

УДК 621.432

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6\(37\).1.16-22](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).1.16-22)

**М.М. Студент**, ст. наук. співр., док. техн. наук  
Фізико-механічний інститут НАН України, м. Львів, Україна  
e-mail: [student.phmi@gmail.com](mailto:student.phmi@gmail.com)

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

**В.М. Гвоздецький**, ст. наук. співр., канд. техн. наук, **Х.Р. Задорожна**, н. с. співр., канд. техн. наук, **Я.Я. Сірак**, мол. наук. співр., канд. техн. наук, **Т.М. Кравчишин**, мол. наук. співр., канд. техн. наук  
Фізико-механічний інститут НАН України, м. Львів, Україна  
e-mail: [gvosdetcki@gmail.com](mailto:gvosdetcki@gmail.com), [880988@ukr.net](mailto:880988@ukr.net), [algirdas.280378@gmail.com](mailto:algirdas.280378@gmail.com), [tkravchyshyn@gmail.com](mailto:tkravchyshyn@gmail.com)

## Зносостійкі покриття на алюмінієвих сплавах

Досліджено абразивну зносостійкість алюмінієвого сплаву Д16 з покриттями нанесеними методами: гальванічного хромування, надзвукового газополуменевого напилення (HVOF – High Velocity Oxygen Fuel Flame Spraying process), плазмо-електролітного оксидування, твердого анодування та електродугового напилення покриттів. Показано, що досліджені покриття підвищують абразивну зносостійкість алюмінієвого сплаву Д16 в 20...90 разів за умов випробовувань закріпленим абразивом та в 3...10 разів за умов випробовувань незакріпленим абразивом. Застосування цих методів підвищує зносостійкість деталей із алюмінієвих сплавів до рівня сталевих та дозволяє замінювати сталь і чавун на алюмінієві сплави із покриттями, щоб зменшити вагу деталей та викиди вуглецю в атмосферу.

**алюмінієвий сплав, гальванічне хромування, газополуменеве напилення, плазмо-електролітне оксидування, тверде анодування, електродугове напилення**

**Постановка проблеми.** Алюмінієві сплави широко використовуються у промисловості. В останній час їх використовують як заміну сталі для виготовлення шківів, шестерень, колонок гідравлічних ротативних трансмісій грейферів та інш. Це зменшує вагу деталей та зменшує викиди вуглецю в атмосферу. Однак алюмінієві сплави мають малу абразивну зносостійкість, тому їх використання можливе із покриттями на поверхні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Серед методів нанесення зносостійких покриттів найбільш ефективними технологіями на цей час є гальванічне хромування [1], надзвукове газополуменеве напилення (HVOF – High Velocity Oxygen Fuel Flame Spraying process) [2], плазмо-електролітне оксидування (ПЕО) [3, 4, 5], тверде анодування (Hard Anodic Coatings) [6] та електродугове напилення покриттів (ЕДП) [7, 8, 9].

**Постановка завдання.** Провести дослідження впливу основних технолог зміцнення на абразивну зносостійкість алюмінієвих сплавів, порівняти результати досліджених покриттів та провести їх ранжування стосовно зносостійкості, корозійної стійкості, а також собівартості та екологічного аспекту.

**Виклад основного матеріалу.**

**Методи досліджень.** Досліджували диски із покриттями діаметром 50 mm та товщиною 10 mm., вирізані з прутка алюмінієвого сплаву Д16 (7075) зміцнені досліджуваними покриттями:

Високошвидкісне газополуменеве напилення (*HVOF*) здійснювали на устаткуванні (*Diamond Jet Hybrid gun*), де за паливо слугували пропан – кисень. Дистанція напилювання 175 мм, швидкість часточок порошку (карбід ванадію: ферохрому – 50:50) завбільшки 20...45  $\mu\text{m}$  становила 650 m/s. Попередньо поверхню зразків обдували корундом. Товщина покриття 500  $\mu\text{m}$ .

Електродугові покриття (ЕДП) товщиною 500  $\mu\text{m}$  наносили використовуючи металізатор ФМІ та порошковий дріт ФМІ-2 (Cr6Al6B3Fe-основа). Параметри напилення: напруга дуги – 32 V, струм – 150 А, тиск повітряного струменю – 0,6 МПа, дистанція напилення – 130 mm. Попередньо поверхню зразків обдували корундом.

