

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.2(99).17629

*І. А. ГУМЕНЮК, В. В. ХАРЧЕНКО, М. А. ГЛОВИН, І. В. КОСТЕЦЬКИЙ**Національний авіаційний університет***ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ  
ЕВТЕКТИЧНОГО ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ПОКРИТТЯ**

*Розглянуто питання доцільності нанесення електроіскрових покриттів з метою дослідження ефективного впливу на трибологічні властивості евтектичних сплавів. Проведено випробування на тертя і зношування електроіскрових покриттів з розробленого евтектичного сплаву на підкладці зі сталі. З метою порівняння ефективності впливу на триботехнічні властивості евтектичних сплавів випробувалися як покриття у початковому стані, так і покриття, що були відпалені за двома різними режимами. За результатами дослідження хімічного складу утворених в процесі тертя плівок було встановлено закономірності за якісною оцінкою. Встановлено залежності триботехнічних властивостей для вихідних і термооброблених покриттів. Проведені дослідження свідчать про доцільність використання електроіскрових покриттів для різних умов тертя.*

**Ключові слова:** зношування, евтектичні сплави, електроіскрове легування, оксидна плівка, відпал, нерівноважний стан.

**Вступ.** При створенні нових матеріалів все більшу увагу привертають можливості використання метастабільних станів, які виникають в умовах ведення нерівноважної кристалізації металевих сплавів у процесі нанесення покриття фізичними методами, які використовують концентровані джерела енергії з великою густиною потужності – лазери, плазмові потоки, детонаційно-газові методи, електроіскрове легування, напилення вибухом тощо. [1-2]. Високоенергетичний вплив на матеріал за малі проміжки часу приводить до виникнення в покритті нерівноважних фаз і структур, які в звичайних чи інших більш рівноважних умовах, не утворюються. Ці стани надають покриттям властивості, що визначаються поєднанням нерівноважних структур і фаз і, крім того, з'являється можливість керувати їхніми властивостями шляхом переведення покриття як термодинамічну систему до більш рівноважного стану.

Важливо зазначити, що змістити покриття, яке знаходиться в нерівноважному стані, в сторону термодинамічної рівноваги можна двома шляхами. Перший – це цілеспрямований зовнішній енергетичний вплив (наприклад, дифузний відпал, зовнішня деформація, лазерний переплав, ультразвукова обробка тощо). Другий – це мимовільний зовнішній енергетичний вплив, який виникає безпосередньо у процесі роботи покриття (наприклад, в умовах тертя, корозійної дії, циклічної взаємодії з іншим тілом). У другому випадку можна говорити про самоорганізацію системи і оптимальну її пристосованість до умов зовнішнього руйнівного впливу. Рушійною силою такого процесу є зниження внутрішньої енергії системи за умов підведення енергії ззовні за рахунок дисипації будь-яким способом.

Реалізація другого варіанту видається більш ефективною, оскільки створити умови для самоорганізації нерівноважної системи простіше, ніж заздалегідь спрогнозувати і забезпечити оптимальну структуру і склад покриття для заданих умов роботи.

Нанесення покриттів з евтектичних сплавів газотермічним або методом конденсації, стимульованим іонним бомбардуванням, розширює за складом

область мінімального сумарного зносу пари тертя і знижує його величину в порівнянні з литим станом. Пояснюється це формуванням більш дисперсної структури покриття і термодинамічно більш нерівноважним в порівнянні з литим станом.

**Метою дослідження** було довести доцільність нанесення електроіскрових покриттів з метою ефективного впливу на трибологічні властивості евтектичних сплавів.

Метод електроіскрового легування, так само, як і зазначені вище методи, дозволяє досягти високої концентрації енергії електричного розряду в малих розплавлених об'ємах матеріалу електрода за короткі проміжки часу. Оскільки підкладка при цьому залишається практично холодною (її інтегральна температура знаходиться поблизу кімнатної), то під час кристалізації розплавлених матеріалу катода можна досягти великих швидкостей охолодження, що приведе до появи нерівноважних станів у покритті. Ці особливості створюють умови, що є аналогічними до умов, які створюються під час використання зазначених вище методів нанесення покриттів. Це дає підстави очікувати існування аналогічних закономірностей зношування і зносостійкості.

**Результати досліджень та їх аналіз.** Для вирішення поставленого завдання були отримані електроіскрові покриття з розробленого евтектичного сплаву [3] (табл. 1) на підкладці зі сталі 12X18H10T.

