

**АБРАЗИВНА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ПЛАЗМОЕЛЕКТРОЛІТНИХ ШАРІВ НА ОСНОВІ КОРУНДУ, СИНТЕЗОВАНИХ НА АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВАХ ТА ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТЯХ**

*М. Студент, д. т. н., О. Калахан\*, д. т. н., В. Посувайло, к. т. н.,  
В. Гвоздецький, к. т. н., Я. Сірак, аспірант, Б. Гнатів\*  
Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України  
\*Львівський національний аграрний університет*

**Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій.** Численні деталі з алюмінієвих сплавів транспортної техніки, у тому числі й сільськогосподарських машин, швидко зношуються та виходять із ладу через їх невисоку поверхневу твердість. Це корпуси кришок розподільчих шестерень двигунів внутрішнього згоряння, поршні гідроциліндрів Ц-75 тракторів МТЗ-80 і ЮМЗ-6, сівалок СЗ-3,6 і культиваторів КПС, поршні двигунів внутрішнього згоряння тощо.

З-поміж багатьох методів відновлення цих деталей метод плазмоелектролітної обробки (ПЕО) алюмінієвих сплавів має важливі переваги. Мікродугове оксидування – процес отримання оксидокерамічних шарів на поверхні вентильних металів, що знаходяться в електроліті в якості робочого електрода, за високовольного режиму, що забезпечує наявність локальних плазмових мікророзрядів [3 – 5]. Переваги методу ПЕО:

1) мінімізація виробничих площ і скорочення часу технологічного процесу, оскільки не потрібна попередня ретельна підготовка поверхні виробів і конструкцій;

2) отримання антикорозійного покриття з вищими показниками механічних властивостей: твердість (до 25 ГПа), зносостійкість, адгезія до металічної основи, опір втомі, коефіцієнт тертя [1];

3) висока екологічна чистота.

Застосування комбінованої технології, що полягає в попередньому газотермічному напиленні покриттів із алюмінієвого сплаву з наступним синтезом плазмоелектролітною обробкою оксидного шару на основі корунду, дає змогу не тільки відновити зношені поверхні, а й суттєво підвищити їх зносостійкість, а отже, й довговічність.

**Постановка завдання.** Мета роботи – провести порівняльні дослідження зносостійкості оксидокерамічних шарів, синтезованих на алюмінієвих сплавах, і газотермічних покриттів на сталі.

**Виклад основного матеріалу.** Електродугові покриття (ЕДП) товщиною 1,0 мм наносили електродуговим металізатором ФМІ із алюмінієвого дроту 1,8 мм на попередньо оброблену дробострумінною обробкою поверхню плоских зразків із

алюмінієвого сплаву Д16. Оболонку порошкового дроту (ПД) виготовляли зі стрічки із сталі 08кп товщиною 0,4 мм і шириною 10 мм. Режими нанесення покриттів: струм 150 А, напруга дуги 32 В. Розпилювали ПД струменем стиснутого повітря під тиском 0,7 МПа із дистанції 150 мм.

Оксидокерамічні покриття синтезували на алюмінієвому сплаві та електродуговому покритті з Д16. Покриття формували в катодно-анодному режимі за співвідношення  $I_k/I_a = 1$  імпульсним струмом густиною 20 А/дм<sup>2</sup> в електроліті 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла (натрійсилікатного).

Абразивне зношування за умов тертя нежорстко закріпленими абразивними частками проводили згідно з ГОСТ 23.208-79. Кварцовий пісок просушували (його вологість не перевищувала 0,16 %), а гумовий диск заправляли шліфувальною шкіркою типу 2 (ГОСТ 6456-75) зернистістю №8П (ГОСТ 3647-71), закріпленою на зразку-держаку у вигляді плоскої сталеві пластини. У зону контакту гумового круга та зразка за допомогою дозувального пристрою постійно подавали абразив.

Режим тертя: навантаження  $P = 2,4$  Н, швидкість обертання гумового диска – 25 м/хв, діаметр 48...50 мм, ширина  $15 \pm 0,1$  мм, абразив – фракціонований (розмір частинок 200...1000 мкм) та просушений пісок. Для порівняльних досліджень використовували абразивний диск із електрокорунду середньом'якої твердості СМ-2 на керамічній зв'язці 7К15 діаметром 150 мм та шириною 8 мм. Зернистість електрокорунду становила 250...315 мкм (25А, 25Н), лінійна швидкість тертя – 100 м/хв, навантаження в зоні лінійного контакту – 1,5 кг. Знос оцінювали за втратою маси зразків із точністю до  $2 \cdot 10^{-4}$  г на електронній аналітичній вазі марки KERN ABJ 220 4М.

