

УДК 621.891

А. О. КОРНІЄНКО, С. В. ФЕДОРЧУК, М. В. КІНДРАЧУК

*Національний авіаційний університет***ТРИБОТЕХНІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ З ЕВТЕКТИЧНИМ НАПОВНЮВАЧЕМ**

*Проведено триботехнічні дослідження при підвищених температурах композиційних електролітичних покриттів на основі нікелю в яких в якості наповнювача використано розроблений для роботи при підвищених температурах зносостійкий евтектичний сплав. Проведені дослідження показали високу зносостійкість розроблених покриттів за рахунок утворення на поверхні тертя плівки вторинних структур. Показано, що оптимально можна вважати термічну обробку композиційного покриття з евтектичним наповнювачем в режимі без оплавлення за температур до 950 °С.*

**Ключеві слова:** композиційні електролітичні покриття, термічна обробка, зносостійкість, евтектичний сплав.

**Постановка завдання.** Одним з перспективних методів поверхневого зміцнення деталей вузлів тертя є нанесення композиційних електролітичних покриттів (КЕП) [1]. Проте, існуючі сьогодні КЕП не задовольняють постійно зростаючі вимоги до них при експлуатації відповідних вузлів тертя механізмів в умовах динамічних навантажень, активного впливу корозійних середовищ і особливо підвищених температур. Одним з ефективних шляхів отримання матеріалів з високою жароміцністю і зносостійкістю є створення композицій на металевій основі, зміцненій тугоплавкими боридами і карбідами із використанням евтектичної реакції між ними, оскільки висока жаростійкість і жароміцність визначається їх структурно-фазовим складом. В роботі [2] показано, що такі фази проникнення, як  $TiB_2$ ,  $CrB_2$  і  $VC$  характеризуються хімічною сумісністю, міцним зв'язком і знаходяться в стійкій рівновазі при підвищених температурах (до  $0,9T_{пл}$ ) з металевою основою, близькою за складом до сталі 12X18H9T. Такі сплави здатні працювати у навантажених вузлах тертя при одночасному впливі хімічно-активного середовища, високих температур при відсутності мащення. З іншого боку, при створенні таких евтектичних покриттів методом наплавлення має місце нерівномірний нагрів по перерізу деталі з покриттям та високі температури на поверхні з різким їх зменшенням до серцевини, що призводить до можливої зміни геометрії деталі та поверхні. Окрім того даний метод дозволяє наносити покриття лише на зовнішні поверхні, які повинні бути добре доступними для обробки, і не дозволяє наносити на внутрішні поверхні, особливо якщо деталі мають довжину більшу ніж діаметр. Певною мірою зазначених недоліків можна позбутись при нанесенні покриттів електролітичним методом.

Тому в роботі була поставлена задача – розробити композиційні електролітичні покриття в яких у якості наповнювача вводяться порошки евтектичних сплавів з метою підвищення ефективності їх роботи при підвищених температурах та дослідити структурний стан і зносостійкість отриманих покриттів.

**Методика експерименту.** Композиційні електролітичні покриття одержували зарощуванням електролітичним нікелем порошоків евтектичного сплаву спеціально розробленого для роботи при підвищених температурах [3] на горизонтальному катоді при імпульсному переміщуванні електроліту і густині струму

від 5 до 10 А/дм<sup>2</sup>, РН 3–4, при температурі електроліту 25–40°C. Термічна обробка зразків з покриттям проводилась шляхом вакуумного відпалу за температур 950 °C і 1250 °C. Дослідження мікроструктури виконували за допомогою оптичного мікроскопа НЕОРНОТ 21 та мікроскопу електронного растрового з системою енергодисперсійного мікроаналізу РЕМ-106І. Мікротвердість визначали на приладі ПМТ-3. Триботехнічні випробування проводили на установці М22-М.

**Результати досліджень.** Фізико-механічні та триботехнічні властивості композиційних покриттів визначаються напружено-деформованим станом покриття та його структурою. Однією з основних умов створення покриттів з заданою структурою є можливість введення певної кількості наповнювача в матрицю. Природа частинок наповнювача, їх хімічний склад, кількість та розмір, характер взаємодії з матрицею визначають майбутній комплекс фізико-механічних та триботехнічних властивостей композиційного покриття. Технологічні параметри процесів осадження гальванопорошкових покриттів підбирались таким чином, щоб отримати покриття з необхідним вмістом порошків евтектичного сплаву – наповнювача згідно рекомендацій роботи [4], оскільки вміст частинок другої фази має суттєвий вплив на зносостійкість композиційного покриття.