Таблиця 1

**Хімічний склад евтектичного сплаву в масових частках**

C	B	Cr	Ni	V	Ti	Al	Cu	Mn	Fe
2,8	1,0	1,0	6,0	8,0	4,2	4,1	19,0	5,0	48,9

Оскільки сплав містить активні метали (Ti, Cr), які здатні інтенсивно окислюватися на повітрі за підвищених температур, процес електроіскрового легування проводився в атмосфері захисного газу – аргону. Для порівняння ефективності впливу на триботехнічні характеристики різних термодинамічних нерівноважних станів випробувалися як покриття у початковому стані, так і покриття, що були відпалені за двома різними режимами. Відпал проводився у вакуумній печі СШВЛ за тиску залишкової атмосфери 5 мм. рт. ст. і температурі 900 °С ( $0,75T_{пл}$ ) протягом 15 і 45 хв. Охолоджувалися зразки з піччю.

Випробування на тертя і зношування проводилися на установці М22-П за наступних умов: схема сполучення: вал – частковий вкладиш; матеріал контртіла – сталь 45 (HRC 45); тертя – без мащення; швидкість ковзання – 0,5 м/с; питомі навантаження – 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 МПа; площа зразка – 1 см<sup>2</sup>; шлях тертя – 1000 м.

Мікроструктура вихідного напиленого електроіскрового евтектичного покриття (рис. 1, б) є сумішшю ультрадисперсних кристалів бориду титану і хрому, які рівномірно розподілені в металевій матриці, що має склад нержавіючої сталі 12X18H9. Білі області в покритті – це частини покриття, які не протравлюються в реактиві і ділянки тонкого конгломерату фаз, що не розпалися; а темніші – ділянки покриття, які частково протравлені і перебувають у більш рівноважному стані. Така структура покриттів принципово відрізняється структури від литого стану (рис. 1, а), оскільки внаслідок великої швидкості охолодження, що реалізується під час електроіскрового напилення,

відбувається зміна механізму евтектичною кристалізацією з формуванням структури тонкого конгломерату фаз [4]. Формування такої структури зумовлює зміну механізму зміцнення в порівнянні з литим станом. За невеликих швидкостей охолодження (під час рівноважної кристалізації розплаву) формується розгалужений каркас із боридів, що несе основне навантаження під час тертя, а сталева матриця передає і перерозподіляє напруження між його окремими гілками. Така структура досить жорстка, термодинамічно стійка, здатна витримувати високі навантаження і робочі температури, але володіє високою крихкістю, яка визначається крихкістю фаз втілення. За умов досягнення критичної швидкості охолодження [5] в електроіскровому евтектичному покритті формується структура тонкого конгломерату фаз, у якій основне навантаження несе металева матриця, а дисперсні кристали боридів зміцнюють її, блокуючи рух дислокацій. На рис. 1, *a* стрілками вказана товщина кристалів боридів, а на рис. 1, *б* в нижній частині знімка видно підкладку зі сталі 12Х18Н10Т. Така будова теоретично передбачає вищу пластичність у порівнянні зі структурою литого стану. Однак насправді у необробленому електроіскровому покритті пластичність знижена внаслідок перенасичення твердого розчину на основі заліза боридними фазами.

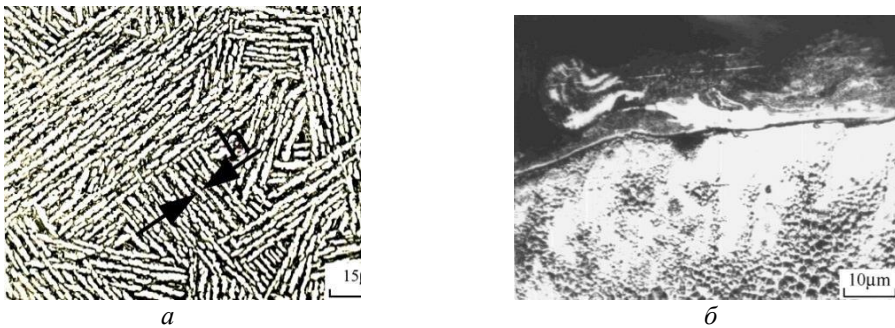


Рис. 1. Структура досліджуваного евтектичного сплаву в литому стані (*a*) і напilenого у вигляді електроіскрового покриття (*б*)

Високотемпературний відпал вихідного покриття призводить до часткового розпаду пересиченої металеві матриці, зниження мікротвердості і коагуляції спочатку високодисперсних кристалів боридів. Зі збільшенням часу відпалу ступінь розпаду твердого розчину на основі заліза і ступінь коагуляції кристалів боридів зростають, що приводить до зміни мікромеханічних властивостей структурних складових покриття. Це, в свою чергу, відбивається на триботехнічних характеристиках покриття в цілому.

