

УДК 620.22: 620.186

DOI: 10.18372/0370-2197.3(104).18983

*О. О. СКВОРЦОВ, О. О. МІКОСЯНЧИК**Національний авіаційний університет, Україна*

ЗАЛЕЖНІСТЬ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ В АБРАЗИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ВІД ЗМІЦНЮЮЧИХ ФАЗ

Проведено аналіз дефектів деталей вузлів тертя авіаційної техніки в умовах абразивного зношування. Розглянуто типи електродних матеріалів для модифікування деталей електроіскровим легуванням. Проаналізовано механізми зношування в умовах впливу вільного абразиву електроіскрових покриттів сталей У10 та Р18, сплаву ВК8 та кераміки ЦЛАБ-І на конструкційних сталях 30ХГСА та 45. Визначено залежність інтенсивності зношування електроіскрових покриттів від твердості карбідів та боридів і співвідношення зміцнюючої фази в матриці.

Ключові слова: *тертя, покриття, зношування, абразив, електроіскрове легування, зносостійкість, карбіди.*

Вступ. Економічне значення проблеми підвищення надійності та довговічності машин та механізмів стає актуальним у зв'язку з тим, що головною причиною виходу з ладу машин є не їх поломка, а знос рухомих сполучень та робочих органів під впливом сил тертя. При терті відбуваються зміни приповерхневого об'єму матеріалу рухомих сполучень. Ці зміни визначають процес зносу і величину самої сили тертя. Деталі вузлів тертя авіаційної та наземної техніки забезпечують передачу потужності, рух, а також плавність роботи механізмів. Дефекти деталей вузлів тертя можуть призвести до погіршення їхніх характеристик, а в деяких випадках навіть до повної відмови. Тому запобігання, а також своєчасне виявлення та усунення дефектів є одним з найважливіших завдань при експлуатації авіаційної та наземної техніки. Актуальність даної роботи обумовлена тим, що дефекти деталей вузлів тертя є однією з основних причин відмов авіаційної та наземної техніки. Згідно з дослідженнями [1], дефекти деталей вузлів тертя є причиною близько 20% всіх відмов авіаційної техніки. Зношування – це кумулятивна втрата матеріалу з контактної поверхні або деформація матеріалу внаслідок механічних процесів між твердими, рідкими чи газоподібними тілами. Зношування поверхні залежить від різних факторів, таких як геометрична форма поверхні, інтенсивність і частота навантажень, атмосферні умови та механічні властивості, термічні та металургійні характеристики матеріалу [2]. Тому вивчення дефектів деталей вузлів тертя та розробка методів їхнього запобігання, виявлення та усунення є важливим завданням для забезпечення надійності та безпеки експлуатації авіаційної та наземної техніки.

Управління тертям, правильний підбір матеріалів за критеріями антифрикційності та зносостійкості, раціональне конструювання вузлів тертя та деталей машин, оптимізація умов їх експлуатації можуть суттєво подовжити ресурс роботи та підвищити ефективність машин та механізмів. У зв'язку з цим виняткового значення набувають дослідження в галузі фізико-хімічної механіки процесу тертя та зношування [3, 4], які можуть розкрити нові способи зниження

втрат на тертя та зношування та знайти шляхи підвищення зносостійкості машин та механізмів авіаційної техніки.

Одним із напрямків забезпечення експлуатаційної надійності технічних систем є використання і розроблення нових сучасних технологічних методів поверхневого зміцнення металів та сплавів. Сучасні технологічні методи нанесення захисних покриттів відкривають необмежені можливості формування зносостійких структур, що забезпечують надійну роботу вузлів тертя в найрізноманітніших умовах контактної взаємодії, а саме: при великих навантаженнях; кавітації; радіації; корозійних і агресивних середовищ і т.п.

Потужним методом модифікування поверхневих шарів деталей вузлів тертя, їх хімічного складу і структури є електроіскрове легування (ЕІЛ), що базується на використанні дії електричного імпульсного розряду, який протікає між електродами. При цьому спостерігається перенесення матеріалу аноду (електроду) на катод (деталь). Електроіскрове легування відзначається низькими термічними навантаженнями на деталі, що обробляються. Це особливо важливо для деталей, виготовлених із складних матеріалів або деталей з важким доступом, де термічна деформація може призвести до негативних наслідків.

Розвиток нових матеріалів та вискоефективних технологій робить електроіскрове легування ще більш актуальним для покращення зносостійкості деталей та отримання нових можливостей для їхнього вдосконалення.

Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем. Встановлено, що одним із катастрофічних видів зношування деталей вузлів тертя авіаційної техніки є абразивне зношування [5-7]. Цей вид зношування притаманний деталям шасі, ЛА, золотниковим парам, гвинтам та іншим деталям авіаційної техніки.

Абразивний знос, відповідно до ISO 15243, класифікується як знос, який проявляється поступовим зніманням матеріалу, зазвичай при наявності забруднюючої речовини, що містить тверді частинки. Абразивне зношування також може виникнути при нестачі мастильного матеріалу. Як правило, абразивне зношування характеризується тьмяним зовнішнім виглядом поверхні. Наприклад, у процесі абразивного зношування підшипників кочення, що може становити до 23% несправностей підшипників (рис. 1), зазвичай порушується мікрогеометрія поверхонь.

