

УДК 682.9.048

СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ЕІЛ-ПОКРИВІВ З TiN, TiB₂ І Мо НА ТИТАНОВОМУ СПЛАВІ VT22 ТА ЇХ ТРАСФОРМАЦІЯ ЗА СВІТЛОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

О. В. ПАУСТОВСЬКИЙ¹, В. В. ПАСІЧНИЙ¹, І. І. ТИМОФЄЄВА¹,
О. Г. МОЛЯР², В. І. НОВІКОВА¹, В. Є. ШЕЛУДЬКО¹, Н. М. МОРДОВЕЦЬ¹,
С. О. ОСТАПЕНКО¹, О. Д. КОСТЕНКО¹, Л. П. ІСАЄВА¹

¹ Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ;

² Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ

Встановлено, що ЕІЛ-покриви з TiN, TiB₂ і Мо значно поліпшують триботехнічні властивості титанового сплаву VT22. Показано, що з підвищенням швидкості ковзання від 1,0 до 10 м/с інтенсивність зношування збільшується в 1,5–2, а коефіцієнт тертя – в 1,3 рази. Значна кількість оксидів у покриттях, їх додаткове легування титаном після обробки КСВ сприяють збільшенню товщини шару в 3–4 рази, але погіршують триботехнічні властивості.

Ключові слова: електроіскрове легування, струм, сонячна обробка, покриття, твердість, шар.

Електроіскровим легуванням (ЕІЛ) можна формувати поверхневі шари зі зміненими структурою, складом і гарною адгезією до металу основи. Метод технологічно простий. Але його недоліком є одержання несучільних шорстких покриттів через дискретність імпульсу. Тому для поліпшення властивостей поверхні доцільна додаткова обробка ЕІЛ-покриттів, наприклад концентрованим сонячним випроміненням (КСВ), що дасть можливість зменшити пористість, залікувати мікротріщини й поліпшити адгезію [1, 2]. Перевагами цього методу є безконтактне нагрівання в будь-якому середовищі й вакуумі, чистота нагріву, можливість широкого регулювання щільності підведеної енергії, відсутність тиску.

Промислові титанові сплави, які за структурою поділяють на α -, $\alpha+\beta$ - та β -сплави [3], мають високий комплекс фізико-хіміко-механічних параметрів, що обумовлює їх застосування в аерокосмічній промисловості. Серед них найміцніший ($\alpha+\beta$)-сплав VT22 ($\sigma_B = 1200$ МПа), широкому використанню якого перешкоджають низькі триботехнічні характеристики, що притаманно всім цим сплавам [4]. Тому поліпшити триботехнічні властивості титанових сплавів, зокрема нанесенням захисних покриттів – важливе наукове завдання. Для його вирішення на титановий сплав VT22 наносили ЕІЛ-покриви з TiN, TiB₂ та Мо. Раніше [5] показано можливість підвищити твердість та зносо-тривкість ЕІЛ-покриттів з TiN та TiB₂ на сталі У8 після КСВ.

Мета цього дослідження – вивчити можливості КСВ для поліпшення фізико-механічних властивостей вихідних ЕІЛ-покриттів, нанесених на титановий сплав VT22.

Об'єкти та методика випробувань. Для досліджень вибрали ЕІЛ-покриви з TiN + Cr, Ni; TiN + Ni, Mo; TiB₂ + Ni, Mo і з Мо, нанесені на основу зі сплаву ВТ22. До всіх матеріалів з тугоплавкими сполуками додавали Al₂O₃. Легували на установці ЭФІ-46А у режимі $I = 1,5$ А, $C = 300$ μF, триботехнічні характеристики досліджували на машині тертя МТ-68 за швидкості ковзання $V = 1,0$ та 10 m/s під навантаженням $P = 0,5$ N на повітрі. Поверхню обробляли КСВ на установці СГУ-2 зі системою спостереження за Сонцем, яка є дзеркальним концентратором сонячної енергії. Температуру обробки контролювали термopарами, встановленими на зворотному боці зразка. Променевий тепловий потік регулювали у межах 3000...4000 kVt/m² за допомогою жалюзі. Рентгенофазовий аналіз (РФА) усіх зразків виконували на установці ДРОН-3М у Cu-K_α-випромінюванні. Для металографічного аналізу електроіскрових покривів і сплаву використовували оптичний мікроскоп МІМ-9.

