

УДК 544.6.018

**ОСОБЛИВОСТІ ГЛИБОКОГО ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ОКСИДУВАННЯ  
АЛЮМІНІЮ ТА ЙОГО СПЛАВІВ****Яблонський Р. В., Борисенко Ю. В.**

Київський національний університет технологій та дизайну

**Мета.** Дослідити особливості глибокого електролітичного оксидування алюмінію та його сплавів, зокрема, для одержання електроізоляційного оксидного шару.

**Методика.** Порівняльна характеристика сучасних літературних даних.

**Результати.** Розглянуто та проаналізовано різні електроліти для глибокого електролітичного оксидування та режими оксидування різних алюмінієвих сплавів; показано, що важливо підтримувати низьку температуру, щоб уникнути розчинення оксидної плівки в сірчанокиислому електроліті, та перемішувати електроліт; показано також, що різні сплави алюмінію при глибокому оксидуванні потребують різних режимів електролізу.

**Наукова новизна.** На результати глибокого електролітичного анодування суттєво впливає склад алюмінієвих сплавів; для одержання якісних оксидних плівок на різних сплавах застосовують різні температурні та електричні режими електролізу.

**Практична значимість.** Для одержання оксидних плівок великої товщини та високими механічними та електроізоляційними властивостями раціонально застосовувати сірчанокислий електроліт за знижених температур, або щавлево-сірчанокислий та трикомпонентний сульфосаліцилатний електроліт; при цьому треба ретельно дотримуватись рекомендованих для кожного сплаву температури анодування, густини струму та напруги.

**Ключові слова:** глибоке електролітичне оксидування алюмінію, анодування алюмінію

Оксидування алюмінію є досить ефективним методом захисту алюмінію від корозії в агресивних середовищах з метою надання його поверхні нових, дуже цінних властивостей. Анодне оксидування дозволяє створити оксидні плівки з високою твердістю і зносостійкістю, з відмінними електроізоляційними властивостями і з гарним декоративним виглядом. Воно може проводитися із застосуванням постійного або змінного електричного струму. За складом електролітів та їх призначенням слід виділити ряд технологічних процесів: оксидування в сірчанокислих електролітах з метою отримання декоративних і твердих оксидних плівок; оксидування в щавлевокислих електролітах для отримання електроізоляційного шару; оксидування в ортофосфорній кислоті для подальшого гальванічного покриття міддю, нікелем та іншими металами, оксидування в хромовій кислоті з метою отримання ематалевих плівок, оксидування в електролітах з органічних сполук для різного призначення [1].

Глибоким анодуванням називають процес отримання окисних плівок товщиною більше 40 мкм, що відрізняються високою твердістю, зносостійкістю і хорошими електроізоляційними властивостями. За допомогою таких плівок можна підвищити зносостійкість поверхонь тертя деталей, наприклад, зубчастих передач, збільшити опір ерозійному зносу, забезпечити електроізоляцію. Глибоке анодування тонкостінних деталей підвищує жорсткість конструкції. Глибоке анодування шестерен підвищує їх зносостійкість у 5-10 разів [2, 3].

#### ***Постановка завдання***

Аналізуючи літературні дані, з'ясувати особливості глибокого електролітичного анодування алюмінію та його сплавів.

#### ***Результати досліджень***

Технологічний процес твердого (глибокого) анодного оксидування (анодування) алюмінію і його сплавів складається з таких операцій: механічної підготовки, хімічного знежирення, хімічного травлення, хімічного або електрохімічного полірування (за необхідності), освітлення, анодного оксидування і ущільнення (за необхідності) [4].

