

УДК 621.787.4

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.58-63](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.58-63)

**М.М. Студент**, пров. наук. співр., проф., д-р техн. наук, **І.М. Погрелюк**, проф., д-р техн. наук

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

**С.І. Маркович**, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

**В.М. Гвоздецький**, ст. наук. співр., канд. техн. наук, **Х.Р. Задорожна**, наук. співр., канд. техн. наук

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

**В.І. Топчій**, доц., канд. техн. наук

*Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна*

*e-mail: student.phmi@gmail.com, irynapohrelyuk@gmail.com, e-mail: marko60@ukr.net;*

*e-mail: gvosdetcki@gmail.com, 880988@ukr.net, vladyslav.i.topchii@lpnu.ua*

## Підвищення абразивної зносостійкості алюмінієвих ливарних сплавів Al-Si АК-9 та АК-12 плазмо-електролітною обробкою

Досліджено структуру, мікротвердість та абразивну зносостійкість алюмінієвих ливарних сплавів Al-Si АК-9 та АК-12 силумінів. Фазовий аналіз показав, що оксидний ПЕО шар складається із двох оксидних фаз  $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$  та силікатної фази  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ . Кремній є присутній у структурі оксидного шару проте його є менше ніж у структурі силумінів. Встановлено, що в процесі плазмо-електролітної обробки кремній розчиняється у лужному електроліті. Показано, що плазмоелектролітна обробка силумінів АК-9 та АК-12 підвищує їх мікротвердість до 1000 ...1300 HV, це спричиняє підвищення їх абразивної зносостійкості у 14...57 разів. Додаток в електроліт перекису водню  $\text{H}_2\text{O}_2$  у кількості 3% мас. підвищує абразивну зносостійкість силумінів після плазмоелектролітної обробки ще на 30...70%. Це зумовлено збільшенням оксидних фаз та зменшенням силікатної фази  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  у структурі покриття. **плазмо-електролітне оксидування, алюмінієві ливарні сплави, оксидні шари, зносостійкість**

**Постановка проблеми.** Алюмінієві ливарні сплави використовуються на машинобудівних, автомобільних, авіаційних, електротехнічних та текстильних підприємствах. Однак алюмінієві сплави мають низьку абразивну зносостійкість, що суттєво стримує їх застосування у технологічних середовищах, де є наявні абразивні частинки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведений огляд літературних джерел показав, що для підвищення зносостійкості алюмінієвих сплавів найчастіше використовують гальванічне хромування [1], газотермічне нанесення покриттів [2, 3], плазмо-електролітне оксидування (ПЕО) та тверде анодування (Hard Anodic Coatings). Метод гальванічного хромування екологічно небезпечний через використання канцерогенних та екологічно небезпечних електролітів. Метод твердого анодування (Hard Anodic Coatings) технологічно простий та відносно дешевий й починає широко використовуватись у промисловості, однак має суттєві недоліки, а саме: покриття мають низьку твердість ( $\leq 500$  HV) та зносостійкість [4]. Метод плазмо-електролітного оксидування ПЕО на алюмінієвих сплавах забезпечує високу твердість до 2000 HV, низький коефіцієнт тертя, високу адгезію до металевої основи, високу екологічну

чистоту [5]. Однак цей метод не дозволяє синтезувати оксидні шари із високою абразивною зносостійкістю на ливарних сплавах - силумінах. ПЕО шари синтезовані на найбільш широкоживаних Al-Si ливарних сплавів мають суттєві недоліки: мала швидкість синтезу оксидокерамічного шару - 0,5 - 1 мкм/хв., мала товщина-до 140 мкм, низька мікротвердість (700-1000 HV) та низька абразивна зносостійкість [6,7].

**Постановка завдання** Синтезувати оксидні ПЕО шари на поверхні зразків із ливарних алюмінієвих сплавів АК9 та АК12. Дослідити мікроструктуру ПЕО шарів, зміну їх мікротвердості в залежності від складу електроліту в процесі плазмо-електролітної обробки, синтезованих на поверхні ливарних алюмінієвих сплавів та дослідити їх абразивну зносостійкість закріпленим абразивом.

