

УДК 621.891

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.182-187>

**М.М. Студент**, ст. наук. співр., д-р техн. наук  
*Фізико-механічний інститут НАН України, м. Львів, Україна*  
*e-mail: student.phmi@gmail.com*

**С.І. Маркович**, доц., канд. техн. наук  
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*  
*e-mail: markob0@ukr.net;*

**В.М. Гвоздецький**, ст. наук. співр., канд. техн. наук  
*e-mail: gvosdetcki@gmail.com*

**Х.Р. Задорожна**, наук. співр., канд. техн. наук

**І.В. Ковальчук**, мол. наук. співр., канд. техн. наук

**Ю.В. Дзьоба**, гол. інж.

*Фізико-механічний інститут НАН України, м. Львів, Україна*

## Зносостійкість оксидних шарів сформованих методом твердого анодування (hard anodic coatings) при зміцненні деталей агропромислової техніки

Синтез анодованого шару на сплаві алюмінію виконували у 20 % розчині сірчаної кислоти за температури  $-8\dots-^{\circ}\text{C}$ . Під час анодування густина струму становила  $5\text{ А/дм}^2$ . Час анодування становив 60, 120 та 180 хв. Проводили металографічні дослідження та фазовий аналіз анодованих шарів. Зменшення вмісту вологи проводили за температури  $400^{\circ}\text{C}$  впродовж 60 хв. Встановлено, що оксидний шар ( $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) під час твердого анодування на алюмінієвих сплавах формують не лише йони кисню, які утворюються внаслідок розкладу води, а також його нейтральні атоми, які формуються з розчину. Виявлено, із збільшенням часу анодування зростає мікротвердість та товщина шару. Після термічної обробки кількість молекул води зменшується і мікротвердість зростає. Підвищення мікротвердості сприяє зростанню опору абразивному зношуванню.

**тверде анодування, алюміній, анодований шар, пори, зносостійкість**

**Постановка проблеми.** В останні роки у агропромисловому виробництві відбувається тенденція на заміну чавунних деталей на деталі із алюмінієвих сплавів при несенні на поверхню зміцнюючого шару [1-4]. Виробництво чавуну супроводжується викидом великої кількості вуглекислого газу в атмосферу. Заміна чавунних деталей на алюмінієві зменшить кількість викидів вуглекислого газу в атмосферу, та суттєво зменшить вагу конструкцій [5-8].

Тверде анодування застосовується практично в усіх галузях промисловості: авіаційна та автомобільна промисловості; пневматика і гідравліка; електроніка; нагрівальні платформи та плитки; медичні прилади.

Особливо велику кількість шківів використовують на комбайнах, при експлуатації яких хмари з пилу, відіграючи роль абразиву, суттєво зменшують їх ресурс. Однак деталі із алюмінієвих сплавів мають малу абразивну зносостійкість, що може суттєво обмежити їх експлуатаційний ресурс.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Серед деталей, що виготовляються із алюмінієвих сплавів є поршні, зубчаті передачі, шківни та шестерні рис.1, рис.2. Для захисту від абразивного зношування алюмінієвих сплавів використовують методи

газотермічного нанесення захисних покриттів, гальванічне нанесення хромового покриття, а в останні роки метод плазмоелектролітного оксидування та холодного анодування (Hard Anodic Coatings).



Рисунок 1 – Шестерні з нанесеним керамічним шаром методом твердого анодування

*Джерело: розроблено авторами*

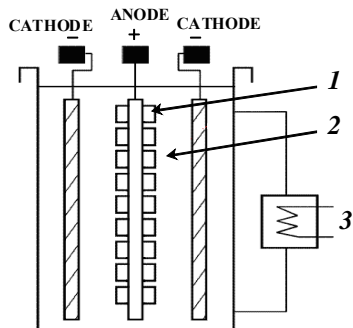


Рисунок 2 – Вигляд анодованого та не анодованого шківів колінвала

Серед переваг холодного анодування алюмінієвих сплавів є використання екологічно чистих електролітів, технологічно нескладний та енергетично-економний процес. Однак суттєвим недоліком є порівняно мала мікротвердість – 400...450 HV, а відповідно і зносостійкість анодованих шарів.

**Постановка завдання.** Підвищення механічні характеристик алюмінієвих сплавів методом формування анодованих шарів на їх поверхні. Змінити час анодування та склад анодованого шару для збільшення товщини анодового шару та підвищення мікротвердості. Визначити вплив часу формування анодованого шару на зміну його властивостей.

