

УДК 621.432

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.20-27](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.20-27)**В.М. Гвоздецький**, ст. наук. співр., канд. техн. наук*Фізико-механічний інститут НАН України, м. Львів, Україна***С.І. Маркович**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна***Х.Р.Задорожна**, наук. співр., канд. техн. наук, **М.М. Студент**, ст. наук. співр., д-р техн. наук*Фізико-механічний інститут НАН України, м. Львів, Україна**e-mail: gvodetcki@gmail.com, e-mail: markob0@ukr.net, e-mail: 880988@ukr.net, e-mail: student.phmi@gmail.com*

Дослідження впливу температури електроліту при імпульсному анодуванні на властивості поверхневих шарів технічного алюмінію

Імпульсне анодування формує оксидні шари на алюмінієвих сплавах, що дозволяє отримати поверхневі шари з високою твердістю (до 2000 HV), низьким коефіцієнтом тертя, високою адгезією до металевої основи та низькою екологічною небезпекою. Проведено дослідження впливу температури імпульсного анодування на структуру та зносостійкість анодованих шарів. Встановлено, що більше молекул води та сірки в анодованому шарі, то менша його мікротвердість та абразивна зносостійкість. Мінімальний знос анодованого шару, а значить найвищу його зносостійкість, зафіксовано для шарів, синтезованих за температури анодування -8°C , а максимальний знос та найменшу зносостійкість за температури анодування -5°C . Висока зносостійкість анодованих шарів, синтезованих за температур електроліту від -8 до $+10^{\circ}\text{C}$ за умов тертя без мащення зумовлена наявністю кристалічної води в анодованому шарі.

алюмінієві сплави, температура імпульсного анодування, структура, твердість, зносостійкість

Постановка проблеми. Алюмінієві сплави широко використовують у промисловості завдяки їх високій конструкційній міцності та ливарним властивостям, низькій питомій вазі та температурі плавлення, проте алюмінієві сплави характеризуються низькою абразивною зносостійкістю, що суттєво стримує їх широке використання в технологічних середовищах, особливо за наявності в них абразивних часточок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для покращення твердості й абразивної зносостійкості застосовують методи гальванічного хромування, термічного напилення, плазмово-електролітичного оксидування (ПЕО) [1-3] і твердого анодування (НА) [4]. Використання канцерогенних та екологічно шкідливих електролітів під час впровадження методу хромування робить його екологічно небезпечним [5]. Отримання алюмінієвих сплавів дозволяє зберегти поверхневі шари з високою твердістю (до 2000 HV), низьким коефіцієнтом тертя, високою адгезією до металевої основи та низькою екологічною небезпекою. Метод синтезу НАL досить дешевий і технологічно простий. Тому він широко використовується в промисловості. Однак через суттєві недоліки (низька твердість ≤ 500 HV і зносостійкість) його широке застосування для поверхневого зміцнення різних елементів обмежене [6, 7]. Тверде анодування, реалізоване в режимі імпульсних струмів, має суттєві переваги порівняно з твердим анодуванням за постійного струму. Суть методу імпульсного анодування полягає в

періодичній зміні густини струму. Впродовж періоду з низькою густиною струму тепло, що утворюється на поверхні анодованого зразка, ефективно розсіюється, тоді як під час періоду високої густини струму інтенсифікується процес утворення оксиду. Тому підвищення міцності та стійкості до стирання анодованих шарів на алюмінієвих сплавах є актуальною проблемою [8, 9].

Постановка завдання. Провести дослідження впливу температури електроліту при імпульсному анодуванні на властивості поверхневих шарів технічного алюмінію.

Виклад основного матеріалу. Формування анодованого шару. Процес імпульсного жорсткого анодування проводили у 20% водному розчині H_2SO_4 за густини струму $1,4 \text{ A/дм}^2$ з частотою 100 Гц з шпаруватістю (СК) 75% (рис. 1).