В якості наповнювача КЕП використовували порошинки різної дисперсності розробленого евтектичного сплаву призначеного для роботи при підвищених температурах. Досліджувані покриття мали вміст частинок евтектичного порошку в нікелевій матриці 30-40% за об'ємом покриття. За такого об'ємного вмісту наповнювача в композиції, згідно рекомендацій робіт [1; 4; 5], має місце оптимальне поєднання напружено-деформованого стану, фізико-механічних та триботехнічних властивостей. Оскільки основна роль твердих частинок є зміцнення матриці, то наявність жорстких включень зміцнює, або армує, матрицю шляхом обмеження її пластичної течії. При цьому зона підвищених дотичних напружень, що виникає в результаті взаємодії полів напружень від сусідніх включень, заглиблюється в матеріал нижче включень. Це в свою чергу знижує навантаження на матрицю в області між включеннями і забезпечує позитивний градієнт напружень від поверхні тертя. При нижчому вмісті наповнювача і, відповідно, менших міжцентрових відстанях між включеннями міцність композиції зменшується внаслідок утворення тріщин на ослаблених границях розділу частинка-частинка. Вище наведене дає підстави вважати, що покриття з об'ємним вмістом наповнювача 30-40% повинні ефективно працювати в умовах тертя та зношування.

Структуру КЕП нікель-евтектичний сплав наведено на рис. 1.

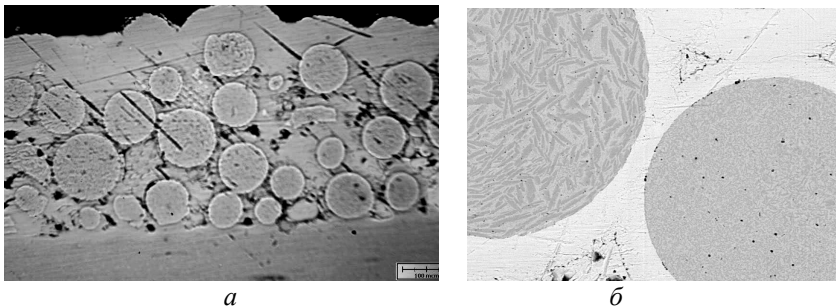


Рис. 1. Структура КЕП нікель-евтектичний сплав: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 600$

Покриття представляє собою нікелеву матрицю з включеннями частинок евтектичних порошків. Оскільки частинки евтектичного порошку є електропровідними отримані покриття характеризуються незначною пористістю до 5%.

Попередньо проведені дослідження показали не достатньо високу зносостійкість даних покриттів, оскільки дані покриття у вихідному стані мають низьку адгезію до підкладки і низьку когезію в покритті через наявні пори (рис. 1, а) та відсутність взаємодії між матрицею та наповнювачем (рис. 1, б), що обумовлює викришування частинок наповнювача при випробуваннях.

У зв'язку з цим, була проведена термічна обробка КЕП шляхом відпалювання зразків з покриттям [6]. Було обрано два температурні режими термічної обробки: 1 – в режимі без оплавлення за температур до 950 °С, що складає  $0,8T_{пл}$  евтектичних порошків (витримка 30 хв і охолодження з піччю); 2 – в режимі з оплавленням за температур до 1250 °С (витримка 30 хв і охолодження з піччю). Проведення термічної обробки дозволяє зміцнити матрицю. Так замірювання мікротвердості в різних зонах покриття перед та після термічної обробки показали, що при термічній обробці мікротвердість нікелевої матриці підвищується за рахунок легуванням матриці елементами джерелом яких є включення, а також рекристалізації нікелю. При цьому утворюється перехідна зона між матрицею та включенням з підвищеною мікротвердістю  $H_c=4,5-5,5$  ГПа. Мікротвердість включень після термічної обробки зменшується, оскільки вже за температури 950 °С відбувається перекристалізація евтектичного сплаву, а за температури 1250 °С відбувається повне оплавлення покриття з утворенням евтектики, в проміжках якої знаходиться твердий розчин заліза та нікелю.