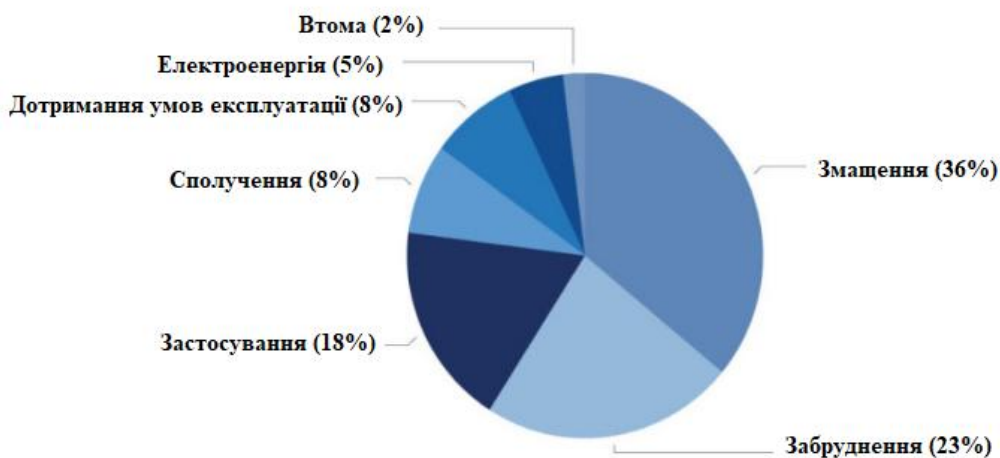


Рис. 1. Загальні причини несправності підшипників [8].

Абразивні частинки можуть швидко зношувати доріжки кочення кілець та тіла кочення, а також виїмки у сепараторах. Причиною абразивного зношування може бути проникнення забрудненого матеріалу в мастило і реалізація граничного режиму мащення в контактні кочення.

Підшипники кочення дуже чутливі до твердих забруднень, які можуть статися навіть під час монтажу підшипника. Забруднення дрібними твердими частинками може видалити матеріал з контактних поверхонь підшипників шляхом надмірного полірування, змінюючи внутрішню геометрію підшипників через абразивне зношування [8]. Вм'ятини контактних поверхонь (рис. 2,а) можуть виникнути, коли тверді та пластичні частинки захоплюються в контактну зону сильно навантажених підшипників і пластично деформують поверхні.

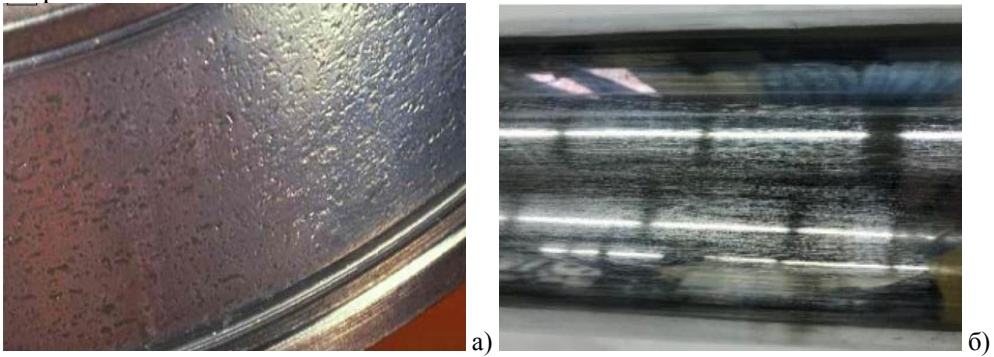


Рис. 2. Опорні поверхні підшипників, пошкоджені абразивом, з вм'ятинами (кратерами) на внутрішньому кільці (а) та пошкодження штоку амортизаційної стійки основного шасі літака Ан-32 у результаті абразивного зношування (б).

Вм'ятини, утворені великими пластичними частинками, можуть призвести до виїмок і відколів, тоді як вм'ятини, пов'язані з дрібними пластичними частинками, можуть призвести до відшарування матеріалу з доріжок тертя [9]. Інтенсивний абразивний знос підшипників кочення проявляється у вигляді задири. На рис. 2,б представлено абразивний знос штоку амортизаційної стійки основного шасі літака Ан-32. Інтенсивне абразивне зношування робочих поверхонь штоку, виготовлених з легованої сталі 30ХГСН2А, обумовлено потраплянням твердих абразивних частинок піску, твердість яких досягає 11...12 ГПа, що призводить до утворення на поверхнях контактуючих деталей подряпин та глибоких рисок.

Традиційно в силових елементах стійки шасі використовують високоміцні вуглецеві сталі у зв'язку з виконанням вимог до максимальної жорсткості таких конструкцій [10]. Вуглецева сталь універсальна і широко використовується в різних галузях промисловості завдяки своїй міцності, довговічності та низькій вартості. Однак вона піддається корозії та зносу, що обмежує термін її служби та продуктивність.

У зв'язку з розвитком методів зміцнення, розробкою нових зносостійких покриттів та появою ефективних методів поверхневої обробки матеріалів, що забезпечують отримання заданого комплексу характеристик поверхневої міцності, з'являються можливості підвищення зносостійкості традиційних конструкційних матеріалів. Зокрема, при ЕЛ залежно від експлуатаційного

призначення модифікованої деталі, використовувани електродні матеріали можна розділити на три категорії [11].

1) зносостійкі матеріали, до складу яких входять тверді карбіди W, Ti, Cr, Ta, Mo, Hf, Zr, Nb, V та ін., сплави для наплавлення з високим вмістом нікелю, хрому, бориди Ti, Zr, Ta, інтерметалічні сполуки та металокераміки;

2) корозійно-стійкі матеріали, до яких належать неіржавна сталь, інтерметаліди Fe, Ni та Ti з Al, багатокомпонентні сплави FeCrAlY, NiCrAlY, CoCrAlY;

3) матеріали для відновлення або модифікування зношеної поверхні: сплави на основі нікелю або кобальту, благородні метали (Au, Ag, Pt, Ir, Pd і Rh), тугоплавкі метали (W, Mo, Ta, Re, Nb і Hf та їх сплави) та сплави Fe, Ni, Cr, Co, Al, Ti, Cu, Zr, Zn, V, Sn та ін.

