890
10	0,329	0,0029	0,0019	0,401
15	0,4208	0,0043	0,0027	-

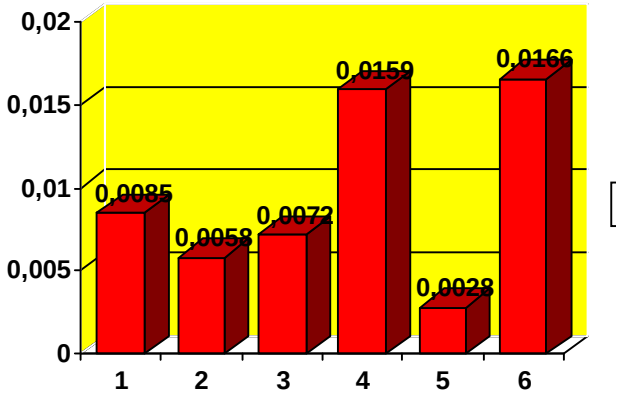


Рис. 6. Порівняльна стійкість проти спрацювання покриттів в умовах абразивного зношування: 1 — електролітичне покриття типу Ni-Ал; 2 — електролітичне покриття типу Ni-B-Ал; 3 — електролітичне покриття типу Ni-B (хромування); 4 — сталь 45; 5 — електроіскрове покриття — анод ВН15; 6 — сталь 45 по контртілу зі скла

Найстійкішими проти спрацювання виявилися покриття на основі Мо.

Наведені вище результати досліджень приводять до висновку про доцільність застосування електроіскрових покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин. На рис. 6 вказано спрацювання електроіскрових покриттів порівняно з композиційними покриттями на основі нікелю, отримане методом електрохімічного осадження.

Наступний етап цієї праці був обумовлений завданням виявити, чи є збіжність результатів спрацювання трибовузла на різних установках з однаковою схемою тертя. Для цього слід було провести такі дослідження: порівняльні дослідження на стійкість проти спрацювання ідентичного зразка за наведеною схемою тертя з метою визначення збіжності результатів; моніторинг утворення оксидних плівок на поверхні тертя в умовах тертя ковзання без мастила.

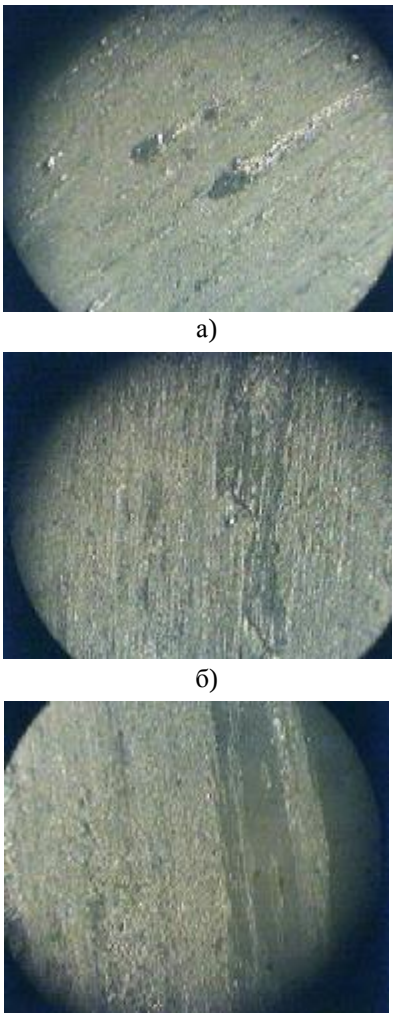
Механічний опір, що виникає при зовнішньому терті в площині дотику двох тіл при їхньому відносному переміщенні, створює силу тертя F, спрямовану протилежно до їх відносного переміщення. Зовнішнє тертя — дисипативний процес, що супроводжується виділенням тепла, електризацією тіл, їх руйнуванням до стану наночастинок.

