

*В. Є. Марчук, канд. техн. наук, доц.,  
О. І. Духота, канд. техн. наук, доц.,  
Н. О. Науменко, асист.*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ В УМОВАХ ФРЕТИНГ-ЗНОШУВАННЯ**

Національний авіаційний університет

*Експериментально досліджено вплив середовища при формуванні електроіскрових покриттів ВК8 на триботехнічні характеристики в умовах фретингу. Встановлено кінетику та механізм зношування покриттів, досліджено їх фізико-механічні властивості.*

**Загальна постановка проблеми та її зв'язок з науково-практичними задачами.** Важливим напрямом підвищення надійності і довговічності деталей авіаційної техніки є підвищення експлуатаційних характеристик конструкційних матеріалів трибосполучень, з яких виготовлено більшість деталей і вузлів. Експлуатаційна надійність і довговічність відповідальних вузлів тертя визначається міцністю контактуючих поверхонь, особливу форму руйнування яких представляє фретинг-процес. Фретинг-процес є найбільш небезпечний вид пошкоджень деталей. Механізм зношування в таких умовах багатогранний, а їх комбінації в реальних умовах призводять до труднощів вивчення і вибору засобів протидії.

**Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем.** Фретинг-процес виникає в трибосполученнях в умовах тертя, як без мастильного матеріалу, так і з ним при наявності вібрацій, які призводять до різного роду коливальних відносних переміщень контактуючих тіл. Циклічний характер фретингу призводить до зниження втомної міцності контактуючих поверхонь, розвиваючи утомні пошкодження.

Проблема поліпшення експлуатаційних характеристик і якості деталей може успішно вирішуватися, перш за все, шляхом забезпечення достатнього рівня фізико-механічних і триботехнічних властивостей матеріалів та за рахунок застосування захисних покриттів із заданими властивостями. Використання методу електроіскрового легування відкриває нові можливості зміцнення поверхонь тертя і значною мірою вирішує дану проблему. Процеси пере-

будови структури, що розвиваються під час електроіскрового легування, відбуваються в умовах, далеких від термодинамічно-рівноважних. Це дозволяє отримувати поверхневі шари з унікальним комплексом фізико-механічних властивостей.

Метод електроіскрового легування має ряд переваг, у порівнянні з іншими методами, однією з яких є можливість створення локальних ділянок покриття дискретної структури. Створення такого рельєфу значно підвищує ефективність процесу формування захисних покриттів трибосполучень при зменшенні витрат легуючих елементів і часу легування.

Найбільш розповсюдженими електродними матеріалами для нанесення покриттів методом електроіскрового легування є стандартні тверді сплави на основі карбіду вольфраму марок ВК з розміром зерен 3–5 мкм. Це пов'язано з тим, що у твердих сплавах, які складаються з твердої (WC) і пластичної (Co) фаз, найкращим чином співвідносяться висока міцність і твердість. Сформовані покриття характеризуються унікальними фізико-механічними властивостями, що робить їх привабливими для використання у трибосполученнях, які працюють в екстремальних умовах експлуатації.

Сучасний розвиток методу електроіскрового легування пов'язаний з удосконаленням існуючих і розробкою нових технологій для отримання на контактуючих поверхнях трибовузлів покриттів функціонального призначення, які працюють в екстремальних умовах експлуатації. У зв'язку з вищевикладеним, наукові дослідження пов'язані з удосконаленням і практичним застосуванням твердосплавних покриттів, сформованих методом електроіскрового легування, є актуальними.

**Метою дослідження** є дослідження фретингостійкості електроіскрових покриттів в умовах граничного тертя та виявлення механізму їх зношування.