Резервом для підвищення якості електроіскрових покриттів (ЕІП) трибологічного призначення можуть бути комбіновані технології: рекомендовано після ЕІП застосовувати поверхнєве пластичне деформування, безабразивну ультразвукову фінішну обробку, лазерну обробку або використовувати графіт в якості катоду у разі ЕІП на заключних операціях обробки [12].

Згідно [13], дослідження електроіскрового осадження в основному зосереджено на тому, як визначити взаємозв'язок між параметрами процесу і товщиною осадження і як збільшити товщину осадження, а дослідження параметрів процесу осадження в основному зосереджено на обмежених керамічних або цементованих карбідних матеріалах осадження, іскрової ємності, напруги, та питомого часу осадження. Осаджений матеріал при ЕІП містить компоненти сплаву, отримані в результаті поєднання електрода, підкладки та середовища під час процесу затвердіння. ЕІП включає ефективний розряд накопиченої енергії в електричному конденсаторі, що призводить до швидкого повторного затвердіння локальних розплавлених областей в мікронному масштабі протягом 10-100 мікросекунд. Наприклад, в роботі [14] проаналізовано, що найбільшою зносостійкістю будуть володіти деталі, оброблені методом ЕІП у режимі з ємністю конденсаторної батареї $150 \pm 15 \text{ мкФ}$, частотою вібрації електрода $250 \pm 50 \text{ Гц}$ із застосуванням електрода Т15К6 внаслідок формування ЕІП з мікротвердістю поверхні 15,2 ГПа. Досягнення високої зносостійкості деталей, оброблених у режимі ємності конденсаторної батареї $330 \pm 30 \text{ мкФ}$, частота вібрації електрода $125 \pm 25 \text{ Гц}$ із застосуванням електрода ВК8, забезпечується поєднанням високої поверхневої мікротвердості ЕІП (13,5 МПа) та залишкових напружень стиску на рівні -90 МПа.

Залежно від типу матеріалу та параметрів процесу, які використовуються в процесі ЕІП, швидкість охолодження може досягати $105\text{--}109 \text{ }^\circ\text{C/s}$ [15]. Таке швидке охолодження може призвести до утворення аморфних та наномасштабних фаз на поверхні. У роботі [16] обґрунтовано застосування технології відновлення зношених валів турбокомпресорів автомобіля шляхом нанесення нових електроіскрових покриттів на основі електроерозійних наноматеріалів, що сприяє покращенню фізико-механічних властивостей електроіскрових покриттів. Визначено, що дане ЕІП підвищує антифрикційні властивості трибосистеми в 3,3 рази при абразивному зношуванню з фракцією 0,1...0,4 мм та підвищує ресурс валів турбокомпресорів, відновлених за рекомендованою технологією, у 1,5 рази.

В роботі [17] зазначено, що формування ЕПП визначається умовами переносу й кристалізації металу: градієнт структур по товщині покриття значною мірою обумовлений розвитком процесів структурних перетворень, подібних впливові термічного характеру. Авторами встановлено, що за умови однакового металу анода і катода (на прикладі вуглецевої сталі за хімічним складом 0,65 % С, 0,67 % Mn, 0,3 % Si, 0,027 % P, 0,028 % S) ефект поверхневого зміцнення від іскрового розряду може бути конкурентноспроможним більшості термічних та хіміко-термічних технологій обробки поверхні металевих матеріалів.

Зменшення витрат матеріалу та енергії в процесі ЕП сприяє зменшенню викидів та відходів, що відповідає сучасним екологічним стандартам та допомагає знизити вплив промисловості на навколишнє середовище. Розвиток нових матеріалів та високоефективних технологій робить ЕП ще більш актуальним для покращення зносостійкості деталей та отримання нових можливостей для їхнього вдосконалення [18]. Усі вищезазначені чинники роблять метод ЕП важливим і актуальним для вирішення завдань підвищення зносостійкості деталей у різних галузях і сферах виробництва.

Мета роботи полягала в оцінці зносостійкості ЕПП, сформованих на конструкційних сталях, в умовах впливу вільного абразиву.

Експериментальне обладнання та методика дослідження. Зразки розміром 30x30 мм були виготовлені із конструкційної легованої сталі 30ХГСА (аналог 30HGSA (Польща)) та конструкційної вуглецевої якісної сталі 45. Всі дослідні зразки виготовлялись з листового матеріалу в якості поставки в нормалізованому стані. Перед нанесенням електроіскрового покриття робоча поверхня зразка шліфувалась. Електроіскрове легування зразків здійснювали на установці «Елітрон-22» при постійному струмі короткого замикання 1А [19].