**Виклад основного матеріалу. Матеріали та методи досліджень.** ПЕО шари синтезували на поверхні пластин 30x30 мм товщиною 4 мм із алюмінієвих ливарних сплавів АК-9 (9% Si) та АК-12 (12% Si) в електроліті – 3 г/л KOH + 2 г/л Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (водний розчин рідкого скла) без та з додатком в електроліт 3 г/л перекису водню H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, імпульсним струмом за частоти 50 Гц у катодно-анодному режимі при співвідношенні струмів ( $I_k/I_a$ ) = 1 та густини струму 20 A/dm<sup>2</sup>. Товщина покриттів після синтезу на протязі 120 хв була 120 -130 мкм.. [4]. Металографічні дослідження проводили на скануючому електронному мікроскопі ZEISS EVO 40XVP з системою рентгенівського мікроаналізу INCA Energy. Фазовий склад поверхневих шарів досліджували за допомогою дифрактометра DRON-3M у Cu-K-випромінювання.

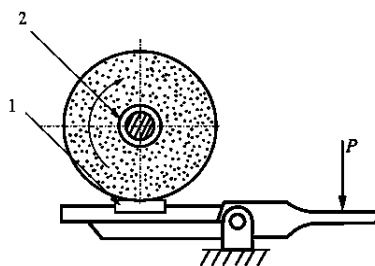
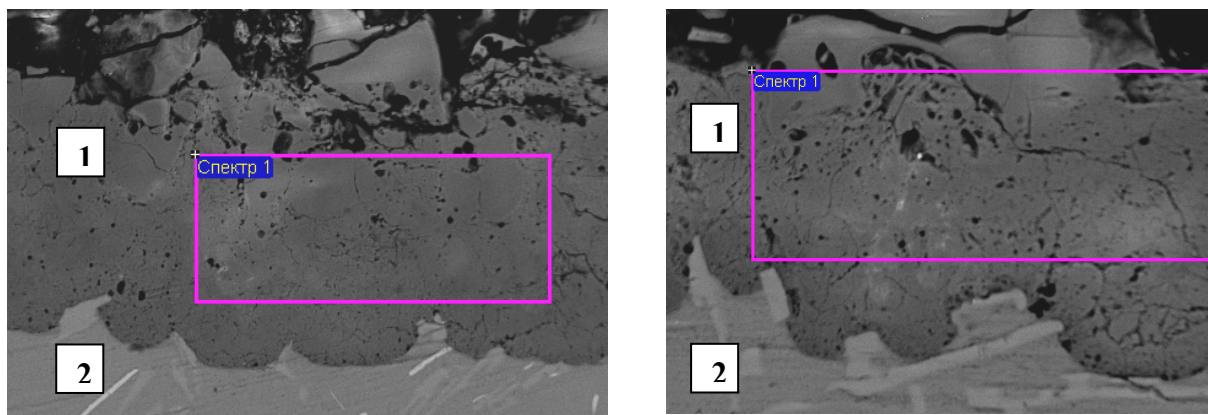


Рисунок 1 – Схема випробування на абразивний знос за використання абразивного диска (1 зразок, 2 абразивний круг)

*Джерело: розроблено авторами*

Абразивну зносостійкість закріпленим абразивом визначали за допомогою абразивного диска (рис. 2б) діаметром 150 mm і шириною 8 mm, виготовленого з електрокорунду із розміром зерна 250 - 315 μm, частота обертання диска 160 грт, навантаження в зоні лінійного контакту 15 Н. Знос зразків оцінювали за втратою маси на електронній вазі KERN ABJ 220 4M з точністю до  $2 \cdot 10^4$  g. Мікротвердість ПЕО шарів визначали за використання приладу ПМТ-3. Структуру оксидних шарів досліджено у характеристичному випромінюванні BSD на електронному мікроскопі EVO 40 XVP. Фазовий аналіз оксидних шарів виконано на рентгенівському дифрактометрі BRUKER D8 DISCOVER.

**Структура плазмо-електролітних шарів на силумінах.** Фазовий аналіз показав, що оксидний ПЕО шар складається із двох оксидних фаз  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\gamma$  Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та силікатної фази силіманіту- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>•SiO<sub>2</sub>. Кремній є присутній у структурі оксидного шару проте його є менше ніж у структурі силумінів. Очевидно, що в процесі плазмо-електролітної обробки кремній розчиняється у лужному електроліті. Причому із силуміну АК12 кремній розчиняється у більшій мірі ніж із силуміну АК9 рис. У структурі ПЕО шару спостерігаються мікротріщини та пори. Це зумовлено швидким охолодженням зони розрядних каналів в процесі синтезу оксидного шару. Верхній шар оксидного шару як правило є більш дефектним ніж нижній шар.