*Абразивна зносостійкість оксидокерамічних шарів на електродугових покриттях (ЕДП).* Оксидокерамічні шари на ЕДП на основі алюмінію характеризуються типовою мікроструктурою з трьома чітко вираженими областями (рис. 1): верхній пористий шар, щільна та широка область практично безпористого покриття та тонкий проміжний шар на межі контакту з алюмінієвою основою або з алюмінієвим напиленим покриттям.

Рентгенофазовим аналізом встановлено, що певна частина оксидокерамічних шарів знаходиться в рентгеноаморфному стані, але основною фазою є оксид алюмінію ( $\alpha$ - і  $\gamma$ -модифікації) (табл. 1).

Співвідношення  $\alpha/\gamma$  фаз залежить від складу сплаву, параметрів оксидування, а також від складу та концентрації електролітів. Оксидокерамічні шари, які формувалися на монолітному сплаві Д16Т, мають максимальний вміст  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 73 %. Оксидокерамічні шари, сформовані на напиленому Д16, містять лише 40 %  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та 60 %  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Оксидокерамічні шари, сформовані на напиленому АМг-6 за тих самих умов, містять 18 %  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і 82 %  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

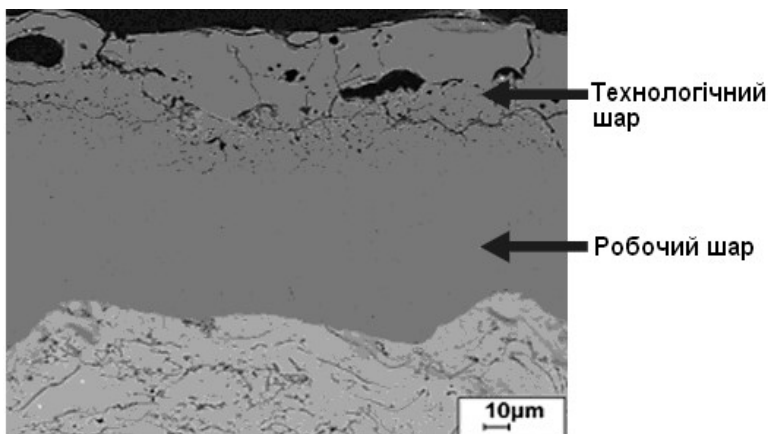
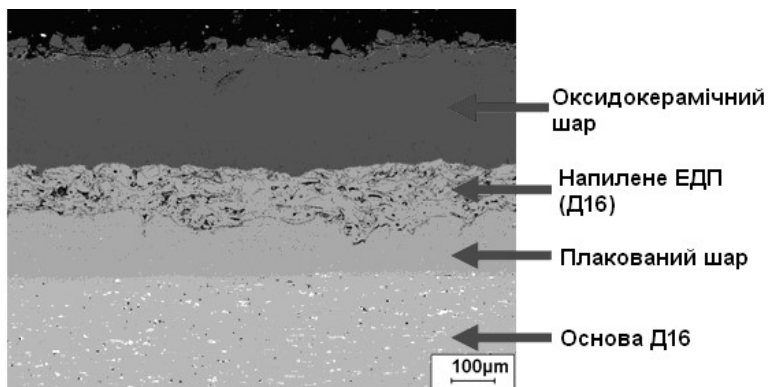


Рис. 1. Структура оксидокерамічного шару, синтезованого на ЕДП з дроту Д16.

Таблиця 1.

Вплив хімічного складу ЕДП на фазовий склад оксидокерамічного шару

Вид ЕДП	$\alpha$ -модифікація, % мас.	$\gamma$ -модифікація, % мас.
Д16Т	73	27
Основа – Д16Т+напилений Д16	40	60
Основа – Д16Т+напилений АМг-6	18	82

Зносостійкість оксидокерамічних шарів, синтезованих на зразках із алюмінієвих сплавів, порівнювали зі зносостійкістю зразків із необробленого алюмінієвого сплаву, а також зразків із загартованої сталі ШХ15 (HRC60). Оскільки оксидокерамічні шари мають верхній пористий шар, то спочатку досліджували його поведінку щодо абразивного зношування. Далі, після завершення випробувань, цей оксидокерамічний шар зішліфовували на товщину

50 мкм і знову проводили аналогічні випробування. Усереднені результати досліджень подано в табл. 2.

