

УДК 620.178.162:669.295:621:762

МОДИФІКАЦІЯ ПОВЕРХНІ АЛЮМІНІЄВИХ І ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТА ТРИБОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

М. М. СТУДЕНТ, І. М. ПОГРЕЛЮК

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

Показано основні досягнення науковців Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України у формуванні зносостійких покриттів на алюмінієвих та титанових сплавах. Встановлено механізми дії водню, міді та нікелю на синтез оксидокерамічних покриттів під час плазмоелектролітного оксидування (ПЕО) алюмінієвих сплавів. Запропоновано методи інтенсифікації синтезу, а саме: додавання перексиду водню та озону в електроліт (підвищення вмісту кисню) та збільшення густини анодного і зменшення катодного струмів, що призведе до зниження йонів водню в плазмовому каналі. Поєднання цих методів збільшить товщину ПЕО покриття на 80%, а зносостійкість у 4–6 разів. Розроблено металооксидні композиційні шари на основі корунду із включеннями міді або нікелю. Виявлено взаємозв'язок розмірів включень металів з енергією окремого розряду, що дасть змогу формувати включення міді і нікелю нанорозмірів. Встановлено вплив водню, який утворюється під час розпаду мастила та води, на трибологічну поведінку контактних пар метал–ПЕО покриття, що дозволило зменшити коефіцієнт тертя цих трибопар у 5–20 разів. Розроблено методи підвищення зносостійкості високоміцних ($\alpha+\beta$)-титанових сплавів, зокрема, сплаву ВТ22. Вперше встановлено, що вихідна ($\alpha+\beta$)-глобулярна структура сплаву є найсприятливішою для газового азотування. Розроблено підхід для інтенсифікації газового азотування за допомогою холодного поверхневого пластичного деформування, що дозволило понизити температурно-часові параметри азотування та сумістити його зі зміцнювальним термічним обробленням сплаву. Показано, що таке комбіноване деформаційно-дифузійне оброблення забезпечує високі триботехнічні характеристики сплаву ВТ22. Встановлено, що комбінування низькотемпературного оксинітрування та старіння в одному технологічному циклі забезпечує високу фретингостійкість сплаву ВТ22 у трибопарі зі сплавом Д16.

Ключові слова: *алюмінієві та титанові сплави, плазмоелектролітне оксидування, оксидокерамічні покриття, металооксидні покриття, поверхнєве зміцнення, азотування, термічне оброблення, деформаційно-дифузійне оброблення, оксинітрування, зміцнені шари, зносостійкість, фретингостійкість.*

The main achievements of scientists of the Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine in formation of wear resistant coatings and layers on aluminum and titanium alloys are shown. The mechanisms of the action of hydrogen, copper and nickel on the synthesis of oxide-ceramic coatings during plasma electrolyte oxidation (PEO) of aluminum alloys are established. Methods for intensifying the synthesis are proposed, namely: addition of hydrogen peroxide and ozone to the electrolyte (increasing the oxygen content) and increase of the density of the anodic and decreasing cathodic currents, which lead to a decrease in hydrogen ions in the plasma channel. The combination of these methods will increase the thickness of the PEO coating by 80%, and the wear resistance by 4–6 times. The metal oxide composite layers based on corundum with inclusions of copper or nickel are developed. The relationship between the sizes of metal inclusions and the energy of a separate discharge is established, which makes it possible to form nano-sized copper and

Контактна особа: М. М. СТУДЕНТ, e-mail: student_m_m@ipm.lviv.ua

nickel inclusions. The influence of hydrogen formed during the oil and water decomposition on the tribological behavior of the metal-PEO contact pairs of the coating is established, which makes it possible to reduce the friction coefficient of these tribo-pairs by 5–20 times. Methods for increasing the wear resistance of high-strength ($\alpha+\beta$)-titanium alloys, in particular, the BT22 alloy, are developed. It is established that the initial ($\alpha+\beta$)-globular structure of the BT22 alloy is favorable for gas nitriding. An approach to the intensification of gas nitriding, using cold surface plastic deformation, is developed, which makes it possible to reduce the temperature-time parameters of nitriding and combine it with the strengthening heat treatment of the alloy. It is shown that such a combined deformation-diffusion treatment provides high tribotechnical characteristics of the BT22 alloy. It is established that the combination of low-temperature oxynitriding and aging of the BT22 alloy in one technological cycle provides a high fretting resistance of the BT22 alloy in the tribo-pair with the A2024 alloy.

Keywords: aluminum and titanium alloys, plasma-electrolytic oxidation, oxide-ceramic coatings, metal oxide coatings, surface hardening, nitriding, heat treatment, deformation-diffusion treatment, oxynitriding, hardened layers, wear resistance, fretting resistance.

Вступ. *Алюмінієві сплави* широко використовують у промисловості завдяки їх високій конструкційній міцності та ливарним властивостям, низькій питомій вазі та температурі плавлення. Водночас вони характеризуються низькою абразивною зносостійкістю, що суттєво стримує їх широке використання в технологічних середовищах, особливо за наявності в них абразивних часточок. На сьогодні в провідних лабораторіях світу шукають нові технології, які б забезпечили цим сплавам високу абразивну зносостійкість. Існує декілька методів підвищення зносостійкості алюмінієвих сплавів: нанесення покриттів способом гальванічного хромування, твердого анодування, лазерного армування та плазмоелектролітного оксидування (ПЕО). Метод ПЕО (отримання покриттів на поверхні вентильних металів або їх сплавів (Al, Mg, Ti, Zr) в електроліті як робочому електроді у високвольтному режимі забезпечує виникнення локальних мікророзрядів, які переміщуються поверхнею за її анодно-катодної поляризації) для алюмінієвих сплавів забезпечує важливі переваги, а саме: високу твердість до 2500 HV, низький коефіцієнт тертя, високі адгезію до металеві основи та екологічну чистоту, але водночас енергозатрати на синтез ПЕО покриттів як мінімум на порядок вищі, ніж на тверде анодування або гальванічне хромування (рис. 1) [1–6].

