

ФАЗОВИЙ СКЛАД, СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ НА ТИТАНІ

*І. М. ПОГРЕЛЮК, В. С. ТРУШ, Х. Р. ЗАДОРЖНА,
Я. Я. СІРАК, Т. М. КРАВЧИШИН*

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Оцінено фазовий склад, структуру та характеристики модифікованого шару титану BT1-0 після електроіскрового легування (ЕІЛ) та його комбінування з оксидуванням та азотуванням. Як електродні матеріали під час ЕІЛ використано графітовий, нікелевий та молібденовий електроди. Визначено антифрикційні властивості сформованих покриттів у парі з керамікою Al_2O_3 за тертя без мащення. Встановлено позитивний вплив комбінованого оброблення на втомну довговічність титану BT1-0 за малоциклового чистого згину.

Ключові слова: титан BT1-0, електроіскрове легування, вуглець, нікель, молібден, комбіноване оброблення, оксидування, азотування, твердість, структура, коефіцієнт тертя, втомна довговічність.

The phase composition, structure and characteristics of the modified BT1-0 titanium layer after electrospark alloying (ESA) and its combination with oxidation and nitriding were evaluated. Graphite, nickel, and molybdenum electrodes were used as electrode materials during ESA. The anti-friction properties of the formed coatings paired with Al_2O_3 ceramics under friction without lubrication were evaluated. The positive effect of combined processing on the fatigue life of BT1-0 titanium under low-cycle pure bending is shown.

Keywords: titanium BT1-0, electrospark alloying, carbon, nickel, molybdenum, combined treatment, oxidation, nitriding, hardness, structure, coefficient of friction, fatigue life.

Вступ. Під час електроіскрового легування (ЕІЛ) використовують розряд між металевою підкладкою та електродом, через що матеріал останнього розплавляється та проникає на поверхню підкладки за високої температури ($5 \cdot 10^3 \sim 2 \cdot 10^4$ °C), утворюючи шар зі спеціальними властивостями [1–4]. Таке оброблення оптимізує фізико-хімічні властивості поверхні та дещо поліпшує твердість, зносо- та корозійну тривкість вихідного матеріалу підкладки [5–10]. Через широку гаму матеріалів під час ЕІЛ та участь міжелектродного середовища в формуванні поверхневих шарів можна змінювати механічні, термічні, електричні, термоємнісінні й інші властивості робочих поверхонь деталей та вивчати механізми формування покриттів.

Комбінуючи ЕІЛ з іншими способами поверхневого оброблення, вдається зменшити різкий перепад твердості між легованим шаром і сплавом, а отже, уникнути руйнування і відшарування покриття під час експлуатації, підвищити тривкість в умовах динамічних та знакозмінних навантажень [11, 12].

Мета цього дослідження – комбінування ЕІЛ з термодифузійним насиченням елементами втілення (киснем, азотом), щоб збільшити твердість поверхні, поліпшити антифрикційні характеристики титану BT1-0 та знизити градієнт мікротвердості модифікованого шару для забезпечення довговічності.

Методика. Зразки 10×15×1 mm технічно чистого титану BT1-0 обробляли за такими схемами: 1 – одноетапне ЕІЛ графітовим, нікелевим та молібденовим електродами на устаткуванні ЭФИ-10м Інституту прикладної фізики академії наук Молдови [13]; 2 – термодифузійне насичення киснем та азотом (оксидування, азотування) та подальше ЕІЛ (хіміко-термічне оброблення (ХТО)+ЕІЛ); 3 – ЕІЛ та подальше термодифузійне насичення киснем та азотом (ЕІЛ+ХТО). Твердорозчинне зміцнення поверхневих шарів титану киснем (оксидування) здійснювали за термодифузійного насичення у розрідженому кисневмісному газовому середовищі (10^{-2} Pa) при 750°C, 3 h. Азотували в розрідженому до 1 Pa динамічному потоці азоту при 850°C, 5 h. Рентгенофазовий та рентгеноструктурний аналізи (XRD) зразків виконували за допомогою дифрактометра ДРОН-3.0 у монохроматичному $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванні з фокусуванням за схемою Бреґґа–Брентано.

