

УДК 669.295.539.121

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2022.97.0.70

## ВПЛИВ МІКРОДУГОВОГО ОБРОБЛЕННЯ НА ЗМІНУ РОЗМІРУ АЛЮМІНІЄВИХ ДЕТАЛЕЙ

Субботін О. В., Білозеров В. В., Субботіна В. В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

***Анотація.** У роботі вивчено зміну розмірів оброблюваних зразків (алюмінієві сплави) після оксидування в лужно-силікатному електроліті за анодно-катодному режиму. Подано двошарову будову покриття алюмінієвих сплавів після МДО-оброблення. Зміна розміру деталей виначається фазовим складом покриття.*

***Ключові слова:** алюмінієві сплави, мікродугове оброблення, фазовий склад, товщина покриття, розмір зразка.*

### Вступ

Мікродугове оксидування (МДО) – один з найперспективніших методів поверхневого оброблення деталей, виготовлених з вентильних металів та сплавів [1, 2]. Воно дозволяє отримувати багатофункціональні покриття з унікальним комплексом властивостей. Особливістю МДО є участь у процесі формування покриття поверхневих мікророзрядів, що надають істотного та специфічного впливу на покриття, що формується [1, 2]. МДО- покриття, які сформовані за оптимальних режимів, поєднують високу довговічність (зносостійкість, спеціальні властивості) та надійність [1, 2]. Вони збільшують експлуатаційну стійкість деталей машин та інструментів, дозволяють відновлювати зношену поверхню й зменшувати потребу в запасних частинах [1, 2]. За допомогою покриттів виробни набувають особливих властивостей робочих поверхонь (жаростійкість, заданий коефіцієнт тертя), що дає змогу значно розширити сфери застосування алюмінієвих сплавів [1–3].

Але актуальним на сьогодні є питання впливу процесу мікродугового оксидування на зміну геометричних розмірів деталей, що обробляються.

### Аналіз публікацій

Нині є достатньо велика кількість робіт з цієї технології, визначені деякі закономірності формування покриттів, зв'язок структури з властивостями, режими здійснення МДО-оброблення [1–3].

Метод мікродугового оксидування (МДО) вентильних матеріалів (Al, Ti, Mg, Zr тощо) перетворює поверхневі шари в оксидну кераміку з унікальним поєднанням фізико-механічних властивостей (твердість, зносо- та корозійна стійкість тощо). Таке оброблен-

ня істотно розширює сферу застосування та можливість заміни традиційних матеріалів. Технологія належить до розряду екологічно чистих.

Алюміній та його сплави є одним з найважливіших матеріалів у сучасній промисловості [4]. Мала вага, висока пластичність, корозійна стійкість, зварюваність – це важливі властивості, які використовують для виготовлення різноманітних деталей та елементів конструкцій [4]. Розширити сферу застосування алюмінієвих сплавів можна нанесенням різноманітних покриттів на виробни [1–3, 5]. Серед найбільш науково-технічних проблемна сьогодні є спосіб нанесення захисних покриттів на метали, які здійснювали б функцію дифузійного бар'єра для гальмування доступу агресивних середовищ, забезпечуючи захист від корозії [1, 5]. Крім того, покриття дозволяють надати металевим виробам зносостійкості, даючи можливість використання їх у парах тертя для відновлення зношених деталей, а також сприяють вирішенню декоративних завдань [6–7]. Істотним моментом під час МДО є зміна розмірів деталей, що обробляються. На жаль, це питання ще в процесі вивчення.

### Мета та постановка задачі

Метою роботи є вивчення зміни розмірів оброблюваних зразків (алюмінієві сплави) після оксидування в лужно-силікатному електроліті за анодно-катодного режиму та визначення основних факторів, що впливають на зміну розміру деталей.

### Результати дослідження

Експериментально визначено, що в процесі МДО формування оксидної зносостійкої плівки здійснюється не з зовнішнього боку, а під плівкою, що пасивує, у місці роз-

поділу плівка-метал. Внутрішня зона складається з безводно-кристалічного окису алюмінію, і тому вона щільна та тверда. Зовнішня зона складається з окису алюмінію та продуктів його взаємодії з компонентами електроліту. Вона пухка, менш жорстка і незносостійка. Таким чином, методом МДО можна отримати двошарову будову покриття (рис. 1). Практичною цінністю є внутрішні шари, а зовнішні шари є технологічним шлаком, який має видалитись під час створення поверхні тертя.