*Триботехнічні випробування КЕП нікель-евтектичний сплав.* Для випробувань були одібрані покриття з наповнювачем різної дисперсності. Так, для одержання покриттів використовували евтектичні порошки дисперсністю від 20-50 мкм та 80-150 мкм. Випробування проводились за кімнатних та підвищених (500 °С) температур і навантаження 0,6 МПа. Результати представлені у табл.

Таблиця

**Результати триботехнічних випробувань покриттів з наповнювачем різної дисперсності**

Розмір частинок, мкм	Термообробка	Температура випробувань, °С	Коефіцієнт тертя	Втрата маси, мг	Лінійний знос, мкм
20-50	без ТО	кімнатна	0,51	82,13	98
80-150	без ТО	кімнатна	0,48	71,25	85
20-50	без ТО	500	0,53	52,4	73
80-150	без ТО	500	0,46	33,2	50
20-50	ТО 950°С	500	0,45	23,9	35
80-150	ТО 950°С	500	0,42	12,3	15

Результати показали, що за всіх умов випробувань меншою величиною зносу як вагового, так і лінійного характеризуються покриття з крупнішим наповнювачем. Причому, зі збільшенням температури випробувань зносостійкість зростає для обох типів наповнювача, що обумовлюється більш інтенсивним окисненням поверхонь тертя і утворенням плівок вторинних структур.

Аналіз поверхні покриття після тертя (рис. 2, а) показав, що на поверхні добре видно утворення вторинних структур. На поверхні тертя евтектичного напо-

внювача в окремих місцях спостерігаються чітко помітні, періодично повторювані нашарування матеріалу, характерні для втомного руйнування (мал. 2, б). Імовірно, процес односпрямованого тертя ковзання приводить до втомного руйнування ділянок поверхні. Цікаво відзначити, що напрямок утворення таких нашарувань є перпендикулярним до напрямку тертя.

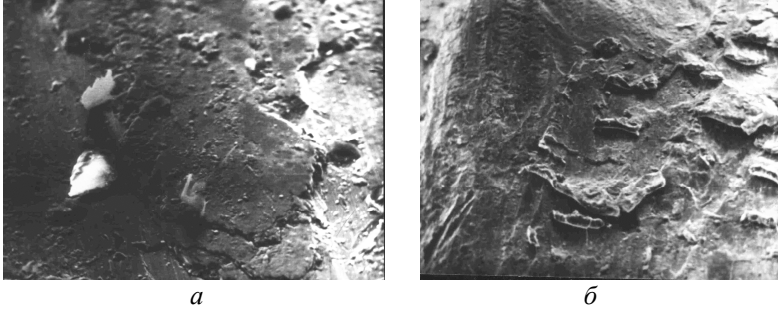


Рис. 2. Поверхня зразка після тертя: *a* –  $\times 1500$ ; *б* –  $\times 4500$

Пояснити різницю у зносостійкості між покриттями з дрібним та крупним наповнювачем можна тим, що при використанні дрібніших частинок частина навантаження при терті передається на м'яку і пластичну нікелеву матрицю, яка не здатна ефективно сприймати навантаження. З іншого боку, більш крупні частинки здатні сприймати навантаження та передавати його у пластичну матрицю. За рахунок цього може відбуватись зменшення площі фактичного контакту і зменшення зносу, оскільки контакт відбувається по частинкам наповнювача і навантаження сприймається твердими і зносостійкими частинками наповнювача. Особливо суттєва різниця за величиною зносу спостерігається у випадку випробувань покриттів після термічної обробки. Це пояснюється тим, що композиційні електролітичні покриття мають невисоку міцність зчеплення як покриття з основою, так і частинок наповнювача з матрицею, і під час роботи можливе викришування частинок, що негативно впливає на зносостійкість покриття. Так при аналізі поверхонь тертя покриттів без термічної обробки спостерігаються борозни, як результат абразивної дії вільних частинок, що викришилися, так і шаржованих в поверхню контртіла. Більшою мірою це відноситься для покриттів з крупнішими частинками. Проведення термічної обробки суттєво підвищує зв'язок між матрицею та наповнювачем в результаті взаємодії між частинкою та матрицею, за рахунок чого підвищується ефективність використання більш крупних частинок. Причому покриття після термічної обробки у всіх випадках характеризуються вищою зносостійкістю порівняно з покриттями у вихідному стані.