Шліфи зі зразків для мікроструктурних та дюрOMETричних досліджень готували за стандартною методикою. Мікроструктурні дослідження виконували на мікроскопі “EPIQUANT”, оснащеному цифровою камерою-окуляром eTREK DCM520, та сканувальному електронному EVO 40XVP зі системою мікроаналізу INCA Energy. Мікротвердість вимірювали приладом PMT-3M за навантаження на індентор 0,49 та 0,981 N. Трибологічні характеристики титану BT1-0 із покриттями визначали за зворотно-поступального руху керамічної (Al_2O_3) кульки площиною зразків. Випробовували у режимі тертя без мащення. Шлях тертя 1600 mm, навантаження 10 N. Плоскі зразки зі шириною робочої частини 3 mm та товщиною 1 mm досліджували за умов симетричного чистого згину у повітрі за кімнатної температури на машині УМДУ-01, розроблений та виготовлений у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України [14, 15]. Амплітуда деформації $\pm\epsilon_a = 0,6\%$.

Результати та їх обговорення. Морфологія поверхні зразків характерна для ЕІЛ (рис. 1a). Розплавлений електродний матеріал (у даному випадку – нікель) взаємодіє з металевою підкладкою (титаном) за високої температури. Значні термічні напруження під час охолодження розплавленого металу провокують утворення сітки поверхневих тріщин після усіх схем комбінованого оброблення (рис. 1b–f, стрілки).

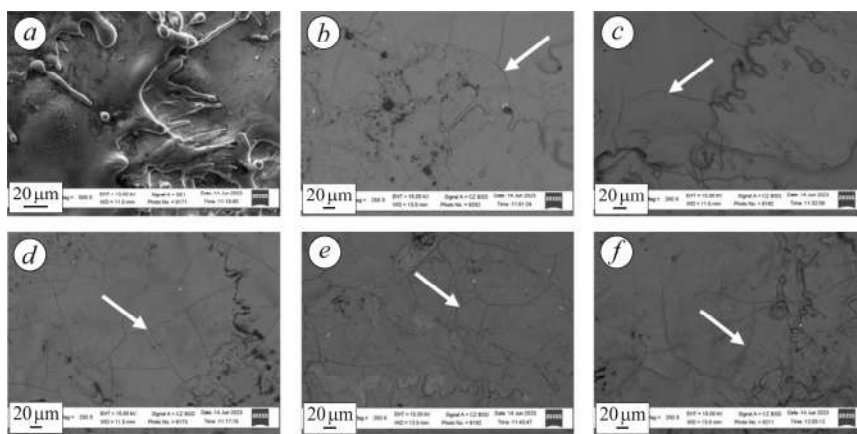


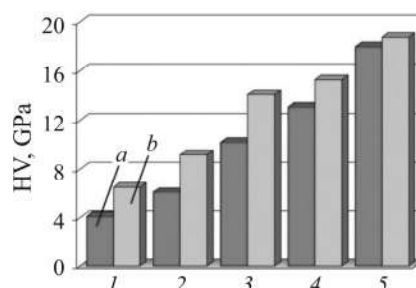
Рис. 1. СЕМ-зображення поверхні титану BT1-0 після ЕІЛ нікелем (a, b), ХТО + ЕІЛ (c, e) та ЕІЛ + ХТО (d, f): a – у вторинних електронах; b–f – у відбитих; c, e – оксидування; d, f – азотування.

Fig. 1. СЕМ-images of the surface of BT1-0 titanium after ESA with nickel (a, b), chemico-heat treatment (CHT) + electro-spark alloying (ESA) (c, e) and ESA + CHT (d, f): a – in secondary electrons; b–f – in reflected ones; c, e – oxidation; d, f – nitriding.

Після ЕІЛ нікелевим електродом XRD спектри поверхні зразків містять лінії нікелідів титану $Ti_{0,9}Ni_{0,1}$ та Ti_2Ni , а також субоксиду титану TiO (див. таблицю). Поверхнева мікротвердість зростає до 6,7 GPa проти 2,9 GPa без оброблення і на 2,4 GPa (56%) вища порівняно з ЕІЛ графітовим електродом (рис. 2).

