

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЖАРОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ, СФОРМОВАНИХ ПЛАЗМОВИМ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИМ ОКСИДУВАННЯМ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Л. Я. Роп'як, А. І. Бандура*, М. М. Романів

ІФНТУНГ; 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15;
e-mail: andriy.bandura@nung.edu.ua

Проведено аналіз методів зміцнення та обґрунтовано перспективи застосування технології плазмового електролітичного оксидування для формування оксидних жаростійких покриттів на алюмінієвих сплавах. Робота спрямована на дослідження впливу технологічних режимів процесу плазмового електролітичного оксидування для алюмінієвих сплавів у проточному електроліті. Розроблено систему керування процесом плазмового електролітичного оксидування, яка забезпечує підтримання на заданому рівні технологічних параметрів процесу плазмового електролітичного оксидування деталей в проточному електроліті: співвідношення концентрацій компонентів електроліту, швидкості потоку, густини струму, співвідношення струмів, та температури електроліту, а також дозволяє контролювати величину водневого показника електроліту та його електричного опору. Розроблено технологічний процес плазмового електролітичного оксидування алюмінієвих деформованих і ливарних сплавів у проточному силікатно-лужному електроліті. Оксидні жаростійкі покриття формували за різних значень технологічних параметрів процесу плазмового електролітичного оксидування. Властивості оксидних покриттів оцінювали відповідно за допомогою вимірювань товщини покриття, конусності зразків, мікротвердості, випробувань на зношування та фрикційну теплостійкість. Для вивчення впливу технологічних параметрів процесу плазмового електролітичного оксидування на геометричні та фізико-механічні властивості зразків з оксидними покриттями дослідження провели за різних комбінацій цих параметрів. За результатами проведених експериментів побудовано графічні залежності для мікротвердості, зносу та конусоподібності поверхні оксидного покриття від технологічних параметрів процесу плазмового електролітичного оксидування. Встановлено вплив технологічних параметрів процесу плазмового електролітичного оксидування: співвідношення концентрацій компонентів ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$), густини струму, швидкості потоку, температури електроліту, які забезпечують мінімальний знос оксидного покриття та достатньо високі фізико-механічні властивості та показники точності форми деталей, мікротвердість та знос. Результати досліджень показали, що експлуатаційні властивості оксидних покриттів залежать практично від усіх складових режимів процесу плазмового електролітичного оксидування. Зразки з оксидним покриттям також випробовували на фрикційну теплостійкість під час сухого тертя за схемою «кільце–кільце». Встановлено, що температура в зоні тертя зразків алюмінію з оксидними покриттям нижча порівняно зі сталевими зразками без покриття, що свідчить про високу фрикційну жаростійкість оксидного покриття.

Ключові слова: технологічний процес, система керування, плазмове електролітичне оксидування, алюмінієвий сплав, жаростійке покриття, конусоподібність, мікротвердість, тертя, зношування, температура.

The possibilities for using plasma electrolytic oxidation technology to create oxide heat-resistant coatings on aluminum alloys were confirmed after an investigation of strengthening techniques was completed. In a flowing electrolyte, the work aims to investigate the effects of technological modes of the plasma electrolytic oxidation process for aluminum alloys. In order to maintain the technological parameters of the plasma electrolytic oxidation process of parts in a flowing electrolyte at a specific level, a control system was developed. This system allows for the control of the electrolyte's hydrogen index and electrical resistance, as well as the ratio of electrolyte component concentrations, flow rate, current density, current ratio, and electrolyte temperature. A technological process for plasma electrolytic oxidation of aluminum deformed and cast alloys in a flowing silicate-alkali electrolyte was developed. Oxide heat-resistant coatings were formed at different values of the technological parameters of the plasma electrolytic oxidation process. The properties of oxide coatings were evaluated, respectively, by measuring the coating thickness, the taper of the samples, microhardness, wear tests and frictional heat resistance. To study the influence of the technological parameters of the plasma electrolytic oxidation process on the geometric and physicomechanical properties of samples with oxide coatings, the research was carried out with different combinations of these parameters. According to the results of the experiments, graphical dependences were constructed for the microhardness, wear and taper of the oxide coating surface on the technological parameters of the plasma electrolytic oxidation process. The influence of the technological parameters of the plasma electrolytic oxidation process was established: the ratio of the concentrations of the components ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$), current

density, flow rate, electrolyte temperature, which ensure minimal wear of the oxide coating and sufficiently high physicomaterial properties and accuracy of the shape of the parts, microhardness and wear. The results of the research showed that the operational properties of oxide coatings depend on almost all the constituent modes of the plasma electrolytic oxidation process. Samples with oxide coating were also tested for frictional heat resistance during dry friction according to the "ring-ring" scheme. It was found that the temperature in the friction zone of aluminum samples with oxide coating is lower compared to steel samples without coating, which indicates high frictional heat resistance of the oxide coating.

Keywords: technological process, control system, plasma electrolytic oxidation, aluminum alloy, heat-resistant coating, taper, microhardness, friction, wear, temperature.

Вступ

Зміцнення тонкого поверхневого шару масивної деталі є прогресивним напрямком у технології машинобудування, оскільки дозволяє економити високоякісні леговані сталі та інші конструкційні матеріали, збільшувати ресурс роботи і надійність механізмів, машин, підвищувати ефективність виробництва. До найважливіших властивостей алюмінієвих сплавів, які дозволяють використовувати їх у різних галузях промисловості, відноситься висока корозійна стійкість і відносно високе співвідношення міцнісних характеристик і питомої ваги. Водночас, такі сплави мають дуже хороші характеристики щодо повторного використання. Проте низька зносостійкість алюмінієвих сплавів за підвищених температур перешкоджає їх ще більш широкому застосуванню в техніці.