Зовнішні умови (навантаження, швидкість, шорсткість, температура, мащення) впливають на величину зовнішнього тертя не менше, ніж природа тіл, що труться, змінюючи його в декілька разів. Унаслідок хвилястості та шорсткості кожної з поверхонь, дотикання двох тіл виникає лише в окремих „плямах", зосереджених на гребнях виступів. Розміри плям залежать від природи тіл та умов зовнішнього тертя. Жорсткіші виступи проникають у контртіло, що деформується, утворюючи одиничні плями реального контакту, на яких виникають сили прилипання (адгезія, хімічні зв'язки, взаємна дифузія тощо). В результаті припрацювання плями дотику бувають „витягнутими" в напрямі руху. Діаметр еквівалентної за площею плями дотику складає від 1 до 50 мкм в залежності від природи поверхні, виду її оброблення і режиму тертя. При ковзанні ці плями нахиляються під деяким кутом до напряму руху, матеріал розсувається в боки і підминається нерівністю, що ковзає, а плями прилипання, що утворюються з поверхневих плівок, покриваючих тверде тіло, називаються мостиками, безперервно руйнуються (зрізуються) і формуються знову. В цих плямах реалізуються напруження лише в декілька разів менші теоретичної міцності матеріалу. Опір відторгненню матеріалу при зсуві залежить від безрозмірної характеристики h/R — відношення глибини h проникнення одиничної нерівності змодельованої сферичним сегментом до його радіуса R. Це відношення визначає механічну складову сили зовнішнього тертя.

З метою наочного дослідження утворення відпрацьованих плям налипання нами були проведені дослідження за методикою [2], в якій схема тертя відповідає наведеній вище установці, в повітряному середовищі сталі 45 по склу з ідентичними трибологічними параметрами, з метою проведення моніторингу утворення оксидних плівок на поверхні тертя металевого зразка. Враховуючи, що скло є достатньо твердим з гладкою поверхнею матеріалом, його можна вважати абсолютно твердим тілом з властивостями хімічно нейтрального матеріалу.

Технологія тертя здійснювалася за схемою постійного зсуву доріжки тертя, так, щоб зразок терся практично по новій доріжці на склі. На момент фотографування зразок зміщували так, щоб поле зору об'єктива збігалося з точкою тертя на зразку. Таким чином нам вдалося провести часовий моніторинг утворення поверхневих оксидних плівок, а також встановити її якісні топографічні характеристики.

Вагові втрати зразків дещо зростають, особливо на підвищених навантаженнях (рис. 6,б). Це пояснюється поганою змочуваністю скла, що, в свою чергу, знижує адгезійні властивості. Тому утворення вторинних структур у процесі тертя дещо затримується за часом, а утворені при цьому продукти тертя знаходяться у зваженому стані в зоні тертя. Такий механізм погіршує трибологічні характеристики, але за рахунок високої поверхневої енергії мікрочастинок спрацьованого матеріалу, останні збираються і утворюють конгломерати, які мають нижчу поверхневу енергію. Подальший процес характеризується прилипанням до поверхні металу з утворенням окисних поверхневих плівок рис 7. На рис. 7,а видно місця утворення конгломератів на поверхні тертя.



а) б) в)

Рис. 7. Характер поверхні при терті без мащення сталь 45 по скляному контртілу

Таким чином, більша частина формозмін пружної та розсіяної енергії обумовлена втратами на гістерезис.

У плямах контакту виникають сили міжмолекулярної взаємодії, втрати на подолання якої оцінюються безрозмірною характеристикою τ/σ_s, де τ — зсувний опір молекулярного зв'язку, σ_s — межа текучості основи. Молекулярний зсувний опір $\tau=\tau_0+\beta P_r$, де τ_0 — міцність мостика за відсутності стискаючого навантаження, P_r — фактичний тиск на плямі контакту, β — коефіцієнт зміцнення мостика. Кожна пляма контакту (так названий фрикційний зв'язок) існує лише обмежений час, оскільки виступ виходить із взаємодії. Тривалість життя фрикційного зв'язку — важлива характеристика, бо визначає температуру, що розвивається при зовнішньому терті, стійкість проти спрацювання тощо.

Отже, процес зовнішнього тертя є двояким процесом — з одного боку він пов'язаний з дисипацією енергії, яка обумовлена подоланням молекулярних зв'язків, а з іншого — з формозміною поверхневого шару матеріалу через нерівності, що зосередилися.

Подальше мікросхоплювання провокує дроблення металу, порошок якого не йде із зони тертя, а утворює конгломерати (рис. 7,б), розтягнуті в напрямі тертя, які