Таблиця 2

Абразивна зносостійкість оксидокерамічного шару

Абразивна зносостійкість за випробування:	Д16Т+ПЕО		Д16+ЕДП+ПЕО	
	технологічний шар	робочий шар	технологічний шар	робочий шар
– закріпленим абразивом	0,004	0,002	0,006	0,003
– незакріпленим абразивом	0,017	0,006	0,0024	0,008

Проведеними експериментами за двома методиками досліджень встановлено, що всі оксидокерамічні шари мають набагато вищі експлуатаційні характеристики, ніж еталон – необроблений сплав Д16Т та гартована сталь.

Кращі властивості щодо абразивного зношування має оксидокерамічне покриття, синтезоване на сплаві Д16Т. Високоймовірно, що це пояснюється найбільшим вмістом у ньому  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  порівняно з іншими покриттями. Зносостійкість верхнього та нижнього оксидокерамічних шарів, синтезованих на сплаві Д16Т та на ЕДП із суцільного дроту Д16, є досить високою. Як бачимо (див. рис. 2), найвищу зносостійкість при терті закріпленим абразивом мають оксидокерамічні шари, синтезовані на сплаві Д16Т та на ЕДП із суцільних дротів Д16 [2].

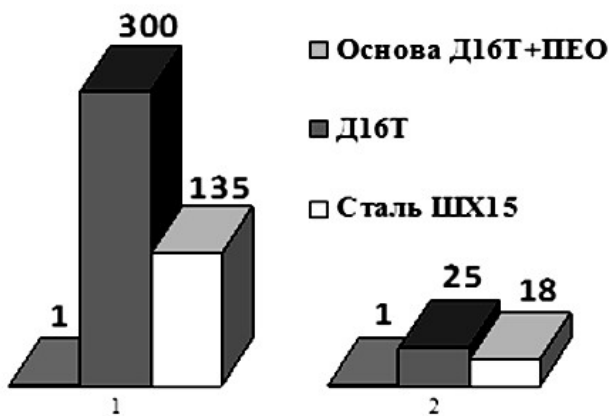


Рис. 2. Відносна абразивна зносостійкість за випробування: 1 – закріпленим абразивом; 2 – незакріпленим абразивом.

Результати досліджень абразивної зносостійкості гартованої сталі ШХ15 (HRC62) та оксидокерамічних шарів, сформованих на сплавах Д16Т, АМГ та ЕДП, свідчать про суттєво вищу зносостійкість оксидокерамічних шарів на напилених покриттях, ніж загартованої сталі ШХ15, як при випробуваннях закріпленим, так і незакріпленим абразивом.

**Висновки.** Показано, що абразивна зносостійкість оксидокерамічного шару на електродугових покриттях із сплаву Д16 перевищує зносостійкість загартованої сталі ШХ15 на два порядки за випробування закріпленим абразивом, що зумовлено найбільшим вмістом у ньому фази  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  порівняно з іншими покриттями.

#### Бібліографічний список

1. Вплив структури ПЕО шарів на електродугових алюмінієвих покриттях на зміну компромісного електродного потенціалу та коефіцієнтів тертя у парі зі сталлю на стадії притирання / Студент М. М. та ін. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2012. Спецвип. № 9, т. 2. С. 622 – 625.
2. Порівняльні характеристики зносостійкості оксидних та нітридних покриттів / Студент М. М. та ін. Проблеми трибології. 2015. № 3. С. 54 – 60.
3. Студент М. М., Шмирко В. В., Довгунік В. М., Клапків М. Д. Оцінювання механічних властивостей комбінованих металооксидокерамічних шарів на алюмінієвих сплавах. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2014. № 2. С. 116 – 121.
4. Gibbs energy calculation of electrolytic plasma channel with inclusions of copper and copper oxide with Al-base / V. M. Posuvailo *at al.* / *Materials Science and Engineering* 2017. Т.181. Р. 157 – 168.
5. Tribological properties of combined metal-oxide–ceramic layers on light alloys / Student M. M. *at al.* *Materials Science*. 2012. Vol. 48, No. 2. P. 180 –190.