Механічну підготовку проводять для вирівнювання алюмінієвої поверхні, для усунення грубих ушкоджень, глибоких подряпин, слідів прокату та інших дефектів, тобто, для надання поверхні максимальної гладкості і блиску. При цьому застосовують фетрові або повстяні кола, або інші абразивні матеріали, з використанням полірувальних паст на основі оксиду алюмінію або віденського вапна. Хімічне знежирення видаляє з поверхні залишки полірувальних паст, жирові плями, масло, мастило, знежирює поверхню. Хімічне травлення видаляє з поверхні важкорозчинні органічні і неорганічні забруднення. Хімічне або електрохімічне полірування зменшує шорсткість поверхні і підвищує блиск. Етап хімічного або електрохімічного полірування проводиться, якщо необхідно отримати блискучу анодовану поверхню. Освітлення видаляє з поверхні шлам нерозчинних компонентів, знижує зернистість, забезпечує освітлення поверхні. Анодне оксидування (анодування) – формує на алюмінієвій поверхні щільну безбарвну оксидну плівку. У своєму складі електроліт твердого анодного оксидування (анодування) не містить токсичних і отруйних компонентів. Фарбування – забарвлює анодовану поверхню в раз особисті кольори і відтінки. Ущільнення – проводить закриття пір, ущільнює поверхневий шар анодованої поверхні. Однак, треба зазначити, що анодні плівки, одержувані в процесі твердого анодного оксидування, мають щільну, низькопористу структуру, тому мало піддаються фарбуванню і ущільненню.

В таблиці 1 наведено схему технологічного процесу електролітичного анодування алюмінію. Операція твердого анодного оксидування проводиться за напруги 60-100 В, густини струму 1,5-3 А/дм<sup>2</sup>, при постійному перемішуванні. Алюмінієві сплави, що містять більш, ніж 7% кремнію, не підлягають анодному оксидуванню [4].

Таблиця 1

**Схема технологічного процесу електролітичного анодування алюмінію**

№ операції	Технологічна операція	Температура, °С	Час, хвилини
1	Хімічне знежирення	60-70	5-10
2	Подвійна промивка	30-50	2-3
3	Хімічне травлення	50-60	0,5-1
4	Подвійна промивка	30-50	2-3
5	Освітлення	20-30	0,5-2
6	Подвійна промивка	15-30	2-3
7	Тверде анодне оксидування	10-30	20-100
8	Подвійна промивка	30-50	2-3
9	Сушка	30-50	60-120

Колір оксидної плівки при проведенні процесу твердого анодного оксидування залежить від складу сплаву, як показано у таблиці 2. Маркування алюмінієвих сплавів наведено згідно з міждержавним стандартом [5].

Таблиця 2

**Кольори оксидних плівок, одержаних в процесі твердого анодного оксидування протягом 30 хвилин**

Алюміній та його сплави	Колір оксидної плівки
Чистий алюміній	безбарвний
Технічний алюміній	світло-золотистий
АМг2	світло-золотистий
АМг6	чорний
Д1Т	блакитний
Д16Т	блакитний
В95	від сіро-блакитного до синьо-чорного

Температура електроліту та густина струму теж варіюються в залежності від складу сплаву. Так, для сплавів Д16, АЛ2, В95 температура електроліту складає 5-15 °С, для алюмінію сплавів АМг, АМц, АВ – 17-23 °С, для сплавів АМг2 – 22-28 °С. Для сплавів Д16 і В95 густина струму складає 1,5 А/дм<sup>2</sup>, для алюмінію і сплаву АМг2 – 3 А/дм<sup>2</sup>, сплавів АМг3, АМг6, АВ – 2 А/дм<sup>2</sup>, для великогабаритних деталей, більших, ніж 300 мм, густину струму знижують в 1,5-2 рази та збільшують час анодного оксидування.

Глибоке анодування часто негативно позначається на механічних властивостях анодованих виробів: зменшуються межа міцності, відносне подовження та поперечний переріз. Такий вплив незначний при малій товщині плівки і зростає з її збільшенням. Механічні та електричні властивості товстих окисних плівок і ступінь їх впливу на характеристики металу залежать від умов оксидування і складу металу або сплаву, що піддається електрохімічній обробці.