ПЕО (оксидокерамічні) покриття синтезували на алюмінієвому сплаві Д16Т в електроліті 3 g/l KOH + 2 g/l рідкого скла (натрій силікатного) імпульсним струмом частотою 50 Hz, за співвідношення густин катодного та анодного струмів  $J_c/J_a=15/15$  A/dm<sup>2</sup>. Тривалість ПЕО процесу 60 min.

Процес твердого анодування проводили за температури  $-4...0^\circ\text{C}$  впродовж 60 min. Базовим електролітом слугував 20%-ий водний розчин H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. В процесі анодування підтримували густину струму 5 A/dm<sup>2</sup>.

Відкриту поруватість покриттів визначали методом гідростатичного зважування. Фазовий склад поверхневих шарів досліджували за допомогою дифрактометра ДРОН-3.0 у Cu-K – випромінюванні з фокусуванням трубки за схемою Бреґга-Брентано.

Абразивну зносостійкість закріпленим та незакріпленим абразивом визначали на установках згідно з [8].

Знос оцінювали за втратою маси зразків з точністю до  $2 \cdot 10^{-4}$  г електронній аналітичній вазі марки KERN ABJ 220 4M. Зносостійкість закріпленим абразивом визначали використовували абразивний диск із електрокорунду середньом'якої твердості СМ-2 на керамічній зв'язці 7K15 діаметром 150 mm та шириною 8 mm. Зернистість електрокорунду становила 250...315  $\mu\text{m}$  (25 А, 25 Н), лінійна швидкість тертя – 100 m/min, навантаження в зоні лінійного контакту – 1,5 kg. Зносостійкість за незакріпленого абразиву визначали за допомогою установки (рис. 1 b). Навантаження  $P = 2,4$  Н, швидкість обертання гумового диска – 25 m/min., діаметр 48...50 mm, ширина  $15 \pm 0,1$  mm, абразив – фракціонований (розмір частинок 200...1000  $\mu\text{m}$ ) та просушений пісок.

**Результати досліджень.** Структура (*HVOF*) покриттів, отриманих за допомогою пальника *Diamond Jet Hybrid gun* (рис. 1a) – це закристалізовані слабдеформовані краплини порошкових сумішей, які формують ламелі з ледь помітними прошарками оксидів між ними.

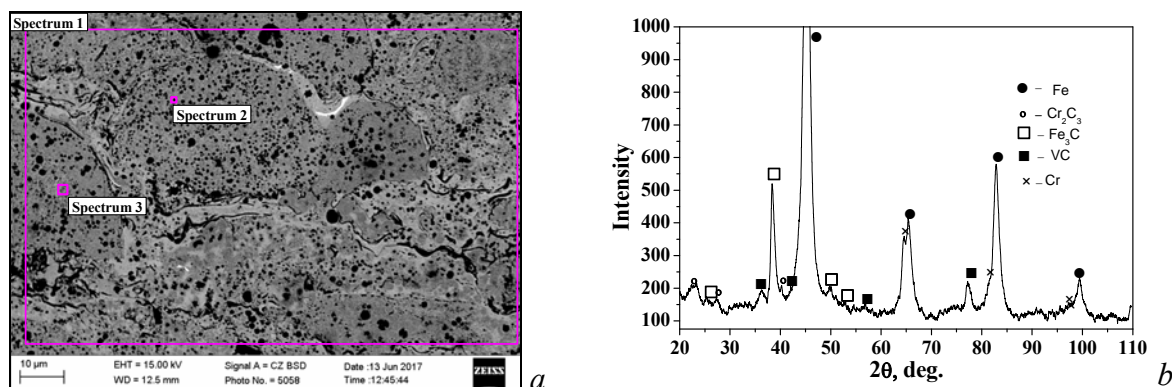


Рисунок 1 – Мікроструктура (a) та фазовий склад (b) HVOF покриття FeCr-VC

Джерело: розроблено авторами

Це ознака того, що в момент удару краплин об напилювану поверхню вони не були повністю в розплавленому стані, а лише мали підвищену пластичність, що зумовлено недостатньою температурою полум'я для плавлення всіх частинок порошку такого складу. Між ламелями в покритті спостерігається міцний металургійний зв'язок, спричинений сильною їх здеформованістю. У структурі покриття є карбіди заліза, хрому та ванадію. Мікротвердість покриття HVOF покриття FeCr-VC становить 1000...1100 HV. Поруватість покриттів не перевищує 2%.