Останнім часом набувають широкого застосування технологічні методи поверхневого зміцнення з використанням висококонцентрованих джерел енергії, зокрема плазми. Сутність цих методів поверхневого зміцнення полягає у тому, що на відносно невеликі об'єми металу діють з великими швидкостями концентрованими потоками енергії високої інтенсивності з наступним швидким охолодженням. Такі умови обробки дозволяють отримувати задані фізико-механічні, електрохімічні, корозійні та експлуатаційні характеристики поверхневих шарів деталей машин та елементів конструкцій нафтогазової, авіаційної та ракетно-космічної техніки.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

До вище перелічених технологічних методів належить і плазмове електролітичне оксидування (plasma electrolytic oxidation) [1–3]. Для утворення захисних покриттів на деталях з алюмінію та його сплавів, а також з металів вентильної групи та їх сплавів в електроліті застосовують плазмове електролітичне оксидування [4, 5]. Прикладена висока напруга між деталлю та електродом, зазвичай виготовленим із нержавіючої сталі, викликає електричний пробій оксидної плівки та виникнення іскор і

мікродугових розрядів на поверхні деталі, які випадково мігрують по всій поверхні та, посилюючись, призводять до нагрівання деталі та електроліту. Внаслідок перебігу плазмохімічних реакцій у розрядних каналах за високих температур утворюються дисперсні оксиди, що містять різні фази, у тому числі й високотемпературну $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, що забезпечує покриття високу твердість, зносостійкість і жаростійкість [1–4]. Дослідники [6, 7] запропонували введення додатків до складу електроліту для покращення жаростійкості оксидних покриттів.

Загальновідомо, що стабільність поверхні розділу «покриття-підкладка» пов'язана з міжфазними силами адгезії та електрохімічними властивостями цієї області. Тому велику увагу слід приділяти підбору раціональних товщин шарів покриття, щоб забезпечити як міцність зчеплення з основою, так і необхідний ресурс роботи деталей машин під час зношування в агресивних корозійних середовищах за підвищених температур [8].

На увагу заслуговують теоретичні моделі для дослідження сингулярних полів напружень поблизу дефектів у тонкостінних конструкціях з композиційними покриттями [9–13] та відгуку функціонально градієнтних та шаруватих покриттів на локальне навантаження від абразивних частинок чи лезового інструменту [14–16].

Раціонально вибрані режими механічної обробки [17, 18] та обробки заготовок пластичним деформуванням перед формуванням плазмовим електролітичним оксидуванням жаростійких покриттів дозволяють підвищити втомну міцність алюмінієвих деталей з жаростійкими покриттями [19, 20].

Результати моделювання руху електроліту та температури в міжелектродному просторі електрохімічної комірки дозволяють раціонально проєктувати оснащення для формування на алюмінієвих деталях складної форми жаростійких покриттів у проточному електроліті та вибирати технологічні режими процесу плазмового електролітичного оксидування, що дозволить підвищити рівномірність товщини оксидного шару порівняно з аналогами [21, 22].

Розподіл температур під час плазмового електролітичного оксидування лишається важливою енергетичною характеристикою цього процесу. Однак математичний опис призводить до рівняння теплопровідності з рухомими межами, позаяк межа між прооксидованим і непрооксидованим шарами постійно змінюється. Це породжує аналітичні складнощі під час розв'язування таких задач [23, 24]. Переважно розв'язання зводиться до використання чисельних методів. Водночас точні розв'язки рівнянь теплопровідності переважно описуються експоненційно-тригонометричними рядами Фур'є, які є частинними випадками кратних рядів Діріхле. Згадані ряди зображають у комплексному просторі аналітичні функції, для яких розроблена докладна і струнка теорія з використанням поняття обмеженості індексу за напрямком [25, 26] та за сукупністю змінних [27].

Цей підхід дозволяє якісно вивчати властивості розв'язків таких рівнянь. Розроблена модель розподілу температур у деталях під час формування оксидного жаростійкого покриття плазмовим електролітичним оксидуванням дозволить раціонально вибирати форму електродів і технологічні режими процесу плазмового електролітичного оксидування для формування покриттів на алюмінієвих деталях. У дослідженні [22] представлено результати вимірювання температури електроліту в гальванічній ванні та деталі під час плазмового електролітичного оксидування, однак відсутні відомості про розподіл температур безпосередньо в зоні формування оксидного шару покриття, де протікають плазмохімічні реакції. Дослідниками [23] було побудовано математичну модель розподілу температур у деталях під час формування оксидного жаростійкого покриття плазмовим електролітичним оксидуванням, яка звелася до крайової задачі з рухомою межею для рівняння теплопровідності у випадку тришарового нескінченного циліндра. Однак для її аналітичного розв'язування були зроблені деякі припущення у [23], які її суттєво спростили. А саме, зважаючи на той факт, що товщина другого і третього шарів (алюмінію та його оксиду) надзвичайно мала порівняно з радіусом циліндра r_1 , зробили висновок про можливість заміни змінних товщин 2-го і 3-го шарів їх середніми значеннями під час визначення температурного поля в циліндрі радіусом r_1 . І за цієї заміни було знайдено температурне поле в сталевому циліндрі, від якого залежать дифузійні процеси на межі розділу між сталевим циліндром і шаром алюмінію (неокисленого). За допомогою новітніх математичних методів та мо-

делей, які викладені в огляді [28], планується позбутися описаного припущення та розглянути випадок зі змінною товщиною першого та другого шарів. Це дозволить нам побудувати точнішу модель розподілу температур.

Зазвичай дослідники зосереджуються на вивченні будови оксидних покриттів, структури, хімічного складу, фізико-механічних властивостей [1–5], зокрема відзначається зміна мікротвердості за товщиною покриття. При цьому не приділяється належна увага технологічним дослідженням, що стримує розробку енергоєфективних технологічних процесів формування жаростійких покриттів та впровадження їх у виробництво [29]. На сьогодні ще не достатньо зрозумілий механізм формування поверхневого оксидного шару, його основних фізико-механічних характеристик, вплив технологічних режимів процесу плазмового електролітичного оксидування та механічної обробки на роботоздатність деталей машин у різноманітних умовах експлуатації. Немає достатньо обґрунтованих наукових і технологічних основ розроблення енергоєфективних технологічних процесів поверхневого зміцнення алюмінієвих сплавів для забезпечення їх експлуатації за підвищених температур [30, 31, 32].