Елемент	Мас. %
O K	52.39
Al K	41.56
Si K	5.39
K K	0.65
сума	100.00

1-PEO шар, 2-основа силумін АК-9

Елемент	Мас. %
O K	51.12
Al K	42.17
Si K	5.42
K K	1.28
сума	100.00

1-PEO шар, 2-основа силумін АК-12

Рисунок 2 – Структура плазмо-електролітних шарів на силумінах  
Джерело: розроблено авторами

**Абразивна зносостійкість PEO шарів.** PEO шари на силумінах мають мікротвердість на рівні 1000-1300HV (рис.3 ) однак ця твердість є суттєво меншою за мікротвердість, яку мають PEO шари синтезовані на сплавах Al-Cu. Так до прикладу мікротвердість PEO шару синтезованого на алюмінієвому сплаві Д16 становить 1600...1800 HV. Ми пов'язуємо малу мікротвердість PEO шарів на силумінах із синтезом у структурі PEO шарів фази силіманіту-  $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ , яка має низьку мікротвердість.

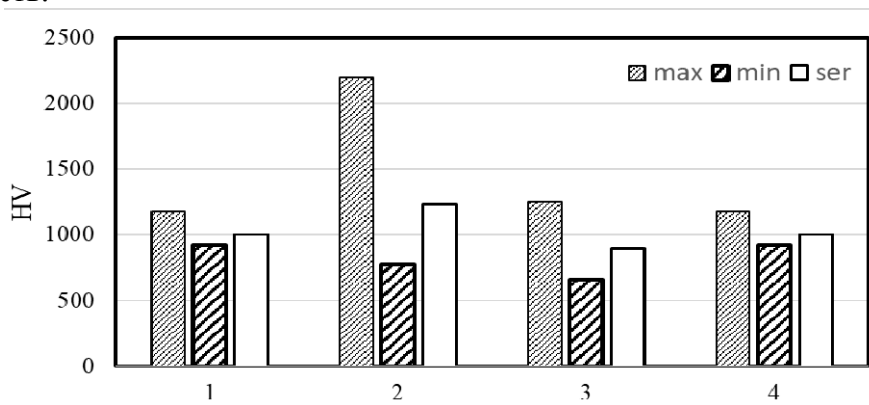


Рисунок 3 – Мікротвердість PEO шарів синтезованих на сплавах алюмінію  
1-сплав АК9 (електроліт 3 g/l KOH + 2 g/l  $Na_2SiO_3$ ),  
2-сплав АК9 електроліт 3 g/l KOH + 2 g/l  $Na_2SiO_3$  + 3г/л  $H_2O_2$ ),  
3 сплав АК12 (електроліт 3 g/l KOH + 2 g/l  $Na_2SiO_3$ ),  
4-сплав АК12 електроліт 3 g/l KOH + 2 g/l  $Na_2SiO_3$  + 3г/л  $H_2O_2$ )

Джерело: розроблено авторами

Плазмо-електролітна обробка силумінів суттєво підвищує їх абразивну зносостійкість (рис.4). Так зносостійкість сплаву АК-9 після плазмоелектролітної обробки зростає у 57 разів, а зносостійкість сплаву АК-12 у 14 разів. Додаток в електроліт перекису водню  $H_2O_2$  у кількості 3% мас. підвищує абразивну зносостійкість

силумінів після плазмоелектролітної обробки ще на 30...70%. Це зумовлено збільшенням оксидних фаз  $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$  та зменшенням силікатної фази силіманіту- $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  у структурі покриття.

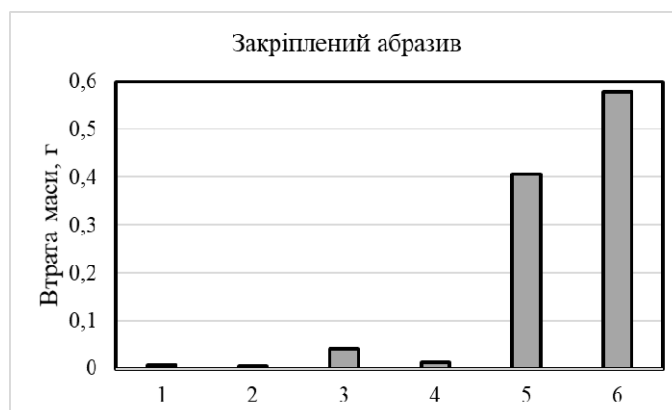


Рисунок 4 – Абразивна зносостійкість ПЕО шарів синтезованих на сплавах алюмінію (табл.1)  
Джерело: розроблено авторами

Таблиця 1 – Зносостійкість сплавів АК-9 (5) та АК-12 (6) та ПЕО шарів синтезованих на сплавах АК9(1,2) та АК12 (3,4).