ЕДП із порошкового дроту ФМІ-2 мають сильно виражену ламелярну будову, мікротвердість 700 HV. У структурі покриття спостерігаються оксидні фази  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та поруватість до 5% (рис. 2). Оксидні фази у структурі покриття мають високу твердість та підвищують зносостійкість покриття.

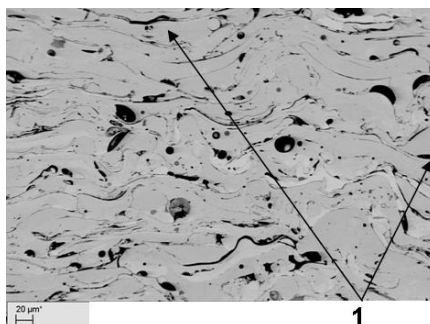


Рисунок 2 – Структура ЕДП із ПД ФМІ-2 (Cr6Al6B3Fe-основа), 1-оксидні включення  
Джерело: розроблено авторами

Плазмоелектролітна обробка алюмінієвих сплавів дозволяє формувати на їх поверні зносостійкі шари (ПЕО) на основі корунду ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) із твердістю до 2000 HV та товщиною до 400  $\mu\text{m}$ . Верхня дефектна частина ПЕО шару (рис. 3) має відносно малу мікротвердість (не вище 800 HV), тому має малу зносостійкість. Високу зносостійкість ПЕО шару забезпечує його нижня частина, твердість якої досягає 1900 HV.

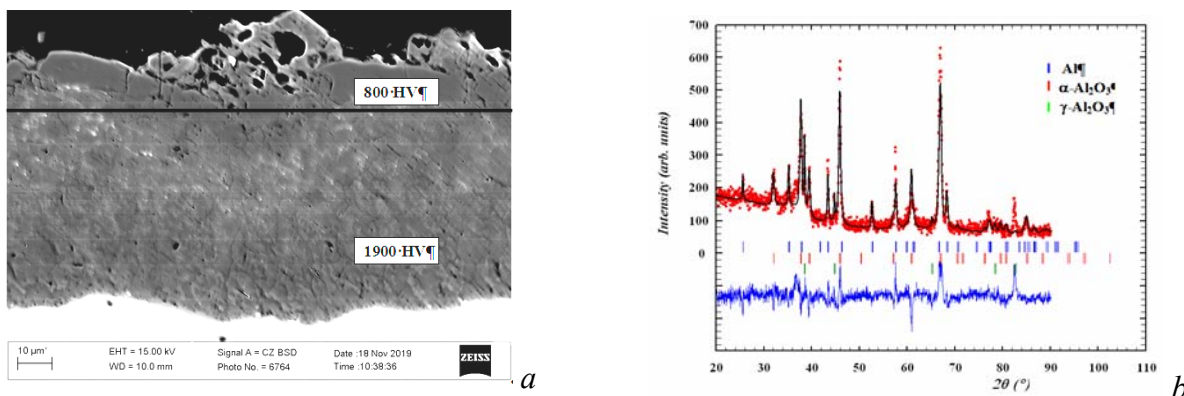


Рисунок 3 – Структура (a) та фазовий склад (b) оксидного шару, синтезованого в електроліті  $2\text{KOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$ , співвідношення густин катодного та анодного струмів  $J_c/J_a + 15/15 \text{ A/dm}^2$ . Тривалість ПЕО процесу 1 година

Джерело: розроблено авторами

Анодований шар формується на поверхні алюмінієвих сплавів у вигляді стовпчиків діаметром не більше 50  $\mu\text{m}$  з сильно гідратованого оксиду алюмінію  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (рис. 4).