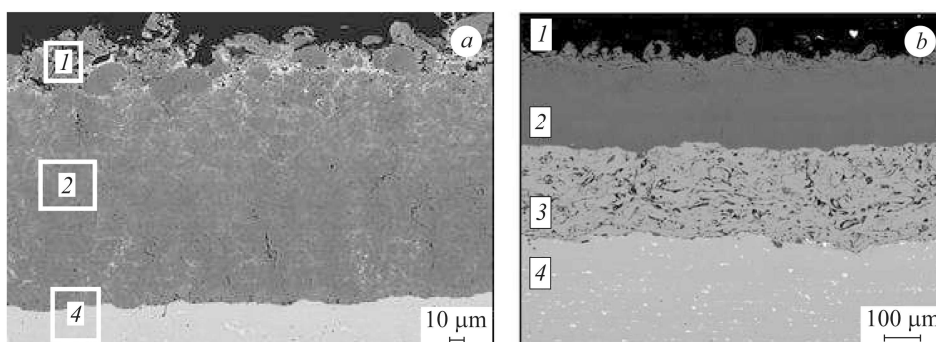


Рис. 1. Мікроструктури поперечного перерізу ПЕО шару, синтезованого на алюмінієвому сплаві Д16 (а) та електродуговому покритті (ЕДП) із дроту Д16 (b): 1 – технологічний ПЕО шар, 2 – ПЕО шар, 3 – залишок ЕДП, 4 – підкладка зі сплаву Д16.

Fig. 1. Microstructures of cross-section of plasma electrolyte oxidation (PEO) layer synthesized on aluminum A2024 alloy (a) and electric arc coating (EAC) of A2024 wire (b): 1 – technological PEO layer, 2 – PEO layer, 3 – residual EAC, 4 – A2024 alloy substrate.

Висловлено гіпотезу, що синтез оксидного шару сповільнює водень, який утворюється під час розпаду води. Термодинамічним аналізом хімічних реакцій

взаємодії водню з оксидами алюмінію в плазмових розрядних каналах встановлено, що молекули водню не відновлюють оксидів алюмінію, його атоми відновлюють лише проміжні оксиди алюмінію, а йони – всі оксиди алюмінію [7]. На основі аналізу вищезгаданих реакцій запропоновано інтенсифікувати синтез плазмо-електролітичних оксидокерамічних покриттів у слаболужних електролітах на сплавах алюмінію та газотермічних покриттях двома методами: зменшенням вмісту йонів водню та підвищенням вмісту йонів кисню у плазмі розрядних каналів. Перший реалізується збільшенням густини анодного J_a та зменшенням катодного струмів J_c , а другий – додаванням в електроліт сильних окисників – пероксиду водню або озону. Підвищення анодної густини струму під час ПЕО зумовлює зменшення кількості водню в плазмових каналах, збільшує кількість $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунду), зменшує кількість $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ у структурі ПЕО покриття і, як наслідок, збільшує його товщину [8]. Додавання до електроліту пероксиду водню (5 g/l) або продування електроліту повітряно-озоною сумішшю (5 mg/l) збільшує товщину ПЕО покриття на 80%. Досліджуючи вплив співвідношення катодного до анодного густин струмів, встановили, що максимальною зносостійкістю володіють ПЕО шари, синтезовані за $J_c / J_a = 12/12 \text{ A/dm}^2$. Порівнюючи ефективність пероксиду водню та озону за впливом на абразивну зносостійкість покриття під час ПЕО за різних співвідношень J_c / J_a , виявили, що продування електроліту озоном підвищує зносостійкість ПЕО покриття у 4 рази, а пероксидом водню – у 6 разів (рис. 2).

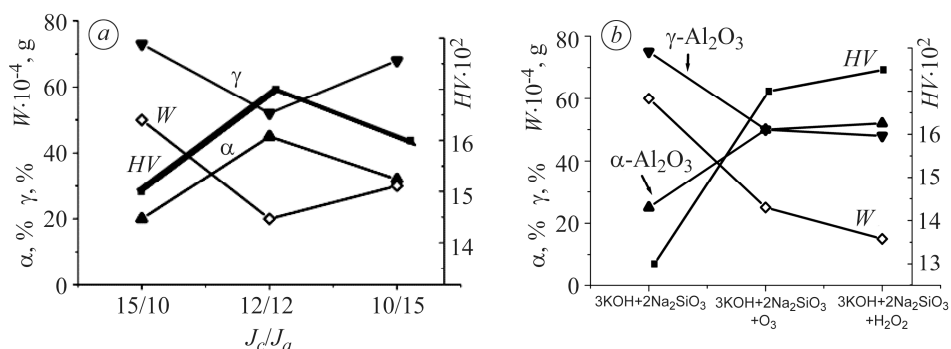


Рис. 2. Вплив співвідношення густин катодного та анодного струмів (J_c / J_a) на фазовий склад (вміст $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ та $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$), твердість HV та абразивну зносостійкість ПЕО шару, синтезованого в електроліті 3 g/l KOH + 2 g/l рідкого скла (a) та порівняння ефективності пероксиду водню H_2O_2 та озону O_3 за їх впливом на ці характеристики ПЕО шару, сформованого за $J_c / J_a = 12/12 \text{ A/dm}^2$ (b). Тривалість ПЕО – 1 h.

Fig. 2. Influence of the ratio of cathode and anode densities of current (J_c / J_a) on the phase composition ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ and $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ content), hardness HV and abrasive wear resistance of PEO layer synthesized in electrolyte 3 g/l KOH + 2 g/l liquid glass (a) and comparison of the efficiency of hydrogen peroxide H_2O_2 and ozone O_3 by their effect on these characteristics of PEO layer formed according to $J_c / J_a = 12/12 \text{ A/dm}^2$ (b). Exposition of PEO – 1 h.