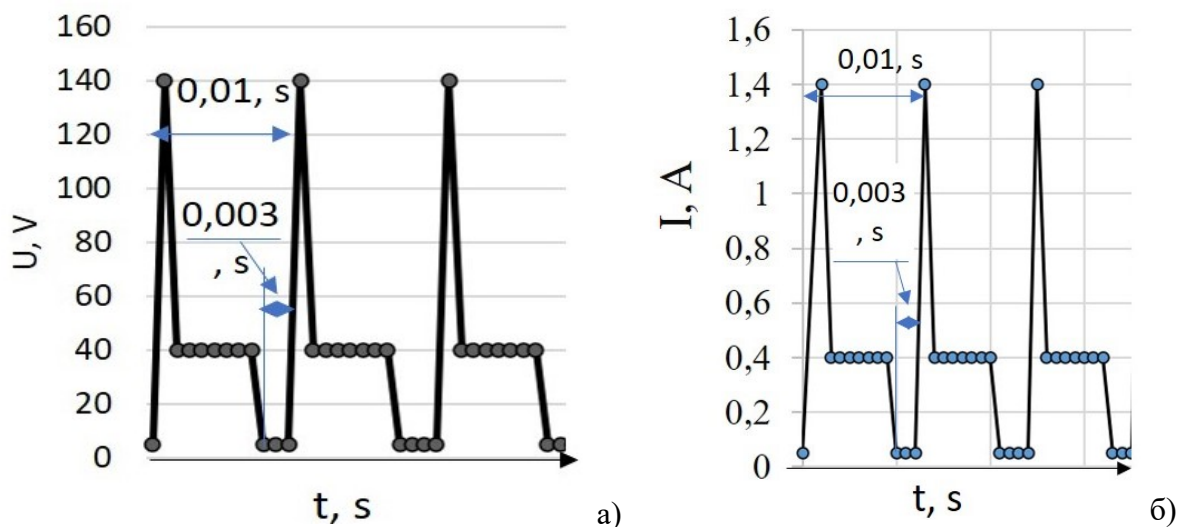


Рисунок 1 – Зміна густини струму а) та напруги б) робочого циклу (DC) в процесі імпульсного холодного анодування

Джерело: розроблено авторами

Температуру електроліту під час формування шарів підтримували на рівні, $-5^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$, $0^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}$, $+5^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}$, $+10^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}$. Тривалість синтезу становила 60 хв. Принципова схема установки для створення шарів наведена на рис. 2. З технічного алюмінію (0,05 Cu; 0,05 Mn; 0,05 Mg; 0,05 Ti; решта Al) виготовлено зразки для анодування у вигляді пластин розміром $20\times 20\times 5$ мм. Перед анодуванням зразки знежирювали у водному розчині суміші (CaO + MgO) і промивали холодною та теплою водою з наступним освітленням у водному розчині азотної кислоти ($400 \text{ г/л } HNO_3$) протягом 30 с. та промиванням у дистильованій воді. Для атестації шарів, отриманих методом анодування, використовували дві характеристики: мікротвердість HV, виміряну на приладі ПМТ-3 при навантаженні 50 г, та абразивну зносостійкість методом фіксованого абразиву $1/W$, визначену за втратою маси W зразки, отримані на електронних аналітичних вагах типу KERN ABJ 220 4M з точністю $2\cdot 10^{-4} \text{ г}$.

Дослідження абразивної зносостійкості проводили згідно розробленої методики [10].

Структуру та мікрорентгено спектральний аналіз твердих анодованих шарів досліджували на електронному мікроскопі EVO 40 XVP із системою мікроаналізу INCA Energy 350. Для фазового аналізу синтезованих шарів використовували рентгенівський дифрактометр BRUKER D8 DISCOVER.