**Методика досліджень.** Випробування на зношування в умовах фретинг-корозії проводились на установці МФК-1 на зразках, виготовлених у відповідності до ГОСТ 23.211-80. Конструкція і принцип роботи установки МФК-1 описаний в роботі [1]. Випробування проводились при наступних параметрах віброконтактного навантаження: питома навантаження –  $P = 20$  МПа; амплітуда відносного переміщення зразків –  $A = 87,5$  мкм; частота коливань –

$f = 25$  Гц; база випробувань –  $N=10^5$  циклів. В процесі випробувань додатково вимірювався момент тертя і визначався коефіцієнт тертя в залежності від кількості циклів віброконтактного навантаження.

Електроіскрові покриття наносили на сталь 30ХГСА. В якості матеріалу контрзразків – сталь 45 термічно оброблена до твердості HRC 52–54. Робочі поверхні зразків і контрзразків шліфувались до  $R_a = 0,32$  мкм.

Нанесення покриттів на робочі ділянки зразків методом електроіскрового легування проводилось на установці «Елітрон-22». В якості легуючого електроду використовували сплав на основі ВК8. На робочих поверхнях зразків формували дискретні структури шляхом нанесенням покриттів двох типів: ВК8 і ВК8+М, які відрізняються тим, що перше покриття формується електроіскровим легуванням в середовищі повітря, а друге – в середовищі мастильного матеріалу.

Випробування проводились при граничному змащенні мастилом ЦИАТИМ-201. Як базові варіанти для порівняння в таких же умовах змащування випробувались зразки із шліфованими робочими поверхнями без покриття. Величина зношування зразків визначалась як середнє арифметичне значення лінійного зносу, виміряного за допомогою оптиметра ИКВ-3 з оптичною приставкою не менш ніж у трьох точках по ширині кільцевої доріжки тертя по восьми перетинам, а контр зразків – ваговим методом, як різниця між початковою масою зразків і масою зразків після випробування, яка перераховувалась у лінійний знос з урахуванням питомою густини матеріалу.

**Результати досліджень та їхній аналіз.** Величини зношування для досліджуваних контактних пар матеріалів в умовах фретингу при випробуванні без мащення і при граничному мащенні мастильним матеріалом ЦИАТИМ-201 приведено на рис. 1, а і 1, б відповідно. Як видно із отриманих результатів, фретингостійкість сталі 30ХГСА при нанесенні зазначених вище електроіскрових покриттів помітно зростає. При цьому однозначно зменшується величина сумарного зносу пари тертя. Найбільший ефект підвищення фретингостійкості досягається при випробуванні із змащенням у парі тертя з покриттям ВК8+М.

В процесі випробувань проводилось також вимірювання моменту тертя в контакті зразків, за якими будувались залежності коефіцієнта тертя від кількості циклів фретингу і визначались такі триботехнічні характеристики, як величина максимального коефі-

цієнта тертя на стадії припрацювання, тривалість стадії припрацювання, величина мінімального коефіцієнта тертя після стадії припрацювання (рис. 2). Отримані дані, які представлені в табл. 1, показують, що пари тертя з покриттями як при випробуванні без мащення, так і змащенням характеризуються меншим коефіцієнтом тертя на стадії і після стадії припрацювання.

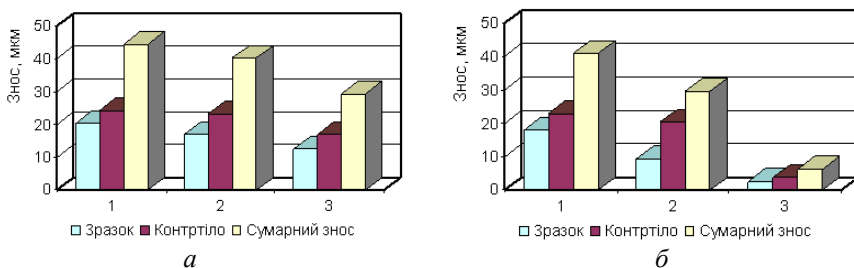


Рис. 1. Діаграми лінійного зношування електроіскрових покриттів в умовах без мащення (а) і з мащенням (б): 1 – сталь 30ХГСА; 2 – ЕІП ВК8; 3 – ЕІП ВК8+М