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Для успішного розроблення і впровадження енергоєфективної технології плазмового електролітичного оксидування у виробництво необхідно дослідити вплив компонентного складу електроліту та струмових параметрів, швидкості потоку електроліту та його температури на ріст оксидного покриття і вирішити комплекс питань підготовки металевої основи. Дослідження спрямовані на вирішення актуальної науково-технічної проблеми в області технології машинобудування – формування жаростійких покриттів. Для досягнення цього виникає потреба у розробленні теоретичних основ та технологічних засобів підвищення енергоєфективності процесу плазмового електролітичного оксидування алюмінієвих сплавів, а також техніко-економічних та екологічних показників процесу плазмового електролітичного оксидування. На актуальність досліджень вказує досить висока науково-публікаційна активність щодо питань процесів плазмового електролітичного оксидування металів та сплавів вентильної групи [1–8].

Модернізація установки для плазмового електролітичного оксидування деталей із алюмінієвих сплавів дозволить порівняно з відо-

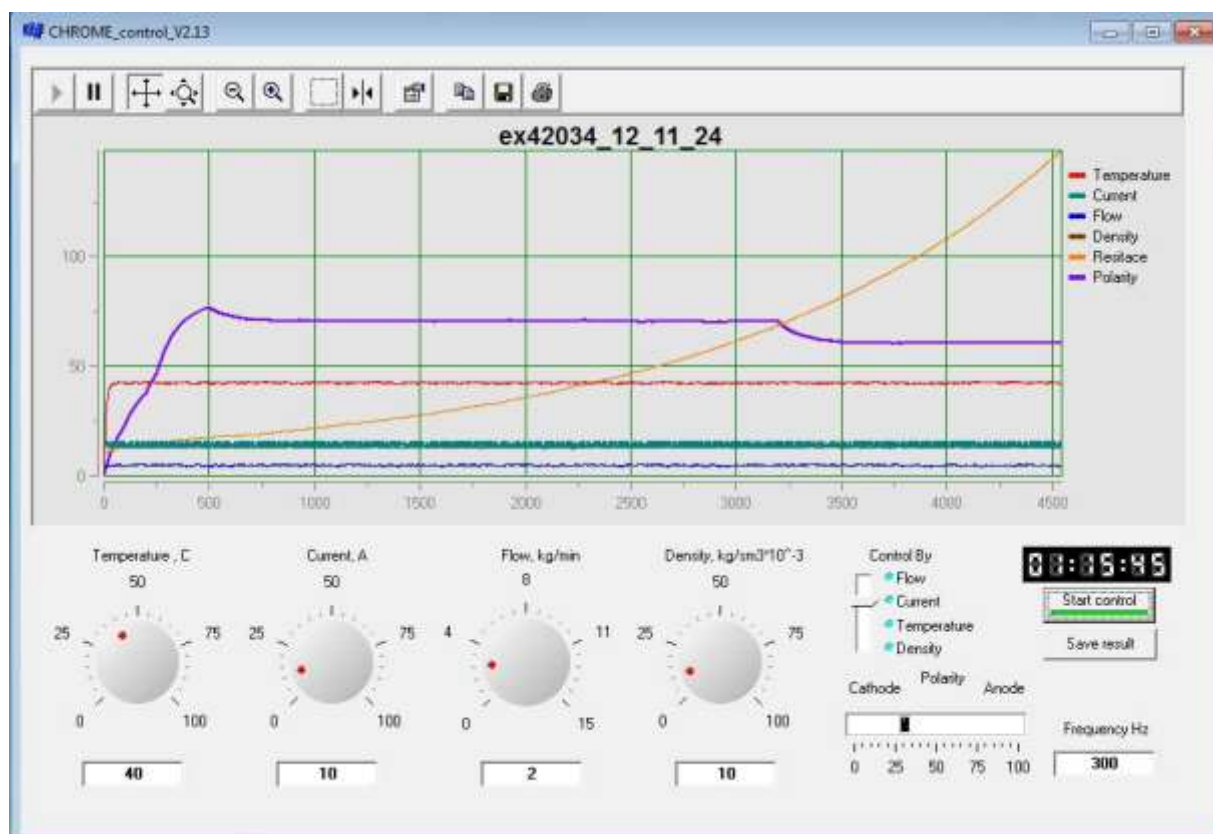


Рисунок 1 – Загальний вигляд інтерфейсу системи керування технологічними параметрами процесу плазмового електролітичного окисування в проточному електроліті

мими аналогами [33, 34] знизити витрати електроенергії та забруднення навколишнього середовища, а також підвищити продуктивність формування оксидних жаростійких покриттів. Все це стало мотивацією для проведення нашого дослідження.

Формулювання цілей

Метою даної праці є дослідження впливу технологічних параметрів процесу плазмового електролітичного окисування в проточному електроліті на властивості оксидних жаростійких покриттів, сформованих на сплавах алюмінію.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- модернізувати установку для плазмового електролітичного окисування у проточному електроліті;
- дослідити вплив технологічних параметрів процесу плазмового електролітичного окисування на конусність поверхні та фізико-механічні властивості покриттів.

Висвітлення основного матеріалу дослідження та дискусія

Як матеріал для виготовлення експериментальних зразків використали алюмінієвий деформівний та алюмінієвий ливарний сплав, які піддаються гартуванню:

- алюмінієвий деформівний сплав Д16Т системи Al–Cu–Mg, загартований і зістарений;
- алюмінієвий ливарний сплав АК8М системи Al–Si–Cu, загартований і зістарений.