Електроди виготовляли із високовуглецевої сталі У10 (1,1%С; 0,3%Р; 0,2%S; аналог за DIN –1.1645), швидкоріжучої сталі Р18 (0,77%С; 4,2%Cr; 18,3%W; 1,2%V; 0,7%Mo; аналог за DIN –1.3355), твердого сплаву ВК8 (92%WC; 8%Co; аналог за DIN – HG30) і кераміки ЦЛАБ-1. Електродний матеріал композиційної кераміки ЦЛАБ-1 з Ni—Cr сполучником виготовлено в Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. Пористість електроду ЦЛАБ-1 становила $\leq 3\%$. Фазовий склад електроду ЦЛАБ-1 наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Склад та режим одержання електродного матеріалу ЦЛАБ-1 [20]

Склад (%)	Температура гарячого пресування, °С	Час спікання, хв
59,19LaB6 + 27,47ZrB2 + 15,33Ni + 5,25Cr + 0,42Al	1550—1600	25—35

Випробування покриттів проводили на експериментальній установці (рис. 3) відповідно до ГОСТ 23.208-79. Методика проведення досліджень, яка використана в роботі, аналогічна методиці в стандарті ASTM G65 Abrasive Wear Test [19]. Процес абразивного зношування моделювався у вільному не жорстко закріпленому абразиві. В якості абразиву використовували кварцевий пісок

(SiO₂) зернистістю 500 мкм. Перед випробуванням абразивні частинки просушували у електричній печі СШОЛ (вологість не перевищувала 0,16%). До і після випробування зразки промивали в етиловому спирті і просушували. Експерименти проводили при постійній швидкості обертання гумового ролика 0,158 м/с, навантажені 44,1 Н впродовж 20 хв.

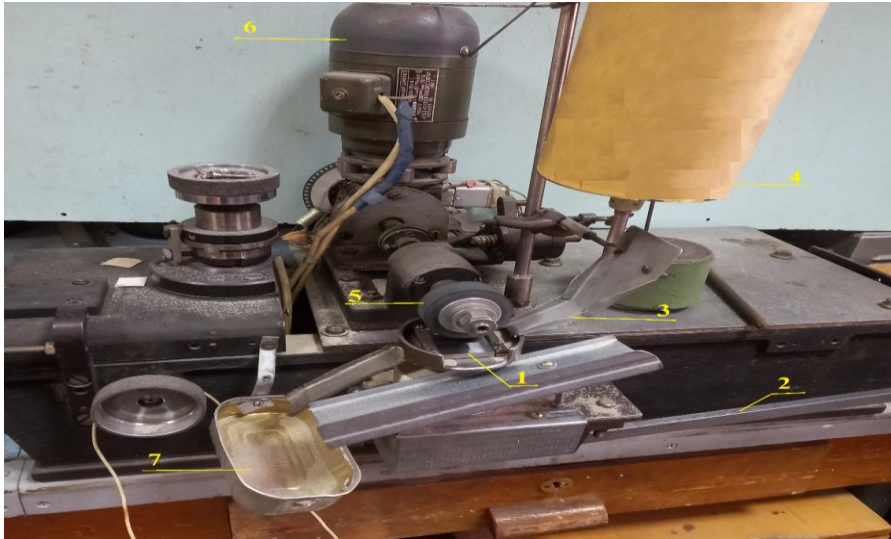


Рис. 3. Установки для випробування на абразивну стійкість 1 – зразок, 2 – важіль, 3 – направляючий лоток для абразиву, 4 – дозуючий пристрій подачі абразивних часток, 5 – гумовий ролик, 6 – привід обертання, 7 – бункер для відходів абразиву.

Ваговий знос покриттів визначали на вагах Axis ANG200C 2-го класу точності з дискретністю 0,0001 г. Структурний стан зразків досліджували за допомогою рентгенівського структурно-фазового аналізу на дифрактометрі ДРОН-3М у випромінненні $\text{CuK}\alpha$.

Результати досліджень та їх аналіз. Найбільшу зносостійкість в умовах впливу абразиву на повітрі без змащувального матеріалу серед усіх досліджених ЕП на конструкційних сталях 30ХГСА та 45 проявляє ЕП вольфрамокобальтовий сплав ВК8. Ваговий знос досліджуваних ЕП, сформованих на сталі 30ХГСА, в 1,8 рази менше для ЕП з кераміки ЦЛАБ-1 та твердого сплаву ВК8, в 1,6 рази менше для ЕП з високовуглецевої сталі У10 та в 1,1 рази менше для ЕП з швидкоріжучої сталі Р18 (рис. 4). Інтенсивність зношування зазначених покриттів на 180 м напрацювання характеризується аналогічними кількісними показниками (табл. 2).

Зміцнююча фаза в ЕП значно впливає на опір зношуванню в абразивному середовищі. Згідно [21], підвищення зносостійкості сплавів обумовлено наявністю найбільш твердих структурних компонентів – карбідів або боридів. При цьому, зносостійкість карбідовмісних сплавів залежить від твердості карбідів, співвідношення карбідної фази та матриці.

Найменша зносостійкість керамічного покриття ЦЛАБ-1 обумовлена наявністю в матричній фазі LaB₆ покриття боридної складової ZrB₂ підвищеної мікротвердості (24...27 ГПа), що призводить до крихкості сформованого ЕП. В роботі [22] зазначено, що провідними механізмами зношування ЕП, які містять

диборид цирконію підвищеної твердості, є крихке руйнування і окислювальний механізм.

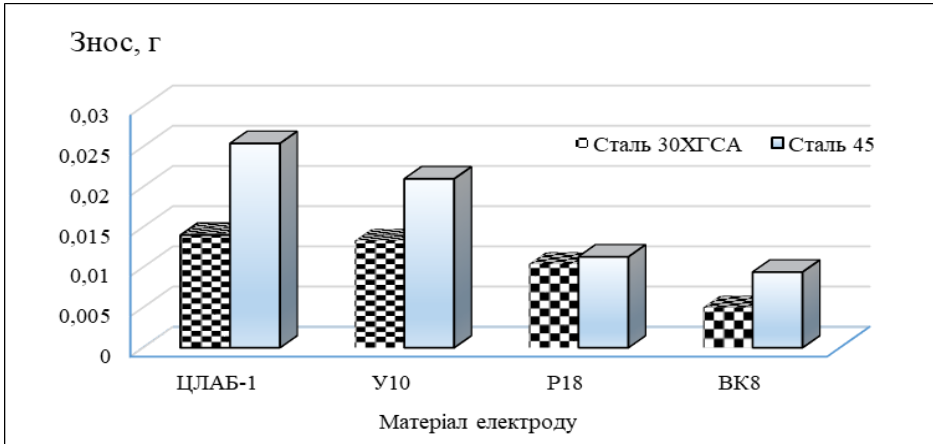


Рис. 4. Ваговий знос електроіскрових покриттів в абразивному середовищі.