Діелектричні властивості плівок залежать від умов електролізу, складу металу або сплаву та від конструкції оброблюваних деталей. При електроізоляційному оксидуванні поверхня деталей повинна відповідати не нижче, ніж дев'ятому класу шорсткості. Не допускається наявність гострих граней, кутів; радіус заокруглення повинен бути не менше 2-3 мм. Зменшення радіуса заокруглення призводить до зниження пробивної напруги плівки [6].

Для отримання окисних плівок великої товщини необхідно створити такі умови електролізу, при яких зменшується розчинення оксиду, який формується. Швидкість розчинення плівки в сірчаноокислому електроліті зростає майже в 10 разів при підвищенні температури на 22-23 °С. Роль теплових процесів, що протікають в зоні формування оксиду, зростає при збільшуванні товщини плівок. Це пояснюється ускладненням відведення тепла від поверхні металу в глибині пір, що може призвести до збільшення швидкості розчинення плівки і металу. Очевидно, що одним з ефективних шляхів зниження розчинності оксиду є зниження температури, при якій відбувається його формування. При цьому потрібно враховувати температуру не тільки електроліту, а й оброблюваного металу.

Тому було розроблено процес глибокого анодування при зниженій температурі електроліту і оброблюваних деталей [2, 6]. Електроліз ведуть в 20%-му розчині сульфатної кислоти при температурі від -3 до +10 °С. Для підтримки необхідної температури застосовують інтенсивне перемішування розчину очищеним стисненим повітрям або механічними мішалками і охолодження його за допомогою спеціальних

агрегатів. Анодна густина струму при глибокому анодуванні складає 2-2,5 А/дм<sup>2</sup>, в разі інтенсивного охолодження її можна підвищити до 5-10 А/дм<sup>2</sup>. Напруга на ванні по мірі збільшення товщини оксидної плівки збільшується і досягає 40-80 В. Технологічні режими процесу встановлюють з урахуванням матеріалу, з якого виготовлені оброблювані деталі, як показано в таблиці 3.

Таблиця 3

**Режими електрохімічного анодування для деяких марок алюмінієвих сплавів**

Марка сплаву	Початкова напруга, В	Кінцева напруга, В	Тривалість оксидування, хвилини	Пробивна напруга плівки, В
А7	20-25	60-65	75-90	600-800
Д16	20-25	60-65	25-30	380-450
АМг	20-25	60-70	60-90	600-800

Хорошу якість оксидних плівок дає глибоке оксидування алюмінію і його сплавів з магнієм і марганцем. А на ливарних сплавах типу силуміну (з кремнієм) пробивна напруга окисних плівок в 2-3 рази нижче, ніж на сплавах, що деформуються.

При оксидуванні підтримують постійну густину струму за допомогою реостатів, включених в ланцюг живлення ванни. Залежно від необхідної товщини оксидної плівки для більшості марок сплавів змінюють швидкість підвищення напруги від 22-26 до 30-36 В за 15 хвилин або до 45-60 В за 45 хвилин. При охолодженні і перемішуванні електроліту на алюмінії і його сплавах можна отримати оксидні плівки товщиною 40-60 мкм, а в деяких випадках – до 120-150 мкм. Добрі результати виходять, якщо застосовувати циркуляцію електроліту у ванні за допомогою кислототривких насосів. Для отримання плівок товщиною 200-300 мкм такого охолодження недостатньо, тому доводиться застосовувати внутрішнє охолодження оброблюваних деталей. Цей спосіб придатний для деталей з внутрішніми порожнинами, які не підлягають оксидуванню; через ці порожнини можна здійснити циркуляцію охолоджуючого розчину.

Як охолоджуючі засоби використовують рідкі холодоагенти або воду, попередньо охолоджену до  $-3 + 0^{\circ}\text{C}$ . Швидкість циркуляції охолоджуючого розчину повинна бути такою, щоб різниця температур при вході і виході з деталі не перевищувала 1 градус.

