

УДК:669.056.91

Володимир Гвоздецький¹, д.т.н., ст. досл., Дмитро Яремчук, аспірант, Михайло Студент¹, д.т.н., проф, Христина Задорожна¹ к.т.н., ст.н.с. Олександр Гасій² д.т.н., проф., Іван Гончар² к.т.н., доц., Галина Веселівська¹ к.т.н., ст. досл.

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

²Національний лісотехнічний університет України

ВИБІР ЕЛЕКТРОЛІТУ ДЛЯ ІМПУЛЬСНОГО АНОДУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Анотація. В процесі імпульсного анодування у оксалатній кислоті оксалат-аніони вбудовуються в структуру анодованого шару а за високої напруги процесу при 150 В відбувається часткова деструкція оксалат-аніонів з виділенням вуглецю (карбонізація), що зміцнює стінки пор та забезпечує високі трибологічні характеристики анодованих шарів.

Ключові слова: алюмінієві сплави, імпульсне анодування, трибологічні характеристики

Volodymyr Hvozdetzkyi¹, Dmytro Yaremchuk², Mykhailo Student¹, Khrystyna Zadorozhna¹ Oleksandr Hasiy², Ivan Honchar², Halyna Veselivs'ka¹

SELECTION OF ELECTROLYTE FOR PULSE ANODIZING OF ALUMINUM ALLOYS

During the process of pulsed anodizing in oxalic acid, oxalate anions are incorporated into the structure of the anodized layer, and at a high process voltage of 150 V, partial destruction of oxalate anions occurs with the release of carbon (carbonization), which strengthens the pore walls and ensures high tribological characteristics of the anodized layers.

Keywords: aluminum alloys, pulse anodizing, tribological characteristics

Алюмінієві сплави є критичними для аерокосмічної та автомобільної галузей, але їхня низька зносостійкість обмежує застосування в парах тертя. Класичне сульфатне анодування ((Hard Anodizing, тип III) - ТА) цих сплавів формує пористі, гідратовані шари ($Al_2O_3 \cdot nH_2O$), які втрачають твердість при нагріванні вище 100°C. Перехід до оксалатних електролітів та високовольтного імпульсного режиму (150 В) дозволяє змінити механізм росту плівки. Імпульсне тверде анодування (ІТА) – це технологія, де замість постійного струму використовуються переривчасті електричні імпульси. Це дає кілька суттєвих переваг порівняно з класичним методом. Завдяки контрольованим імпульсам структура оксидного шару стає щільнішою. Це ідеально для деталей, які постійно труться або працюють під навантаженням. Оскільки струм подається порціями, електроліт і сама деталь менше нагріваються. Це дозволяє уникнути «підпалів» металу та отримати рівномірне покриття на деталях складної форми. Процес ІТА зазвичай іде швидше (до 30-50% приросту швидкості нарощування шару), оскільки можна використовувати вищу щільність струму без ризику зіпсувати деталь. Імпульсний режим дозволяє якісно анодувати ливарні сплави з високим вмістом кремнію (наприклад, силуміни) або міді, які важко піддаються звичайному анодуванню. Покриття виходить менш пористим і більш гладким, що покращує як зовнішній вигляд, так і антикорозійні властивості.

ТА часто використовується в конструкції БПЛА для захисту алюмінієвих компонентів, які піддаються високим механічним або термічним навантаженням. Основними сферами застосування ТА є:

- картер двигуна – ТА створює захисний шар проти корозії від агресивних продуктів згоряння палива;
- гільзи циліндрів та поршні – ТА забезпечує низький коефіцієнт тертя та стійкість до високих температур;

- напрямні та замки – ТА запобігає «закушуванню» металевих деталей при механічному терті та захищає від піску чи бруду в польових умовах;
- рами та кронштейни – ТА підвищує жорсткість конструкції без значного збільшення ваги, що важливо для точного маневрування на високих швидкостях;
- радіатори охолодження – ТА допомагає ефективніше відводити тепло від потужних відеопередавачів (VTX) та регуляторів швидкості (ESC), які сильно нагріваються під час тривалого баражування;
- корпуси камер та підвісів – ТА захищає високоточні деталі від подряпин та атмосферного впливу (вологи, солі), забезпечуючи працездатність сенсорів до моменту влучання в ціль.

Однак класичне сульфатне анодування – ТА дає пористі, гідратовані шари, які втрачають твердість при нагріванні вище 100°C.

Перехід до оксалатних електролітів та високовольтного (~150 В) імпульсного режиму анодування (ІТА) дозволяє змінити механізм росту плівки. Висока енергія імпульсу сприяє формуванню маловодних фаз (беміту – $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), що забезпечує термічну стабільність та високу трибологічну стійкість таблиця 1.

Таблиця 1. Характеристики електролітів для імпульсного анодування

Характеристика	Сульфатний електроліт	Оксалатний електроліт
Формуюча напруга	Формуюча напруга процесу твердого анодування – 15–25 В. При збільшенні напруги до 150 В виникає ризик пробую та розчинення анодованого шару.	Процес анодування за формуючої напруги 100–160 В відбувається без пробую анодованого шару (високовольтне анодування).
Структура	В процесі анодування формується фаза гібситу ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) через високу агресивність електроліту	Формує щільний беміт завдяки низькій розчинній здатності ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$).
Твердість	Середня (до 400–500 HV).	Максимальна (до 600 – 650 HV).
Трибологічні властивості	Потребує додаткового наповнення мастилами.	Має природні антифрикційні властивості (включення оксалатів).

При однаковій напрузі 150 В енергоспоживання в процесі ІТА залежить від електропровідності електроліту:

- Сульфатний електроліт має дуже високу провідність. При напрузі 150 В струми будуть значними і енерговитрати високі. Більша частина енергії йде не на ріст анодного шару, а на розкладання води (газовиділення) та нагрів ванни. При цьому необхідно потужні холодильні установки, що споживають у 2-3 рази більше електрики, ніж сам процес анодування.

- Оксалатний електроліт має низьку провідність (високий опір). Енерговитрати помірні, а густина струму при напрузі 150 В залишається в межах норми для твердого анодування (2–5 А/дм²). Система охолодження працює в економному режимі, оскільки виділяється значно менше джоулевого тепла. За витратами на кВт·год оксалатний процес виграє за рахунок менших затрат на охолодження.

Висновок. Вища ціна закупівлі оксалатної кислоти компенсується низьким відсотком браку та меншими затратами за електрику (охолодження). В оксалатній кислоті оксалат-аніони вбудовуються в структуру анодованого шару а за високої напруги процесу ІТА при ~150 В відбувається часткова деструкція оксалат-аніонів з виділенням вуглецю (карбонізація), що зміцнює стінки пор. Критична напруга 150 В є пороговою для переходу від аморфних гідроксидних структур до термодинамічно стабільних оксидних фаз у оксалатних електролітах. Це пояснює високу твердість та високі трибологічні характеристики анодованих шарів.