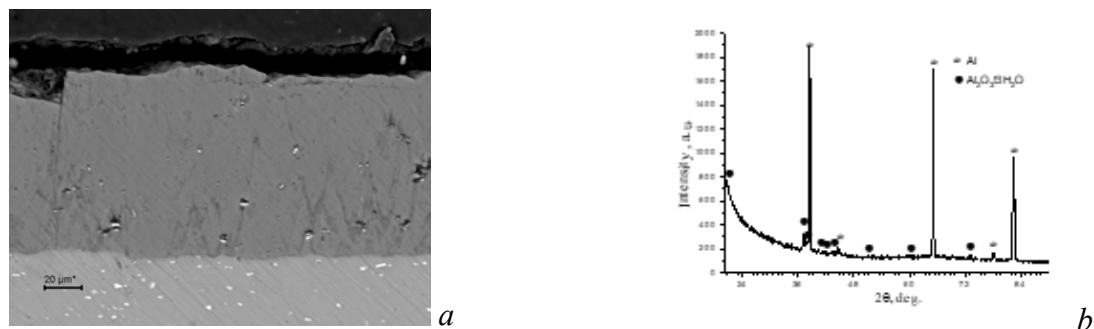


Рисунок 4 – Структура (а) та фазовий аналіз (b) анодованого шару на сплаві АД0 синтезованого впродовж 60 min.

Джерело: розроблено авторами

Кількість молекул в оксидному шарі залежить від режиму синтезу покриття. Мікротвердість анодованого шару не перевищує 500 HV. Після термічної обробки за температури 300<sup>0</sup>C протягом 1 h мікротвердість зростає до 700 HV, а кількість молекул H<sub>2</sub>O у гідратованому оксиді Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·nH<sub>2</sub>O зменшується від 3-х до однієї.

Отримані експериментальні дані зносостійкості сплаву Д16, порівняно з незміцненим, за рівнем зносу за різних умов випробувань, а також енергозатратністю приведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Ранжування способів поверхневого зміцнення алюмінієвого сплаву

Метод напilenня	Жорстко закріплений абразив	Незакріплений абразив	Мікротвердість HV	Відносні енергозатрати	Екологічність процесу
В95 - 1070 (Еталон)	1	1	100	–	–
Сталь 100Cr6 (аналог США 52100) (HRC64)	20	3	800	–	–
Гальванічне хромування	35	5	1000	3	Канцерогенні електроліти
HVOF (VC)	75...85	7...10	1100 мікротвердість карбідів VC-2500	7	Шум 130 дБ Пил металу мікронних розмірів
ПЕО	70-90	8-10	1900	7	Екологічно чисті електроліти
Тверде анодування	20	3	700	2	Екологічно чисті електроліти
Електродугове напilenня	30	5	750 Мікротвердість оксидів 800-2000	1	Шум 120дБ Пил металу мікронних розмірів

Джерело: розроблено авторами

Встановлено, що покриття HVOF (VC) та ПЕО мають у 3...4 рази вищу зносостійкість, ніж високовуглецева гартована сталь 100Cr6, та в 2 рази вищу, ніж

покриття із гальванічного хрому, проте мають високі енергозатрати. Найменші енергозатрати мають два методи: електродугове напилення покриттів та тверде анодування. В той же час зносостійкість таких покриттів є суттєво меншою, ніж покриттів, отриманих методом ПЕО та HVOF (VC). Для відновлення зношених деталей найбільш доцільними є методи HVOF (VC) та електродугове напилення, так як вони дозволяють наносити товсті покриття до 5 mm. Для нових деталей складної конструкції є більш прийнятною технологія зміцнення деталей методом твердого анодування, через те, що у цьому разі можна отримати зносостійке покриття без зміни розмірів деталі та її шорсткості. ПЕО покриття мають високу зносостійкість, проте відносно малу товщину і високу шорсткість, тому потребують фінішну обробку шліфуванням (рис. 5).



Рисунок 6 – Відновлені поверхні поршня (який новим був анодованим) (а) та загальний вигляд (б) ротатора грейфера методом електродугового напилення із порошкового дроту ФМІ-2

*Джерело: розроблено авторами*

Але у деяких випадках, особливо у поліграфічній промисловості, навпаки, необхідна контрольована шорсткість, що легко забезпечується різними режимами ПЕО. Метод гальванічного хромування має достатньо високу зносостійкість, дозволяє наносити товсті покриття, легко знімається та повторно наноситься на зношену поверхню, однак наявність канцерогенних електролітів змусили передові країни світу різко зменшити застосування цього методу у виробництві.