Таблиця 2

Інтенсивність зношування електроіскрових покриттів на конструкційних сталях

Матеріал основи	Матеріал електроду			
	ЦЛАБ-1	У10	Р18	ВК8
Сталь 30ХГСА	7,38E-05	7,01E-05	5,49E-05	2,64E-05
Сталь 45	1,34E-04	1,11E-04	5,96E-05	4,96E-05

Зносостійкість ЕІП високовуглецевої сталі У10, яка має структуру вторинного цементиту та перліту, обумовлена наявністю карбіду заліза, вагова частка якого становить до 16%. Однак, карбіди заліза відносяться до найменш стійких карбідів, у порівнянні з карбідами легуючих елементів, оскільки їм притаманна крихкість. Саме домінування крихкого руйнування даного покриття при абразивному зношуванні свідчить про аналогічний механізм, встановлений ЦЛАБ-1. Інтенсивність зношування цих покриттів не має суттєвих відмінностей. Для підвищення зносостійкості ЕІП з сталі У10 необхідно використовувати електрод з термічною обробкою: згідно [23] загартування сталі У10 з аустенітної області призводить до розчинення вторинних карбідів та появи значної кількості залишкового аустеніту (структура мартенситу відпуску з $A_{\text{зал}}$), що призводить до зростання зносостійкості такої сталі в абразивному середовищі на 10,4 %/

Підвищення зносостійкості сталей з ЕІП зі сталі Р18 встановлено на 24% для сталі 30ХГСА та на 50% для сталі 45, в порівнянні з попередньо розглянутими покриттями. Опору зношуванню в абразивному середовищі ЕІП зі сталі Р18 сприяє наявність великої кількості карбідів, загальна кількість яких складає, в середньому, 28%. Основним карбідом сталі Р18 є складний карбід вольфрама Fe_3W_3C (Me_6C), в якому може розчинятися частина ванадію та хрому [24]. Карбідоутворюючі елементи V та Mo також підвищують експлуатаційні характеристики ЕІП із сталі Р18.

Сплави та покриття WC-Co широко використовуються в промисловості, так як характеризуються поєднанням високої твердості та зносостійкості, тому сплав BK8 використовували для зміцнення досліджуваних сталей методом ЕПІ. Вольфрамокобальтовий сплав BK8 містить 92% карбіду вольфраму WC. Однак, рентгенівський структурно-фазовий аналіз дифрактограм ЕПІ з сплаву BK8 після тертя показав наявність в покритті фаз напівкарбіду вольфраму W_2C і β -карбіду вольфраму WC_{1-x} (рис.5).

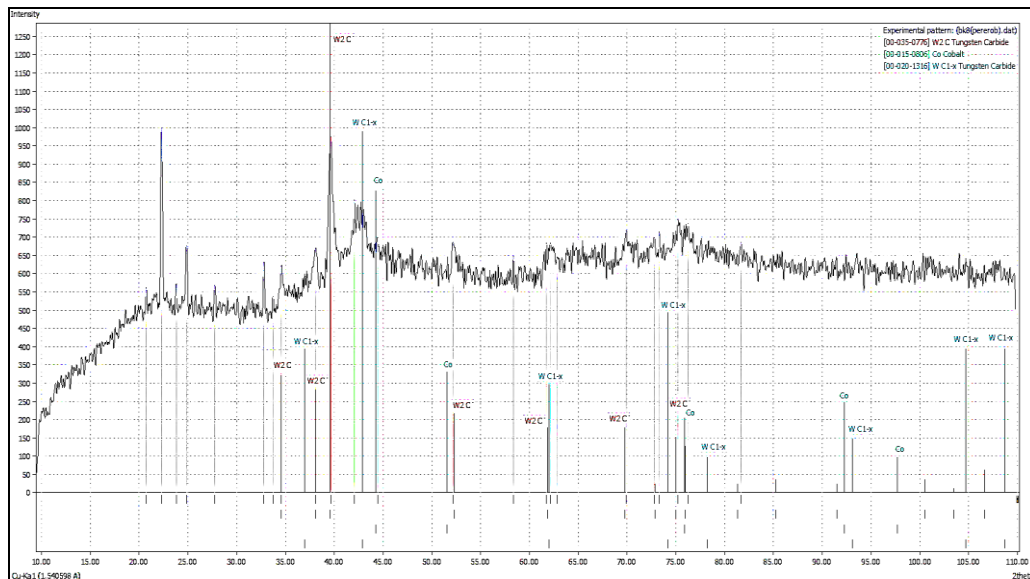


Рис.5. Рентгенівська дифрактограма електроіскрового покриття сплаву BK8 після тертя в абразивному середовищі.

В спектрі не виявлено фази WC, що свідчить про його деструкцію. Фазова та структурна неоднорідність сформованого ЕПІ-покриття зі сплаву BK8 може бути обумовлена миттєвим неоднорідним розподілом температурних полів на робочій поверхні анод-катод, внаслідок чого фізико-хімічні процеси на локальних ділянках протікають за різних температур. При терті активуються окислювальні процеси в поверхневих шарах матеріалу, при цьому, згідно [25] кисень є додатковим фактором, що призводить до втрати вуглецю карбідом. В порівнянні з WC, W_2C характеризується більшою термостійкістю, твердістю (до 23,7 ГПа) та проявляє вищі протизношувальні властивості.