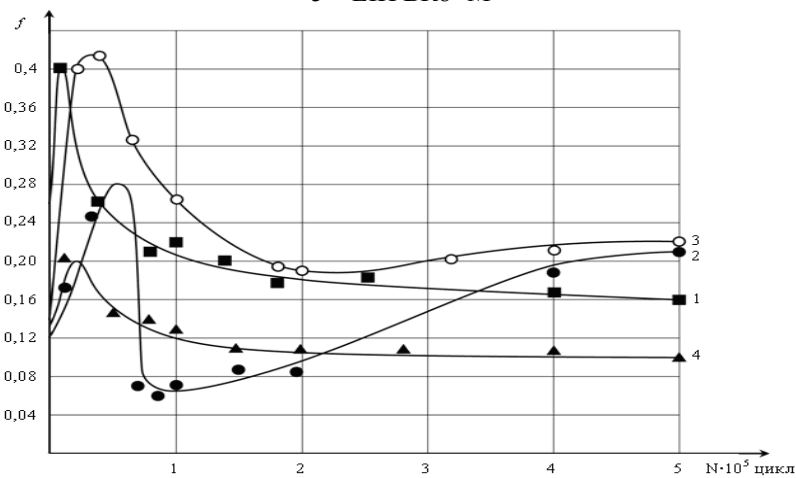


Рис. 2. Залежність коефіцієнта тертя від кількості циклів фретингу в умовах тертя без мащення (1, 3) і з мащенням (2, 4): 1, 2 – ЕІП ВК8; 3, 4 – ЕІП ВК8+М

Тривалість періоду припрацювання, яку визначали кількістю циклів фретингу до стабілізації коефіцієнта тертя, для електроіскрових покриттів ВК8 і ВК8+М в парі зі сталлю 45 по відношенню до пари сталь 30ХГСА–сталь 45 при випробуванні без мащення збільшується в

середньому відповідно на 32 % і 50 %, при випробуванні зі змащенням зменшується в середньому відповідно на 32 % і 16 %. При цьому, як і по величині зношування матеріалів пари тертя при випробуванні зі змащенням покриття ВК8+М забезпечує більш низькі значення коефіцієнтів тертя і тривалості періоду припрацювання.

Таблиця 1

**Триботехнічні характеристики матеріалів досліджених пар тертя**

№ з/п	Пара тертя	Величина максимального коефіцієнта тертя на стадії припрацювання, $f_{max}$	Тривалість стадії припрацювання $N_{np}, \times 10^5$ цикл	Величина мінімального коефіцієнта тертя після припрацювання, $f_{min}$
Випробування без змащення				
1	Сталь 30ХГСА – сталь 45	0,7	1,0–1,2	0,28
2	ВК8–сталь 45	0,4	1,4–1,5	0,22
3	ВК8+М–сталь 45	0,42	1,6–1,7	0,24
Випробування з змащенням				
1	Сталь 30ХГСА – сталь 45	0,5	1,4–1,5	0,27
2	ВК8–сталь 45	0,28	1,0–1,2	0,09
3	ВК8+М–сталь 45	0,22	1,1–1,4	0,1

Підвищену фретингостійкість покриття ВК8+М можна пояснити умовами його формування. Відомо, що механічні властивості спечених карбідо-вольфрамових твердих сплавів залежить від співвідношення твердої карбідної і м'якої металевої фаз. В системі WC–Co існує оптимальне співвідношення компонентів, яке забезпечує найбільш високу міцність і зносостійкість композиції. Очевидно, при електроіскровому легуванні електродними твердосплавними матеріалами системи WC–Co на повітрі, що відповідає технології формування покриття ВК8, в результаті високотемпературних реакцій між компонентами легуючого електрода і матеріалу основи їх взаємодією з киснем відбувається знеуглецювання карбіду вольфраму і зв'язування вихідних компонентів та компонентів, що утворюються, в складні карбіди, інтерметалідні сполуки і оксидні фази. Не дивлячись на те, що за умовами формування електроіскрові покриття відрізняються від спечених твердих сплавів,

можна очікувати, що чим менше в покритті зберігається WC і Co по відношенню до оптимального складу композиції і більше утворюється крихких і менш міцних структурних складових, тим меншу зносостійкість буде мати покриття.