Якщо коефіцієнт тертя вихідного покриття навіть дещо знижується зі збільшенням навантаження, то у відпалених покриттях залежність складніша. Більш тривалий відпал (45 хв) до питомих навантажень 0,15 МПа обумовлює мінімальні значення  $f$ , нижчі ніж в початковому стані, а при великих значеннях  $P$  він різко зростає. Причому характер залежності зберігається для обох режимів відпалу, що практично виключає помилку експерименту. Така залежність визначається описаними вище процесами зниження твердості, міцності і підвищення пластичності, металеві матриці покриття, яка несе основне навантаження. Ці ж процеси можуть призвести до збільшення вагового зносу покриття при великих питомих навантаженнях, що спостерігається для обох режимів відпалу. Катастрофічне збільшення зносу відпаленого протягом 15 хв

покриття при  $P > 0,15$  МПа, швидше за все викликано повним зношуванням покриття до підкладки і його безпосередньою участю в процесі тертя.

За результатами дослідження хімічного складу утворених в процесі тертя плівок були встановлені наступні закономірності. В основі всіх окисних плівок, як вихідного, так і відпалених покриттів, лежать сполуки заліза з киснем, іноді леговані хромом і нікелем в кількості (в атомних частках, %) 18,6 - 1,8 і 4,9 - 0,17 відповідно. Склад цих сполук відповідає формулам  $Fe_3O_4$  і  $Fe_2O_3$ . Інші метали, присутні в покритті, незважаючи на їх велику, в порівнянні з залізом активність, самостійних оксидів не утворюють. Збільшення часу відпалу сприяє зниженню корозійної стійкості вихідного покриття і, як наслідок, призводить до збільшення кількості окисних плівок (якісна оцінка проводилася за інтенсивністю піків елементів) [6].

Необхідно відзначити, що проведений відпал вихідних покриттів не тільки знижує їх крихкість, але і одночасно знижує їх початково високу корозійну стійкість. Як зазначалося вище, невідпалені покриття слабо травляться в реактиві і при терті утворюють порівняно невелику кількість окисних плівок. Завдяки низькому коефіцієнту тертя сумарний знос пари тертя мінімальний. При відпалі відбувається частковий розпад металеві матриці, підвищується її пластичність і одночасно знижується корозійна стійкість – зростає активність травлення в реактиві, інтенсифікується процес утворення окисних плівок при терті.

**Висновки.** Таким чином, в результаті відпалу покриттів відбуваються конкуруючі процеси, які призводять до протилежних результатів. З одного боку, збільшується кількість окисних плівок, які грають роль твердого мастильного матеріалу, і зростає пластичність, що знижує утомне руйнування і викришування покриття, що приводить до зниження зношування. З іншого боку, відпал призводить до зниження твердості і міцності металеві матриці, яка несе навантаження і сприяє підвищенню зношування покриття, особливо за великих навантажень. Таким чином, змінюючи ступінь нерівноважного стану отриманих покриттів шляхом їх відпалу, можна в деякому діапазоні змінювати їх триботехнічні властивості, мінімізуючи сумарний знос пари тертя. Оскільки встановлені залежності триботехнічних властивостей для вихідних і термооброблених покриттів досить сильні, з'являється можливість самоорганізації оптимального стану досліджених покриттів для різних умов тертя (різні матеріали контртіла, навантаження, швидкості ковзання, температурний режим тертя, атмосфера тощо).

#### Список літератури

1. Lazernaya i elektronno-luchevaya obrabotka materialov: Spravochnik/ N. N. Ryikalın, A. A. Uglov, I. V. Zuev, A. I. Kokora. – М.: Mashinostroenie. – 1991. – 147p.
2. Vysokoeffektivnyie lazerno-plazmennyye tehnologii v mashinostroenii / V. A. Barvinok, V. M. Novikovı, G. M. Zmeevskoy i dr. – М.: Mashinostroenie – 1997. – 74 p.
3. Шури́н А. К. Износостойкость нержавеющей эвтектических сплавов с фазами внедрения/ А. К. Шури́н, В. Е. Панарин, М. В. Киндрачук // Проблемы трения и изнашивания. – К.: Техніка, – 1981. – №19. – С. 65 – 73.
4. Пат. 102244 України. Зносостійкий евтектичний сплав на основі заліза / Кіндрачук М. В., Лабунець В. Ф., Денисенко М. І., Загребельний В. В., Гуменюк І. А., Нечепорук В.В., Добрянський С.С.; № и 2015 03259; заявл. 07.04.2015; опубл. 26.10.2015, Бюл. № 20.