**Виклад основного матеріалу.** Процес твердого анодування проводили за температури  $-8...-4^{\circ}\text{C}$  впродовж 60 хв. використовуючи установки наведену на рис. 3., електролітом слугував 20%-ий водний розчин  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . В процесі анодування підтримували густину струму  $5 \text{ A/dm}^2$ . Зразки з технічного алюмінію АД0 (1011) (0,25 мас.% Si; 0,40 мас.% Fe; 0,05 мас.% Cu; 0,05 мас.% Mn; 0,05 мас.% Mg; 0,05 мас.% Ti; решта Al) розміром  $20 \times 20 \times 5 \text{ мм}$  перед анодуванням знежирували віденським вапном (водний розчин суміші CaO + MgO) та промивали в холодній і теплій воді з наступним освітленням у водному розчині нітратної кислоти ( $400 \text{ g/l HNO}_3$ ). Після освітлення зразки просушували гарячим повітряним струменем впродовж 3...5 хв та, під'єднавши до анодної напруги, занурювали в електроліт.



1 – навіска з деталями; 2 – електроліт; 3 – рециркуляція та охолодження електроліту  
Рисунок 3 – Схема установки для твердого анодування алюмінієвих сплавів

*Джерело: розроблено авторами*

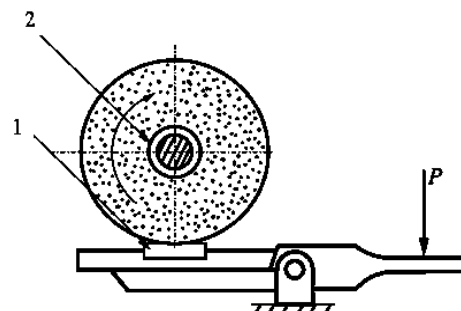


Рисунок 4 – Схеми випробування абразивним зносом при використанні жорстко закріпленого абразиву (1 зразок, 2 абразивний круг) Р-навантаження

Мікротвердість визначали по товщині анодованих шарів за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 (ГОСТ 9450-76). Структуру досліджували у характеристичному випромінюванні BSD на електронному мікроскопі EVO 40 XVP. Фазовий аналіз виконано на рентгенівському дифрактометрі BRUKER D8 DISCOVER. Абразивну зносостійкість визначали за використання абразивного круга рис.4.

**Результати та їх обговорення.** На рис. 5 показано схематичне зображення морфології пористої анодної плівки, яка складається з тонкого бар'єрного шару, розташованого на межі розділу метал/плівка, і зовнішньої пористої області, що містить циліндричні пори, які виходять з поверхні плівки до бар'єрного шару. Плівка має щільний набір стовпчастих шестикутних комірок, кожна з центральною, циліндричною, рівномірною порою. Бар'єрний шар на дні кожної комірки має напівсферичну форму.

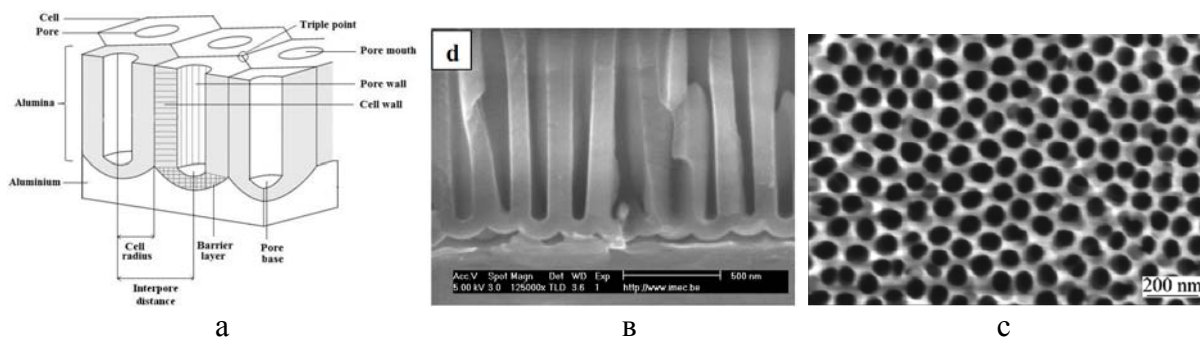
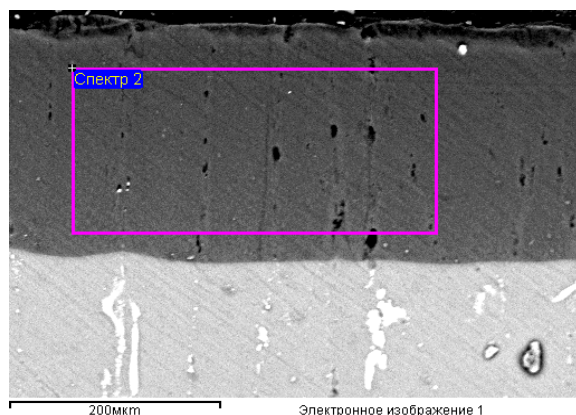