При електроіскровому легуванні в середовищі мастильного матеріалу, що відповідає умовам формування покриття BK8+M, за рахунок виходу газоподібних продуктів розкладу мастила під дією високотемпературних імпульсів електричного розряду, ускладнюється доступ кисню до ванни мікророзплаву. Одночасно, шар мастильного матеріалу запобігає надмірному нагріву і окисленню поверхні металу в зонах термічного впливу електричного розряду. Тому, можна очікувати, що при електроіскровому легуванні тврдосплавними електродними матеріалами в середовищі мастильного матеріалу за рахунок зазначених ефектів: по-перше, буде формуватись більш сприятлива структура покриття, за хімічним і фазовим складом є більш наближеною до матеріалу легуючого електроду; по-друге, буде зменшуватись інтенсивність окислювальних та інших процесів, що негативно впливають на властивості матеріалу основи, зокрема, його релаксаційну здатність. За таких умов формування, враховуючи дискретний характер будови покриття, поєднання тврдих металургійно-зв'язаних з основою ділянок легованого матеріалу з високою несучою здатністю і ділянок матеріалу, які зберігають високу релаксаційну здатність, буде сприяти прояву реологічних механізмів дисипації механічної енергії, зниженню пікових напружень в матеріалі від дії динамічних контактних навантажень, що з позиції сучасної теорії реології контактної взаємодії і розвитку релаксаційних процесів при зовнішньому терті тврдих тіл розглядається як один із основних факторів забезпечення зносостійкості трибосистем [2; 3].

Металографічний аналіз поперечного перерізу зразків і результати вимірювання мікротвердості показали, що при електроіскровому легуванні сталі 30XГСА тврдосплавним електродним матеріалом BK8+M в середовищі мастильного матеріалу формується практично бездефектний шар покриття (рис. 3, а) з мікротвердістю 1000 МПа. Мікротвердість покриття, сформованого при легуванні на повітрі, складає 1100 МПа, щільність шарів практично відсутня. В покритті виявляється значна кількість дефектів, а на границі покриття з основним матеріалом спостерігається явно виражена пере-

хідна зона (рис. 3, б) із значно підвищеною, у порівнянні з основою мікротвердістю, утворення якої може бути обумовлено ефектом загартування (табл. 2).

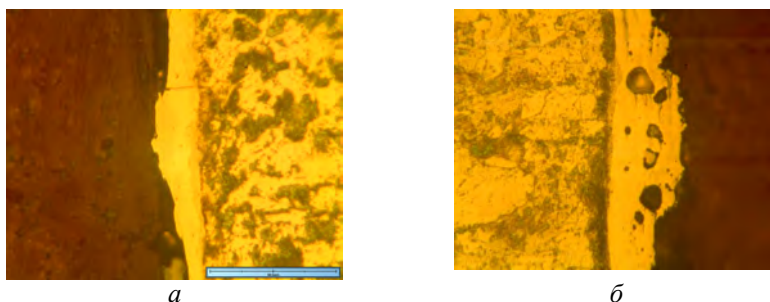


Рис. 3. Мікроструктура поперечного перерізу зразків із електроіскровими покриттями: а – VK8+М; б – VK8

Таблиця 2

**Мікротвердість досліджених електроіскрових покриттів**

Електроіскрове покриття	Мікротвердість шарів, МПа	
	Біля поверхні	Біля границі покриття з основою
VK8	1100	894
VK8+М	1000	973