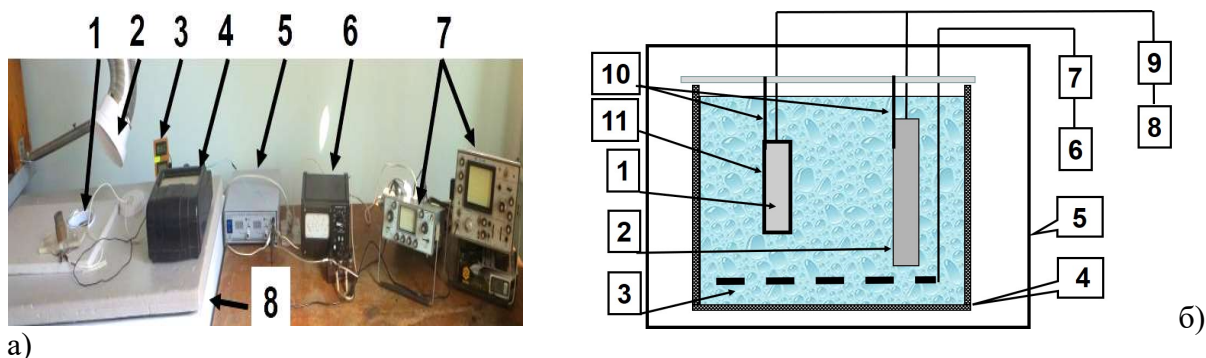


Рисунок 2 – Обладнання для анодування – (а) 1 - ємність з електролітом, 2 - витяжна, 3 – прилад контролю температури електроліту, 5 – джерело живлення для підтримання густини струму 5 A/дм^2 між зразком та електродом, 6 – блок регулювання частоти імпульсів, 7 – прилади контролю напруги та частоти імпульсів на зразку, 8 - камера для стабілізації температурного режиму процесу анодування у діапазоні $-4 \dots 0^\circ\text{C}$, та принципова схема установки (б) 1 – зразок для анодування; 2 – електрод; 3 – барботер; 4 – ємність з електролітом (20 % водний розчин H_2SO_4); 5 – камера для стабілізації температурного режиму процесу анодування у діапазоні $-4-0^\circ\text{C}$; 6 – компресор; 7 – блок регулювання продуктивності барботера та компресора; 8 – джерело живлення для підтримання густини струму 5 A/дм^2 між зразком та електродом; 9 – блок регулювання та контролю потужності джерела живлення, 10 – кріплення електрода та зразка, 11 – анодний шар

Джерело: розроблено авторами

Результати досліджень. Анодовані шари містять у своєму складі молекули води і чим вища температура анодування, тим більша їх кількість. Очевидно, що верхні шари анодованого шару містять більше молекул води, внаслідок тривалішого контакту з електролітом.

За низьких температур менше -5°C внаслідок низької швидкості електрохімічних процесів синтезуються оксидні шари із пониженою мікротвердістю та товщиною. Фазовим аналізом при цьому зафіксовано синтез оксидного шару на основі алюмінію із вмістом двох фаз: синтез анодованого шару починається з утворення гідратованого оксиду алюмінію $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ зі структурою Pbnm, ($a= 4.40 \text{ \AA}$, $b= 9.39 \text{ \AA}$, $c= 2.84 \text{ \AA}$) – беміту, яка містить одну молекулу води та фази $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ – зі структурою P21/n ($a= 8.624 \text{ \AA}$, $b= 5.060 \text{ \AA}$, $c= 9.700 \text{ \AA}$) – гібситу, яка містить три молекули води.

Із підвищенням температури анодування швидкість електрохімічних процесів зростає, що зумовлює зростання товщини анодованого шару (рис. 3), так і його мікротвердості рис. 19. За температури 0°C , та -5°C анодований шар містять лише одну фазу - $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, (беміт) з однією молекулою води. За температури анодування $+5^\circ\text{C}$ та -8°C анодований шар знову формується у вигляді двох фаз - $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (гібситу). та $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (беміту) а за температури $+10^\circ\text{C}$ лише $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (гібситу).