Перед формуванням оксидних покриттів зразки алюмінієвих сплавів піддавали механічній обробці (точіння та шліфування) для досягнення необхідної шорсткості поверхні.

Плазмове електролітичне окисування деталей із алюмінієвих деформівних або ливарних сплавів проводили на розробленій нами установці, яка дозволяє регулювати форму електричного сигналу, частоту, напругу, густини і співвідношення анодного та катодного струмів, а також підвищити енергоефективність процесу плазмового електролітичного окисування деталей із алюмінієвих сплавів під час формування жаростійких покриттів в електроліті. Зовнішній вигляд інтерфейсу системи керування установкою наведено на рисунку 1.

До складу установки входять: джерело живлення змінним струмом (напругою до 1000 В), система вимірювання величин напруги і струму в катодному та анодному періодах, циліндрична гальванічна ванна із неіржавіючої сталі Х18Н10Т, заповнена силікатно-лужним електролітом, що служить електродом, система перемішування електроліту з механічною мішалкою, система охолодження електроліту, система витяжної вентиляції та система блокування від ураження електричним струмом. Під час формування оксидного покриття циліндричний зразок розташовували вертикально, співвісно з віссю циліндричної гальванічної ванни. Технологічні режими формування оксидного покриття плазмовим електролітичним оксидуванням: напруга – від 100 до 1000 В; густина струму – від 2 до 10 А/дм², співвідношення компонентів електроліту (Na₂SiO₃)/(KOH) – від 2,5 до 8, швидкість потоку електроліту – від 10 до 140 см/с, температура електроліту становила – від 10 до 80 °С.

Для формування оксидних покриттів плазмовим електролітичним оксидуванням вибрали широко розповсюджений силікатно-лужний електроліт на водній основі. Під час приготування електроліту використовували хімічно чисті компоненти – гідроксид калію (KOH) і силікат натрію (Na₂SiO₃). Електроліт готували простим змішуванням компонентів у дистильованій воді.

Після проведення плазмового електролітичного оксидування деталі з оксидним покриттям промивали у проточній воді. Сушіння проводили на повітрі за кімнатної температури.

Для контролю товщини оксидного покриття виготовляли поперечні мікрошліфи і проводили вимірювання на вимірювальному мікроскопі. Мікротвердість оксидних покриттів вимірювали на поперечних мікрошліфах приладом ПМТ-3 при навантаженні на алмазну піраміду Віккерса 1,0 Н.

Для оперативного контролю покриття використовували товщиномір. Товщина оксидного покриття, сформованого плазмовим електролітичним оксидуванням, становила від 200 до 300 мкм.

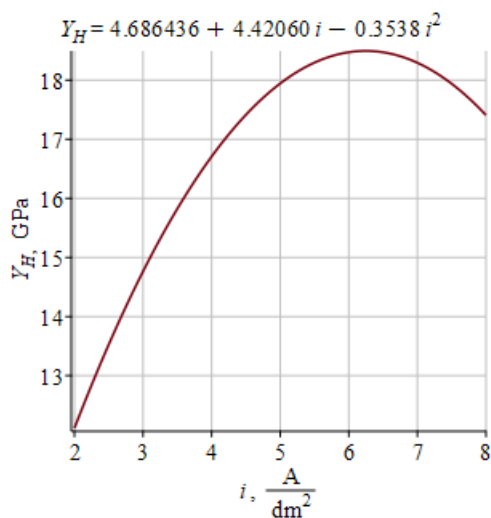
Конусність визначали як середнє значення різниці максимального та мінімального діаметрів деталі з оксидним покриттям. Вимірювання проводили за допомогою індикатора годинникового типу з ціною поділки 1 мкм.

Для оцінки фрикційної теплостійкості оксидних покриттів, сформованих плазмовим електролітичним оксидуванням, проводили експерименти на універсальній установці для випробування матеріалів на тертя УМТ-1 під час

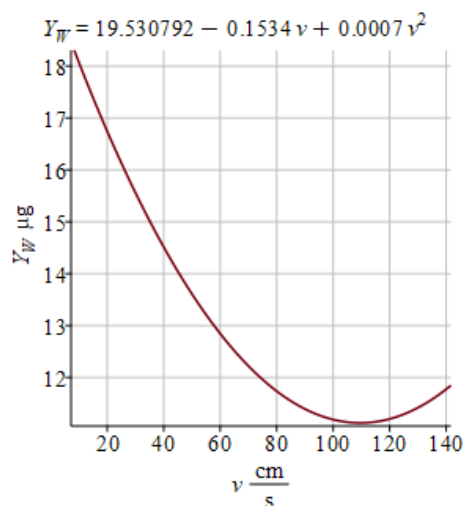
сухого тертя зразків за схемою торцевого тертя «кільце–кільце». Частота обертання рухомого зразка становить 1000 хв⁻¹. Навантаження на зразок було постійним і становить 200 Н. Температуру в зоні фрикційного контакту вимірювали автоматичним електронним потенціометром класу точності 0,5 з використанням хромель-копелевої термопари, діапазон вимірювання якої становив від мінус 50 до плюс 600 °С. Для порівняльних випробувань використовували сталь конструкційну леговану 40ХН. Про термостійкість матеріалів (покриттів) під час тертя судять із залежності зміни температури від часу випробування. Тривалість випробувань під час сухого тертя зразків контролювали секундоміром.

Величину зносу зразків із оксидним покриттям визначали гравіметричним методом, використовуючи аналітичні терези ВЛР-200. Під час випробування зразків експерименти повторювали тричі та визначали середнє арифметичне значення. Результати досліджень властивостей оксидних покриттів представлені на рисунках 2 – 4.