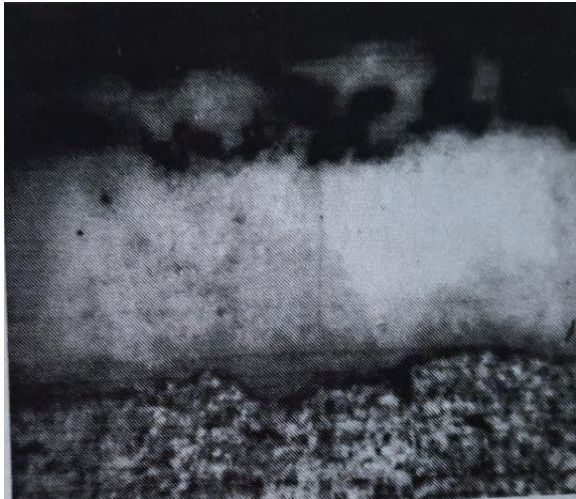


Рис. 1. Мікроструктура МДО-покриття на сплаві АЛ9

Окисел алюмінію, що утворюється, має більший об'єм, ніж вихідний металевий алюміній, який перетворюється в оксид, тому в процесі формування МДО-покриттів лінійні розміри зразка повинні збільшитися. Однак у процесі формування покриття паралельно з нарощуванням плівки відбувається її розчинення на зовнішній межі плівка-розчин. На ступінь зміни розмірів має впливати тип модифікації оксиду алюмінію та їхнє кількісне співвідношення в складі покриття, оскільки різні модифікації оксиду алюмінію мають різну питому вагу (табл. 1).

Таблиця 1 – Щільність алюмінію та його окислів

Фаза	Щільність, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>
Al	2,7
$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,99
$\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,68
3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub>	3-3,1

У роботі здійснено розрахунок зміни розміру зразка, зумовлений збільшенням обсягу в процесі формування оксидної плівки. Спів-

відношення товщини покриття ( $\delta$ ) до товщини шару алюмінію ( $B$ ), з якого утворився оксид, обчислюється за формулою

$$\frac{\delta}{B} = \frac{\rho_{Al} \cdot M_{Al_2O_3}}{\rho_{Al_2O_3} \cdot M_{Al}}$$

де  $\rho_{Al}$ ,  $\rho_{Al_2O_3}$  – питома вага відповідних фаз;  $M_{Al_2O_3}$  – молекулярна вага оксиду алюмінію;  $M_{Al}$  – еквівалентна вага алюмінію.

Розрахунки демонструють, що в разі переважного утворення  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> співвідношення  $\delta/B$  становить 1,28, а в разі утворення  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> співвідношення  $\delta/B$  становить 1,55, якщо утворюється муліт (3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>), співвідношення 2,23.

Таким чином, рівень зміни розмірів зразка після МДО істотно залежить від фазового складу самого покриття.

Експериментальна перевірка на різних сплавах та різних електролітах підтвердила різний ступінь зміни розміру залежно від фазового складу покриття, що визначається режимами МДО і складом електроліту.

Так, експериментальне значення для сплаву Д16 після МДО за різних режимів змінюється від 1,0 до 2,0; для сплаву В96 – 1,15–2,76; для сплаву АМг6 – 1,46–2,55.

Вищезазначені результати належать до загальної товщини сформованого покриття. З огляду на двошарову будову покриття і те, що товщина пухкого шару, що підлягає видаленню, становить 15–50 % від загальної товщини, зміна розмірів деталі після остаточного тертя поверхні має бути незначною. Експериментально визначено, що зі сплавів Д16, В96, АМг6 за оптимальних режимів МДО (товщина зносостійкого покриття – 100–150 мкм) збільшення розміру деталі становить 5–10 мкм. У структурі покриття ливарних сплавів (наприклад, АЛ9), що містять помітну кількість муліту, збільшення розміру деталі з такого сплаву після МДО, є більшим (як порівняти з деформівними сплавами) і становить 20–30 мкм. Ці зміни розміру мають бути враховані під час оброблення деталей з малими допусками або усунуті через часткове видалення основного зносостійкого шару.