Результати оцінювання товщини імпульсним твердим анодуванням шару (ІТАШ) в залежності від температури електроліту T під час анодування, наведені на рисунку 4а. Оскільки за температури нижчої -10°C електроліт перетворюється в гелеподібну субстанцію, в якій електрохімічні реакції практично припиняються, то розпочали синтез ІТАШ за температури -5°C . Проте внаслідок синтезу за $T = -5^\circ\text{C}$ і потім і вищої (аж до 0°C) середнє значення товщини ІТАШ зростало від 83 мкм до 110 мкм . За подальшого підвищення температури електроліту товщина ІТАШ зменшувалася і за температури електроліту $+10^\circ\text{C}$ становила 80 мкм . Такий характер зміни товщини анодованого шару від температури синтезу пояснили двома протиборними процесами, які відбуваються під час анодування. Із зростанням температури електроліту перш за все інтенсифікується процес синтезу ІТАШ, а отже товщина отриманого шару мала би постійно зростати зі зростанням температури синтезу. Проте зростання температури електроліту інтенсифікує також поверхневе

розчинення анодованого шару, яке спрямоване на зменшення товщини анодованого шару. І коли швидкість розчинення анодованого шару починає перевищувати швидкість його синтезу, то його товщина починає зменшуватися.

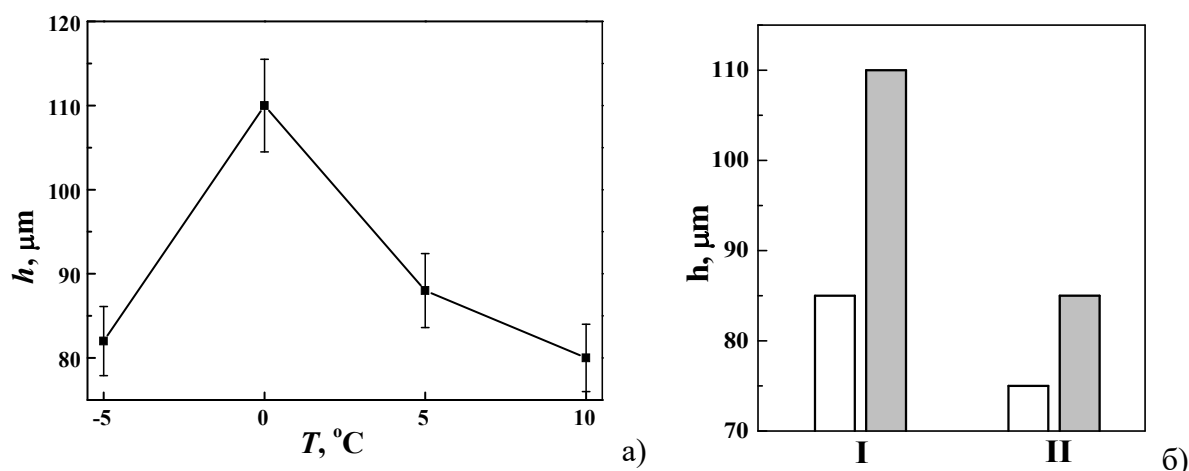


Рисунок 3 – (а) Вплив температури електроліту T під час імпульсного твердого анодування тривалістю 1 година на товщину h синтезованих ІТАШ та (б) вплив режиму синтезу твердого анодованих шарів (ТАШ) за постійного (білі стовпчики) та імпульсного (сірі стовпчики) струмів на товщину анодованих шарів h , отриманих за температури $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (I) та $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (II)

Джерело: розроблено авторами

Отримана закономірність зміни товщини ІТАШ від температури електроліту однозначно підтвердила закономірність зниження швидкості росту ІТАШ за температури понад 0°C через перевищення швидкості процесу електрохімічного розчинення синтезованого шару (внаслідок взаємодії з наявною в електроліті кислотою) над його швидкістю синтезу. Отже, оскільки чим нижча температура синтезу, тим менш інтенсивно анодовані шари розчиняються через взаємодію з кислотою, то і дослідники, і виробники віддають перевагу низькій температурі процесу анодування. Її вибір оптимізують таким чином, щоб температура синтезу, з одного боку, забезпечувала би все ще достатньо високу швидкість росту ІТАШ, а, з другого, – мінімізувала би шкідливий ефект розчинення синтезованого шару через його роз'їдання кислотою.