Рис. 2. Мікротвердість поверхні зразків титану BT1-0 після ЕІЛ (1), ХТО + ЕІЛ та ЕІЛ + ХТО (2–5): 2, 4 – оксидування та азотування + ЕІЛ, 3, 5 – ЕІЛ + оксидування та азотування; а – ЕІЛ графітовим електродом, b – нікелевим.

Fig 2. Microhardness of the surface of BT1-0 titanium samples after ESA (1), CHT + ESA and ESA + CHT (2–5): 2, 4 – oxidation and nitriding + ESA, 3, 5 – ESA + oxidation and nitriding; a – ESA with a graphite electrode, b – with a nickel electrode.



Застосовуючи перед ЕІЛ, зокрема графітовим електродом, термодифузійне насичення титану киснем чи азотом (ХТО + ЕІЛ), а також ЕІЛ + ХТО, можна змінювати фазово-структурний стан поверхневих шарів, збільшуючи при цьому поверхневу мікротвердість (рис. 3а), а отже, впливати на антифрикційні характеристики поверхні [17, 18]. Оксидування перед ЕІЛ нікелевим електродом змінює фазовий склад поверхневих шарів проти одноетапного оброблення. Нікеліду Ti_2Ni у дифракційному спектрі поверхні уже не фіксували, проте з'явилися сліди оксиду NiO . При цьому поверхнева мікротвердість зразків зросла на 2,7 GPa (до 9,4 GPa). Оксидування після ЕІЛ сприяє підвищенню поверхневої мікротвердості до 14,2 GPa, що у 2,1 рази більше, ніж після ЕІЛ нікелевим електродом. У поверхневому дифракційному спектрі зразків з'являються рефлекси оксиду $Ti_4Ni_2O_{0,6}$ (кубічна структура з Fd3m симетрією, $a = 1,134$ nm) як результат окиснення нікеліду титану $Ti_{0,9}Ni_{0,1}$.

Після оброблення за схемами ХТО+ЕІЛ чи ЕІЛ+ХТО поверхнева мікротвердість зразків зростає інтенсивніше. Після попереднього азотування, порівняно з оксидуванням, вона збільшується на 5,9 GPa (15,3 проти 9,4 GPa). Під час азотування після ЕІЛ нікелевим електродом збільшується до 19,5 GPa, тобто незначно поступається мікротвердості зразків після такого ж комбінованого оброблення під час ЕІЛ графітовим електродом (19,1 GPa) (рис. 3). Такий ефект, очевидно, пов'язаний із формуванням на поверхні твердих нітридних фаз, адже твердість TiN становить 21...24 GPa [16]) (див. таблицю).

Фазовий склад поверхневих шарів титану BT1-0 після ЕІЛ та комбінованого оброблення

Оброблення	Фазовий склад
ЕІЛ нікелевим електродом	α -Ti; TiO; $Ti_{0,9}Ni_{0,1}$; Ti_2Ni
Оксидування + ЕІЛ нікелевим електродом	α -Ti; TiO; $Ti_{0,9}Ni_{0,1}$; NiO
Азотування + ЕІЛ нікелевим електродом	α -Ti; Ti_2N ; TiN; $Ti_{0,9}Ni_{0,1}$; $Ti_4Ni_2O_{0,6}$
ЕІЛ нікелем + оксидування	α -Ti; TiO; $Ti_{0,9}Ni_{0,1}$; $Ti_4Ni_2O_{0,6}$
ЕІЛ нікелем + азотування	α -Ti; Ti_2N ; TiN; $Ti_{0,9}Ni_{0,1}$; $Ti_4Ni_2O_{0,6}$

Суттєвіше поверхнєве зміцнення після ЕІЛ нікелевим електродом порівняно з графітовим впливає на антифрикційні характеристики, зокрема у трибопарі з керамікою Al_2O_3 (рис. 3). Хоча час припрацювання у першому випадку тривалі-