### Висновки

1. Розрахунок та дослідження демонструють, що рівень зміни розмірів зразка після МДО істотно залежить від фазового складу самого покриття.

2. З огляду на двошарову будову покриття і те, що товщина пухкого шару, що підлягає видаленню, становить 15–50 % від загальної товщини, зміна розмірів деталі після остаточного тертя поверхні має бути незначною.

### Література

1. Шкілько А. М., Тихолненко В. В. Аналіз способу зміцнення деталей мікродуговим окисуванням. Вісник національного технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. Тематичний вісник: Нові рішення в сучасних технологіях. 2010. № 46. С. 252–257.
2. The influence of the conditions of microplasma processing (microarc oxidation in anode-cathode regime) of aluminum alloys on their phase composition / Belozеров V., Sobol O., Mahatlova A., Subbotina V., Tabaza T. A., Al-Qawabeha U. F., Al-Qawabah S. M. Eastern-European journal of enterprise technologies. 2017. Vol. 5. № 12(89). P. 52–57.
3. Determination of influence of electrolyte composition and impurities on the content of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase in MAO-coatings on aluminum / Subbotina V., Al-Qawabeha U. F., Belozеров V., Sobol' O., Subbotin A., Tabaza T. A., Al-Qawabah S. M. Eastern-european journal of enterprise technologies. 2019. Vol. 6. № 12 (102). P. 6–13.
4. Мальцев М. В. Металлография промышленных цветных металлов и их сплавов. Металлургия. 1970.
5. Субботіна В. В., Білозеров В. В., Соболю О. В. Кінетика росту, фазово-структурний стан та твердість мікродугових оксидних покриттів на ливарних алюмінієвих сплавах АЛ2, АЛ9, АЛ25. Металознавство та термічна обробка металів. 2020. № 3 (90). С. 52–63.
6. A study of the phase-structural engineering possibilities of coatings on D16 alloy during micro-arc oxidation in electrolytes of different types / Subbotina V., Sobol O., Belozеров V., Subbotin A., Smyrnova Y. Eastern-european journal of enterprise technologies. 2020. Vol. 4. № 12 (106). P. 14–23.
7. Subbotina V., Sobol' O. Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy. International scientific journal "Machines. Technologies. Materials. 2020. YEAR XIV. Iss. 6. P. 247–250.

### References

1. Shkil'ko A. M., Tikholnenko V. V. Analysis of the method of strengthening parts by micro-arc oxidation. Bulletin of the National Technical University "KhPI": coll. of science works Thematic bulletin: New solutions in modern technologies. 2010. No. 46. P. 252–257.
2. The influence of the conditions of microplasma processing (microarc oxidation in anode-cathode regime) of aluminum alloys on their phase

composition / Belozеров V., Sobol O., Mahatlova A., Subbotina V., Tabaza T. A., Al-Qawabeha U. F., Al-Qawabah S. M. Eastern-European journal of enterprise technologies. 2017. Vol. 5. № 12(89). P. 52–57.

3. Determination of influence of electrolyte composition and impurities on the content of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase in MAO-coatings on aluminum / Subbotina V., Al-Qawabeha U. F., Belozеров V., Sobol' O., Subbotin A., Tabaza T. A., Al-Qawabah S. M. Eastern-european journal of enterprise technologies. 2019. Vol. 6. № 12 (102). P. 6–13.
4. Maltsev M. V. Metallography of industrial non-ferrous metals and their alloys. Metallurgy. 1970.
5. Subbotina V. V., Bilozеров V. V., Sobol O. V. Growth kinetics, phase-structural mill and hardness of microarc oxide coatings on liquor aluminum alloys AL2, AL9, AL25. *Metal science and thermal processing of metals*. 2020. №. 3 (90). P. 52–63.
6. A study of the phase-structural engineering possibilities of coatings on D16 alloy during micro-arc oxidation in electrolytes of different types / Subbotina V., Sobol O., Belozеров V., Subbotin A., Smyrnova Y. Eastern-european journal of enterprise technologies. 2020. Vol. 4. № 12 (106). P. 14–23.
7. Subbotina V., Sobol' O. Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy. International scientific journal "Machines. Technologies. Materials. 2020. YEAR XIV. Iss. 6. P. 247–250.