Таким чином, дослідження характеру зносостійкості ЕПІ в абразивному середовищі залежно від типу карбідної фази можуть бути базою для обґрунтованого вибору електроіскрового легування сталей для підвищення їх зносостійкості. Отримані результати вказують на перспективність ЕПІ із сталі P18 та сплаву BK8 з необхідним рівнем властивостей для підвищення зносостійкості конструкційних сталей 30ХГСА та 45.

Висновки

Визначено вплив зміцнюючих карбідних фаз в електроіскрових покриттях на опір зношуванню в абразивному середовищі. Встановлено наступні механізми зношування ЕПІ:

1. Низька зносостійкість керамічного покриття ЦЛАБ-1 обумовлена наявністю дибориду цирконію підвищеної твердості в матричній фазі, що призводить до крихкості покриття.

2. Домінування крихкого руйнування ЕПП сталі У10 обумовлена наявністю карбїду заліза до 16% в структурі сталі.

3. Підвищення опору зношуванню ЕПП зі сталі P18 обумовлено наявністю карбїдів W, V та Mo загальною кількістю до 28%.

4. Фазова неоднорідність ЕПП зі сплаву ВК8 та активація окислювальних процесів при терті обумовлюють підвищення зносостійкості ЕПП за рахунок фаз напівкарбїду вольфраму W_2C і β -карбїду вольфраму WC_{1-x} .

Список літератури

1. Мельник О. В. Причини зношування деталей вузлів тертя авіаційної техніки та методи забезпечення їх працездатності. *Problems of friction and wear*. 2020. № 1(86). С.87-92. URL: <https://doi.org/10.18372/0370-2197.86.14491>.

2. Bhadauria N., Pandey S., Pandey P.M. Wear and enhancement of wear resistance – A review. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 26, Part 2. P. 2986-2991. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.616>.

3. Uvarov V., Bepalov S. Prediction of Tribological Properties of Structural Steels Using Artificial Neural Networks. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2019. Vol.5, No.1. P. 45–60. <https://doi.org/10.23939/ujmems2019.01.045>

4. Дурягіна З.А., Щербовських Н.В., Беспалов С.А. Вплив лазерного легування з порошкових сумішей на структуру та мікромеханічні властивості сталі 12Х18Н10Т. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2011. Т.33, №7. С. 969 – 975.

5. Соловійов В. І., Коротін С. М., Коровін І. П. Організація експлуатації бойової авіаційної техніки. Підручник: К., НУОУ, 2016, 216 с.

6. Ігнатович С. Р., Маленко В. Н., Лабунец В.Ф. Идентификация поверхностной прочности деталей узлов трения летательных аппаратов. *Проблеми трибології*. 2007. №1. С. 11-14.

7. Беззубець С. В., Сорочан О. О. Аналіз стану та перспектив розвитку системи технічного обслуговування авіації повітряних сил збройних сил України. *Збірник наукових праць кафедри авіації. Інженерно-авіаційне забезпечення*. 2021. № 2(9). С. II-1-10.

8. Rodriguez D., Meyers K. E. Schadensanalyse bei wälzlagern mithilfe der norm ISO 15243. 2022. <https://evolution.skf.com/de/schadensanalyse-bei-waelzlagern-mithilfe-der-norm-iso-15243/#>. (дата звернення: 19.08.2024).

9. Vencl A., Gašić V., Stojanović B. Fault tree analysis of most common rolling bearing tribological failures. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017. 174. 012048 doi:10.1088/1757-899X/174/1/012048

10. Рябков В.И., Капитанова Л.В., Бабенко Ю.В. и др. Особенности использования титановых сплавов, нержавеющей сталей, металлокомпозиционных и антифрикционных материалов в шасси современных самолетов. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2003. Вип. 1(36). С.6-15.

11. Zhengchuan, Z., GuanJun, L., Konoplianchenko, I., Tarelnyk, V. B., Zhiqin, G., Xin, D. A review of the electro-spark deposition technology. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*. 2022. 2 (44). P. 45-53. <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.10>

12. Tarelnyk V., Martsynkovskyy V. Upgrading of Pump and Compressor Rotor Shafts Using Combined Technology of Electroerosive Alloying. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 630. P. 397-412. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.630.397>.