ший через формування шорсткішої поверхні, проте значення коефіцієнта тертя на усій базі випробування нижчі. Зокрема, на стадії стабільної роботи трибопари вони різняться у 1,4 рази (рис. 3а). Аналогічні тенденції зберігаються і за комбінованого оброблення (ХТО + ЕІЛ чи ЕІЛ + ХТО) (рис. 3b–d). Лише під час оброблення за схемою ХТО + ЕІЛ припрацювання чіткіший ефект (рис. 3b, c), ніж за одноетапного. За оброблення за схемою ЕІЛ + ХТО припрацювання трибопари швидке, без суттєвих змін коефіцієнта тертя (рис. 3b, d).

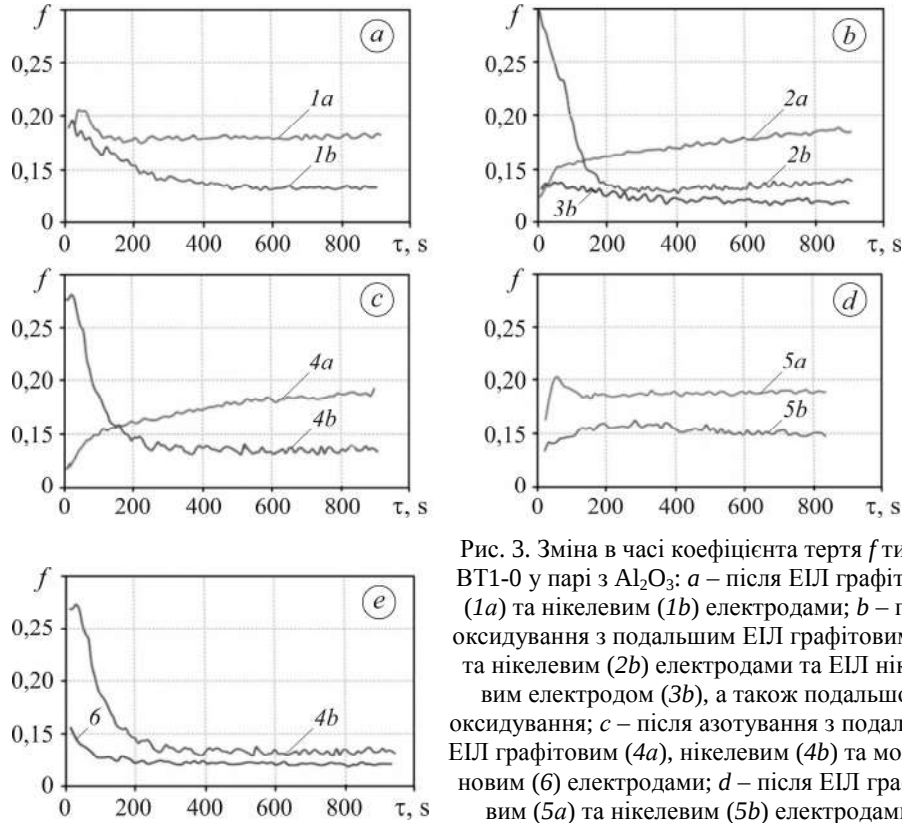


Рис. 3. Зміна в часі коефіцієнта тертя f титану BT1-0 у парі з Al_2O_3 : а – після ЕІЛ графітовим (1а) та нікелевим (1b) електродами; б – після оксидування з подальшим ЕІЛ графітовим (2а) та нікелевим (2b) електродами та ЕІЛ нікелевим електродом (3b), а також подальшого оксидування; с – після азотування з подальшим ЕІЛ графітовим (4а), нікелевим (4b) та молібденовим (6) електродами; д – після ЕІЛ графітовим (5а) та нікелевим (5b) електродами з подальшим азотуванням.

Fig. 3. Change in time of the friction coefficient f of BT1-0 titanium in a pair with Al_2O_3 : а – after ESA with graphite (1a) and nickel (1b) electrodes; б – after oxidation followed by ESA with graphite (2a) and nickel (2b) electrodes and ESA with a nickel electrode (3b) and subsequent oxidation; с – after nitriding with subsequently ESA with graphite (4a), nickel (4b) and molybdenum (6) electrodes; д – after combined ESA treatment with graphite (5a) and nickel (5b) electrodes followed by nitriding.