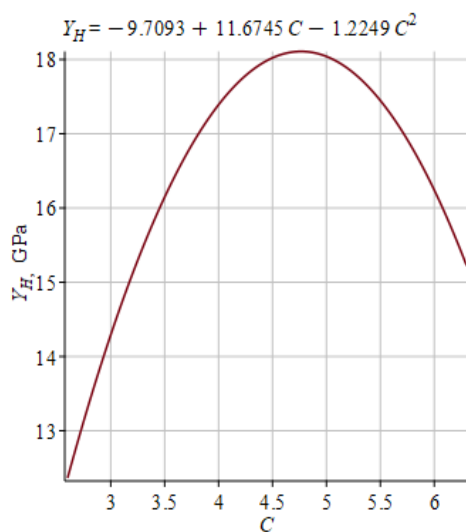
Досліджували вплив технологічних параметрів процесу плазмового електролітичного оксидування алюмінію на мікротвердість покриття (рис. 2) за фіксованих значень густини струму, співвідношень масових концентрацій складників електроліту або температури електроліту попарно нарізно та отримали три різні регресійні криві для мікротвердості у вигляді квадратичної залежності. Зрозуміло, що всі одержані функціональні залежності виявилися увігнутими кривими відносно одного параметра при конкретних значеннях решти двох зазначених вище параметрів та досягають максимумів в точках відповідно: густина струму $i = 6,3$ А/дм² (рис. 2, а), співвідношення масових концентрацій складників електроліту $C = 4,7$ (рис. 2, б), температура електроліту $T = 58$ °С (рис. 2, в). Швидкість потоку електроліту в даному процесі не чинить статистично істотного впливу на зміну величини мікротвердості. За перерахованих оптимальних значень технологічних параметрів процесу плазмового електролітичного оксидування у зображених на рисунках діапазонах забезпечується отримання величини мікротвердості покриття від 18,1 GPa до 18,5 GPa. При цьому найсуттєвіший внесок на величину мікротвердості забезпечується густиною струму, що гарантує формування оксидного покриття алюмінію з великою мікротвердістю 18,5 GPa за температури 50 градусів Цельсія та співвідношення масової концентрації складників проточного електроліту $C = 4,4$.



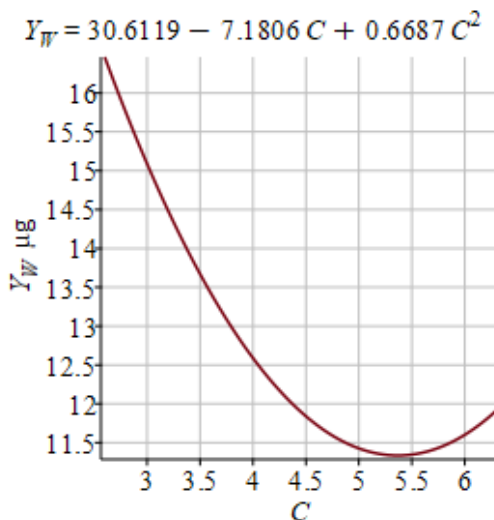
a



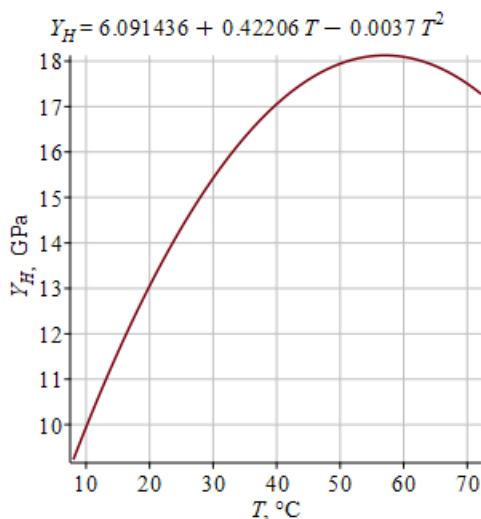
a



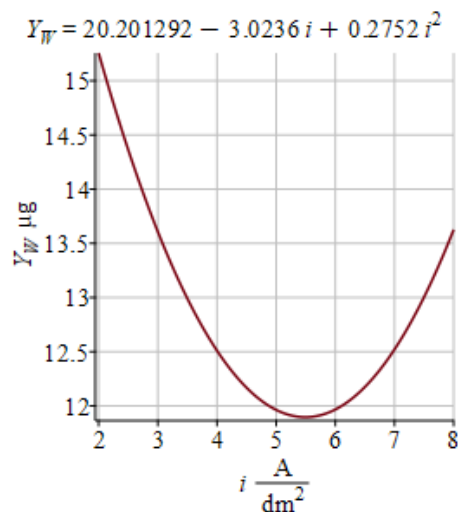
б



б



в



в

а – густини струму ($T = 50^{\circ}C$; $C = 4.4$);
 б – співвідношення концентрацій компонентів
 електроліту ($T = 50^{\circ}C$; $i = 5 A/dm^2$);
 в – температури електроліту ($C = 4.4$; $i = 5 A/dm^2$)

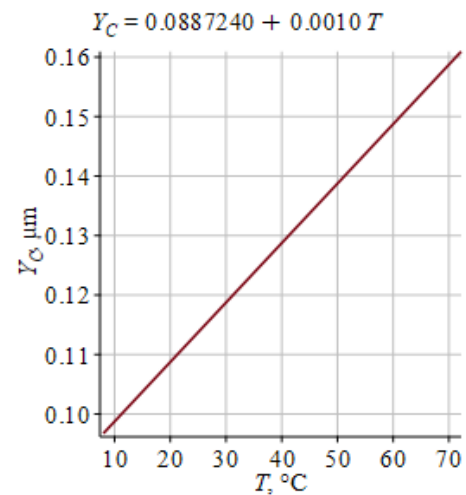
Рисунок 2 – Залежність мікротвердості покриття від технологічних параметрів процесу плазмового електролітичного оксидування алюмінієвого сплаву в проточному електроліті

а – швидкості потоку ($i = 5 A/dm^2$; $C = 4.4$);
 б – співвідношення концентрацій компонентів
 електроліту ($i = 5 A/dm^2$; $v = 75 cm/s$);
 в – густини струму ($C = 4.4$; $v = 75 cm/s$)