Результати та їх обговорення. На рентгенограмах вихідних ЕІЛ-покривів з TiN, крім фази TiN, присутні також у невеликій кількості фази α- та β-титану, інтерметалідів та оксидів (табл. 1). У покриттях TiN та TiB₂, підданих дії КСВ, збільшується кількість простих та складних оксидів Ti, Al, Ni і Мо, присутні також інтерметаліди TiNi, TiCr₂, борат TiBO₃ і β-Ti. Результати металографічного та дюрOMETричного аналізів подані в табл. 2.

Таблиця 1. Рентгенофазовий склад ЕІЛ-покривів і підкладки

Склад матеріалу	ЕІЛ	ЕІЛ + КСВ
Мо	Mo [*] , α-, β-Ti	Mo, β-Ti, Ti ₂ O ₃
TiN + Ni, Mo, Al ₂ O ₃	TiNO [*] , TiNi ₃ , Ti ₃ Ni [*] , TiO ₂ [*] , NiMo, Al ₂ O ₃ [*] , α-, β-Ti	TiNO, MoNi, Ti ₃ NiO ₃ , TiNi, Mo ₄ O ₁₁ , Al ₂ O ₃ [*] , TiO ₂ , NiTiO ₃
TiN + Cr, Ni, Al ₂ O ₃	TiNO [*] , TiCr ₂ , Ti ₂ Ni, Al ₂ O ₃ [*] , TiO ₂ , α-, β-Ti	TiNO, TiNi, TiCr ₂ , Al ₂ O ₃ , Ti ₃ O ₅ , NiTiO ₃
TiB ₂ + Ni, Mo, Al ₂ O ₃	TiB [*] , TiNi ₃ , β-Ti, Al ₂ O ₃ [*] , Ni, Ti ₃ O ₅ , Ti ₇ O ₁₃	TiB, TiB ₂ , β-Ti, Ti ₃ NiO ₃ , TiMoO ₅ , TiBO ₃ , Al ₂ O ₃ , AlBO ₃ [*] , TiNi ₃ [*]
ВТ22	Підкладка α-, β-Ti, TiO ₂ [*]	

Примітка: * – сліди.

Таблиця 2. Результати металографічного й дюрOMETричного аналізів покривів і зони термічного впливу

Матеріал електрода	ЕІЛ		ЕІЛ + КСВ	
	товщина легового шару, μm	H_{μ} [*] , GPa	товщина легового шару, μm	H_{μ} , GPa
TiN + Ni, Mo, Al ₂ O ₃	40	12/3,3	200	19/3,8–3,3
TiN + Cr, Ni, Al ₂ O ₃	30	10 /3,3	150	14/3,8–3,3
TiB ₂ + Ni, Mo, Al ₂ O ₃	35	11/3,3	150	18/3,8–3,3
Мо	25	7,8/3,3	35	4/3,8–0,33

* У чисельнику – мікротвердість легового шару, у знаменнику – зони термічного впливу в сплаві ВТ22.

Леговані шари для всіх матеріалів після обробки КСВ суцільні, але нерівномірні, з товщиною 150...200 μm, що в 5 разів перевищує товщини зміц-

нених шарів після ЕІЛ. У термооброблених шарах є ділянки темної фази з $H_{\mu} = 5,5$ GPa. Мікротвердість легованих шарів коливається від 14 до 19 GPa. В окремих місцях досягає 22 GPa, де, очевидно, присутній оксинітрид титану (табл. 1). Мікротвердість поверхні покриття з Мо становить 4,0...7,0 GPa.