В таблиці 4 наведено значення мікротвердості оксидного шару, сформованого в сірчанокиислому електроліті на деяких сплавах. З таблиці видно, що мікротвердість має достатнього високі значення. У розбавленому електроліті, що містить 100 г/л  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , при

температурі від 0 до 6 °С і густині струму 2,5-4 А/дм<sup>2</sup> на сплавах АК6, В95 отримують плівки товщиною до 40-45 мкм. Напруга на ванні за час електролізу підвищується до 90-100 В. Мікротвердість плівок, отриманих на сплаві АК6, 3500-4000 МПа.

Таблиця 4

**Значення мікротвердості оксидного шару, сформованого в сірчано-кислому електроліті на деяких сплавах алюмінію**

Сплави алюмінію	Мікротвердість оксидної плівки, МПа
Технічний алюміній	5000-5200
АВ	4800-5000
Д16	3300-3500
АЛ9	4500-4800
АК6	3500-4000

Для одержання оксидних плівок великої товщини, які характеризуються високими твердістю і електроопором, запропоновано досить багато електролітів на основі сірчаної або щавлевої кислот з добавками маленової, лимонної, мелітової, борної кислот, формаміду, цукру, хлористого магнію і ряду інших сполук. Більшість цих добавок є малоефективними і тому не знайшли практичного застосування [6].

Електроізоляційні оксидні покриття на алюмінії і сплавах типів АМг, АМц, АДЗ1 можуть бути отримані в розчині, що містить 40-60 г/л щавлевої кислоти за температури 12-25 °С, анодної густини струму 2,5-3,5 А/дм<sup>2</sup>, при напрузі в кінці електролізу до 120 В та інтенсивному перемішуванні.

У порівнянні зі щавлевокислим, змішаний сірчано-щавлевокислий електроліт дозволяє отримувати оксидні плівки більшої товщини, що відрізняються великими твердістю і величиною пробивної напруги. Такого типу розчин для обробки алюмінію та його сплавів, що деформуються, за винятком сплавів, що містять більше 4,5% міді, складається з 180-200 г/л H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> і 10-20 г/л щавлевої кислоти. Електроліз ведуть за температури 10-25 °С, анодної густини струму 2-5 А/дм<sup>2</sup>, при напрузі до 90 В, інтенсивно перемішуючи електроліт. Якщо до оброблюваного виробу висуваються підвищені вимоги щодо класу шорсткості поверхні, рекомендується зменшити концентрацію сірчаної кислоти до 90-100 г/л, збільшивши вміст щавлевої кислоти до 40-50 г/л.

На сплавах Д16, АМг, АМц оксидні покриття товщиною до 80 мкм можуть бути отримані в електроліті, що містить 40-60 г/л щавлевої, 10-20 г/л лимонної, 5-10 г/л борної кислот за температури 10-40 °С і анодної густини струму 2-5 А/дм<sup>2</sup>.

Пробивна напруга непрозорих ематаль – плівок, отриманих в щавлево-титановому електроліті, становить 400-450 В, в хромово-борному електроліті – 300-400 В.

Тверді електроізоляційні оксидні покриття успішно отримують в дво- та трикомпонентних сульфосаліцилатних електролітах. У промисловості використовується електроліт, до складу якого входить 90-110 г/л сульфосалицилової, 25-35 г/л щавлевої, 3-5 г/л сірчаної кислот. Режим електролізу: температура розчину 10-25 °С, анодна густина струму 1,5-3,0 А/дм<sup>2</sup>, напруга до 100 В при постійній циркуляції або перемішуванні електроліту. При анодуванні чистого алюмінію підтримують температуру розчину 18-28 °С, сплавів АМг, АМц – від 18 до 23 °С, Д16, В95, АЛ2 – від 10 до 18 °С. Густина струму становить для алюмінію і сплавів АМг<sub>2</sub>, АМг<sub>3</sub>, АМц – 3 А/дм<sup>2</sup>, сплавів АМг, АМг<sub>6</sub>, В95, АЛ2 – 2 А/дм<sup>2</sup>, Д16 – 1,5 А/дм<sup>2</sup>. Якщо обробці піддаються великогабаритні вироби, щоб уникнути перегріву металу, доцільно в 1,5-2 рази знизити густина струму, одночасно збільшивши тривалість електролізу. Оксидування сплаву марки АД1 протягом години за температури 18-20 °С призводить до формування оксидних плівок, що мають пробивну напругу 550-750 В [6].