Позначення сплавів та їх обробки на рис.4	Марка силуміну, (склад електроліту)	Знос, г
1	АК-9 (3 g/l KOH + 2 g/l Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )	0,0071
2	АК-9 (3 g/l KOH + 2 g/l Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> + 3г/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	0,0051
3	АК-12 (3 g/l KOH + 2 g/l Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )	0,0418
4	АК-12 (3 g/l KOH + 2 g/l Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> + 3г/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	0,0134
5	АК-9 вихідний сплав	0,4065
6	АК-12 вихідний сплав	0,578

### Висновки:

1. Плазмо-електролітна обробка силумінів АК-9 та АК-12 підвищує їх мікротвердість до 1000 ...1300 HV, це спричиняє підвищення їх абразивної зносостійкості у 14...57 разів.

2. Додаток в електроліт перекису водню H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> у кількості 3% мас. підвищує абразивну зносостійкість силумінів після плазмоелектролітної обробки ще на 30...70%. Це зумовлено збільшенням вмісту оксидних фаз  $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$  та зменшенням вмісту силікатної фази силіманіту-  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  у структурі покриття.

### Список літератури

1. Bazaluk, O., Dubei, O., Ropyak, L., Shovkoplias, M., Pryhorovska, T., Lozynskyi, V. (2022) Strategy of compatible use of jet and plunger pump with chrome parts in oil well . *Energies*, 15 (1), art. no. 83, DOI: 10.3390/en15010083
2. Improvement of wear resistance of aluminum alloy by HVOF method. V. Hutsaylyuka, M. Student, Kh. Zadorozhna, O. Student, H. Veselivska, V. Gvozdetkii, P.Maruschak, H.Pokhmurska . *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9, Iss. 6. P. 16367–16377, doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.102 .
3. The Effect of Increasing the Air Flow Pressure on the Properties of Coatings during the Arc Spraying of Cored Wires / Student M., Gvozdetky V., Student O., Prentkovskis O., Maruschak P., Olenyuk, O., Titova, L. *Strojnický Casopis* link is disabled, 2019, 69(4), pp. 133–146, DOI: 10.2478/scjme-2019-0048

4. Effects of anodizing conditions and the addition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PTFE particles on the microstructure aluminium alloy / Michaela Remešová, Serhii Tkachenko, Daniel Kvarda, Ivana Ročňáková, Bernhard Gollas, Melita Menelaou, Ladislav Čelko, Jozef Kaise . *Applied Surface Science*, Vol. 513, 30 May 2020, 145780. doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145780
5. Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions – A review / Xiaopeng Lu , Marta Mohedano, Carsten Blawert, Endzhe Matykina, Raul Arrabal, Karl Ulrich Kainer, Mikhail L. Zheludkevich. *Surface and Coatings Technology*. Vol. 307, Part C, 15 December 2016, P. 1165-1182. doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.08.055
6. A.B. Rogov, H. Lyu, A. Matthews, A. Yerokhin, AC plasma electrolytic oxidation of additively manufactured and cast AlSi12 alloys, *Surf. Coat. Technol.* 399 (2020), 126116, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126116>.
7. K. Li, W. Li, G. Zhang, W. Zhu, F. Zheng, D. Zhang, M. Wang, Effects of Si phase refinement on the plasma electrolytic oxidation of eutectic Al-Si alloy, *J. Alloys Compd.* 790 (2019) 650–656, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.217>.