13. Huang, Q., Chen, Z., Wei, X., Wang, L., Hou, Z., Yang, W. Effects of Pulse Energy on Microstructure and Properties of Mo₂FeB₂-based Cermet Coatings Prepared by Electro-spark Deposition. *China Surface Engineering*. 2017. 30(3). P. 89-96. <https://doi.org/10.11933/j.issn.1007-9289.20170106002>
14. Kozak, F. V., Prunko, I. B., Fedenko, V. Y., Gladun, M. R. Optimization of the process of application of electrospark coatings when strengthening automotive parts of the "shaft" type. *Oil and Gas Power Engineering*. 2024. (2(40), 66–72. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2\(40\)-66-72](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2(40)-66-72)
15. Habibi F., Samadi A. In-situ formation of ultra-hard titanium-based composite coatings on carbon steel through electro-spark deposition in different gas media. *Surface and Coatings Technology*. 2024. Vol. 478. 130472 <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130472>
16. Marchenko, D., Matvyeyeva, K. Increasing the Wear Resistance of Restored Car Parts by Using Electrospark Coatings. *Problems of Tribology*. 2023. 28(1/107). C. 65–72. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-107-1-65-72>
17. Vakulenko I. O., Proydak S. V., Stradomski Z., Diadko V. A. Influence of electric spark on hardness of carbon steel. *Science and Transport Progress*. 2014. (2(50), 95–102. <https://doi.org/10.15802/stp2014/23779>
18. Mikosianchuk O., Tokaruk V., Mnatsakanov R. Estimation of tribotechnical characteristics and signals of acoustic emission for a friction pair of steel 30HGSA and duraluminium D16 modified by an alloy VK8. *Problems of Tribology*. 2019. 24(2/92). P. 48–54. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-92-2-48-54>
19. Скворцов О. О., Мікосянчик О. О. Дослідження зносостійкості електроіскрових покриттів в умовах впливу абразиву. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. 3 (100). С. 64-72. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(100\).17895](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(100).17895)
20. Панашенко В.М. Склад, структура і властивості електроіскрових і лазерно-електроіскрових ZrB₂-вмісних покриттів на титанових сплавах. *Електричні контакти та електроди*. 2014. № 12. С.134-143.
21. Попов В.С., Брыков Н.Н., Металловедческие аспекты износостойкости сталей и сплавов. – З.:ВПК «Запоріжжя», 1996. 180с.
22. Єрко О. О., В. І. Копилов Абразивна зносостійкість електроіскрових композиційних покриттів на основі ZrB₂. *Інженерія поверхні. Комплексний підхід: Матеріали шостої всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників*: К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ТОВ "Фастпринт", 2018. С.5-6.
23. Брыков М.Н., Ефременко В.Г., Ефременко А.В. Износостойкость сталей и чугунов при абразивном изнашивании: Научное изд. Херсон: Гринь Д.С., 2014. 364с.
24. Чмелева В.С. Рабочая программа, методические указания и индивидуальные задания к изучению дисциплины «Легированные стали и специальные сплавы и их термическая обработка». Днепропетровск: НМетАУ, 2021. 56с.
25. Dvornik M., Mikhailenko E., Nikolenko S. et al. Production of ultrafine-grained spherical β-WC-W₂C-Co microparticles by electro discharge erosion of WC-15Co alloy in glycerol and their solutions. *Materials Research Express*. 2020. Vol. 7, 9. 7 096504 DOI 10.1088/2053-1591/abb0d6

O. SKVORTSOV, O. MIKOSIANCHYK

THE DEPENDENCE OF THE WEAR RESISTANCE OF ELECTRO-SPARK COATINGS IN AN ABRASIVE ENVIRONMENT ON THE STRENGTHENING PHASES

The analysis of the defects of parts of the friction units of aviation equipment under the conditions of abrasive wear was carried out. Types of electrode materials for modification of parts by electrospark alloying are considered. The mechanisms of wear under the influence of free abrasive of electrospark coatings of 1.1645 and 1.3355 steels, HG30 alloy and ZLAB-1 ceramics on structural steels 30HGSA and 45 were analyzed. The dependence of the intensity of wear of electrospark coatings on the hardness of carbides and borides and the ratio of the strengthening phase in the matrix was determined. The low wear resistance of the ceramic coating ZLAB-1 is due to the presence of the boride component ZrB₂ of increased microhardness in the matrix phase, which leads to the brittleness of the coating. The predominance of brittle fracture of ESC of 1.1645 steel is caused by the presence of iron carbide up to 16% in the structure of secondary cementite and pearlite of the steel. The increase in wear resistance of ESC made of 1.3355 steel is due to the presence of a large amount of W, V and Mo carbides. The phase inhomogeneity of ESC made of HG30 alloy, established by X-ray structural and phase analysis of the coating diffractograms and the activation of oxidation processes during friction lead to an increase in the wear resistance of ESC due to the appearance of W₂C tungsten semi-carbide and WC_{1-x} tungsten semi-carbide phases. The obtained results indicate the prospects of ESC made of 1.3355 steel and HG30 alloy with the necessary level of properties to increase the wear resistance of structural steels.

Key words: friction, coating, wear, abrasive, electrospark alloying, durability, carbides.

References

1. Melnyk O. Causes of wear of aircraft parts of friction units and methods for their availability supporting. *Problems of friction and wear*. 2020. № 1(86). C.87-92. URL: <https://doi.org/10.18372/0370-2197.86.14491>.
2. Bhadauria N., Pandey S., Pandey P.M. Wear and enhancement of wear resistance – A review. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 26, Part 2. P. 2986-2991. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.616>.
3. Uvarov V., Bespalov S. Prediction of Tribological Properties of Structural Steels Using Artificial Neural Networks. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2019. Vol.5, No.1. P. 45–60. <https://doi.org/10.23939/ujmems2019.01.045>
4. Durjagina Z.A., Shherbov's'kih N.V., Bespalov S.A. Vpliv lazernogo leguvannja z poroshkovih sumishej na strukturu ta mikromehanichni vlastivosti stali 12H18N10T. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2011. T.33, №7. C. 969 – 975.
5. Solovjov V. I., Korotin S. M., Korovin I. P. Organizacija ekspluatacii bojovoї aviacijnoї tehniky. Pidruchnik: K., NUOU, 2016, 216 c.
6. Ignatovich S. R., Malenko V. N., Labunec V.F. Identifikacija poverhnostnoj prochnosti detalej uzlov trenija letatel'nyh apparatov. *Problemi tribologii*. 2007. №1. C. 11-14.
7. Bezzubec' S. V., Sorochan O. O. Analiz stanu ta perspektiv rozvitku sistemi tehničnogo obslugovuvannja aviacii povitrijanih sil zbrojnih sil Ukraїni. *Zbirnik naukovih prac' kafedri aviacii. Inženerno-aviacijne zabezpečennja*. 2021. № 2(9). C. II-1-10.
8. Rodriguez D., Meyers K. E. Schadensanalyse bei wälzlagern mithilfe der norm ISO 15243. 2022. <https://evolution.skf.com/de/schadensanalyse-bei-waelzlagern-mithilfe-der-norm-iso-15243/#>. (data zvernennja: 19.08.2024).
9. Vencel A., Gašić V., Stojanović B. Fault tree analysis of most common rolling bearing tribological failures. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017. 174. 012048 doi:10.1088/1757-899X/174/1/012048