Рисунок 5 – Схематичне зображення структури анодного шару – а, реальне зображення анодного шару поперечний переріз – в, вид зверху – с

*Джерело: розроблено авторами*

У структурі анодних шарів присутні пори двох типів: крупні ( $\leq 5 \mu\text{m}$ ) та нанометрової величини ( $\leq 50 \text{ nm}$ ). Кількість пор в анодованому шарі зростає зі збільшенням тривалості анодування. Як правило, нанометрова поруватість анодованого шару не перевищує 11...13 об.%. Крупні пори, на наш погляд, виникають внаслідок витравлювання електролітом включень інтерметалідів заліза та міді. у структурі алюмінієвого сплаву, про що свідчить виділення міді на катоді. (рис. 6).



Элемент	Весовой %
O K	46.18
Mg K	0.57
Al K	45.58
S K	6.56
Cu K	1.11
Итого	100.00

Рисунок 6 – Структура та спектральний аналіз анодного шару на сплаві АД0 синтезованого впродовж 60 хв.

*Джерело: розроблено авторами*

Фазовим аналізом анодованих шарів визначено, що оксидний шар у своєму складі містить до трьох молекул води рис. 7, які суттєво знижують мікротвердість а значить і зносостійкість анодованого шару.

Відомо, що термічна обробка кристалогідратів приводить до втрати кристалічної води. Тому, досліджено вплив температури термічної обробки на зміну фазового стану, твердість та зносостійкість анодованих шарів. Показано, що нагрів вже при  $100^{\circ}\text{C}$  приводить до підвищення мікротвердості анодованого шару. Внаслідок зменшення молекул води в анодованому шарі від 3 до 1 (рис. 8.) при  $400^{\circ}\text{C}$  мікротвердість досягає свого максимуму -750 HV (рис. 9).

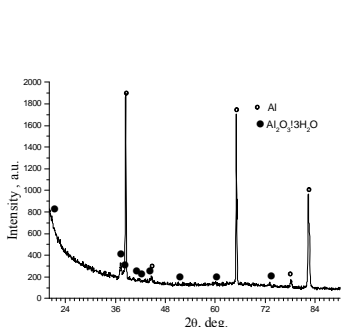


Рисунок 7 – Фазовий склад анодованого шару  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

Джерела: розроблено авторами

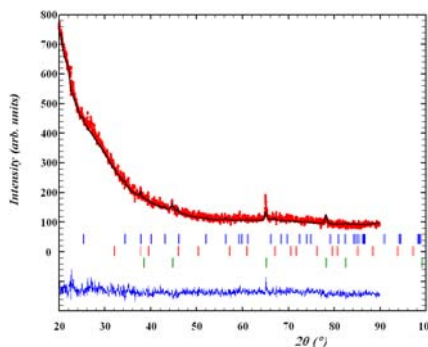


Рисунок 8 – Фазовий склад анодованого шару після ТО  $400^{\circ}\text{C}$   $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1\text{H}_2\text{O}$

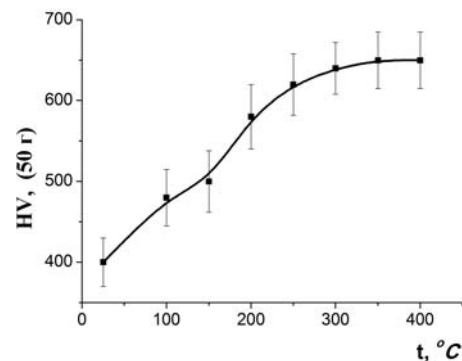


Рисунок 9 – Вплив термообробки на мікротвердість анодованого шару

Оксидні шари на алюмінієвих сплавах сформовані методом холодного анодування за низьких температур  $-8...-2^{\circ}\text{C}$  суттєво підвищують абразивну зносостійкість алюмінієвого сплаву Д16. Збільшення часу формування оксидних шарів від 60 хв до 120 хв та термічна обробка за температури  $400^{\circ}\text{C}$  впродовж 1 години підвищує абразивну зносостійкість алюмінієвого сплаву до двох разів рис.10.