**Субботін Олександр Володимирович**, старший викладач кафедри «Матеріалознавство», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна, E-mail: [subbotin.alex95@gmail.com](mailto:subbotin.alex95@gmail.com), тел. : 067-530-04-35;

**Білозеров Валерій Володимирович**, к. т. н., доцент кафедри «Матеріалознавство», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна. E-mail: [belozеров.valerii@gmail.com](mailto:belozеров.valerii@gmail.com), тел. : 067-575-29-14;

**Субботіна Валерія Валеріївна**, д. т. н., доцент кафедри «Матеріалознавство», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, . 61002, Україна E-mail: [subbotina.valeri@gmail.com](mailto:subbotina.valeri@gmail.com), тел. : 067-933-20-68.

### Influence of microarc machining on resizing of aluminum parts

**Abstract. Problem.** The change of the sizes of the processed samples (aluminum alloys) after oxidation in alkaline-silicate electrolyte at the anode-cathode mode is studied in the work. The two-layer structure

of aluminum alloys after MAO processing is shown. The change in the size of the parts is determined by the phase composition of the coating. **Goal.** The goal is study of the changes in the size of the processed samples (aluminum alloys) after oxidation in alkaline-silicate electrolyte at the anode-cathode mode. The change of the sizes of the processed samples (aluminum alloys) after oxidation in alkaline-silicate electrolyte at the anode-cathode mode is studied in the work. **Methodology.** X-ray structural analysis (Dron - 3) in radiation  $K\alpha$ -Cu, microhardness measurement (PMT-3) with the load of 100 gr., measurement of coating thickness (vortex thickness gauge BT – 10NTs). **Results.** It is shown that in the case of predominant  $\alpha$ -  $Al_2O_3$  formation the  $\delta / B$  ratio is 1.28, in the case of  $\gamma$ - $Al_2O_3$  formation, the  $\delta / B$  ratio is 1.55 and in the case of mullite formation ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) – 2.23.

The calculation showed that the level of change in the size of the sample after MAO significantly depends on the phase composition of the coating. Experimental testing on different alloys and different electrolytes confirmed the different degree of change in size depending on the phase composition of the coating, which is determined by the modes of MAO and the composition of the electrolyte.

Thus, the experimental value for alloy D16 subjected to MAO in different modes varies from 1.0 to 2.0; for B96 metal – 1.15–2.76; for AMg6 metal – 1.46–2.55.

The results presented above relate to the total thickness of the formed coating. Given the two-layer structure of the coating and the fact that the thickness of the loose layer to be removed is 15–50 % of the total thickness, the change in the size of the part after the final finishing of the friction surface should be insignificant. It has been experimentally established that from alloys D16, B96, AMg6 at optimal modes of MAO (thickness of wear-resistant coating 100–150  $\mu m$ ) the increase in the size of the part to the side is

5–10  $\mu m$ . As for cast alloys (for example, Al9), the structure of the coating which contains a significant amount of mullite, the increase in the size of the part of such alloy after MAO and refining, more (compared to deformed alloys) and is 20–30 microns  $Al_2O_3$ . **Originality.** The calculation and research showed that the level of change in the size of the sample after MDO significantly depends on the phase composition of the coating itself. Considering the two-layer structure of the coating and the fact that the thickness of the loose layer to be removed is 15–50 % of the total thickness, the change in the dimensions of the part after the final proofing of the surface should be insignificant. **Practical value.** Changes in the dimensions of the part must be taken into account when processing parts with small tolerances or eliminated by additional finishing by partially removing the main wear-resistant layer.

**Key words:** aluminum alloys, microarc treatment, phase composition, coating thickness, sample size.

**Subbotin Olekcandr**, senior Lecturer Department of Materials Science National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" Kirpichova str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002

E-mail: [subbotin.alex95@gmail.com](mailto:subbotin.alex95@gmail.com)

tel. : 067-530-04-35

**Belozarov Valerii**, candidate of technical sciences, professor, Department of Materials Science National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" Kirpichova str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002

E-mail: [belozarov.valerii@gmail.com](mailto:belozarov.valerii@gmail.com)

tel.067-575-29-14

**Subbotina Valeria**, doctor of technical sciences, Department of Materials Science National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" Kirpichova str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002

E-mail: [subbotina.valeri@gmail.com](mailto:subbotina.valeri@gmail.com)

tel. 067-933-20-68.