Структура сплаву VT22 під покритвом з $TiB_2-(Ni, Mo, Al_2O_3)$, обробленого нижче температури поліморфного перетворення ($860^{\circ}C$), двофазна. Після травлення видно межі колишнього β -зерна та виділення α -фази у вигляді пластин кошикового плетіння в середині β -зерна (рис. 1a, b). Структура сплаву з покритвом з Мо, обробленого вище температури поліморфного перетворення, однофазна, присутня тільки високотемпературна β -фаза (рис. 1c, d) без виділення низькотемпературної α -фази, що свідчить про швидкісне охолодження зразків (гартування на β -фазу) після КСВ (табл. 3).

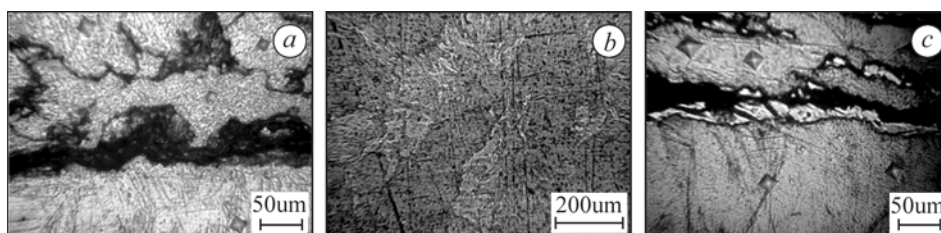


Рис. 1. Мікроструктура ЕІЛ-покриття з $TiB_2 + Ni, Mo, Al_2O_3$ (a) та сплаву VT22 під покритвом (b), ЕІЛ-покриття з Мо (c) та сплаву VT22 під покритвом (d).

Fig. 1. Microstructure of electric-spark alloyed (ESA) coating with $TiB_2 + Ni, Mo, Al_2O_3$ (a) and VT22 alloy under coating (b), ESA coating with Mo (c) and VT22 alloy under coating (d).

Триботехнічні властивості досліджених ЕІЛ-покриттів і підкладки VT22 ілюструють рис. 2 і 3. Зі зменшенням швидкості ковзання від 10 до 1 м/с за однакового навантаження 0,5 N інтенсивність зношування сплаву VT22 без покриття зменшується в 6 разів. Для ЕІЛ-покриттів з $TiN + Ni, Mo, Al_2O_3$ – вдвічі, а з $TiN + Ni, Cr, Al_2O_3$ і $TiB_2 + Ni, Mo, Al_2O_3$ – в 1,5 рази, а коефіцієнт тертя – в 1,3 рази. Для ЕІЛ-покриття з Мо вона зменшується в 4 рази (від 60 до $15 \cdot 10^{-7}$), а коефіцієнт тертя – в 1,4 рази.

Мінімальний коефіцієнт тертя для ЕІЛ-покриттів з $TiN + Ni, Cr, Al_2O_3$ і $TiB_2 + Ni, Mo, Al_2O_3$ становить 0,26 за швидкості ковзання 10 м/с і $P = 0,5$ N. Мінімальний коефіцієнт тертя для ЕІЛ-покриттів з Мо становить приблизно 0,14 за швидкості ковзання 1,0 м/с і $P = 0,5$ N.