## References

1. Bazaluk, O., Dubei, O., Ropyak, L., Shovkopliias, M., Pryhorovska, T., Lozynskiy, V. (2022). Strategy of compatible use of jet and plunger pump with chrome parts in oil well . *Energies*, 15 (1), art. no. 83, DOI: 10.3390/en15010083 [in English].
2. Hutsaylyuka, V., Student, M., Zadorozhna, Kh., Student, O., Veselivska, H., Gvosdetskii, V. et al. (2020). Improvement of wear resistance of aluminum alloy by HVOF method . *Journal of Materials Research and Technology*. Vol. 9, Iss. 6. P. 16367–16377, //doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.102 . [in English].
3. Student M., Gvozdetzky V., Student O., Prentkovskis O., Maruschak P., Olenyuk, O., Titova, L. (2019). The Effect of Increasing the Air Flow Pressure on the Properties of Coatings during the Arc Spraying of Cored Wires . *Strojnicky Casopis* this link is disabled, 69(4), pp. 133–146, DOI:10.2478/scjme-2019-0048 [in English].
4. Michaela Remešová, Serhii Tkachenko, Daniel Kvarda, Ivana Ročňáková, Bernhard Gollas, Melita Menelaou et al. (2020). Effects of anodizing conditions and the addition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PTFE particles on the microstructure aluminium alloy . *Applied Surface Science* Volume 513, 30 May 2020, 145780 //doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145780 [in English].
5. Xiaopeng Lu , Marta Mohedano, Carsten Blawert, Endzhe Matykina, Raul Arrabal, Karl Ulrich Kainer, et al. (2016). Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions – A review . *Surface and Coatings Technology* Volume 307, Part C, 15 December 2016, Pages 1165-1182 //doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.08.055 [in English].
6. Rogov, A.B., Lyu, H., Matthews, A., Yerokhin, A. (2020), AC plasma electrolytic oxidation of additively manufactured and cast AlSi12 alloys, *Surf. Coat. Technol.* 399 126116, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126116> [in English].
7. Li K., Li W., Zhang G., Zhu W., Zheng F., Zhang D., Wang M. (2019). Effects of Si phase refinement on the plasma electrolytic oxidation of eutectic Al-Si alloy, *J. Alloys Compd.* 790, pp. 650–656 [in English].

**Mykhajlo Student**, Prof., DSc., Leading Researcher, **Iryna Pogrelyuk**, Prof., DSc.

*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 Hvozdetzskii**, PhD tech. sci., Senior Research, **Khrystyna Zadopozna**, PhD tech. sci., Senior Research

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

**Vladyslav Topchiy**, Assos. Prof., PhD tech. sci.

*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine*

## **Increasing the Abrasion Resistance of Aluminum Foundry Alloys AL-SI AK9 and AK12 Plasma-electrolytic Treatment**

Aluminum casting alloys are used in machine-building, automobile, aviation, electrical and textile enterprises. However, aluminum alloys have low abrasive wear resistance, which significantly hinders their use in technological environments where abrasive particles are present.

However, aluminum alloys have low abrasive wear resistance, which significantly hinders their use in technological environments where abrasive particles are present. The method of plasma electrolytic oxidation of plasma electrolyte treatment on aluminum alloys provides high hardness up to 2000 HV, low friction coefficient, high adhesion to the metal base, high environmental friendliness. However, this method does not allow the

synthesis of oxide layers with high abrasive wear resistance on cast alloys - silumin. Plasma electrolyte treatment layers synthesized on the most widely used Al-Si foundry alloys have significant disadvantages: low rate of synthesis of the oxoceramic layer - 0.5 - 1  $\mu\text{m} / \text{min.}$ , Low thickness - up to 140  $\mu\text{m}$ , low microhardness (700-1000 HV) and low abrasion resistance.

Plasma electrolyte treatment layers were synthesized on the surface of 30x30 mm plates with a thickness of 4 mm from aluminum casting alloys AK-9 (9% Si) and AK-12 (12% Si) in electrolyte - 3 g / l KOH + 2 g / l  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (aqueous solution of liquid glass) without and with the addition to the electrolyte of 3 g / l of hydrogen peroxide  $\text{H}_2\text{O}_2$ , pulsed current at a frequency of 50 Hz in the cathode-anode mode at a ratio of currents ( $I_k / I_a$ ) = 1 and a current density of 20 A /  $\text{dm}^2$ . The thickness of the coatings after synthesis for 120 min was 120 -130  $\mu\text{m}$  .. [4]. Metallographic studies were performed on a scanning electron microscope ZEISS EVO 40XVP with X-ray microanalysis system INCA Energy. The phase composition of the surface layers was investigated using a DRON-3M diffractometer in Cu-K radiation.

Conclusions:

1. Plasma-electrolyte treatment of silumins AK-9 and AK-12 increases their microhardness up to 1000... 1300 HV, which causes an increase in their abrasive wear resistance by 14 ... 57 times.

2. Addition to the electrolyte of hydrogen peroxide  $\text{H}_2\text{O}_2$  in the amount of 3% of the mass. increases the abrasive wear resistance of silumins after plasma electrolyte treatment by another 30 ... 70%. This is due to the increase in the content of oxide phases  $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$  and the decrease in the content of the silicate phase of sillimanite -  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  in the coating structure.

**plasma-electrolyte oxidation, aluminum cast alloys, oxide layers, wear resistance**

*Одержано (Received) 27.04.2022*

*Прорецензовано (Reviewed) 19.05.2022*

*Прийнято до друку (Approved) 30.05.2022*