Серед усіх схем оброблення антифрикційні характеристики забезпечує ХТО + + ЕІЛ нікелевим електродом з азотуванням. Твердість поверхні титану тут становить $\text{HV}_{0,49} = 15,9$ GPa; $\text{HV}_{0,981} = 10,9$ GPa. За тертя без мащення коефіцієнт тертя титану з покриттям у парі з керамічною кулькою знижується до 0,113 проти 0,132 за одноетапного ЕІЛ.

Після заміни електрода на молібденовий коефіцієнт тертя у трибопарі з керамікою знижується до 0,1 (рис. 4е). Покриття містить фазу $\text{Ti}_{0,9}\text{Mo}_{0,1}$ та нітридні фази TiN ; Ti_2N . Окрім того, у дифракційному спектрі присутні рефлекси молібдену. Твердість поверхні титану з таким покриттям $\text{HV}_{0,49} = 13,9$ GPa; $\text{HV}_{0,981} = 11,6$ GPa. Тобто градієнт його твердості $\Delta\text{HV} = \text{HV}_{0,49} - \text{HV}_{0,981}$ менший (5,0 проти 2,3 GPa).

Досліджували втомну довговічність за чистого згину титану після одноетапного ЕЛІ графітовим та нікелевим електродами, а також комбінованого оброблення. Найменшу довговічність зафіксували після одноетапного ЕЛІ: ~ 20 та ~ 34 тис. циклів, відповідно (рис. 4), коли формуються зміцнені шари з різким градієнтом мікротвердості по перетину (рис. 5, стовпчик 1). Після оброблення за схемою ЕЛІ+ХТО кількість циклів до руйнування збільшується в середньому втричі для графітового і у 2–2,5 разів для нікелевого електродів. Після дифузійного насичення азотом з подальшим ЕЛІ графітовим електродом кількість циклів до руйнування проти ЕЛІ графітовим електродом також зростає: ~ 60 і 20 тис. циклів, відповідно. Підвищення довговічності викликане формуванням під час комбінованого оброблення структури модифікованих зміцнених шарів з перехідною дифузійною зоною між покриттям і титановою матрицею, що забезпечує плавний розподіл твердості у приповерхневих шарах (рис. 6).

Рис. 4. Втомна довговічність титану BT1-0 під час чистого згину за деформації $\pm \epsilon_a = 0,6\%$ після оброблення за різними режимами: 1, 5 – одноетапного ЕЛІ, відповідно, графітовим та нікелевим електродами; 2 – азотування з подальшим ЕЛІ графітовим електродом; 3, 6 – ЕЛІ графітовим та нікелевим електродами, відповідно, з подальшим оксидуванням; 4, 7 – ЕЛІ графітовим та нікелевим електродами, відповідно, з подальшим азотуванням.

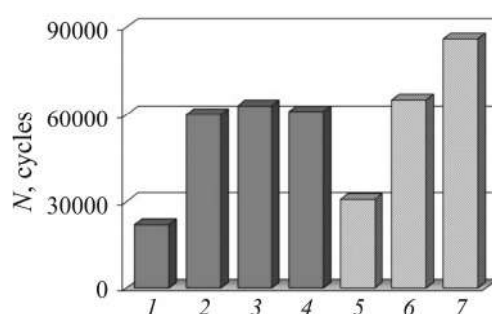


Fig. 4. Fatigue life of BT1-0 titanium under pure bending at a deformation of $\pm \epsilon_a = 0.6\%$ after different mode treatment: 1, 5 – one-stage ESA with graphite and nickel electrodes, respectively; 2 – nitriding followed by ESA with a graphite electrode; 3, 6 – ESA with graphite and nickel electrodes, respectively, with subsequent oxidation; 4, 7 – ESA with graphite and nickel electrodes, respectively, followed by nitriding.