5. Таран Ю. Н., Мазур В. И. Структура эвтектических сплавов. – М.: Metallurgia, 1978. – 311 с.

6. Дослідження триботехнічних характеристик електроіскрових покриттів з евтектичного сплаву на сталі 12X18H10T / В. С.Панарін, І. А. Гуменюк, М. В. Кіндрачук, О. В. Тісов. // Проблеми трибології. – 2017. – №4.– С. 6–11.

Стаття надійшла до редакції 29.05.2023.

**Гуменюк Ігор Анатолійович** – докторант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, <https://orcid.org/0000-0002-4352-7035>. E-mail: nau12@ukr.net

**Харченко Володимир Володимирович** – завідувач лабораторії кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національного авіаційного університету, проспект Любомира Гузара,1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: nau12@ukr.net.

**Гловин Михайло Андрійович** – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національного авіаційного університету, проспект Любомира Гузара,1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2525-9767>.

**Костецький Іван Володимирович** – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національного авіаційного університету, проспект Любомира Гузара,1, м. Київ, Україна, 03058, +38(044)4067773, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2815-0230>.

*I. A. HUMENIUK, V. V. KHARCHENKO, M. A. HLOVYN, I. V. KOSTETSKYI*

## INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF EUTECTIC ELECTROSPARK COATING

The article considers the efficiency of applying electric spark coatings with the aim of studying the effective influence on the tribological properties of eutectic alloys. Friction and wear tests of electrospark coatings made of the developed eutectic alloy on a steel substrate were performed. In order to compare the effectiveness of the influence on the tribotechnical properties of eutectic alloys, both the coatings in the initial state and the coatings annealed under two different modes were tested.

Based on the results of the study of the chemical composition of the films formed in the process of friction, regularities were established by qualitative assessment. The dependences of tribotechnical properties for the initial and heat-treated coatings were determined. These studies indicate the feasibility of using electrospark coatings for different friction conditions.

**Keywords:** wear, eutectic alloys, electric spark alloying, oxide layer, annealing, nonequilibrium phase.

### Referenses

1. Lazernaya i elektronno-luchevaya obrabotka materialov: Spravochnik/ N. N. Ryikalina, A. A. Uglov, I. V. Zuev, A. I. Kokora. – M.: Mashinostroenie. – 1991. – 147p.
2. Vysokoeffektivnyie lazerno-plazmennyye tehnologii v mashinostroenii / V. A. Barvinok, V. M. Novikovi, G. M. Zmeevskoy i dr. – M.: Mashinostroenie – 1997. – 74 p.
3. Shurin A. K. Iznosostoikost nerzhaveyushchikh evtekticheskikh splavov s fazami vnedreniya/ A. K. Shurin, V. Ye. Panarin, M. V Kindrachuk // Problemi treniya i iznashivaniya. – K.: Tekhnika, – 1981. – №19. – S. 65 – 73.
4. Pat. 102244 Ukrainy. Znosostiikiy evtektichnyi splav na osnovi zaliza / Kind-rachuk M. V., Labunets V. F., Denysenko M. I., Zahrebelnyi V. V., Humeniuk I. A., Neche-poruk V.V., Dobrianskyi S.S.; № y 2015 03259; zaiavl. 07.04.2015; opubl. 26.10.2015, Biul. № 20.
5. Taran Yu. N., Mazur V. Y. Struktura evtekticheskikh splavov. – M.: Metallur-hiya, 1978. – 311 s.
6. Doslidzhennia trybotekhnichnykh kharakterystyk elektroiskrovykh pokryttiv z evtektichnoho splavu na stali 12Kh18N10T / V. Ye.Panarin, I. A. Humeniuk, M. V. Kindrachuk, O. V. Tisov. // Problemy trybolohii. – 2017. – №4.– S. 6–11.

**Humeniuk Ihor** – doctoral student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, , National Aviation University, <https://orcid.org/0000-0002-4352-7035>.

**Kharchenko Volodymyr** – head of laboratory of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6383-5337>.

**Hlovyn Mykhailo** – PhD student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2525-9767>.

**Kostetskyi Ivan** – PhD student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2815-0230>.