Вперше показано, що під час ПЕО обробки алюмінієвих газотермічних покриттів або сплавів, легованих металами (наприклад, міддю, нікелем), оксиди яких відновлюються розплавом алюмінію в плазмовому каналі, синтезуються не оксидні, а металооксидні композиційні шари на основі корунду із включеннями пластичного металу (міді або нікелю) (рис. 3) [9, 10].

Встановлено взаємозв'язок між енергією одиничного плазмового розряду під час ПЕО та розміром металевих включень у покритті. Якщо розмір часточок перевищує критичний, то вони втілюються в ПЕО покриття у незмінному вигляді. Якщо ж він менший, то відбувається їх фазова перекристалізація (внаслідок

алюмотермічних реакцій) і вони втілюються в ПЕО покриття включеннями нано-розміру.

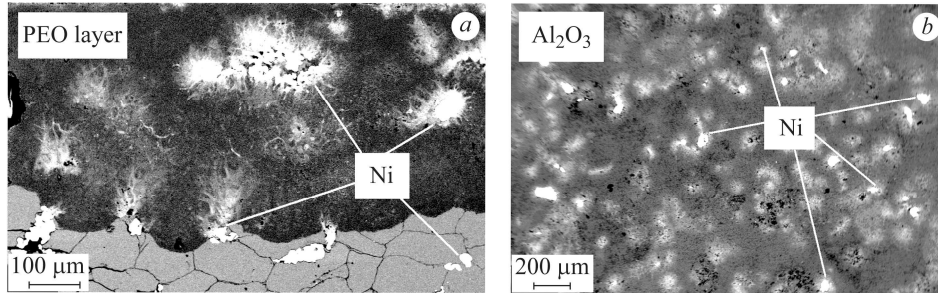


Рис. 3. Структура ПЕО покриття, синтезованого на пресованому зразку Al + 20% Ni, у поперечному перерізі (а) та на поверхні (b).

Fig. 3. Structure of PEO coating synthesized on a compressed sample of Al + 20% Ni, in the cross-section (a) and on the surface (b).

Встановлено вплив водню, який утворюється за розпаду мастила та води під час тертя, на трибологічну поведінку контактних пар провідник (метал)–діелектрик (ПЕО покриття, синтезовані на алюмінієвих сплавах) [11]. Наводнення не впливає на зношування сталі за умов граничного мащення під час фрикційної взаємодії сталі з керамічним ПЕО шаром, якщо концентрація водню у поверхневих шарах сталі недостатня для виникнення в ній мікропошкоджень. Коли ж концентрація водню у цих шарах зростає до рівня, достатнього для виникнення мікропошкоджень або мікротріщин, то це суттєво знижує зносостійкість сталі. Зношування сталевих зразків сталі 45 та У8 за фрикційної взаємодії із ПЕО шарами на сплавах АМг-6 та Д16 зменшується за їх наводнювання, додавання води та водного розчину гліцерину до оливи І-20 (рис. 4); у парі тертя сталь–ПЕО шар на сплаві АМг-6 воно в 5–10 разів менше, ніж у парі сталь–ПЕО шар на сплаві Д16.

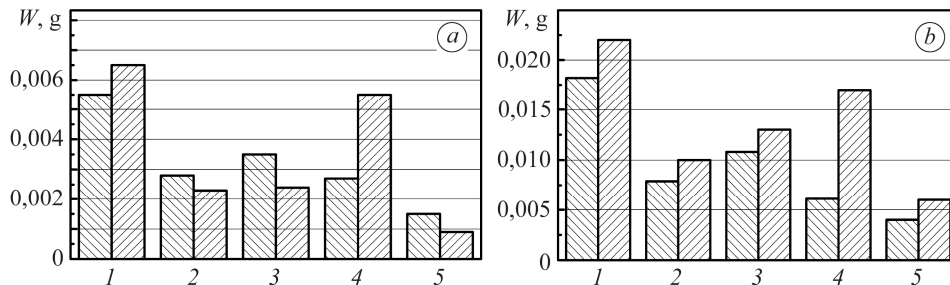


Рис. 4. Зношування колодок зі сталі 45 (▨) та У8 (▧) у фрикційних парах з ПЕО шарами, синтезованими на сплавах АМг-6 (а) та Д16 (b): 1 – в оливі І-20; 2 – в оливі І-20 з додатком 0,5 vol.% дистильованої води, після електролітичного наводнювання; 3 – дифузійний водень; 4 – залишковий водень; 5 – з додаванням 1 vol.% 2,5% водного розчину гліцерину.

Густина струму за електролітичного наводнювання 2 A/dm², тривалість наводнювання 1 h. Питоме навантаження 4 МПа. Тривалість випробувань 4 h.

Fig. 4. Wear of blocks made of 45 (▨) and W108 (▧) steels in friction pairs with PEO layers synthesized on AMg-6 (a) and A2024 (b) alloys: 1 – in oil I-20; 2 – in oil I-20 with addition of 0.5 vol.% of distilled water, after electrolytic hydrogenation; 3 – diffusion hydrogen; 4 – residual hydrogen; 5 – with addition of 1 vol.% 2.5% aqueous solution of glycerol. Current density for electrolytic hydrogenation 2 A/dm², hydrogenation duration 1 h. Specific load 4 MPa. Test time 4 h.

Під час фрикційної взаємодії в умовах тертя з мащенням у парі тертя ПЕО покриття на сплаві АМг-6-сталь (чавун) на сталевих контактних поверхнях утворюються захисні склоподібні плівки типу шпінелі (герсоніт FeAl_2O_4) [12, 13]. Для фрикційної пари ПЕО покриття на сплаві Д16-сталь (чавун) реалізується явище вибіркового переносу із формуванням на поверхні сталі або чавуну гліцератних плівок. При цьому коефіцієнт тертя та зношування фрикційних пар зменшуються на порядок (рис. 5).