В умовах граничного тертя при разовому мащенні контактних поверхонь трибосполучень консистентним мастильним матеріалом дискретність поверхні покриття за рахунок «капілярного ефекту» мікрозаглибин буде сприяти утриманню мастильного матеріалу в зоні контакту і регенерації на плямах фактичного контакту граничної мастильної плівки. З огляду на це можна сказати, що чим вище зносостійкість сформованого покриття на ділянках фактичного контакту, тим тривалішим період дії «капілярного ефекту» і, відповідно, тривалість роботи трибосистеми в умовах граничного тертя. Зазначений принцип формування зносостійкості трибосистем найбільш ефективно реалізується у парі тертя з покриттям VK8+М. Ефективність захисної дії граничної мастильної плівки для даної пари підтверджується стабільністю коефіцієнта тертя після періоду припрацювання (см. рис. 2). В той же час у пари з покриттям VK8 після досягнення певного мінімального значення у період припрацювання коефіцієнт тертя поступово підвищується, що може бути пов'язано з поступовим зменшенням ефективної щодо забезпечення режиму граничного тертя

глибини і щільності розташування на контактній поверхні покриття мікрозаглибин в наслідок зношування.

Такий висновок підтверджується результатами аналізу робочих поверхонь зразків, сформованих при прийнятих умовах випробування в середовищі мастильного матеріалу. Як видно з рис. 4, *a* на зразках з покриттям ВК8 після  $5 \times 10^5$  циклів фретингу формується практично суцільна поверхня доріжки тертя з окремими одиночними мікрозаглибинами. За таких же умов на зразках з покриттям ВК8+М поверхня доріжки тертя представляє собою дискретну поверхню, яка складається з окремих ділянок зон фактичного контакту, оточених мікрозаглибинами (рис. 4, *б*).

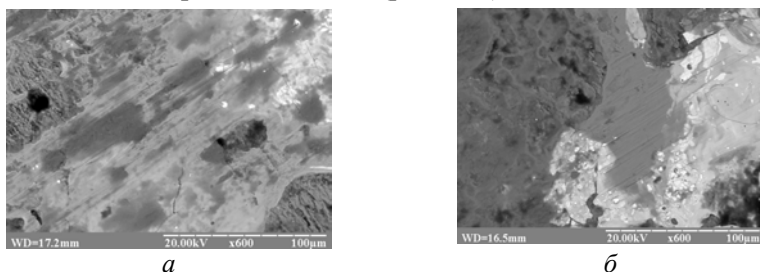


Рис. 4. Фрактографічні знімки робочих поверхонь електроіскрових покриттів після  $5 \times 10^5$  циклів фретингу в середовищі мастильного матеріалу ЦІАТИМ-201: *a* – ВК8; *б* – ВК8+М

Незважаючи на високу зносостійкість електроіскрових покриттів, суттєвим їх недоліком [4] є різке зниження характеристик опору втомі, як в умовах «чистої» втомі, так і в умовах фретингу-втомі. Руйнування зразків в зазначених умовах здійснюється у точках електроіскрового впровадження сплаву ВК8 у сталь 30ХГСА. Ці пошкодження знижують вихідні втомні характеристики сталі і суттєво погіршують опір втомі при додатковому впливі на них зусиль від контакту і тертя в зоні фретингу.

Зниження втомної міцності пов'язано з утворенням залишкових напружень розтягу в поверхневих шарах покриття. Розрахунок напружено-деформованого стану поверхні тертя методом скінчених елементів підтвердив наявність розтягуючих напружень в покритті та стискуєчих в основі (рис. 5, *a, б*). Якщо в системі покриття-основа не діють нормальні навантаження, то в основі не відбувається зміна знаку напружень (рис. 5, *a*). А якщо прикласти нормальне навантаження по всій



площі покриття, то характер розподілу напружень в основі змінюється (рис. 5, б.)