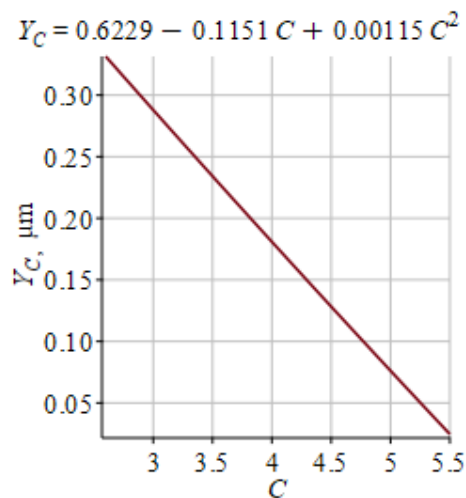
Рисунок 3 – Залежність величини зносу оксидного покриття від технологічних параметрів процесу плазмового електролітичного оксидування алюмінієвого сплаву в проточному електроліті

Водночас під час аналізу впливу технологічних параметрів процесу плазмового електролітичного оксидування алюмінію на величину зносу покриття (рис. 2) варто відзначити, що показані на рис. 3, а, б, в залежності є опуклими функціями та мають мінімуми в точках відповідно: швидкість потоку $v = 110$ см/с, співвідношення масових концентрацій складників електроліту $C = 4,4$, густина струму $i = 5,5$ А/дм². За вище вказаних значень технологічних параметрів процесу плазмового електролітичного оксидування алюмінію у досліджуваних діапазонах величина зносу покриття змінюється від 11 μg до 11,8 μg. З'ясовано, що найменша величина зносу 11 μg оксидного покриття на алюмінії досягається під час його формування за швидкості потоку електроліту $i = 110$ см/с. Для описаних умов вплив температури електроліту на ступінь зносу оксидного покриття алюмінію був статично незначущим, тому в регресійних залежностях, знайдених для величину зносу, вказана температура відсутня як параметр.

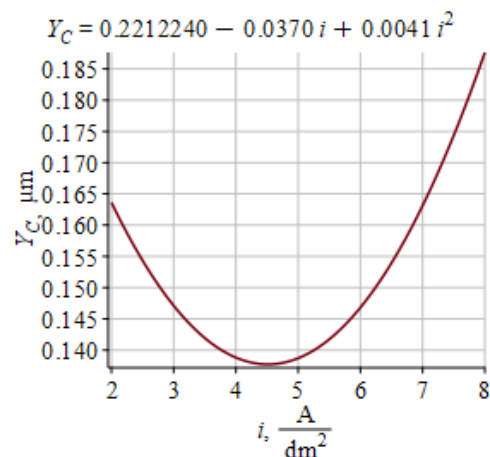
Дослідження конусоподібності зразків з оксидними покриттями провели за фіксованих значень двох параметрів з таких трьох: температура електроліту $T = 50$ °C, співвідношення масових концентрацій складників електроліту $C = 4,4$, густина струму $i = 5$ А/дм². Вплив швидкості потоку на конусоподібність при зазначених числових значеннях технологічних параметрів був статистично незначущим під час процесу плазмового електролітичного оксидування алюмінію. Водночас для решти параметрів отримали три різні регресійні криві мікротвердості: дві з них у вигляді лінійної залежності, а одна у вигляді квадратичної залежності. Остання виявилася опуклою функцією відносно густини струму та досягає свого локального екстремуму при густині струму $i = 7$ А/дм² (рис. 4, в). Відповідне найменше значення конусоподібності становить 0,03 μm. Залежності конусоподібності від температури електроліту та співвідношення масових концентрацій складників електроліту виявилися лінійними. Тому найменші значення конусоподібності у досліджуваних діапазонах спостерігалися у крайніх правих точках діапазону, себто при таких числових значеннях температури електроліту $T = 72$ °C (рис. 4, а) та співвідношення масових концентрацій складників електроліту $C = 6,7$ (рис. 4, б). Конусоподібність, рівна 0 мкм, отримана при співвідношенні концентрацій компонентів електроліту, рівному $C = 4,7$.



а



б



в

а – температури електроліту ($i = 5$ А/дм²; $C = 4,4$);
 б – співвідношення концентрацій компонентів електроліту ($i = 5$ А/дм²; $T = 50$ °C);
 в – густини струму ($C = 4,4$; $T = 50$ °C)

Рисунок 4 – Залежність конусоподібності поверхні оксидного покриття від технологічних параметрів процесу плазмового електролітичного оксидування алюмінієвого сплаву в проточному електроліті

Таблиця 1 – Залежність температури в зоні тертя (°C) від тривалості часу випробовування

Матеріал	Час, хв																	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Сталь 40ХН	21	107	250	268	290	300	370	375	379	377	387	378	375	379	380	377	380	377
Алюмінієвий деформівний сплав Д16Т	21	50	75	105	152	160	167	180	183	187	192	193	192	197	196	194	195	197
Алюмінієвий ливарний сплав АК8М	21	50	75	105	152	160	167	180	183	187	187	189	190	191	193	192	192	194

Також дослідили теплозахисні властивості оксидних покриттів на алюмінієвому деформівному сплаві Д16Т та алюмінієвому ливарному сплаві АК8М. За еталон обрали сталь 40XH (таблиця 1).

Аналіз результатів, представлених у таблиці 1, показав, що температура в зоні сухого тертя зразків стабілізується приблизно через 9–10 хв і досягає значень від 192 °C до 197 °C, і вже практично не змінюється при подальшому зношуванні оксидного покриття.

Під час випробовування зразків зі сталі 40XH за менш короткий проміжок часу від 4 до 6 хв після початку випробувань в зоні контакту була більш висока температура, яка становила 370 C. Це свідчить про високі теплозахисні властивості оксидного покриття. Оксиди у складі оксидного покриття забезпечують високі теплозахисні властивості композиції та захист основи з алюмінієвого сплаву від температурних впливів і зношування.