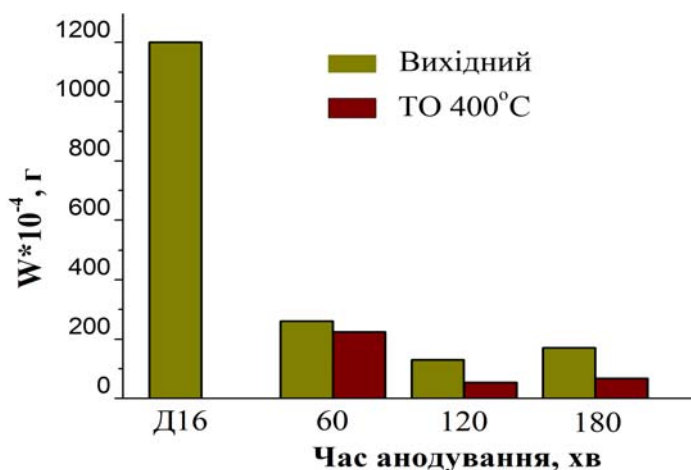


Рисунок 10 – Вплив температури термічної обробки на абразивну зносостійкість анодованого шару на технічному алюмінії АД0

Джерело: розроблено авторами

**Висновки:**

1. Оксидний шар у своєму складі містить до трьох молекул води, які суттєво знижують мікротвердість, а значить і зносостійкість анодованого шару.
2. Оксидні шари на алюмінієвих сплавах сформовані методом холодного анодування за низьких температур  $-8\dots-4^{\circ}\text{C}$  до 6 раз підвищують абразивну зносостійкість алюмінієвого сплаву Д16.
3. Термічна обробка за температури  $400^{\circ}\text{C}$  впродовж 2 годин підвищує абразивну зносостійкість алюмінієвого сплаву на порядок.

**Список літератури**

1. Improvement of wear resistance of aluminum alloy by HVOF method / Hutsaylyuk, V., Student, M., Zadorozhna, K. et al. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. 9(6). Pp. 16367–16377.
2. The Effect of Increasing the Air Flow Pressure on the Properties of Coatings during the Arc Spraying of Cored Wires, Student M.<sup>a</sup>, Gvozdetzky V.<sup>a</sup>, Student O.<sup>a</sup>, Prentkovskis O.<sup>b</sup>, Maruschak P.<sup>c</sup>Send mail to Maruschak P., Olenyuk O.<sup>d</sup>, Titova L., *Strojnický Casopis*, 2019, 69(4), pp. 133–146.
3. The properties of oxide-ceramic layers with Cu and Ni inclusions synthesizing by PEO method on top of the gas-spraying coatings on aluminium alloys, Hutsaylyuk, V., Student, M., Posuvailo, V., ...Maruschak, P., Veselivska, H., *Vacuum*, 2020, 179, 109514.
4. Improvement of wear resistance of aluminum alloy by HVOF method, Hutsaylyuk, V., Student, M., Zadorozhna, K., ...Maruschak, P., Pokhmurska, H., *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(6), pp. 16367–16377.
5. Tribological behavior of PEO layers synthesized on light alloy Student, M., Padgurskas, J., Dovhunyk, V., ...Posuvailo, V., Hvozdetzkyi, V., *Proceedings of 10th International Scientific Conference BALTRIB 2019*, 2019, pp. 268–273
6. Ning-ning Hu, Shi-rong Ge and Liang Fang. Tribological properties of nano-porous anodic aluminum oxide template. *J. of Central South University of Tech.* 2011. 18. P. 1004–1008.
7. Alaa M. Abd-Elnaiem, Gaber A. Parametric study on the anodization of fabricating nano-pores template. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2013. 13. P. 9741–9751.
8. Quang-Phu Tran, Tsung-Shune Chin Plasma electrolytic oxation coating on 6061 Al alloy using an electrolyte without alkali ions. *Journal of Science and Technology*. 2016. 54 (5A). P. 151-158.