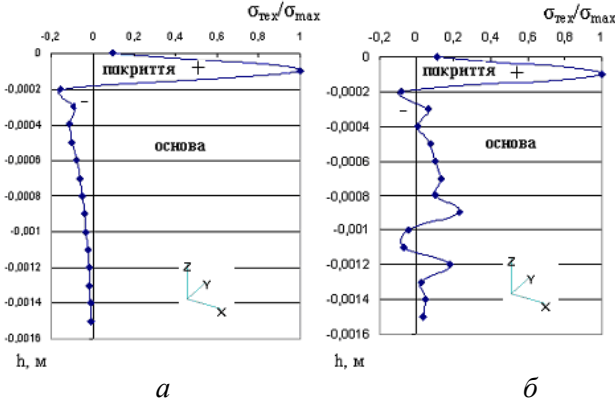


Рис. 5. Розподіл нормальних напружень вздовж осі X по висоті моделі у напрямку осі Z без навантаження (а) та при дії розподіленого нормально-го навантаження (б) на покритті ВК8+М [5]

Одним із шляхів зменшення залишкових напружень розтягу електроіскрових покриттів є поверхнево-пластична деформація шарів, яка сьогодні широко використовується в техніці для підвищення експлуатаційної надійності деталей [6].

**Висновки.** Дослідження зносостійкості електроіскрових покриттів в умовах фретингу показало суттєвий вплив середовища на формування їх триботехнічних характеристик. Встановлено, що:

1. Нанесення електроіскрових покриттів в середовищі мастильного матеріалу (ВК8+М) забезпечує зменшення сумарного зносу матеріалів контактної пари в умовах граничного тертя, порівняно з покриттям, нанесеним в середовищі повітря (ВК8), у 4,6 рази.

2. Досліджено механізм зношування дискретних електроіскрових покриттів ВК8+М, який базується на принципі «капілярного ефекту», що сприяє утриманню мастильного матеріалу дискретними ділянками (мікрозаглибинами) і регенерації мастильних плівок у зонах фактичного контакту.

### Список літератури

1. Голего Н.Л. Фреттинг-коррозия металлов / Н.Л.Голего, А.Я.Алябьев, В.В. Шевеля – К.: Техніка, 1974. – 272 с.

2. *Шевеля В.В.* Трибохимия и реология износостойкости / В.В.Шевеля, В.П. Олександренко– Хмельницький: ХНУ, 2006. – 278 с.

3. *Шевеля В.В.* Реология износостойкости и совместимости пар трения / В.В.Шевеля // Трение и износ. – 1993. – Т. 14, №1. – С. 48–62.

4. *Цыбанев Г.В.* Фреттинг-усталость поверхностей с дискретными покрытиями / Г.В.Цыбанев, В.Е.Марчук, О.Н. Герасимчук // Проблемы трибологии. – 2009. – №1. – С. 97–104.

5. Дискретні покриття для підвищення зносостійкості деталей машин і механізмів [Б.А.Ляшенко, В.Є.Марчук, В.І.Калініченко, Ю.О.Градиський]// Вісник Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка. – Харків: Вид-во Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка, 2010. – Вип. 94. – С. 324–335.

6. Обработка металлопокрытий выглаживанием [Л.А.Хворостухин, В.Н.Машков, В.А.Торпачев, Н.Н.Ильин]. – М.: Машиностроение, 1980. – 63 с.

*Марчук В.Е., Духота А.И., Науменко Н.А.* **Исследование износостойкости электроискровых покрытий в условиях фреттинг-изнашивания** // Проблемы тертя та зношування: наук. техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 56. – С.84–93.

Експериментально досліджено вплив середовища при формуванні електроискрових покриттів ВК8 на триботехнічні характеристики в умовах фреттинга. Установлено кінетика і механізм изнашивания покриттів, дослідовано їх фізико-механічні властивості.

Табл. 2, рис. 5, список лит.: 6 найм.

*Marchuk V., Dukhota O., Naumenko N.* **Investigation of wear resistance of coating by the electric coatings in fretting-wear.**

The influence of the environment in the formation of the electric spark coatings on the tribological characteristics VK8 by fretting have been investigated. The kinetics and mechanism of wear coatings and their physical and mechanical properties have been investigated.

Стаття надійшла до редакції 01.11.2011