10. Rjabkov V.I., Kapitanova L.V., Babenko Ju.V. i dr. Osobennosti ispol'zovaniya titanovih splavov, nerzhavejushhijh stalej, metallokompozicionnyh i antifrikcionnyh materialov v shassi sovremennyh samoletov. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija*. 2003. Vip. 1(36). C.6-15.
11. Zhengchuan, Z., Guanjun, L., Konoplianchenko, I., Tarelynyk, V. B., Zhiqin, G., Xin, D. A review of the electro-spark deposition technology. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*. 2022. 2 (44). P. 45-53. <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.10>
12. Tarelynyk V., Martsynkovskyy V. Upgrading of Pump and Compressor Rotor Shafts Using Combined Technology of Electroerosive Alloying. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 630. P. 397-412. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.630.397>.
13. Huang, Q., Chen, Z., Wei, X., Wang, L., Hou, Z., Yang, W. Effects of Pulse Energy on Microstructure and Properties of Mo₂FeB₂-based Cermet Coatings Prepared by Electro-spark Deposition. *China Surface Engineering*. 2017. 30(3). P. 89-96. <https://doi.org/10.11933/j.issn.1007-9289.20170106002>
14. Kozak, F. V., Prunko, I. B., Fedenko, V. Y., Gladun, M. R. Optimization of the process of application of electrospark coatings when strengthening automotive parts of the "shaft" type. *Oil and Gas Power Engineering*. 2024. (2(40), 66–72. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2\(40\)-66-72](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2(40)-66-72)
15. Habibi F., Samadi A. In-situ formation of ultra-hard titanium-based composite coatings on carbon steel through electro-spark deposition in different gas media. *Surface and Coatings Technology*. 2024. Vol. 478. 130472 <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130472>
16. Marchenko, D., Matvyeyeva, K. Increasing the Wear Resistance of Restored Car Parts by Using Electrospark Coatings. *Problems of Tribology*. 2023. 28(1/107). C. 65–72. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-107-1-65-72>
17. Vakulenko I. O., Proydak S. V., Stradomski Z., Diadko V. A. Influence of electric spark on hardness of carbon steel. *Science and Transport Progress*. 2014. (2(50), 95–102. <https://doi.org/10.15802/stp2014/23779>
18. Mikosianchyk O., Tokaruk V., Mnatsakanov R. Estimation of tribotechnical characteristics and signals of acoustic emission for a friction pair of steel 30HGSA and duraluminium D16 modified by an alloy VK8. *Problems of Tribology*. 2019. 24(2/92). P. 48–54. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-92-2-48-54>
19. Skvortsov O., Mikosianchyk O. Research of the wear resistance of electro-spark coatings under abrasive conditions. *Problems of friction and wear*. 2023. 3 (100). C. 64-72. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(100\).17895](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(100).17895)
20. Panashenko V.M. Sklad, struktura i vlastivosti elektroiskrovih i lazerno-elektroiskrovih ZrB₂-vmisnih pokrittiv na titanovih splavah. *Elektrichni kontakti ta elektrodi*. 2014. № 12. C.134-143.
21. Popov V.S., Brykov N.N., Metallovedcheskie aspekty iznosostojkosti stalej i splavov. – Z.: VPK «Zaporizhzhja», 1996. 180c.
22. Erko O. O., V. I. Kopilov Abrazivna znosostijkist' elektroiskrovih kompozicionnih pokrittiv na osnovi ZrB₂. *Inzhenerija poverhni. Kompleksnij pidhid: Materiali shostoï vseukraïns'koï naukovno-tehnichnoi konferencii studentiv, aspirantiv ta naukovih spivrobitnikiv*: K.: KPI im. Igorja Sikors'kogo, TOV "Fastprint", 2018. C.5-6.
23. Brykov M.N., Efremenko V.G., Efremenko A.V. Iznosostojkost' stalej i chugunov pri abrazivnom iznashivannii: Nauchnoe izd. Herson: Grin' D.S., 2014. 364s.
24. Chmeleva V.S. Rabochaja programma, metodicheskie ukazanija i individual'nye zadanija k izucheniju discipliny «Legirovannye stali i special'nye splavy i ih termicheskaja obrabotka». Dnepropetrovsk: NMetAU, 2021. 56c.
25. Dvornik M., Mikhailenko E., Nikolenko S. et al. Production of ultrafine-grained spherical β-WC-W₂C-Co microparticles by electro discharge erosion of WC-15Co alloy in glycerol and their solutions. *Materials Research Express*. 2020. Vol. 7, 9. 7 096504 DOI 10.1088/2053-1591/abb0d6

Oleksandr Skvortsov – graduate student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: pomorie@i.ua, <https://orcid.org/0009-0008-8778-6400>

Oksana Mikosianchuk - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: oksana.mikos@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2438-1333>

Скворцов Олександр Олексійович – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 095 736 07 25, E-mail: pomorie@i.ua, <https://orcid.org/0009-0008-8778-6400>

Мікосянчик Оксана Олександрівна – докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: oksana.mikos@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2438-1333>