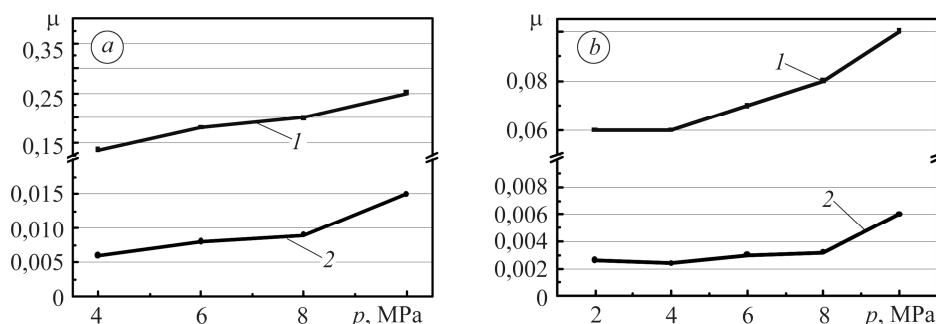


Рис. 5. Коефіцієнт тертя μ залежно від питомих навантажень p для трибопар ПЕО шар $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\%$ Cu та сталь 45 (а) або сірий чавун (б) за випроб в індустріальній оливі I-20 (1) та за додавання до неї 2,5% водного розчину гліцерину в кількості 1% (2). Тривалість випробувань 4 h.

Fig. 5. Coefficient of friction μ depending on specific loads p for tribo-pairs PEO layer $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\%$ Cu and steel 45 (a) or gray cast iron (b) under testing in industrial oil I-20 (1) and with addition of 2.5% aqueous solution of glycerol in an amount of 1% (2). Test time 4 h.

Титанові сплави. Ще один конструкційний матеріал, який має низьку зносостійкість – титан та його сплави. Якщо за рівнем питомої міцності та корозійної стійкості він задовольняє вимоги до конструкційного матеріалу для сучасної техніки і може не тільки конкурувати, а навіть має суттєві переваги перед багатьма іншими конструкційними сплавами, то використання його у вузлах тертя без зміцнювальної поверхневої обробки або захисних покриттів здебільшого неможливе. Незалежно від системи легування, фазового і структурного стану, рівня міцності та твердості, сплави на основі титану характеризуються низькими триботехнічними властивостями і схильні до схоплення та налипання під час тертя у будь-якому поєднанні з матеріалами пари тертя [14, 15].

Матеріалознавці інституту впродовж останнього десятиріччя зосереджували увагу на розробленні способів підвищення зносостійкості високоміцних ($\alpha+\beta$)-титанових сплавів і, зокрема, ширококовживаного у сучасному авіабудуванні сплаву ВТ22 (система легування Ti-Al-Mo-V-Cr-Fe). Рівень зміцнення таких сплавів забезпечують зміцнювальним термічним обробленням (ЗТО) [16]. Для отримання оптимальних фізико-механічних і технологічних властивостей сплаву ВТ22 найчастіше застосовують термічне оброблення за ступінчатим режимом (рис. 6). Швидкостями охолодження та різними циклами ступінчатого відпалу регламентують зміну структурно-фазового складу, який задає механічні характеристики титанової матриці. Проте таке оброблення не забезпечує необхідного поверхневого зміцнення. Подальше газове азотування (ГА), як спосіб підвищення зносостійкості, нівелює результат попереднього термічного оброблення. Тому особливо актуально досягнути достатньої зносостійкості сплаву за збереження регламентованого об'ємного зміцнення. Вирішення цього завдання базувалося на ідеї

суміщення термічного та хіміко-термічного оброблення в одному технологічному циклі (рис. 6, фрагменти 1, 2) [16].

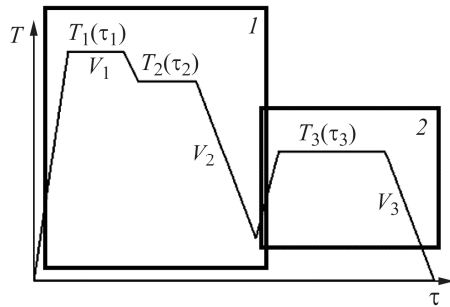


Рис. 6. Базова схема зміцнювального термічного оброблення сплаву BT22 та фрагменти газового азотування у ній (1, 2): T – температура; τ – час; V – швидкість охолодження [16].

Fig. 6. Basic scheme of strengthening heat treatment (SHT) of BT22 alloy and fragments of gas nitriding (GN) in it (1, 2): T – temperature; τ – time; V – cooling rate [16].

Для оптимізації параметрів такого комплексного оброблення (рис. 6, фрагмент 1) необхідно оцінити вплив на поверхневе зміцнення температурного, часового та газодинамічного параметрів азотування у базовій схемі ЗТО [17].

Аналіз тенденцій у зміні поверхневої мікротвердості і глибини зміцненого шару за варіювання параметрами хіміко-термічного оброблення показав, що на поверхневе зміцнення (поверхневу мікротвердість, глибину зміцненої зони, градієнт твердості за перерізом поверхневих зміцнених шарів) найефективніше впливає подовження ізотермічної витримки на першому ступені T_1 ЗТО під час насичення у розрідженій (0,1...1 Pa) динамічній атмосфері азоту (рис. 7). Водночас глибина зміцненого шару та поверхнева мікротвердість азотованих зразків сплаву BT22 малочутливі до збільшення ізотермічної витримки на другому ступені T_2 (рис. 6, фрагмент 1).