Сформовані плазмовим електролітичним оксидуванням жаростійкі покриття мають покращені теплофізичні характеристики порівняно з відомими аналогами [29].

Результати проведених нами експериментальних досліджень впливу технологічних параметрів процесу плазмового електролітичного оксидування (компонентного складу електроліту, струмових режимів тощо) на фізико-механічні властивості (мікротвердість, зношування) порівняно з [1–8] та на жаростійкість оксидних покриттів порівняно з відомими [29] дозволять вибрати раціональні межі варіювання технологічних параметрів процесу для оптимізації технології плазмового електролітичного оксидування алюмінієвих сплавів.

У подальших дослідженнях планується вивчення впливу легування оксидних покриттів хромом під час плазмового електролітичного оксидування алюмінієвих сплавів на їх жаростійкість.

Висновки

В результаті проведених досліджень:

- розроблено та виготовлено установку, оснащену системою автоматизованого керування технологічними параметрами процесу плазмового електролітичного оксидування алюмінієвих сплавів у проточному електроліті, яка забезпечує підтримання на заданому рівні технологічних параметрів процесу: співвідношення концентрацій компонентів електроліту, швидкості потоку, густини струму, співвідношення струмів і температури електроліту, а також дозволяє контролювати водневий показник електроліту та його електричний опір;
- встановлено вплив технологічних режимів процесу плазмового електролітичного оксидування на формування жаростійких покриттів на алюмінієвих сплавах, їх мікротвердість та зносостійкість, а також на точність форми поверхні деталі (конусоподібність);
- результати порівняльних випробовувань оксидних покриттів на фрикційну теплостійкість показали, що вони забезпечують надійний захист деталей з алюмінієвого деформівного сплаву та алюмінієвого ливарного сплаву під час сухого тертя за схемою «кільце – кільце». Встановлено, що температура в зоні тертя нижча для пари зразків з оксидними покриттями, а її стабілізація відбувається повільніше порівняно зі сталевими;
- впровадження розробленої технології плазмового електролітичного оксидування алюмінієвих сплавів у проточному електроліті у виробництво дозволить підвищити ресурс роботи швидкозношуваних деталей машин, які експлуатуються за підвищених температур.

Фінансування: Дослідження виконано за кошти Національного фонду досліджень України (National Research Foundation of Ukraine), проєкт НФДУ № 2023.04/0160, 0124U003748 «Розробка технології формування жаростійких покриттів плазмовим електролітичним оксидуванням на деталях авіаційної та ракетно-космічної техніки».

Література / References

1. Clyne T. W., Troughton S. C. A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals. *International Materials Reviews*. 2019. Vol. 64, No 3. P. 127–162. <https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1466492>
2. Simchen F., Sieber M., Kopp A., Lampke T. Introduction to Plasma Electrolytic Oxidation—An Overview of the Process and Applications. *Coatings*. 2020. Vol. 10, No 7. Art. No 628. <https://doi.org/10.3390/coatings10070628>
3. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Process—Processing, Properties, and Applications. / S. Sikdar et al. *Nanomaterials* 2021. Vol. 11, No 6. Art. No 1375. <https://doi.org/10.3390/nano11061375>
4. Kaseem M., Fatimah S., Nashrah N., Ko Y. G. Recent progress in surface modification of metals coated by plasma electrolytic oxidation: Principle, structure, and performance. *Progress in Materials Science*. 2021. Vol. 117. Art. No 100735. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100735>
5. Student M. M., Pohrelyuk I. M. Modification of the Surfaces of Aluminum and Titanium Alloys Aimed at the Improvement of Their Wear Resistance and Tribological Characteristics. *Materials Science*. 2021. Vol. 57, No 3. P. 377–386. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00552-z>
6. Dissolution Behavior of Different Alumina Phases within Plasma Electrolytic Oxidation Coatings / F. Simchen et al. *Coatings*. 2022. Vol. 12, No 8. Art. No 1205. <https://doi.org/10.3390/coatings12081205>
7. The importance of type of Ti-based additives on the PEO process and properties of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ coating / M. Hashemzadeh et al. *Surfaces and Interfaces*. 2023. Vol. 36. Art. No 102523. <https://doi.org/10.1016/j.surf.2022.102523>
8. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) coatings on aluminum alloy 2024: A review of mechanisms, processes, and corrosion resistance enhancement / M. Gamba et al. *Applied Surface Science Advances*. 2025. Vol. 26. Art. No 100707. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2025.100707>
9. Shats'kyi I. P. Integral equation of the problem of crack in a shallow shell with flexible coating. *Dop. Akad. Nauk Ukr.* 1992. No 1. P. 46–48.
10. Shatskyi I. P., Makoviichuk M. V., Shcherbii A. B. Equilibrium of Cracked Shell with Flexible Coating. In *Shell Structures: Theory and Applications*; CRC Press: Leiden, The Netherlands, 2018. Vol. 4. P. 165–168. [doi:10.1201/9781315166605-34](https://doi.org/10.1201/9781315166605-34)
11. Stress Analysis in Damaged Pipeline with Composite Coating / M. Dutkiewicz et al. *Appl. Sci.* 2021. Vol. 11, No 22. Art. No 10676. <https://doi.org/10.3390/app112210676>
12. Shats'kyi, I.; Makoviichuk, M.; Shcherbii, A. Influence of a flexible coating on the strength of a shallow cylindrical shell with longitudinal crack. *J. Math. Sci.* 2019, Vol. 238. P. 165–173. <https://doi.org/10.1007/s10958-019-04226-9>
13. Shatskyi, I.P.; Makoviichuk, M.V.; Shcherbii, A.B. Influence of flexible coating on the limit equilibrium of a spherical shell with meridional crack. *Mater. Sci.* 2020. Vol. 55, No 4. P. 484–491. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00329-w>
14. Optical and Mechanical Properties of Layered Infrared Interference Filters / M. Bembenek et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 21. Art. No 8105. <https://doi.org/10.3390/s22218105>
15. Shatskyi I., Makoviichuk M., Ropyak L., Velychkovych A. Analytical model of deformation of a functionally graded ceramic coating under local load. *Ceramics*. 2023. Vol. 6, No 3. P. 1879–1893. <https://doi.org/10.3390/ceramics6030115>
16. Shatskyi I., Makoviichuk M., Ropyak L. Plane deformation of contrast layered coating under local load. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 59. P. 407–412. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.058>
17. Methodology for soft-sensor design and in-process surface conditioning in turning of aluminum alloys / T. Junge et al. *Production Engineering*. 2024. Vol. 18, No 2. P. 267–287. <https://doi.org/10.1007/s11740-023-01260-0>
18. Madhavi Y., Narasaiah N., Jyothirmayi A., Rama Krishna L. Influence of surface-roughness on the corrosion-fatigue behavior of MAO coated 6061-T6 Al alloy assessed in NaCl medium. *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 414. Art. No 127102. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127102>
19. Influence of combined shot peening and PEO treatment on corrosion fatigue behavior of 7A85 aluminum alloy / Z. Ye et al. *Appl. Surf. Sci.* 2019. Vol. 486. P. 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.04.242>
20. Madhavi Y., Rama Krishna L., Narasaiah N. Corrosion-Fatigue Performance of Hard Anodized and MAO-Coated 2024-T3 and 7075-T6 Aerospace Al Alloys. *Trans Indian Inst Met* 2021. Vol. 74, No 9. P. 2231–2243. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02313-7>
21. Optimization of Plasma Electrolytic Oxidation Technological Parameters of Deformed Aluminum Alloy D16T in Flowing Electrolyte / L. Ropyak et al. *Ceramics*. 2023. Vol. 6, No 1. P. 146–167. <https://doi.org/10.3390/ceramics6010010>