Застосування імпульсного твердого анодування дає змогу додаткове підвищити товщину синтезованого шару h відносно отриманого з використанням традиційного твердого анодування за стабільного струму. Як показано на рисунку 4 за імпульсного режиму синтезу анодованого шару його товщину можна підвищити на 15-20% за обох температур електроліту: і за пониженої, а саме -5°C , рисунок 4б (I), і за підвищеної, а саме $+5^{\circ}\text{C}$, рисунок 10б (II). Але при цьому в обох синтезованих шарах (ТАШ та ІТАШ) підвищення температури електроліту зменшувало товщину анодованого шару (на 55 % за синтезу в режимі ТА, і на 75% за синтезу у режимі ІТА, рисунок 4, білі і сірі стовпчики відповідно).

Отже з підвищенням температури електроліту понад $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ товщина анодованого шару зменшувалася незалежно від використаного режиму синтезу (за постійного чи за імпульсного струмів). В обох випадках попри інтенсифікацію обох електрохімічних процесів зменшення товщини анодованого шару за температури $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ зумовлено його розчинення ніж синтезом.

Найвищу мікротвердість та, відповідно, абразивну зносостійкість $1/W$ зафіксували для ІТАШ із однією молекулою води $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (беміт), синтезованого за температури електроліту -5°C . Саме з її появою у структурі анодованого шару

пов'язали максимальний ефект зміцнення. Однак, з підвищенням температури електроліту під час імпульсного анодування мікротвердість і абразивна зносостійкість ІТАШ знижувалися. Це пов'язали з формуванням в анодованих шарах оксиду алюмінію $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ з більшою кількістю молекул води та структурою гібситу.

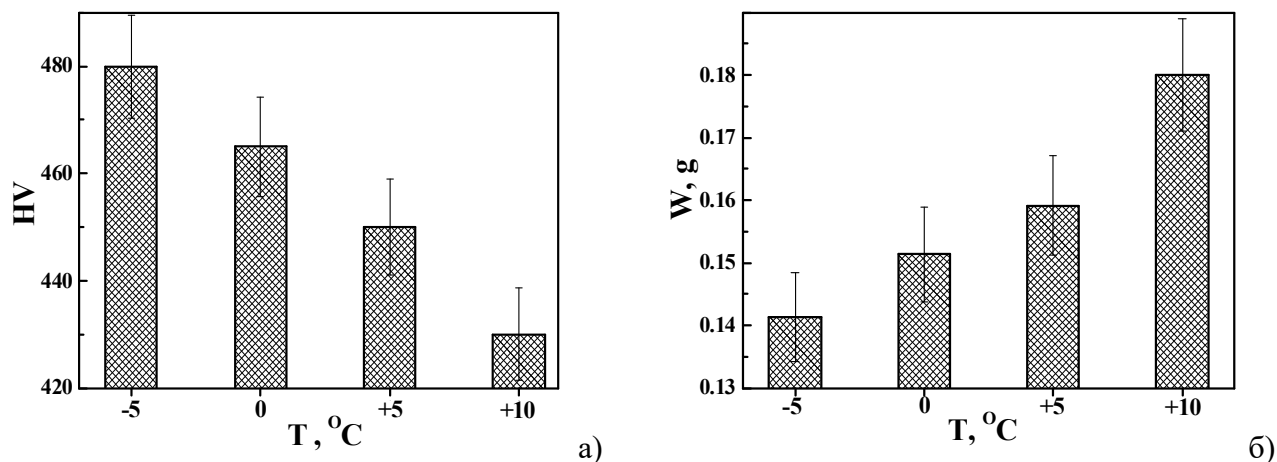


Рисунок 4 – Вплив температури електроліту під час синтезу імпульсно-анодованих шарів на поверхні алюмінієвого сплаву 1011 на їх (а) мікротвердість HV та (б) втрату маси W після випробувань на абразивну зносостійкість в умовах із закріпленням абразивом

Джерело: розроблено авторами

На основі представлених на рисунку 4 результатів вважали, що встановлені закономірності зміни мікротвердості та абразивної зносостійкості ІТАШ, пов'язані з особливостями дегідратації анодованих шарів, синтезованих за різної температури електроліту. Крім того відзначили, що закономірність зміни обох цих показників від температури синтезу корелює також із зміною вмісту сірки в анодованих шарах, як це показано на рисунку 5 за результатами оцінювання вмісту сірки в анодованих шарах на основі їх рентгенофазового аналізу.