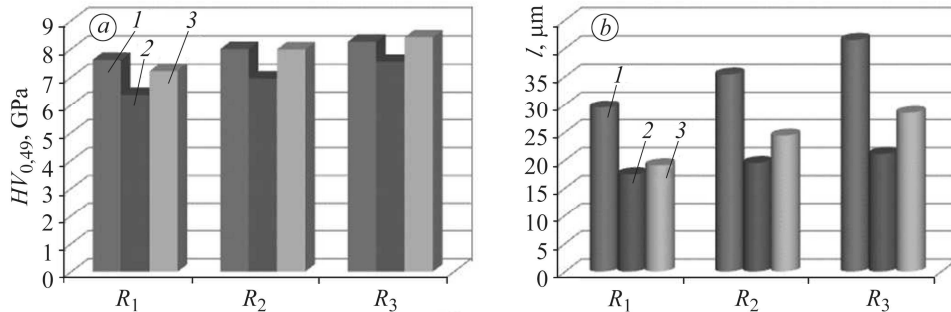


Рис. 7. Поверхнева мікротвердість (а) та глибина азотованого шару (б) сплаву BT22 після ГА суміщеного зі ЗТО: 1 – β -структура, 2 – $(\alpha+\beta)$ -пластинчаста, 3 – $(\alpha+\beta)$ -глобулярна структура;

R_1 – $T_1 = 820^\circ\text{C}$, $\tau_1 = 3$ h; $T_2 = 750^\circ\text{C}$, $\tau_2 = 3$ h; $T_3 = 600^\circ\text{C}$, $\tau_3 = 6$ h;

R_2 – $T_1 = 820^\circ\text{C}$, $\tau_1 = 3$ h; $T_2 = 750^\circ\text{C}$, $\tau_2 = 6$ h; $T_3 = 600^\circ\text{C}$, $\tau_3 = 6$ h;

R_3 – $T_1 = 820^\circ\text{C}$, $\tau_1 = 6$ h; $T_2 = 750^\circ\text{C}$, $\tau_2 = 3$ h; $T_3 = 600^\circ\text{C}$, $\tau_3 = 6$ h.

Fig. 7. Surface microhardness (a) and depth of the nitrided layer (b) of BT22 alloy after GN combined with SHT: 1 – β -structure, 2 – $(\alpha+\beta)$ -lamellar, 3 – $(\alpha+\beta)$ -globular structure;

R_1 – $T_1 = 820^\circ\text{C}$, $\tau_1 = 3$ h; $T_2 = 750^\circ\text{C}$, $\tau_2 = 3$ h; $T_3 = 600^\circ\text{C}$, $\tau_3 = 6$ h;

R_2 – $T_1 = 820^\circ\text{C}$, $\tau_1 = 3$ h; $T_2 = 750^\circ\text{C}$, $\tau_2 = 6$ h; $T_3 = 600^\circ\text{C}$, $\tau_3 = 6$ h;

R_3 – $T_1 = 820^\circ\text{C}$, $\tau_1 = 6$ h; $T_2 = 750^\circ\text{C}$, $\tau_2 = 3$ h; $T_3 = 600^\circ\text{C}$, $\tau_3 = 6$ h.

Відповідно до мікроструктурних досліджень, подовження ізотермічної витримки мало впливає на структуру матриці сплаву BT22, проте дещо збільшує відстань між колоніями субзерен α -фази. Змін структури за перерізом зміцненої зони не спостерігали. Поверхнева нітридна плівка за довшої ізотермічної витрим-

ки τ_1 потовщується. З підвищенням температури на першому ступені T_1 від 820 до 830°C, хоч поверхневе зміцнення і зростає, проте це негативно впливає на структуру матриці сплаву: вона укрупнюється, змінюючись від глобулярних невеликих субзерен α -фази до витягнутих гострих (голкоподібних) зерен, що погіршує механічні характеристики сплаву.

Дослідження впливу парціального тиску азоту ($p_{N_2} = 1; 10; 10^5$ Pa) на поверхневе зміцнення показали, що за вищого тиску азоту поверхнева твердість зменшується за нижчого навантаження (0,49 N), проте практично не змінюється за вищого (0,981 N) (табл. 1), тобто градієнт твердості за перерізом поверхневих зміцнених шарів знижується.

Таблиця 1. Поверхнева мікротвердість HV та глибина зміцненої зони l сплаву ВТ22 після газового азотування ($T_1 = 820^\circ\text{C}$)

Параметри зміцнення	$p_{N_2} = 1$ Pa; τ_1 , h			$p_{N_2} = 10$ Pa; τ_1 , h	$p_{N_2} = 10^5$ Pa; τ_1 , h	
	3,5	5	6,5	6,5	6,5	8
$HV_{0,49}$, GPa	10,1	7,2	10	8,9	8,5	8,8
$HV_{0,981}$, GPa	7,4	5,9	6,8	7,1	6,8	7,1
l , μm	40	45	60	60	50	65

Вперше досліджено вплив вихідного структурного стану сплаву ВТ22 на фізико-механічні характеристики поверхневого зміцненого шару після суміщеного зі ЗТО азотування та структурні зміни у матриці [18, 19]. Показано, що для сплаву з вихідною глобулярною ($\alpha+\beta$)- та β -структурами поверхневе зміцнення вище, ніж для сплаву з вихідною ($\alpha+\beta$)-пластинчастою (рис. 7). Натомість інтенсивні структурні зміни матриці (ріст α -фази) спостерігаємо у сплаві з вихідною β - та ($\alpha+\beta$)-пластинчастою структурами. Отже, найсприятливішою вихідною структурою для суміщеного зі ЗТО азотування є ($\alpha+\beta$)-глобулярна, яка забезпечує високий рівень поверхневого зміцнення сплаву ВТ22 без помітного погіршення структури його матриці.

Режими ЗТО, які відповідають за структурно-фазові перетворення у сплаві, забезпечуючи необхідні механічні характеристики, обмежують температурно-часові параметри ГА. Для отримання належного рівня як об'ємних, так і поверхневих характеристик сплаву необхідно інтенсифікувати азотування, що дасть можливість знизити ці параметри до таких, які відповідають ЗТО. Показано, що інтенсифікувати азотування, суміщене зі ЗТО сплаву, можна холодним поверхневим пластичним деформуванням (ХППД) внаслідок попереднього модифікування структури (подрібнення), що створює умови для полегшеної дифузії азоту [20]. Фізико-механічні характеристики поверхневих зміцнених шарів сплаву ВТ22 після комбінованого деформаційно-дифузійного оброблення залежать від параметрів ХППД [21, 22]. Збільшення навантаження під час ХППД сплаву ВТ22 забезпечує високе поверхневе зміцнення та поліпшує якість чистоти поверхні. Подальше ГА підвищує поверхневу мікротвердість, але дещо погіршує якість обробленої поверхні (табл. 2).