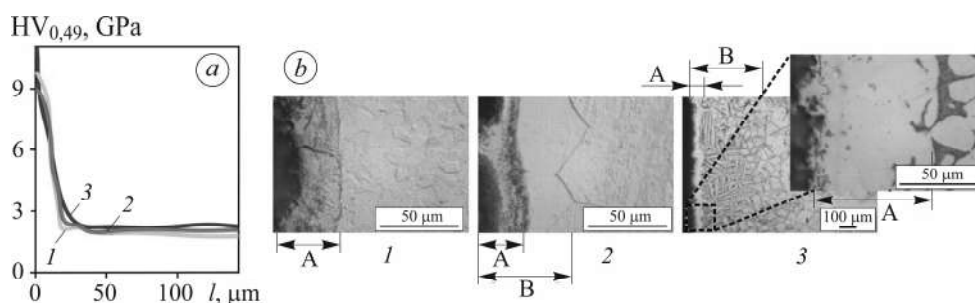


Рис. 5. Розподіл мікротвердості (a) та структура поверхневих модифікованих шарів (b) після одноетапного ЕЛІ нікелевим електродом (1); ЕЛІ нікелевим електродом з подальшим оксидуванням (2) та азотуванням (3); А – покриття; В – дифузійна зона.

Fig. 5. Microhardness distribution (a) and structure of near-surface modified layers (b) after one-stage ESA with a nickel electrode (1); ESA with a nickel electrode followed by oxidation (2) and nitriding (3); A – coating; B – diffusion zone.

Згідно з фрактографічним аналізом, на зразках титану після одноетапного ЕЛІ чітко проявляється поверхневий шар завтовшки 40...50 μm з відмінностями у зламі, порівняно з матрицею (рис. 6a, b). Його товщина співмірна з товщиною покриття, сформованого в результаті ЕЛІ. Він містить крихкі міжзеренні фасетки, не-

значну кількість деформаційних гребенів, що вказує на крихкий тип руйнування через різкий перепад напружень між покриттям та матрицею.

На зразку після ЕІЛ нікелевим чи вуглецевим електродами з подальшим оксидуванням чи азотуванням втомні борозенки та деформаційні гребені починаються з поверхні, що свідчить про задовільне зчеплення покриття з матрицею (рис. 6с–g). У поверхневому шарі таких зразків виявили значну кількість втомних борозенок, деформаційних гребенів, а фасеток відколу не було, що підтверджує вищу енергоємність руйнування порівняно з одноетапним ЕІЛ.