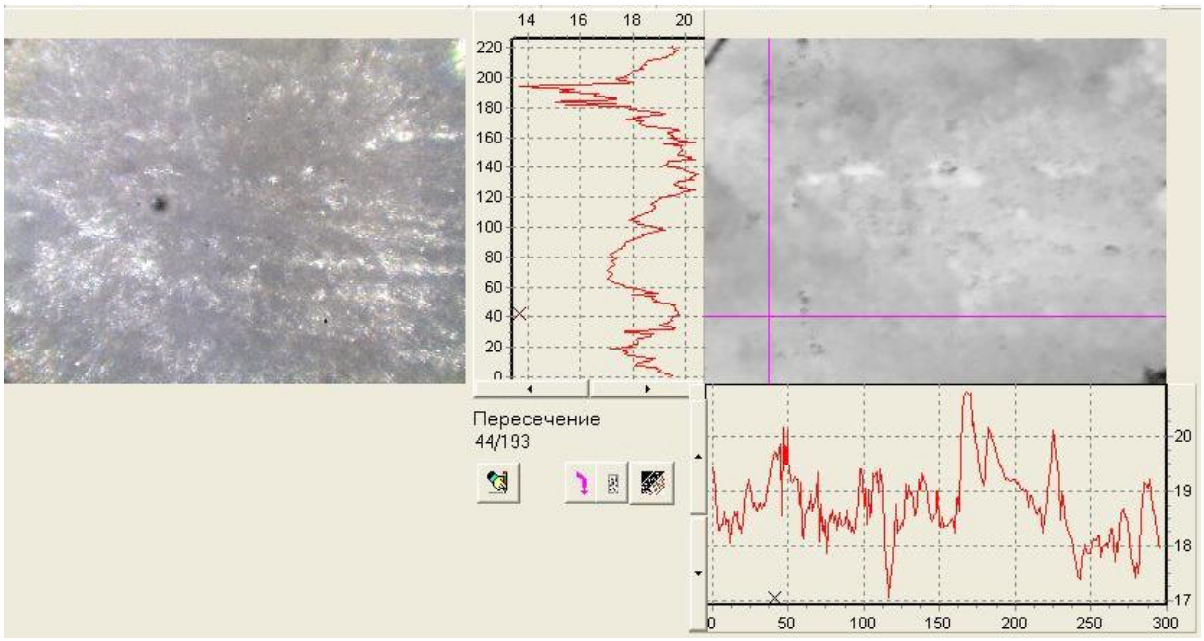


Рис. 8. Топографія поверхні тертя сталь 45 по скляному контртілу

утримуються за рахунок міжатомного притягування [2]. Укрупнені конгломератні скупчення площею до 10 мм^2 надалі розтираються по поверхні тертя в тонкі захисні плівки (рис. 7,в).

Для визначення об'ємних характеристик і якості топографії поверхні були проведені топографічні дослідження на установці „Мікрон-альфа", яка дає змогу в реальному масштабі часу відтворювати мікротопографію поверхні за допомогою оброблення послідовності картин інтерференції, що реєструються цифровою камерою при комп'ютерному керуванні зміщенням опорного дзеркала. Мікрон-альфа дає змогу: будувати 2D і 3D профілі поверхні; кількісно оцінювати характеристики поверхні; спостерігати картини інтерференції; проводити металографічні дослідження.

Поле сканування (X, Y) — 100x90 мкм. Розширення по горизонталі (X, Y) — 0,16 мкм. Максимальна висота рельєфу, що вимірюється (Z) — 40 мкм. Скануючи поверхню, ми бачимо, що налиплі плівки досягають до 2…3 мкм [4].

Висновки. 1. Дослідження, проведені незалежно на двох різних установках, але на матеріалі зі сталі 45 одного постачання, вказують на збіжність результатів при терті ковзання без мащення.

2. Дослідження показали достатню працездатність розроблених покриттів у запропонованих для них трибологічних параметрах випробувань.

Література

1. *www*.swpearl.com/eng/scripts/dictionary/index.php?char=b-250k.

2. *Свирид М.М., Паращанов В.Г., Онищенко А.В.* Комплекс для дослідження трибологічних параметрів вузла тертя // Наук.-техн. зб. „Проблеми тертя та зношування". — К.: НАУ, 2006. — Вип. 45. — 204 с.

3. *Гаркунов Д.Н.* Триботехника (износ и безызносность): Учебник. — М.: Изд-во МСХА, 2001. — 616 с.

4. *Игнатович С.Р., Закиев И.М., Борисов Д.И., Закиев В.И.* Методика исследования физико-механических свойств поверхностных слоев материалов при усталости с использованием многофункционального прибора «Микрограмма» / Авиационно-космическая техника и технология. — Вип. 8(16). — Харьков: ХАИ, 2004. — С. 103—166.

Отримана 20.11.07

E. Vays, N. Radek, M. Svirid, V. Paraschanov, S. Zadniprovska

The tribological properties of electro-spark coverages on the basis of titan and molybdenum

Polytechnic institute, Kel'tse, Poland;
National aviation university, Kyiv, Ukraine

The compatibility of the tribological systems and analogy of the results is researched. Technological possibilities of friction surface monitoring topography and possibility of using of the electro-spark coverages, for the increase of the friction knot capacity, are shown.