**References**

1. Improvement of wear resistance of aluminum alloy by HVOF method, Hutsaylyuk, V., Student, M., Zadorozhna, K., Student O.<sup>b</sup>, Veselivska H.<sup>b</sup>, Gvozdetzkyi V., Maruschak, P., Pokhmurska, H., (2020). *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), pp. 16367–16377.
2. The Effect of Increasing the Air Flow Pressure on the Properties of Coatings during the Arc Spraying of Cored Wires, Student M.<sup>a</sup>, Gvozdetzky V.<sup>a</sup>, Student O.<sup>a</sup>, Prentkovskis O.<sup>b</sup>, Maruschak P.<sup>c</sup>Send mail to Maruschak P., Olenyuk O.<sup>d</sup>, Titova L., *Strojnický Casopis*, 2019, 69(4), pp. 133–146.
3. The properties of oxide-ceramic layers with Cu and Ni inclusions synthesizing by PEO method on top of the gas-spraying coatings on aluminium alloys, Hutsaylyuk, V., Student, M., Posuvailo, V., ...Maruschak, P., Veselivska, H., *Vacuum*, 2020, 179, 109514.
4. Improvement of wear resistance of aluminum alloy by HVOF method, Hutsaylyuk, V., Student, M., Zadorozhna, K., ...Maruschak, P., Pokhmurska, H., *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(6), pp. 16367–16377
5. Tribological behavior of PEO layers synthesized on light alloy Student, M., Padgurskas, J., Dovhunyk, V., ...Posuvailo, V., Hvozdetzkyi, V., *Proceedings of 10th International Scientific Conference BALTRIB 2019*, 2019, pp. 268–273
6. *Ning-ning Hu, Shi-rong Ge and Liang Fang*. Tribological properties of nano-porous anodic aluminum oxide template // *J. of Central South University of Tech.* 2011. 18. P. 1004–1008.
7. *Alaa M. Abd-Elnaiem, Gaber A.* Parametric study on the anodization of fabricating nano-pores template // *Int. J. Electrochem. Sci.* – 2013. – 13. – P. 9741–9751.
8. Quang-Phu Tran, Tsung-Shune Chin (2016). Plasma electrolytic oxation coating on 6061 Al alloy using an electrolyte without alkali ions // *Journal of Science and Technology*. 54 (5A). P. 151-158.

**Mykhajlo Student**, Dsc., Senior Researcher

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

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

*Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine*

**Volodymyr Hvozdetkii**, PhD tech. sci., Senior Researcher

**Khrystyna Zadorozhna**, PhD tech. sci., Researcher

**Igor Kovalchuk**, Coll., Ph.D. tech. Science, Junior Research Fellow

**Yurii Dzjoba**, Chief Engineer

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

### **Wearproofness of Layers of Oxide of Formed by Method of Hard Anodization (Hard Anodic Coatings) at Strengthening of Details of Agroindustrial Technique**

In the last years in an agroindustrial production there is a tendency on replacement of cast-iron details on a detail from aluminium alloys at execution on поверхню of strengthening layer. An ironmaking is accompanied the extrass of plenty of carbon dioxide in an atmosphere. Substituting of cast-iron details by aluminium will decrease the amount of extrass of carbon dioxide in an atmosphere, and substantially will decrease weight of constructions. Hard anodization is used practically in all of industries of industry: avsup and motor-car industry; hydraulics; electronics; heater platforms and tiles; medical devices. This method will allow to promote mechanical descriptions of aluminium alloys the method of forming of the anodized layers on their surface.

The synthesis of the anodized layer on an aluminum alloy was performed in a 20% solution of sulfuric acid at a temperature of (-8...-2 °C). During anodizing, the current density was 5 A / dm<sup>2</sup>. The anodizing times were 60, 120 and 180 minutes. Conducted metallographic studies and phase analysis of the layers. Reduction of moisture content was performed at a temperature of 400°C for 60 minutes. It was found that the oxide layer (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · H<sub>2</sub>O) during hard anodizing on aluminum alloys forms not only oxygen ions, which are formed due to the decomposition of water, but also its neutral atoms, which are formed from the solution. It was found that the microhardness and layer thickness increase with increasing anodizing time. After heat treatment, the number of water molecules decreases and the microhardness increases. Increasing the microhardness increases the resistance to abrasive wear.

Conclusions: The layer of oxide in the composition contains to three molecules of water, which reduce a microhardness, and wearproofness of the anodized layer substantially. The layers of oxide on aluminium alloys are formed the method of cold anodization at low temperatures -8...-4 °C to 6 time promote abrasive wearproofness of aluminium alloy of D16. Heat treatment for the temperatures of 400°C during 2 hours promotes abrasive wearproofness of aluminium alloy on an order.

**key words: hard anodizing, aluminum, anodized layer, pores, wear resistance**

*Одержано (Received) 12.11.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 18.11.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021*