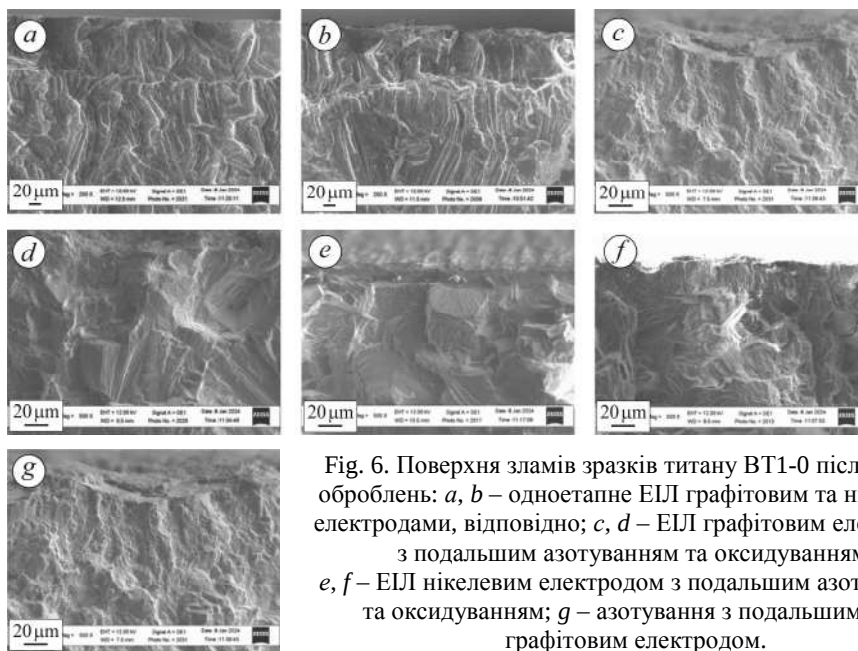


Fig. 6. Поверхня зламів зразків титану BT1-0 після різних оброблень: *a, b* – одноетапне ЕІЛ графітовим та нікелевим електродами, відповідно; *c, d* – ЕІЛ графітовим електродом з подальшим азотуванням та оксидуванням; *e, f* – ЕІЛ нікелевим електродом з подальшим азотуванням та оксидуванням; *g* – азотування з подальшим ЕІЛ графітовим електродом.

Fig. 6. Fracture surface of BT1-0 titanium after different treatment modes: *a, b* – one-stage ESA with graphite and nickel electrodes, respectively; *c, d* – ESA with a graphite electrode followed by nitriding and oxidation; *e, f* – ESA with a nickel electrode followed by nitriding and oxidation; *g* – nitriding followed by ESA with a graphite electrode.

ВИСНОВКИ

Після комбінованого оброблення незалежно від схеми реалізації (ХТО+ЕІЛ чи ЕІЛ+ХТО) поверхнева мікротвердість титану BT1-0 проти з одноетапного ЕІЛ графітовим і нікелевим електродами підвищується у 2,9–4,4 рази. ЕІЛ нікелевим електродом порівняно з графітовим поліпшує антифрикційні характеристики у трибопарі з керамічною кулькою (Al_2O_3) під час сухого тертя за усіх досліджених схем оброблення (коефіцієнт тертя f зменшується від 0,132 до 0,113). Зі зміною нікелевого електрода на молібденовий під час оброблення за схемою азотування + ЕІЛ коефіцієнт тертя зменшується до 0,1.

Довговічність зразків титану BT1-0 з електроіскровими покриттями, отриманими комбінованим обробленням, порівняно з одноетапним ЕІЛ графітовим та нікелевим електродами, зростає у 2–3 рази, що пов'язано з формуванням перехідних дифузійних зон між покриттям і матрицею, які забезпечують плавний розподіл мікротвердості по перерізу модифікованих шарів.

1. Johnson R. N. Alternative coatings for wear and corrosion: the electrospark deposition process. – Publ. American Electroplaters and Surface Finishers Society, 2002. – P. 10. <https://www.nmfr.org/pdf/awk02/awk02d06.pdf>