Для стабілізації та поліпшення електроізоляційних властивостей оксидних покриттів великої товщини після ретельного промивання в проточній воді і сушки їх просочують ізоляційним лаком або компаундом.

### **Висновки**

На результати глибокого електролітичного анодування суттєво впливає склад алюмінієвих сплавів; для одержання якісних оксидних плівок на різних сплавах застосовують різні температурні та електричні режими електролізу. Для одержання оксидних плівок великої товщини та високими механічними та електроізоляційними властивостями раціонально застосовувати сірчаноокислий електроліт за знижених температур, або щавлево-сірчаноокислий та трикомпонентний сульфосаліцилатний електроліти. При анодуванні треба ретельно додержуватись рекомендованих для кожного сплаву температури анодування, густини струму та напруги.

## Список використаних джерел

1. Сайт «Библиотека технических рецептов»: Оксидирование алюминия и его сплавов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://anytech.narod.ru/al-ox.htm>
2. Сайт «Строительство»: Глубокое анодирование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stroitelstvo-new.ru/metal/glubokoe-anodirovanie.shtml>
3. Хенли В. Ф. Анодное оксидирование алюминия и его сплавов : Монография. – М. : Металлургия, 1986. – 152 с.
4. Сайт «Impgold»: Технологическая инструкция. Твердое (глубокое) анодное оксидирование алюминия и алюминиевых сплавов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://impgold.ru/electroplating/conversion/Твердое%20\(глубокое\)%20анодирование%20алюминия.pdf](https://impgold.ru/electroplating/conversion/Твердое%20(глубокое)%20анодирование%20алюминия.pdf)
5. Сайт «МП Марта»: Справочник. Алюминий, сплавы, марки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://martametals.com.ua>
6. Сайт «Металлический портал»: Глубокое оксидирование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://metallicheckiy-portal.ru/articles/zashita\\_ot\\_korrozii\\_metalla/oksidirovanie/glubokoe\\_oksidirovanie](http://metallicheckiy-portal.ru/articles/zashita_ot_korrozii_metalla/oksidirovanie/glubokoe_oksidirovanie)

**Yablonsky Ruslan**  
[ruslanyablonsku@gmail.com](mailto:ruslanyablonsku@gmail.com)  
Kyiv National University of  
Technologies and Design

## References

1. *Sayt «Biblioteka tekhnicheskikh retseptov»: Oksidirovaniye ayuminiya i yego splavov* [Site «Library of technical recipes»: Oxidation of aluminum and its alloys]. <http://anytech.narod.ru>. Retrieved from <http://anytech.narod.ru/al-ox.htm> [in Russian].
2. *Sayt «Stroitel'stvo»: Glubokoye anodirovaniye* [Site «Construction»: Deep Anodizing]. <http://www.stroitelstvo-new.ru>. Retrieved from <http://www.stroitelstvo-new.ru/metal/glubokoe-anodirovanie.shtml> [in Russian].
3. Khenli, V. (1986). *Anodnoye oksidirovaniye alyuminiya i yego splavov* [Anodic oxidation of aluminum and its alloys]. Moscow [in Russian].
4. *Sayt «Impgold»: Tekhnologicheskaya instruktsiya. Tverdoye (glubokoye) anodnoye oksidirovaniye alyuminiya i alyuminiyevykh splavov* [Site «Impgold»: Technology Instruction. Solid (deep) anodic oxidation of aluminum and aluminum alloys]. <https://impgold.ru>. Retrieved from [https://impgold.ru/electroplating/conversion/Твердое%20\(глубокое\)%20анодирование%20алюминия.pdf](https://impgold.ru/electroplating/conversion/Твердое%20(глубокое)%20анодирование%20алюминия.pdf) [in Russian].
5. *Sayt «MP Marta»: Spravochnik. Alyuminiy, splavy, marki* [Site «MP Marta»: Reference. Aluminum, alloys, grades]. <http://martametals.com.ua>. Retrieved from <http://martametals.com.ua>
6. *Sayt «Metallicheskiy portal»: Glubokoye oksidirovaniye* [Site «Metal Portal»: Deep Oxidation]. Retrieved from [http://metallicheckiy-portal.ru/articles/zashita\\_ot\\_korrozii\\_metalla/oksidirovanie/glubokoe\\_oksidirovanie](http://metallicheckiy-portal.ru/articles/zashita_ot_korrozii_metalla/oksidirovanie/glubokoe_oksidirovanie) [in Russian].