Наступні триботехнічні дослідження проводились за навантаження 0,6 МПа для композиційних покриттів з більш крупними частинками наповнювача 80-150 мкм з метою встановлення впливу термічної обробки та температури випробувань на зносостійкість розроблених покриттів.

Якщо проаналізувати результати випробувань за різних температур, то можна відзначити, що зі збільшенням температури випробувань як до 500 °С, так і до 800 °С для всіх типів покриттів спостерігається зменшення як вагового, так і лінійного зносу. Це пояснюється окисненням поверхні зі збільшенням температури та утворенням плівок вторинних структур, які позитивно впливають на зносостійкість покриття. Також можна відзначити, що покриття після термічної обробки мають вищу зносостійкість порівняно з покриттями у вихідному стані, що пояснюється тим, що композиційні електролітичні покриття у вихідному

стані мають невисоку міцність зчеплення як покриття з основою, так і частинок наповнювача з матрицею, і під час роботи можливе викришування частинок, що негативно впливає на зносостійкість покриття, а при термічній обробці за рахунок взаємодії між частинками наповнювача та матрицею підвищується міцність зчеплення як між різними фазами покриття, так і покриття з основою. Найвищою зносостійкістю характеризуються покриття після термічної обробки без оплавлення за температури 950 °С. Це пояснюється тим, що після такої обробки зберігається будова покриття у вигляді композиту, що позитивно впливає на триботехнічні властивості матеріалів з одночасним підвищенням міцності зчеплення між різними фазами покриття, і покриття з основою.

**Висновки.** Проведення термічної обробки композиційних покриттів системи нікель – евтектичний сплав в режимах без оплавлення та з оплавленням суттєво змінює структуру та елементний склад ділянок покриття: матриця – перехідна зона – включення. Необхідність проведення термічної обробки обґрунтовується необхідністю підвищення механічних властивостей матриці, підвищенням адгезії та когезії. Триботехнічні властивості показали високу зносостійкість розроблених покриттів при підвищених температурах за рахунок введення у нікелеву матрицю спеціально розробленого евтектичного сплаву, оскільки склад сплаву для наповнювача підбирався таким чином, щоб при терті утворювались оптимальні плівки вторинних структур для захисту поверхні від зношування. Показано, що режими термічної обробки суттєво впливають на зносостійкість покриття. При цьому встановлено, що оптимальною можна вважати термічну обробку композиційного покриття з евтектичними наповнювачем в режимі без оплавлення за температур 950 °С.

#### Список літератури

1. Кіндрачук М.В. Експериментально-аналітичні дослідження триботехнічних характеристик покриттів матрично-наповненого типу / М.В.Кіндрачук, М.В.Лучка, А.О.Корнієнко // Проблеми трибології. – 2005, № 2, – С. 74–80.
2. Структурування та формування триботехнічних властивостей евтектичних покриттів / М.В. Кіндрачук, Ю.А. Куницький, О.І. Дудка, Ю.Г. Сухенко, В.М. Коржик. – К.: Вища шк., 1997.– 120 с.
3. Пат. 65018 України МПК (2011.01) C25D 15/00 / Склад для одержання зносостійких композиційних електролітичних покриттів на основі нікелю для роботи при підвищених температурах / Кіндрачук М.В., Корнієнко А.О., Федорчук С.В., Лучка М.В., Перро Д.М., Подлесний В.В. № u 2011 05006; Заявл. 20.04.2011; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22. – 4с.
4. Корнієнко А.О. Формування триботехнічних властивостей композиційних електролітичних покриттів на основі нікелю створенням градієнтних структур: Дис. ...канд. техн. наук.: 05.02.04. – К., 2007. – 167 с.
5. Эволюция структуры и свойств эвтектических покрытий при трении / М.В. Киндрачук, Ю.Я. Душек, М.В.Лучка, В.Н. Гладченко // Порошковая металлургия. – 1995. – №5/6. – С. 104–110.
6. Properties of electrolytical nickel-eutectic filler composite coatings / M.Pashechko, M.Kindraczuk, A. Kornienko, S.Fedorczuk, M.Barszcz // Surface engineering. 2014. – № 1. – P. 63–67.