Таблиця 3. Режими обробки КСВ ЕІЛ-покриттів на сплаві VT22

Склад матеріалу	Температура нагріву, $^{\circ}C$	Час нагріву τ , s	Тепловий потік, W/cm^2
$TiN + Ni, Mo, Al_2O_3$	680	10,3	165
$TiN + Cr, Ni, Al_2O_3$	670	8,7	165
$TiB_2 + Ni, Mo, Al_2O_3$	740	8,7	165
Mo	600	9,8	180

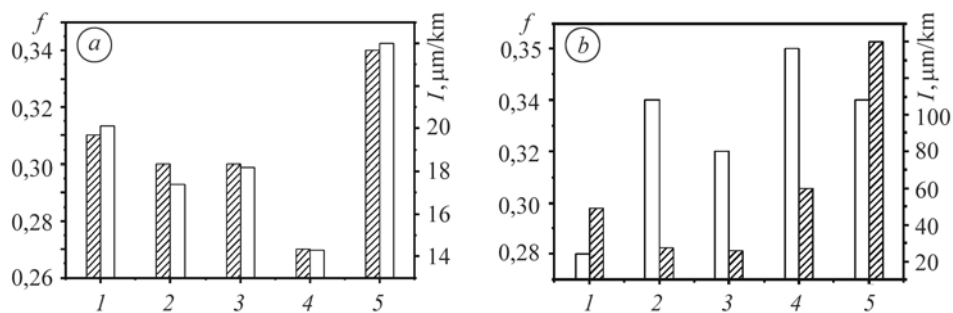


Рис. 2. Коефіцієнт тертя (f , заштриховані стовпчики) і інтенсивність зношування (I , світлі) ЕІЛ-покривів на підкладці зі сплаву ВТ22, нанесених електродними матеріалами ($P = 0,5$ МПа): 1 – TiN + Mo, Ni; 2 – TiN + Cr, Ni; 3 – TiB₂ + Mo, Ni; 4 – Mo; 5 – підкладка із ВТ22 ($a - V = 1$ м/с; $b - 10$ м/с).

Fig. 2. Friction coefficient (f , dashed columns) and wear intensity (I , light) of ESA coatings on BT22 alloy substrate, deposited by electrode materials ($P = 0.5$ MPa): 1 – TiN + Mo, Ni; 2 – TiN + Cr, Ni; 3 – TiB₂ + Mo, Ni; 4 – Mo; 5 – BT22 substrate ($a - V = 1$ m/s; $b - 10$ m/s).

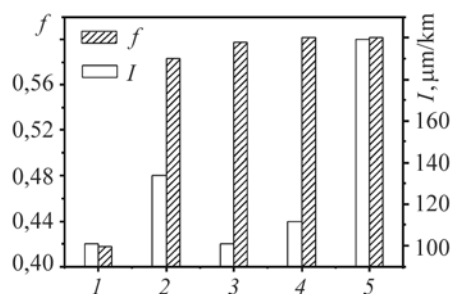


Рис. 3. Коефіцієнт тертя (f) і інтенсивність зношування (I) ЕІЛ-покривів з матеріалів: 1 – TiN + Mo, Ni; 2 – TiN + Cr, Ni; 3 – TiB₂ + Mo, Ni; 4 – Mo; 5 – підкладка з титанового сплаву ВТ22 після КСВ ($V = 10$ м/с, $P = 0,5$ N).

Fig. 3. Friction coefficient (f) and wear intensity (I) of ESA coatings from materials: 1 – TiN + Mo, Ni; 2 – TiN + Cr, Ni; 3 – TiB₂ + Mo, Ni; 4 – Mo; 5 – titanium BT22 alloy substrate after concentrated solar irradiation ($V = 10$ m/s, $P = 0.5$ N).

Таблиця 4. Режими обробки КСВ та властивості ЕІЛ-покривів і підкладки із сплаву ВТ22

Склад матеріалу	Температура нагріву, °С	Час нагріву τ , s	Коефіцієнт тертя, f	Інтенсивність зношування I , $\mu\text{m}/\text{km}$
TiN + Ni, Mo	270	16,5	0,42	99
TiN + Cr, Ni	270	13,8	0,48	200
TiB ₂ + Ni, Mo	270	12,0	0,42	198
Mo	300	9	0,44	215
BT22	270	9	0,6	201
BT22	270	16,5	0,7	275