Визначено зростання вмісту сірки у складі ІТАШ в міру зростання температури їх синтезу. Максимально високий її вміст (5,7 мас. %) виявили в ІТАШ, синтезованому за температури $+10^{\circ}C$, а за температур анодування в діапазоні від -5 до $0^{\circ}C$ зафіксували її найнижчий вміст (4,75 мас. %).

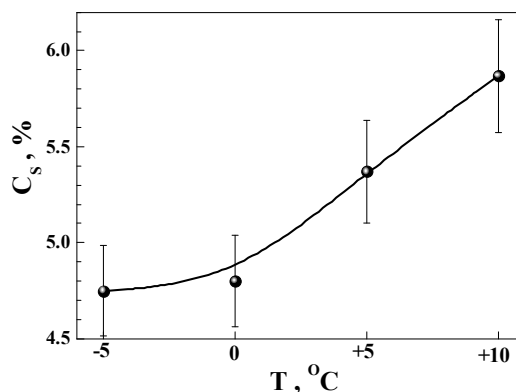


Рисунок 5 – Вплив температури електроліту T під час імпульсного твердого анодування алюмінієвого сплаву 1011 на вміст сірки CS, визначений за результатами рентгенофазового аналізу на поверхні синтезованого шару ІТАШ

Джерело: розроблено авторами

Отже мінімальний знос та, відповідно, найвищу зносостійкість зафіксовано для анодованого шару, синтезованого за температури -5°C . Проаналізувавши отримані результати, підсумували, що мікротвердість HV та абразивна зносостійкість 1/W ІТАШ були вищими, за меншої кількості молекул води, що входила до складу оксидів алюмінію, та нижчого вмісту сірки, що досягалося синтезом ІТАШ за мінусової температури електроліту.

Висновки:

1. Що більше молекул води та сірки в анодованому шарі, то менша його мікротвердість та абразивна зносостійкість.

2. Мінімальний знос анодованого шару, а значить найвищу його зносостійкість, зафіксовано для шарів, синтезованих за температури анодування -8°C , а максимальний знос та найменшу зносостійкість за температури анодування -5°C .

3. Висока зносостійкість анодованих шарів, синтезованих за температур електроліту від -8 до $+10^{\circ}\text{C}$ за умов тертя без мащення зумовлена наявністю кристалічної води в анодованому шарі.

Список літератури

1. Cr_2O_3 Sealing of Anodized Aluminium Alloy by Heat Treatment / Junghoon Lee, Yonghwan Kim, Heuiun Jang, Uoochang Jung and Wonsub Chung. *Procedia Engineering*. 2011. 10. P. 2803–2808.
2. Оцінка розподілу включень і дефектів плазмоелектролітних і лазерно модифікованих покриттів на алюмінієвих сплавах / І.Б. Івасенко та ін. *Наукові нотатки: міжвуз. зб.*, 2019. Вип. №66. С. 135–140.
3. Електрохімічне окиснення алюмінію і його сплавів: метод. вказівки до лаб. роб. для студентів спеціальності «Технічна електрохімія» денної та заочної форм навчання / уклад.: О.І. Пилипенко. Х. : НТУ «ХП», 2016. 36 с
4. Shih H., Tzou S. Study of anodic oxidation of aluminum in mixed acid using a pulsed current. *Surface and Coatings Technology*. 2000. 124. P. 278–285.
5. Хімічна корозія та захист металів : навчальний посібник / П. І. Стоєв та ін. Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. 216 с
6. Anodic aluminum oxide films formed in mixed electrolytes of oxalic and sulfuric acid and their optical constants / Li-Rong Zhao, Jian Wang, Yan Li, Cheng-Wei Wang, Wei-Min Liu. *Physica B.: Condensed Matter*. 2010. 405. №11. P.456-460
7. Alloy in the hard anodizing process / P. Kwolek, K. Krupa, A. Obłój, P. Kocurek, M. Wierzbińska, J. Sieni. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2018. 27. P. 3268–3275
8. Вплив складу електроліту на характеристики синтезованого під час твердого анодування алюмінію оксидного шару / М.М. Студент та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр.* 2021. Вип. 4 (35). С. 63–69.
9. Зносостійкість та корозійна тривкість ПЕО шарів на покритті зі сплаву Д16 / Г. Г. Веселівська та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2017. Вип. 47, ч. 2. С. 31-37.
10. Багатофункціональні електродугові покриття : монографія / М. М. Студент та ін. Львів : Простір-М, 2018. 335 с.