Встановлено, що для забезпечення високої зносостійкості пари тертя сплав ВТ22–бронза БраЖН 10-4-4 доцільно здійснювати ХППД за малих навантажень. Показано, що кращими триботехнічними характеристиками володіє пара тертя, диск якої попередньо деформаційно обробляли за навантаження 200 N. Коефіцієнт тертя такої трибопари становив 0,03, а температура в околі зони тертя зберігалась на рівні 20°C. Попереднє ХППД перед ГА сплаву ВТ22 дозволяє знизити

коефіцієнт тертя та температуру в околі зони тертя досліджуваної фрикційної пари на 30 та 20% відповідно порівняно з сумішним зі ЗТО азотуванням без попереднього деформування [23]. Слід зазначити, що зміцнений деформаційно-дифузійним обробленням титановий сплав ВТ22 у всьому діапазоні досліджень практично не зношувався, що є свідченням високого рівня антифрикційних властивостей його поверхні.

Таблиця 2. Шорсткість та мікротвердість поверхні сплаву ВТ22 після деформаційного та деформаційно-дифузійного оброблення

Режим	Навантаження під час ХППД	$R_a, \mu\text{m}$			$HV_{0,49}, \text{GPa}$		
		Вихідна	ХППД	ХППД+ГА *	Вихідна	ХППД	ХППД+ГА *
1	200 N	4,00	0,189	0,25	3,25	4,81	6,06
2	300 N		0,155	0,27		4,95	6,44
3	600 N		0,114	0,28		5,15	7,06
4	700 N		0,102	0,31		6,02	8,04

* ГА, сумішене зі ЗТО (рис. 6).

Варіантом суміщення термічного та хіміко-термічного оброблення в одному технологічному циклі є формування оксидного та оксинітридного шарів на сплаві ВТ22 за термодифузійного насичення з контрольованого розрідженого газового середовища в температурно-часовому діапазоні старіння сплаву (рис. 6, фрагмент 2) [24–26].

Результати випробувань на фретингостійкість сплаву ВТ22 з оксидними та оксинітридними шарами, сформованими за суміщення з його старінням ($650 \pm 50^\circ\text{C}$, 7 h) (рис. 6, фрагмент 2) у розрідженому газовому середовищі: $25\% \text{O}_2 + 75\% \text{Ar}$ для оксидування та $25\% \text{O}_2 + 75\% \text{N}_2$ – оксинітрування, у парі зі сплавом Д16 показали, що за усіма трибологічними характеристиками (змінюючи масу сплаву, трибопари, їх середнього лінійного зношування та коефіцієнта тертя) за різних навантажень (умовно помірно 9,8 МПа та умовно жорстко 19,6 МПа) оксинітридні шари мають найвищі показники. Також фретингостійкість у парі тертя сплав ВТ22–сплав Д16 збільшується у поєднанні оксинітрування з нанесенням шару ВАП-2 (MoS_2). Таке комбіноване оброблення забезпечує усунення адгезійної складової зношування, що характерно для сплаву ВТ22.

Результати досліджень сплаву ВТ22, зміцненого термомеханічним обробленням за технологією, розробленою в Інституті металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, та подальшим суміщенням зі ЗТО оксинітруванням (рис. 6), засвідчили, що таке оброблення покращує трибологічні властивості та практично не впливає на короткочасну міцність та пластичність сплаву (табл. 3).

Таблиця 3. Характеристики міцності, пластичності та втомної довговічності сплаву ВТ22 з модифікованою поверхнею

Вид оброблення	σ_B, MPa	$\delta, \%$	$\psi, \%$	σ_{-1}, MPa
Старіння у вакуумі	1320	9,8	30	565
Старіння з оксинітруванням	1350	9,4	27	485
Старіння з оксинітруванням + ВАП-2	1340	9,2	26	475

ВИСНОВКИ

Показано основні досягнення науковців Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України у формуванні високих трибологічних характе-

ристик алюмінієвих і титанових сплавів та зносостійких покриттів на них. Встановлені механізми дії водню на синтез оксидокерамічних покриттів під час плазмоелектролітного оксидування алюмінієвих сплавів. Показано, що йонізований водень у плазмових каналах відновлює оксиди алюмінію та блокує взаємодію кисню з алюмінієм. Запропоновано інтенсифікацію синтезу оксидокерамічних покриттів на сплавах алюмінію двома методами: підвищенням вмісту кисню в розрядному каналі за допомогою додавання в електроліт сильних окисників (пероксиду водню та озону); збільшенням густини анодного та зменшенням катодного струмів. Поєднання цих методів призведе до збільшення товщини ПЕО покриття на 80% та зносостійкості у 4–6 разів. Вперше показано, що під час ПЕО оброблення алюмінієвих газотермічних покриттів або сплавів, легованих міддю і нікелем, оксиди яких відновлюються розплавом алюмінію в плазмовому каналі, синтезуються не оксидні шари, а металооксидні композиційні шари на основі корунду із включеннями пластичного металу. Виявлено взаємозв'язок розмірів включень металів з енергією окремого розряду, що дозволяє формувати включення міді і нікелю нанорозмірів. Встановлено вплив водню, який утворюється за розпаду мастила та води під час тертя, на трибологічну поведінку контактних пар метал–ПЕО покриття, що дало можливість зменшити коефіцієнт тертя в 5–20 разів. Розроблено способи підвищення зносостійкості високоміцних ($\alpha+\beta$)-титанових сплавів (зокрема ВТ22). Запропоновано сумістити зміцнювальне термічне та хіміко-термічне оброблення в одному технологічному циклі. Така комбінація дає можливість досягнути достатньої зносостійкості сплаву за збереження регламентованого об'ємного та поверхневого зміцнення шляхом зміни температурно-часових та газодинамічних параметрів ГА, суміщеного зі ЗТО. Вперше встановлено, що вихідна ($\alpha+\beta$)-глобулярна структура є найсприятливішою для ГА, суміщеного зі ЗТО. Розроблено метод інтенсифікації термічного азотування за допомогою холодного поверхневого пластичного деформування, що дало змогу знизити температурно-часові параметри ГА до параметрів ЗТО. Розроблене комбіноване деформаційно-дифузійне оброблення сплаву ВТ22 забезпечує високі триботехнічні характеристики. Зокрема, після оброблення коефіцієнт тертя трибопари сплав ВТ22–бронза БрАЖН 10-4-4 становить 0,03, а температура в околі зони тертя 20°C. Розроблено методику формування оксидного та оксинітридного шарів за термодифузійного насичення з контрольованого розрідженого газового середовища в температурно-часовому діапазоні старіння сплаву ВТ22. Встановлено, що оксинітридні шари володіють високою фретингостійкістю порівняно з оксидними, особливо без модифікованого шару. Запропоновано режими оксинітрування титанового сплаву ВТ22.