22. Development of an Oxide Layer on Al 6061 Using Plasma Arc Electrolytic Oxidation in Silicate-Based Electrolyte / P. Jadhav et al. *Materials*. 2022. Vol. 15, No 4. Art. No 1616. <https://doi.org/10.3390/ma15041616>
23. Design of a Two-Layer Al–Al₂O₃ Coating with an Oxide Layer Formed by the Plasma Electrolytic Oxidation of Al for the Corrosion and Wear Protections of Steel / L. Ropyak et al. *Progress in Physics of Metals*. 2023. Vol. 24, No 2. P. 319–365. <https://doi.org/10.15407/ufm.24.02.319>
24. Chaurasiya V., Wakif A., Shah N. A., Singh J. A study on cylindrical moving boundary problem with variable thermal conductivity and convection under the most realistic boundary conditions. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2022. Vol. 138. Art. No 106312. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106312>
25. Bandura A. I., Skaskiv O. B. Boundedness of L-index in direction of functions of the form $f(z, m)$ and existence theorems. *Matematychni Studii*. 2014. Vol. 41, No. 1. P. 45–52. http://matstud.org.ua/texts/2014/41_1/45-52.pdf
26. Bandura A., Skaskiv O. Functions Analytic in the Unit Ball Having Bounded L-Index in a Direction. *Rocky Mountain Journal of Mathematics*. 2019. Vol. 49, No. 4. P. 1063–1092. <https://doi.org/10.1216/RMJ-2019-49-4-1063>
27. Bandura A., Salo T., Skaskiv O. L-Index in Joint Variables: Sum and Composition of an Entire Function with a Function With a Vanished Gradient. *Fractal and Fractional*. 2023. Vol. 7, No 8. Art. No 593. <https://doi.org/10.3390/fractalfract7080593>
28. Čanić S. Moving Boundary Problems. *Bulletin (New Series) of the American Mathematical Society*. 2021. Vol. 58, No 1. P. 79–106. <https://doi.org/10.1090/bull/1703>
29. PEO-Chameleon as a potential protective coating on cast aluminum alloys for high-temperature applications / A Shirani et al. *Surface and Coatings Technology*. 2020. Vol. 397. Art. No 126016. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126016>
30. Energy-efficient PEO process of aluminium alloys / E. Matykina et al.. *Materials Letters*. 2014. Vol. 127. P. 13–16. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.04.077>
31. Kaseem M., Dikici B. Optimization of Surface Properties of Plasma Electrolytic Oxidation Coating by Organic Additives: A Review. *Coatings*. 2021. Vol. 11, No 4. Art. No 374. <https://doi.org/10.3390/coatings11040374>
32. Songur F., Arslan E., Dikici B. Taguchi optimization of PEO process parameters for corrosion protection of AA7075 alloy. *Surface and Coatings Technology*. 2022. Vol. 434. Art. No 128202. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128202>
33. Application Number SK2023000018. Connection of Pulsed dc Source for Plasma Electrolytic Oxidation. Application Date 14.02.2023. Publication Number 202300018. Publication Date 11.10.2023. Grant Number 9975. Grant Date 28.02.2024. Publication Kind Y1. IPC C25D 11/00, H03K 3/00. Applicants Zilinska univerzita v Ziline, Slovakia. Inventors: Kajanek D., Belany P., Pastorek F., Jackova M. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=SK410757800&cid=P12-LYWX68-78029-3>
34. Application Number US20220056608. Plasma Electrolytic Oxidation Apparatus and Method of Plasma Electrolytic Oxidation Using the Same. Application Date 17.08.2021. Publication Number 20220056608. Publication Date 24.02.2022. Grant Number 11555253. Grant Date 17.01.2023. Publication Kind B2. IPC C25D 11/00, C25D 21/12. Applicants Korea Institute of Science and Technology. Inventors: Hun-su L., Jaewoo K., Un-Seok J., Yoonsang K., Yongchae J., Jaesang Y., Yongseok C. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US351844000&cid=P12-LYWX68-78029-8>