**Студент М., Калахан О., Посувайло В., Гвоздецький В., Сірак Я., Гнатів Б. Абразивна зносостійкість плазмоелектролітних шарів на основі корунду, синтезованих на алюмінієвих сплавах та електродугових покриттях**

Численні деталі з алюмінієвих сплавів транспортної техніки, у тому числі й сільськогосподарських машин, швидко зношуються та виходять із ладу через їх невисоку поверхневу твердість. З-поміж багатьох методів відновлення цих деталей метод плазмоелектролітної обробки алюмінієвих сплавів має важливі переваги. Мікродугове оксидування – процес отримання оксидокерамічних шарів на поверхні вентильних металів, що знаходяться в електроліті в якості робочого електрода, за високовольтного режиму, що забезпечує наявність локальних плазмових мікророзрядів.

Застосування комбінованої технології, що полягає в попередньому газотермічному напиленні покриттів із алюмінієвого сплаву з наступним синтезом плазмоелектролітною обробкою оксидного шару на основі корунду, дає змогу не тільки відновити зношені поверхні, а й суттєво підвищити їх зносостійкість, а отже, й довговічність. Мета роботи – провести порівняльні дослідження зносостійкості

оксидокерамічних шарів, синтезованих на алюмінієвих сплавах, і газотермічних покриттів на сталі.

**Ключові слова:** електродугові покриття, алюмінієвий сплав, плазмоелектролітна обробка, абразивне зношування, мікродугове оксидування.

**Student M., Kalakhan O., Posuvajlo V., Gvozdeckii V., Sirak Y., Gnativ B. Abrasion resistance of plasma-electrolytic layers based on corundum synthesized on aluminum alloys and electric arc coatings**

Many details of aluminum alloys of transport equipment, including agricultural machinery, quickly wear out and fail because of its low surface hardness. Among many methods of restoring these details, the method of plasma-electrolytic processing of aluminum alloys has important advantages. Microarc oxidation is the process of obtaining oxide-ceramic layers on the surface of valve metals that are in the electrolyte as a working electrode in the high-voltage regime, which ensures the presence of local plasma discharges.

Application of the combined technology consists in preliminary gas-thermal spraying of coatings from an aluminum alloy with subsequent synthesis by plasmoelectrolytic treatment of an oxide layer based on corundum. This allows not only to restore worn surfaces, but also to significantly increase its wear resistance, and consequently, durability.

Objective: to conduct comparative studies of the wear resistance of oxide-ceramic layers synthesized on aluminum alloys and gas-thermal coatings and steel.

**Key words:** electric arc coating, aluminum alloy, plasma-electrolytic layer, abrasion resistance, microarc oxidation.

**Студент М., Калахан О., Посувайло В., Гвоздецкий В., Сирак Я., Гнатив Б. Абразивная износостойкость плазмoeлектролитических слоев на основе корунда, синтезированных на алюминиевых сплавах и электродуговых покрытиях**

Множество деталей из алюминиевых сплавов транспортной техники, в том числе и сельскохозяйственных машин, быстро изнашиваются и выходят из строя из-за их невысокой поверхностной твердости. Среди множества методов восстановления этих деталей метод плазмoeлектролитической обработки алюминиевых сплавов имеет важные преимущества. Микродуговое оксидирование – процесс получения оксидно-керамических слоев на поверхности вентильных металлов, которые находятся в электролите в качестве рабочего электрода, в высоковольтном режиме, что обеспечивает наличие локальных плазменных разрядов.

Применение комбинированной технологии заключается в предварительном газотермическом напылении покрытий из алюминиевого сплава с последующим синтезом плазмoeлектролитической обработкой оксидного слоя на основе корунда.

Это позволяет не только восстановить изношенные поверхности, но и существенно повысить их износостойкость, а следовательно, и долговечность.

В работе проведены сравнительные исследования износостойкости оксидно-керамических слоев, синтезированных на алюминиевых сплавах, и газотермических покрытий на стали.

**Ключевые слова:** электродуговые покрытия, алюминиевый сплав, плазмоэлектролитная обработка, абразивное изнашивание, микродуговое оксидирование.