**Borysenko Yulia**  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1639-0205>  
Scopus Author ID: [57207989822](https://orcid.org/0000-0002-1639-0205)  
[boria95@ukr.net](mailto:boria95@ukr.net)  
Kyiv National University of  
Technologies and Design



**Особенности глубокого электролитического оксидирования алюминия и его сплавов****Яблонский Р. В., Борисенко Ю. В.***Киевский национальный университет технологий и дизайна***Цель.** Исследовать особенности глубокого электролитического оксидирования алюминия и его сплавов, в частности, для получения электроизоляционного оксидного слоя.**Методика.** Сравнительная характеристика современных литературных данных.**Результаты.** Рассмотрены и проанализированы различные электролиты для глубокого электролитического оксидирования и режимы оксидирования различных алюминиевых сплавов; показано, что важно поддерживать низкую температуру, чтобы избежать растворения оксидной пленки в сернокислом электролите, перемешивать электролит; показано также, что различные сплавы алюминия при глубоком оксидировании требуют различных режимов электролиза.**Научная новизна.** На результаты глубокого электролитического анодирования существенно влияет состав алюминиевых сплавов; для получения качественных оксидных пленок на различных сплавах применяют различные температурные и электрические режимы электролиза.**Практическая значимость.** Для получения оксидных пленок большой толщины и высокими механическими и электроизоляционными свойствами рационально применять сернокислый электролит при пониженных температурах, или щавелево-сернокислый и трехкомпонентный сульфосалицилатный электролиты; при этом необходимо тщательно соблюдать рекомендованные для каждого сплава температуры анодирования, плотности тока и напряжение.**Ключевые слова:** глубокое электролитическое оксидирование алюминия, анодирование алюминия**Features of deep electrolytic oxidation of aluminum and its alloys****Yablonsky R. V., Borysenko Yu. V.***Kiev National University of Technology and Design***Purpose.** To study the features of deep electrolytic oxidation of aluminum and its alloys, in particular, to obtain an electrical insulating oxide layer.**Methodology.** Comparative characteristics of modern literature data.**Findings.** Various electrolytes for deep electrolytic oxidation and oxidation modes of various aluminum alloys were examined and analyzed; It was shown that it is important to maintain a low temperature in order to avoid dissolution of the oxide film in the sulfuric acid electrolyte, to mix the electrolyte, and also that various aluminum alloys require different electrolysis modes during deep oxidation.**Originality.** The composition of aluminum alloys significantly affects the results of deep electrolytic anodizing; Various temperature and electric modes of electrolysis are used to obtain high-quality oxide films on various alloys.**Practical value.** To obtain oxide films of large thickness and high mechanical and electrical insulating properties, it is rational to use a sulfate electrolyte at low temperatures, or oxalic sulfate and three-component sulfosalicylate electrolytes; at the same time, it is necessary to carefully observe the anodizing temperatures, current density and voltage recommended for each alloy.**Keywords:** deep electrolytic oxidation of aluminum, anodizing of aluminum