**Висновки.** Встановлено, що досліджені HVOF (VC), ПЕО, ЕДП та твердоанодовані покриття суттєво підвищують абразивну зносостійкість деталей із алюмінієвих сплавів. Методи HVOF (VC) та електродугове напилення можна використовувати для захисту від зношування нових, так і для відновлення зношених деталей. Методи ПЕО та тверде анодування можна використовувати для захисту від зношування лише нових деталей.

Застосування цих методів підвищує зносостійкість деталей із алюмінієвих сплавів до рівня сталевих та дозволяє замінювати сталь і чавун на алюмінієві сплави із покриттями, зменшуючи вагу деталей та викиди вуглецю в атмосферу.

## Список літератури

1. Oduoza C.F., Khan E. and Sihra T. Chromium Electroplating of Aluminium Alloys Using Electroless Nickel as Underlayer. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2014. 02(07). P. 59 -74.
2. Student M.M., Pokhmurs'ka H.V., Zadorozhna K.R.. Structure and Wear Resistance of VC-FeCr and VC-FeCrCo Coatings Obtained by Supersonic Flame Spraying // *Materials Science*. 2018. 54(1). P. 22-29.
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 / V. Hutsaylyuk et al. *Vacuum*, May 2020 179:109514
4. Вплив складу електроліту на характеристики синтезованого під час твердого анодування алюмінію оксидного шару / М. М. Студент, В. М. Гвоздецький, Г. Г. Веселівська та ін. *Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр.* 2021. Вип. 4 (35). С. 63–69.

5. Зносостійкість та корозійна тривкість ПЕО шарів на покритті зі сплаву Д16 / Г. Г. Веселівська, Я. Я. Сірак, В. М. Гвоздецький та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2017. Вип. 47, ч. 2. С. 31-37.
6. Improvement of the Functional Characteristics of Coatings Obtained By the Method of Hard Anodizing of Aluminum Alloys / M.M. Student, I.M. Pohrelyuk, H.V. Chumalo, V.M. Hvozdet'skyi . *Materials Science.* 2021. 56(6). P. 820–829.
7. Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings / T.R. Stupnyts'kyi, M.M. Student, H.V. Pokhmurs'ka, V.M. Hvozdet'skyi . *Materials Science.* 2016. 52(2). P. 165–172.
8. Багатофункціональні електродугові покриття : монографія / М. М. Студент, Г. В. Похмурська, В. М. Гвоздецький та ін. Львів : Простір-М, 2018. 335 с.
9. Абразивна зносостійкість та трибологічні характеристики електрометалізаційних композиційних покриттів / М.М. Студент, С.І. Маркович, В.М. Гвоздецький та ін. *Фізико-хімічна механіка матеріалів.* 2022. № 1. С. 90-97.

## Referencis

1. Oduoza, C.F., Khan, E. & Sihra, T. (2014). Chromium Electroplating of Aluminium Alloys Using Electroless Nickel as Underlayer . *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 02(07), P. 59 -74 [in English].
2. Student, M.M., Pokhmurs'ka, H.V. & Zadorozhna, K.R. (2018). Structure and Wear Resistance of VC–FeCr and VC–FeCrCo Coatings Obtained by Supersonic Flame Spraying . *Materials Science*, 54(1), P.22-29 [in English].
3. Hutsaylyuk, V. et.al. (2020). 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 . *Vacuum*, May 2020 179:109514 [in English].
4. Student, M.M., Hvozdet'skyj, V.M., Veselivs'ka, H.H. et al. (2021). Vplyv skladu elektrolitu na kharakterystyky syntezovanoho pid chas tverdoho anoduvannia aliuminiuu oksydnoho sharu [Influence of Electrolyte Composition on the Characteristics of Synthesized During Solid Anodization of Aluminum Oxide Layer]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky : zb. nauk. pr. – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, Vol. 4 (35), 63–69. [in Ukrainian]
5. Veselivs'ka, H.H., Sirak, Ya.Ya. & Hvozdet'skyj, V.M. et al. (2017) . Znosostijkist' ta korozijnna tryvkist' PEO shariv na pokrytti zi splavu D16 [Abrasion resistance and corrosion resistance of PEO layers on the D16 coating]. *Konstrujuvannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil's'kohospodars'kyx mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery*, Vol. 47, part 2, 31-37 [in Ukrainian].
6. Student, M.M., Pohrelyuk, I.M., Chumalo, H.V. & Hvozdet'skyi V. M. (2021). Improvement of the Functional Characteristics of Coatings Obtained By the Method of Hard Anodizing of Aluminum Alloys . *Materials Science*, 56(6), 820–829 [in English].
7. T.R.Stupnyts'kyi, M.M.Student, H.V.Pokhmurs'ka, V.M.Hvozdet's'kyi. (2016). Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings . *Materials Science*, 52(2), 165–172. [in English]
8. Student, M.M., Pokhmurs'ka, H.V., Hvozdet'skyj, V.M. et al. (2018). *Bahatofunktsional'ni elektroduhovi pokryttia [Multifunctional electric arc coatings]*. L'viv : Prostir-M [in Ukrainian].
9. Student, M.M., Markovych, S.I., Hvozdet'skyj, V.M. et al. (2022). Abrazyvna znosostijkist' ta trybolohichni kharakterystyky elektrometalizatsijnykh kompozytsijnykh pokryttiv [Abrasive wear resistance and tribological characteristics of electrometallization composite coatings]. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv – Physicochemical Mechanics of Materials*, 1, 90-97 [in Ukrainian].