Referencis

1. Junghoon Lee, Yonghwan Kim, Heuiun Jang, Uoochang Jung and Wonsub Chung (2011). Cr_2O_3 Sealing of Anodized Aluminium Alloy by Heat Treatment. *Procedia Engineering*, 10, P. 2803–2808 [in English]
2. Ivasenko, I.B., Zadorozhna, Kh.R., Posuvailo, V.M. et al. (2019). Otsinka rozpodilu vkluchen i defektiv plazmoelektrolitnykh i lazerno modyfikovanykh pokryttiv na aliuminiievykh splavakh [Evaluation of the distribution of inclusions and defects of plasma-electrolyte and laser-modified coatings on aluminum alloys] . *Naukovi notatky : Mizhvuzivskyi zbirnyk – Scientific notes: interuniversity. coll, Vol. 66*, 135–140 [in Ukrainian]
3. Pylypenko, O.I. (Eds.). (2016). Elektrokhimichne oksyduvannia aliuminiuu i yoho splaviv : Metodychni vkazivky do laboratornoi roboty dlia studentiv spetsialnosti «Tekhnichna elektrokhimiiia» dennoi ta zaочноi form navchannia [Electrochemical oxidation of aluminum and its alloys: method. directions to

- the lab. do for full-time and part-time students of the "Technical Electrochemistry" specialty] . Kharkiv : NTU «KhPI» [in Ukrainian]
4. Shih, H. & Tzou, S. (2000). Study of anodic oxidation of aluminum in mixed acid using a pulsed current. *Surface and Coatings Technology*. 124, P. 278–285 [in English]
 5. Stoiev, P.I., Lytovchenko, S.V., Hirka, I.O. & Hrytsyna, V.T. (2019). *Khimichna koroziiia ta zakhyst metaliv* [Chemical corrosion and protection of metals]. Kharkiv : KhNU imeni V. N. Karazina [in Ukrainian]
 6. Li-Rong Zhao, Jian Wang, Yan Li, Cheng-Wei Wang, Wei-Min Liu. (2010). Anodic aluminum oxide films formed in mixed electrolytes of oxalic and sulfuric acid and their optical constants / *Physica B: Condensed Matter*, 405, №11, P.456–460 [in English]
 7. Kwolek P., Krupa K., Obłój A., Kocurek P., Wierzbińska M. & Sieni J.. (2018). Alloy in the hard anodizing process / *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, P. 3268–3275 [in English]
 8. Student, M.M., Hvozdettskyi, V.M., Veselivska, H.H. et al. (2021). Vplyv skladu elektrolitu na kharakterystyky syntezovanoho pid chas tverdoho anoduvannia aliuminiuu oksydnoho sharu [Influence of the electrolyte composition on the characteristics of the oxide layer synthesized during hard anodization of aluminum]. *Tsentrálnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences, Issue 4 (35)*, 63–69 [in Ukrainian]
 9. Veselivska, H.H., Sirak, Ya.Ya., Hvozdettskyi, V.M. et al. (2017). Znosostiikist ta koroziiina tryvkist PEO shariv na pokrytti zi splavu D16 [Wear resistance and corrosion resistance of PEO layers on D16 alloy coating] . *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn : zahalnoderzh. mizhvid. nauk.-tekhn. zb – Design, production and operation of agricultural machines: general government. between science and technology coll, Issue 47, part. 2*, 31-37 [in Ukrainian]
 10. Student, M.M., Pokhmurska, H.V. & Hvozdettskyi, V.M. et al. (2018). *Bahatofunktsionalni elektroduhovi pokryttia* [Багатофункціональні електродугові покриття]. Lviv : Prostir-M [in Ukrainian]

Volodymyr Hvozdetskii, Senior Researcher, PhD tech. sci.

Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

Sergiy Markovych, Assos. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Khrystyna Zadorozhna, PhD tech. sci., Senior Researcher, **Mykhajlo Student**, DSc., Senior Researcher

Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

Study of the Influence of the Temperature of the Electrolyte During Pulse Anodization on the Properties of the Surface Layers of Technical Aluminum

Aluminum alloys are characterized by low abrasive wear resistance, which significantly restricts their wide use in technological environments, especially if they contain abrasive particles. The method of pulse anodizing, which consists in periodically changing the current density, allows to improve the hardness and abrasive wear resistance. However, the influence of temperature on these processes has not been sufficiently studied.

The process of pulsed hard anodizing was carried out in a 20% aqueous H₂SO₄ solution at a current density of 1.4 A/dm² with a frequency of 100 Hz and a sparsity of 75%. The temperature of the electrolyte during the formation of layers was maintained at -5±1°C, 0°C±1, +5°C±1, +10°C±1. The duration of synthesis was 60 minutes.

At low temperatures of less than -5°C due to the low speed of electrochemical processes, oxide layers with reduced microhardness and thickness are synthesized. At the same time, the phase analysis recorded the synthesis of an oxide layer based on aluminum with the content of two phases: the synthesis of the anodized layer begins with the formation of hydrated aluminum oxide Al₂O₃·H₂O. As the anodizing temperature increases, the rate of electrochemical processes increases, which leads to an increase in the thickness of the anodized layer and its microhardness. At temperatures of 0°C and -5°C, the anodized layer contains only one phase - Al₂O₃·H₂O, (boehmite) with one water molecule. At anodizing temperatures of +5°C and -8°C, the anodized layer is formed again in the form of two phases - Al₂O₃·3H₂O (gibbsite) and Al₂O₃·H₂O (boehmite) and at a temperature of +10°C only Al₂O₃·3H₂O (gibbsite). At a temperature lower than -10°C, the electrolyte turns into a gel-like substance in which electrochemical reactions practically stop, so the synthesis of a pulsed solid anodized layer at a temperature of -5°C was started. However, as a result of the synthesis at T = -5 °C and then even higher (up to 0°C), the average thickness of the pulsed hard anodized layer increased from 83 μm to 110 μm. With further increase in the temperature of the electrolyte, the thickness decreased and at an electrolyte temperature of +10 °C it was 80 μm. Such a change in the thickness of the anodized layer depending on the synthesis temperature was explained by two opposing processes that occur during anodization. As the temperature of the electrolyte increases, the process of synthesis of the layer intensifies first of all, and therefore

the thickness of the obtained layer should constantly increase with the increase of the synthesis temperature. However, an increase in the temperature of the electrolyte also intensifies the surface dissolution of the anodized layer, which is aimed at reducing the thickness of the anodized layer. And when the rate of dissolution of the anodized layer begins to exceed the rate of its synthesis, its thickness begins to decrease.

Conclusions: 1) The more water and sulfur molecules in the anodized layer, the lower its microhardness and abrasive wear resistance. 2) The minimum wear of the anodized layer, which means the highest wear resistance, was recorded for layers synthesized at an anodization temperature of -8°C , and the maximum wear and lowest wear resistance at an anodization temperature of -5°C . 3) High wear resistance of anodized layers synthesized at electrolyte temperatures from -8 to $+10^{\circ}\text{C}$ under conditions of friction without lubrication is caused by the presence of crystalline water in the anodized layer.

aluminum alloys, pulse anodizing temperature, structure, hardness, wear resistance

Одержано (Received) 03.07.2023

Прорецензовано (Reviewed) 23.09.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023