*A. O. KORNIENKO, S. V. FEDORCHUK, M. V. KINDRACHUK*

### **ELEVATED TEMPERATURE TRIBOTECHNICAL INVESTIGATIONS OF COMPOSITE ELECTROLYTIC COATINGS WITH EUTECTIC FILLER**

The elevated temperature tribotechnical investigations of composite nickel-based electrolytic coatings are carried out. As a composite coating filler the wear-resistant eutectic alloy powder designed for operation at elevated temperatures is used. Heat treatment in modes without melting and with melting of the composite coatings essentially changes the structure and element content of coating areas: matrix - transitive zone – particle filler. Necessity of heat treatment is validated by need of increase the mechanical properties of a matrix, increase the adhesion and cohesion. Besides, as the coatings were developed for operation at the raised temperatures the applying of heat treatment at temperatures above than friction units operational temperatures promotes avoidance of uncontrollable structural transformations in a coating at action of operational temperatures. Tribological tests have shown high wear resistance of the developed coatings at the raised temperatures due to the introduction into a nickel matrix specially developed eutectic alloy powder filler. The alloy powder filler content was chosen to form secondary structure optimum films for protection of a surface against wear process at a friction. It is shown, that modes of heat treatment essentially influence on coating wear resistance. It is thus established, that optimum heat treatment of a composite coating with eutectic alloy powder filler is a mode without melting temperatures 950 °C.

**Key words:** composition electrolytic coatings, heat treatment, wearproofness, eutectic alloy

#### **References**

1. Kindrachuk M.V. Eksperementalno-analitychni doslidzhennia trybotekhnichnykh kharakterystyk pokryttiv matrychno-napovnenoho typu / M.V.Kindrachuk, M.V.Luchka, A.O. Korniienko // *Problemy trybolohii*. – 2005, № 2, – S. 74–80.
2. Strukturoutvorennia ta formuvannia trybotekhnichnykh vlastyvostei evtektichnykh pokryttiv / M.V. Kindrachuk, Yu.A. Kynytskyi, O.I. Dudka, Yu.H. Sukhenko, V.M. Korzhyk. – K.: Vyshcha shk., 1997.– 120 s.
3. Pat. 65018 Ukrainy MPK (2011.01) S25D 15/00 / Sklad dlia oderzhannia znosostiikykh kompozytsiinykh elektrolitychnykh pokryttiv na osnovi nikeliu dlia roboty pry pidvyshchenykh temperaturakh / Kindrachuk M.V., Korniienko A.O., Fedorchuk S.V., Luchka M.V., Perro D.M., Podliesnyi V.V. № u 2011 05006; Zaiavl. 20.04.2011; opubl. 25.11.2011, Biul. № 22. – 4s.
4. Korniienko A.O. Formuvannia trybotekhnichnykh vlastyvostei kompozytsiinykh elektrolitychnykh pokryttiv na osnovi nikeliu stvorenniam hradiientnykh struktur: Dys. ...kand. tekhn. nauk.: 05.02.04. – K., 2007. – 167 s.
5. Jevoljucija struktury i svojstv jevtekticheskikh pokrytij pri trenii // M.V. Kindrachuk, Ju.Ja. Dushek, M.V.Luchka, V.N. Gladchenko // *Poroshkovaja metallurgija*. – 1995. – №5/6. – S. 104–110.
6. Properties of electrolitical nickel-eutectic filler composite coatings / M.Pashechko, M.Kindraczuk, A. Kornienko, S.Fedorczuk, M.Barszcz // *Surface engineering*. 2014. – № 1. – P. 63–67.

**Корнієнко Анатолій Олександрович** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри машинознавства Національного авіаційного університету.

**Федорчук Світлана Володимирівна** – старший викладач кафедри машинознавства Національного авіаційного університету.

**Кіндрачук Мирослав Васильович** – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри машинознавства Національного авіаційного університету, kindrachuk@ukr.net.