1. *Структура та властивості алюмінієвих сплавів, лазерно модифікованих карбідом силіцію* / Г. В. Похмурська, М. М. Студент, Н. Р. Червінська, Х. Р. Сметана, А. Ванк, Т. Геніг, Г. Подлесак // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2005. – **41**, № 3. – С. 34–40.
(Structure and properties of aluminum alloys modified with silicon carbide by laser surface treatment / H. V. Pokhmurs'ka, M. M. Student, N. R. Chervins'ka, Kh. R. Smetana, A. Wank, T. Hoenig, and H. Podlesak // Materials Science. – 2005. – **41**, № 3. – P. 316–323.)
2. *Improvement of wear resistance of aluminum alloy by HVOF method* / V. Hutsaylyuk, M. M. Student, Kh. Zadorozhna, O. Student, H. Veselivska, V. Gvosdetskii, P. Maruschak, and H. Pokhmurska // J. Mater. Res. Technol. – 2020. – **9**, № 6. – P. 16367–16377.
3. *Оптимізація вмісту хрому в порошкових дротах систем Fe–Cr–C, Fe–Cr–B за корозійною тривкістю електродугових покривів* / Т. Р. Ступницький, М. М. Студент, Г. В. Похмурська, В. М. Гвоздецький // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 2. – С. 23–28.
(Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings / T. R. Stupnyts'kyi,

- M. M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, and V. M. Hvozdets'kyi // *Materials Science*. – 2016. – **52**, № 2. – P. 165–172.)
4. *Оцінювання механічних властивостей комбінованих металооксидокерамічних шарів на алюмінієвих сплавах* / М. М. Студент, В. В. Шмирко, М. Д. Клапків, І. М. Лясота, Л. Н. Добровольська // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2014. – **50**, № 2. – С. 116–121.
(*Evaluation of the mechanical properties of combined metal-oxide-ceramic layers on aluminum alloys* / M. M. Student, V. V. Shmyrko, M. D. Klapkiv, and I. M. Lyasota // *Materials Science*. – 2014. – **50**, № 2. – P. 290–295.)
 5. *Фрикційна поведінка залізовуглецевих сплавів у парі із ПЕО шарами, синтезованими на сплаві Д16Т* / М. М. Студент, В. М. Довгунік, В. М. Посувайло, І. В. Ковальчук, В. М. Гвоздецький // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2017. – **53**, № 3. – С. 63–70.
(*Friction behavior of iron-carbon alloys in couples with plasma-electrolytic oxide-ceramic layers synthesized on D16T alloy* / M. M. Student, V. M. Dovhunyuk, V. M. Posuvailo, I. V. Koval'chuk, and V. M. Hvozdets'kyi // *Materials Science*. – 2017. – **53**, № 3. – P. 359–367.)
 6. *Plasma electrolytic oxidation of arc sprayed aluminium coatings* / V. Pokhmurskii, H. Nykyforchyn, M. Student, M. Klapkiv, H. Pokhmurska, B. Wielage, T. Grund, and A. Wank // *J. Therm. Spray Technol.* – 2007. – **16**. – P. 998–1004.
 7. *Посувайло В. М., Ковальчук І. В.* Вплив водню на синтез оксидокерамічних покриттів в електролітній плазмі на алюмінієвих сплавах // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2020. – **56**, № 4. – С. 114–121.
(*Posuvailo V. M. and Koval'chuk I. V.* Influence of hydrogen on the synthesis of oxide-ceramic coatings on aluminum alloys in electrolytic plasmas // *Materials Science*. – 2021. – **56**, № 4. – P. 560–569.)
 8. *The effect of electrolyte composition on the plasma electrolytic oxidation and phase composition of oxide ceramic coatings formed on 2024 aluminium alloy* / V. M. Posuvailo, V. V. Kulyk, Z. A. Duriagina, M. M. Student, and B. D. Vasylyv // *Arch. Mater. Sci. Eng.* – 2020. – **105**, № 2. – P. 49–55.
 9. *The properties of oxide-ceramic layers with Cu and Ni inclusions synthesizing by PEO method on top of the gas-spraying coatings on aluminium alloys* / V. Hutsaylyuk, M. Student, V. Posuvailo, O. Student, Ya. Sirak, V. Hvozdets'kyi, P. Maruschak, and H. Veselivska // *Vacuum*. – 2020. – **179**. – 109514.
 10. *Gibbs energy calculation of electrolytic plasma channel with inclusions of copper and copper oxide with Al-base* / V. M. Posuvailo, M. D. Klapkiv, M. M. Student, Y. Y. Sirak, and H. V. Pokhmurska // *Mater. Sci. Eng.* – 2017. – **181**. – P. 157–168.
 11. *Effect of hydrogen on the wear resistance of steels upon contact with plasma electrolytic oxidation layers synthesized on aluminum alloys* / V. Hutsaylyuk, M. Student, V. Dovhunyuk, V. Posuvailo, O. Student, P. Maruschak, and I. Koval'chuck // *Metals*. – 2019. – **9**, № 3. – 280.
 12. *Tribological behavior of plasma electrolytic oxidation layers synthesized on AMg6 and D16 alloys in couples with cast iron SCH 21-40* / M. Student, J. Padgurskas, V. Dovhunyuk, H. Chumalo, V. Posuvailo, and V. Hvozdetskyi // 10th Int. Scientific Conf. "BALTTTRIB 2019" (14–16 November, 2019). – Kaunas, 2019. – P. 274–279.
 13. *Tribological behavior of PEO layers synthesized on light alloy* / M. Student, J. Padgurskas, V. Dovhunyuk, H. Chumalo, V. Posuvailo, and V. Hvozdetskyi // 10th Int. Scientific Conf. "BALTTTRIB 2019" (14–16 November, 2019). – Kaunas, 2019. – P. 268–273.
 14. *Конструкционные материалы в самолетостроении* / А. Г. Моляр, А. А. Коцюба, А. С. Бычков, О. Ю. Нечипоренко. – К.: КВИЦ, 2015. – 400 с.
 15. *Кравчишин Т. М., Погрелюк І. М., Лаврись С. М.* Фізико-механічні характеристики титанового сплаву VT6 після поверхневого деформаційно-дифузійного оброблення // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2020. – **56**, № 4. – С. 76–81.
(*Kravchishyn T. M., Pohrelyuk I. M., and Lavryś S. M.* Physicomechanical characteristics of VT6 titanium alloy subjected to surface deformation-diffusion treatment // *Materials Science*. – 2021. – **56**, № 4. – P. 516–522.)
 16. *Закономірності термодифузійного насичення азотом, сумішеного зі штатною термічною обробкою, титанового сплаву VT22* / І. М. Погрелюк, В. М. Федірко, С. М. Лаврись, Т. М. Кравчишин // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2016. – **52**, № 6. – С. 87–92.