**Mykhajlo Student**, DAc, 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 Hvozdet'skii**, PhD tech. sci., Senior Researcher, **Khrystyna Zadorozhna**, PhD tech. sci., Senior Researcher, **Yaruna Sirak**, PhD tech. sci., Senior Researcher, **Taras Kravchys'hyn**, PhD tech. sci., Senior Researcher

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

## **Wear-resistant Coatings on Aluminum Alloys**

Aluminum alloys are widely used in industry. Recently, they are used as a replacement for steel for the manufacture of pulleys, gears, columns of hydraulic rotary transmissions of grabs, etc. This reduces the weight

of the parts and reduces carbon emissions into the atmosphere. However, aluminum alloys have low abrasive wear resistance, so their use is possible with coatings on the surface.

High-speed gas flame spraying (HVOF) was carried out on the equipment (Diamond Jet Hybrid gun). Arc coatings with a thickness of 500  $\mu\text{m}$  were applied using FMI metallizer and FMI-2 powder wire (Cr6Al6B3Fe-base). PEO (oxido ceramic) coatings were synthesized on D16T aluminum alloy in an electrolyte of 3 g/l KOH + 2 g/l liquid glass (sodium silicate) with a pulsed current at a frequency of 50 Hz, with the ratio of the densities of the cathode and anode currents  $J_c/J_a=15/15 \text{ A}/\text{dm}^2$ . The duration of the PEO process is 60 min. The open porosity of the coatings was determined by the method of hydrostatic weighing. The phase composition of the surface layers was studied using a DRON-3.0 diffractometer.

HVOF (VC) and PEO coatings have been found to have 3 to 4 times higher wear resistance than high carbon hardened steel 100Cr6 and 2 times higher than galvanic chromium coatings, but have high energy consumption. Two methods have the lowest energy consumption: electric arc spraying of coatings and hard anodizing. At the same time, the wear resistance of such coatings is significantly lower than that of coatings obtained by the PEO and HVOF (VC) methods. For the restoration of worn parts, the most appropriate methods are HVOF (VC) and electric arc spraying, as they allow applying thick coatings up to 5 mm.

Conclusions: It was established that the studied HVOF (VC), PEO, EDP and hard anodized coatings significantly increase the abrasive wear resistance of aluminum alloy parts. HVOF (VC) and electric arc spraying methods can be used to protect new and worn parts from wear. PEO and hard anodizing methods can be used to protect against wear on new parts only.

The use of these methods increases the wear resistance of parts made of aluminum alloys to the level of steel and allows replacing steel and cast iron with aluminum alloys with coatings, reducing the weight of parts and carbon emissions into the atmosphere.

**aluminum alloy, galvanic chrome plating, gas flame spraying, plasma-electrolytic oxidation, hard anodizing, electric arc spraying**

*Одержано (Received) 15.09.2022*

*Прорецензовано (Reviewed) 22.09.2022*

*Прийнято до друку (Approved) 26.09.2022*