2. *Advanced Electro-Spark Deposition Process on Metallic Alloys*. Chapter 3 / P. Vizureanu, M.-Cr. Perju, D.-Cr. Achiței and C. Nejeru. – London: United Kingdom IntechOpen, 2018. – P. 45–68. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.79450>
3. *Surface modification and functionalization by electrical discharge coating: a comprehensive review* / P. J. Liew, C. Y. Yap, J. Wang, T. Zhou, and J. Yant // *Inter. J. of Extreme Manufact.* – 2020. – **2**, № 1. – P. 1–32. <http://doi.org/10.1088/2631-7990/ab7332>
4. *Electrospark alloying of titanium and its alloys, physical and technological aspects and the possibility of practical use. Short review* / V. V. Mikhailov, A. E. Gitlevich, A. D. Verkhovturov, A. I. Mikhaylyuk, A. V. Belyakovsky, and L. A. Konevtsov // *Surf. Eng. and Appl. Electrochem.* – 2013. – **49**, № 5. – P. 21–44.
5. *Synthesis of multicomponent coatings by electrospark alloying with powder materials* / V. Mikhailov, N. Kazak, S. Ivashcu, E. Ovchinnikov, C. Baci, A. Ianachevici, R. Rukuiza, and A. Zunda // *Coatings*. – 2023. – **13**. – Article number 651. <https://doi.org/10.3390/coatings13030651>
6. *Synthesis of carbide phases in surface metal layers under electrospark alloying with graphite and transition metals in groups IV–VI* / V. Mikhailov, N. Kazak, V. Agafii, and A. I. Yanakovich // *Powder Metallurgy and Metal Ceram.* – 2019. – **58**. – P. 307–311. <https://doi.org/10.1007/s11106-019-00079-8>
7. *Surface characteristics, properties and wear resistance of TiB₂ based hard-alloy coatings obtained by electrospark deposition at negative polarity on Ti6Al4V alloy* / T. Penyashkia, G. Kostadinova, M. Kandevar, A. Nikolovb, R. Dimitrova, and V. Kamburov // *Tribology in Industry*. – 2023. – **45**, № 4. – P. 686–698. <https://doi.org/10.24874/ti.1507.06.23.08>
8. *Chen Z. and Zhou Y. Surface modification of resistance welding electrode by electro-spark deposited composite coatings. Part I: Coating characterization* // *Surf. and Coat. Technol.* – 2006. **201**, № 3–4. – P. 1503–1510.
9. *Electrode materials for composite and multilayer electrospark-deposited coatings from Ni–Cr and WC–Co alloys and metals* / V. B. Tarel'nyk, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, E. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskiy, and B. Antoszewski // *Powder Metallurgy and Metal Ceram.* – 2017. – **55**, № 9–10. – P. 585–595. <https://doi.org/10.1007/s11106-017-9843-2>
10. *Electric-spark alloying of VT22 alloy by chromium and tungsten electrode materials* / O. V. Paustovskiy, V. I. Novikova, I. I. Tymofeeva, O. H. Molyar, Yu. V. Hubin, N. M. Mor-dovets', L. P. Isaeva, and A. D. Kostenko // *Materials Science*. – 2011. – **47**, № 1. – P. 120–123. <https://doi.org/10.1007/s11003-011-9377-6>
11. *Electro-spark alloying using graphite electrode on titanium alloy surface for biomedical applications* / Tang Chang-bin, Liu Dao-xin, Wang Zhan, Gao Yang // *Appl. Surf. Sci.* – 2011. – **257**, № 15. – P. 6364–6371. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.01.120>
12. *Ribalko A. V., Sahin O., and Korkmaz K. A modified electrospark alloying method for low surface roughness* // *Surf. and Coat. Technol.* – 2009. – **203**, № 23. – P. 3509–3515. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.05.002>Get rights and content
13. *Modification of the surface of titanium during complex treatment with nitriding, oxidation and electroerosive alloying* / V. Mikhailov, A. Shkurpelo, N. Kazak, I. Pogrelyuk, V. Trush, and A. Lukyzenko // *Mater. Sci. and Condensed Matter. Physics*. Editia 9, 25–28 Septembrie 2018, Chisinau. – Chisinau, Republica Moldova: Institutul de Fizica Aplicata, 2018. – P. 267.
14. *Effect of heat treatment in oxygen-containing medium on fatigue life of zirconium alloy* / V. Trush, P. Maruschak, M. Student, S. Lavrys, A. Luk'yanenko // *Strojnický Casopis – J. of Mech. Eng.* – 2022. – **72**, № 2. – P. 211–218. <https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0030>
15. *Influence of the functional layer on the operating characteristics of Zr–1% Nb alloy at a temperature of 380°C* / V. S. Trush, V. M. Fedirko, V. M. Voyevodin, P. I. Stoev, and A. G. Luk'yanenko, and V. A. Panov // *Materials Science*. – 2021. – **57**, № 2. – P. 234–239. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00537-y>
16. *Pierson H. O. Handbook of refractory carbides and nitrides: properties, characteristics, processing and applications*. – Imprint: William Andrew, Noyes Publ., 1996. – 362 p.
17. *Surface modification of titanium by oxidation followed by electrospark alloying with a graphite electrode* / I. M. Pohrelyuk, M. M. Student, Kh. R. Zadorozhna, V. S. Trush, and T. M. Kravchyshyn // *Materials Science*. – 2023. – **59**, № 3. – P. 347–353. <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00784-9>
18. *Трибологічні характеристики титану після комбінованого оброблення* / I. M. Погрелюк, М. М. Студент, Х. Р. Задорожна, С. М. Лаврись, Т. М. Кравчишин, І. В. Ковальчук // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2023. – **59**, № 6. – С. 95–103.

Одержано 15.02.2024