Другий експеримент з обробкою КСВ виконували при нижчих температурах (200...300°С на зворотному боці зразка) (табл. 4). Помітно, що зі зменшенням температури нагріву зразків до 270°С інтенсивність зношування покривів збільшується приблизно в два рази, а коефіцієнт тертя зменшується в

1,5 рази (табл. 4). Однакові триботехнічні значення для обох термічних режимів має ЕІЛ-покрив з TiN + Ni, Mo, Al₂O₃. Для сплаву BT22 при низькій температурі нагріву за тривалішої витримки інтенсивність зношування збільшується в 1,3 рази порівняно із тим же сплавом, обробленим при 600°C (табл. 4). Такі результати можна пояснити взаємодією матеріалів покривів і основи під час обробки КСВ, збагаченням зовнішнього шару і оксидами, і титаном, що погіршує триботехнічні властивості. Поліпшення цих властивостей зі збільшенням інтенсивності опромінення пояснюють утворенням газонасичених поверхневих шарів з підвищеними триботехнічними характеристиками.

ВИСНОВКИ

Електроіскрові покриття з досліджених матеріалів суттєво поліпшують триботехнічні властивості титанового сплаву BT22 і їх характеристики залежать від умов випробувань. Встановлено, що зі зниженням швидкості ковзання від 10 до 1,0 м/с триботехнічні характеристики ЕІЛ-покривів на основі TiN, TiB₂ і Мо на сплаві BT22 підвищуються (інтенсивність зношування зменшується в 1,5–2 рази, а коефіцієнт тертя – в 1,3 рази). Під час обробки ЕІЛ-покривів на основі TiN, TiB₂ і Мо товщина легованого шару збільшується у 3–4 рази внаслідок утворення значної кількості оксидів та дифузії титану в покриття, що, на відміну від сталі, погіршує триботехнічні властивості.

РЕЗЮМЕ. Установлено, что ЕИЛ-покрытия из TiN, TiB₂ и Мо значительно улучшают триботехнические свойства титанового сплава BT22. Показано, что повышение скорости скольжения с 1,0 до 10 м/с приводит к увеличению интенсивности изнашивания в 1,5–2, а коэффициента трения – в 1,3 раза. Образование большого количества оксидов в ЕИЛ-покрытиях, их дополнительное легирование титаном после обработки КСИ способствует увеличению толщины слоя в 3–4 раза, но ухудшает триботехнические свойства.

SUMMARY. It is established that ESA-coatings from TiN-, TiB₂- and Mo essentially improve the tribotechnical characteristics of BT22 titanium alloy. It is shown that the increase in sliding speed from 1.0 to 10 m/s leads to the 1.5–2 fold increase of wear intensity and 1.3 fold increase of friction coefficient. Formation of a great quantity of oxides in ESA-coatings after concentrated solar irradiation promotes the increase of the layer thickness in 3–4 times but deteriorates the tribotechnical properties.

1. *Верхотуров А. Д., Муха И. М.* Технология электроискрового покрытия металлических поверхностей. – К.: Техника, 1982. – 179 с.
2. *Верхотуров А. Д., Подчерняева И. А., Егоров Ф. Ф.* Электродные материалы для электроискрового легирования. – М.: Наука, 1988. – 200 с.
3. *Gerd Lütjering, James Williams.* Titanium. – Berlin: Springer-Verlag, 2003. – 379 p.
4. *Осташ О. П., Федірко В. М., Моляр О. Г.* Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій. – Львів: Сполом, 2007. – 1062 с.
5. *Изменение структуры и физико-механических свойств электроискровых покрытий на основе TiN и TiB₂ после обработки концентрированным солнечным излучением / А. В. Паустовский, Г. А. Фролов, В. И. Новикова и др. // Порошковая металлургия. – 2005. – № 7/8. – С. 64–69.*

Одержано 05.12.2008