- (Regularities of thermal diffusion saturation with nitrogen combined with standard heat treatment of VT22 titanium alloy / I. M. Pohrelyuk, V. M. Fedirko, S. M. Lavrys, and T. M. Kravchyshyn // *Materials Science*. – 2017. – **52**, № 6. – P. 841–847.)
17. Pretreatment influence on titanium surface properties after gas nitriding / I. M. Pohrelyuk, S. M. Lavrys, O. M. Sakharuk, I. V. Stasyshyn, and O. V. Penkovyi // *J. of Mater. Eng. and Perform.* – 2017. – **26**. – P. 5072–5078.
 18. Вплив структури сплаву VT22 на поверхнєве зміцнення за деформаційно-дифузійної обробки / I. M. Погрелюк, С. Є. Шейкін, С. М. Лаврись, Д. А. Сергач, А. Є. Байцер // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2017. – **53**, № 2. – С. 30–35.
(Influence of the structure of VT22 alloy on the surface hardening in the course of deformation-diffusion treatment / I. M. Pohrelyuk, S. E. Sheikin, S. M. Lavrys, D. A. Serhach, and A. E. Baitser // *Materials Science*. – 2017. – **53**, № 2. – P. 158–164.)
 19. Погрелюк І. М., Кіндрачук М. В., Лаврись С. М. Зносотривкість титанового сплаву VT22 після азотування, суміщеного з термічною обробкою // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2016. – **52**, № 1. – С. 56–60.
(Pohrelyuk I. M., Kindrachuk M. V., and Lavrys S. M. Wear resistance of VT22 titanium alloy after nitriding combined with heat treatment // *Materials Science*. – 2016. – **52**, № 1. – P. 56–61.)
 20. Погрелюк І. М., Лаврись С. М. Термічна стабільність деформованого поверхневого шару титанового сплаву VT22 у азотовмісному середовищі // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2021. – **57**, № 1. – С. 42–46.
 21. Pohrelyuk I. M., Fedirko V. M., and Lavrys S. M. Effect of preliminary ball burnishing on wear resistance of the nitrided VT22 alloy // *J. Frict. Wear*. – 2017. – **38**, № 3. – P. 221–224.
 22. Pohrelyuk I. M. and Lavrys S. M. Load influence at rolling on structure and wear resistance of a titanium alloy VT22 // *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* – 2016. – **38**, № 6. – P. 783–793.
 23. Wear resistance of two-phase titanium alloy after deformation-diffusion treatment / I. M. Pohrelyuk, S. E. Sheykin, J. Padgurskas, and S. M. Lavrys // *Tribol. Int.* – 2018. – **127**. – P. 404–411.
 24. Formation of oxynitride layers on titanium alloys by gas diffusion treatment / I. Pohrelyuk, O. Yaskiv, O. Tkachuk, and Dong Bok Lee // *Met. Mater. Int.* – 2009. – **15**. – P. 949–953.
 25. Influence of oxynitriding on antifriction properties of Ti–6Al–4V titanium alloy / I. M. Pohrelyuk, J. Padgurskas, O. V. Tkachuk, A. G. Luk'yanenko, V. S. Trush, and S. M. Lavrys // *J. Frict. Wear*. – 2020. – **41**, № 4. – P. 333–337.
 26. Термодифузійне насичення поверхні титанового сплаву VT22 з контрольованого кисеньазотовмісного газового середовища на стадії старіння / В. М. Федірко, І. М. Погрелюк, О. Г. Лук'яненко, С. М. Лаврись, М. В. Кіндрачук, О. І. Духота, О. В. Тісов, В. В. Загребельний // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2017. – **53**, № 5. – С. 100–109.
(Thermodiffusion saturation of the surface of VT22 titanium alloy from a controlled oxygen–nitrogen-containing atmosphere in the stage of aging / V. M. Fedirko, I. M. Pohrelyuk, O. H. Luk'yanenko, S. M. Lavrys, M. V. Kindrachuk, O. I. Dukhota, O. V. Tisov, and V. V. Zahrebel'nyi // *Materials Science*. – 2017. – **53**, № 5. – P. 100–109.)

Одержано 14.04.2021