

УДК 621.9

В.Є. Стрельницький, д-р фіз.-мат. наук, Ю.Г. Гуцаленко,
О.К. Севидова, канд. техн. наук, І.І. Степанова, канд. техн. наук
Харків, Україна

ДИЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МІКРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ КОРПУСІВ ІНСТРУМЕНТІВ АЛМАЗНО-ІСКРОВОГО ШЛІФУВАННЯ

У статті представлена виконана в НТУ «ХПИ» розробка локальних електроізоляційних захисних покриттів посадкових поверхонь корпусів з алюмінієвих сплавів шліфувальних кругів з алмазно-металевої композицією робочої частини. Наведено діелектричні характеристики отриманих методом мікродугового оксидування анодно-іскрових покриттів сплавів Д16Т і АК6.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, діелектричний захист, анодно-іскрове покриття, силікатно-лужний електроліт, мікродугове оксидування, довільно падаюча потужність, товщина покриття, питомий об'ємний електричний опір, електрична міцність.

В статье представлена выполненная в НТУ «ХПИ» разработка локальных электроизоляционных защитных покрытий посадочных поверхностей корпусов из алюминиевых сплавов шлифовальных кругов с алмазно-металлической композицией рабочей части. Приведены диэлектрические характеристики полученных методом микродугового оксидирования анодно-искровых покрытий сплавов Д16Т и АК6.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, диэлектрическая защита, анодно-искровое покрытие, силикатно-щелочной электролит, микродуговое оксидирование, произвольно падающая мощность, толщина покрытия, удельное объемное электрическое сопротивление, электрическая прочность.

The article presents made in NTU "KPI" the development of local electrically insulating coatings for the seating surfaces of frameworks from aluminum alloys of grinding wheels with diamond-metal composition of the working part. The dielectric characteristics of anode-spark coatings of D16T and АК6 alloys obtained by the microarc oxidation method are given.

Keywords: aluminum alloy, dielectric protection, anodic-spark coating, silicate-alkaline electrolyte, microarc oxidation, randomly falling power, coating thickness, specific volumetric electric resistance, electric strength.

Вступ. Інструментально-методичне забезпечення досліджень. Для проведення досліджень по формуванню електроізоляційних покриттів методом мікродугового оксидування (МДО) були вибрані два промислові алюмінієві сплави – Д16Т і АК6 (ГОСТ 4784-97), широко [1] відомих у виготовленні корпусів шліфувальних кругів з алмазно-металевою композицією робочої частини для електрофізикохімічної алмазно-абразивної обробки, зокрема алмазно-іскрового шліфування [2, 3].

Вибір електричних режимів МДО для дослідження здійснювали на основі аналізу літературних даних [4, 5] та з врахуванням особистих результатів попередніх досліджень.

Літературним оглядом встановлено, що найбільш широкі практичне впровадження метод МДО має на анодно-катодному струмі в режимі довільно падаючої потужності (ДПП). Цей режим може забезпечити формування відносно товстих (150...250 мкм) шарів покриття з високими показниками функціонально-експлуатаційних властивостей, зокрема і діелектричних.

Реалізацію процесу МДО в режимі ДПП проводили на лабораторному устаткуванні в умовах кафедри матеріалознавства НТУ «ХП» при участі проф. В.В. Білозерова і с.н.с. Г.І. Махатилової. Ємність ванни складала 5 л. Електричний режим окисації забезпечувався конденсаторним джерелом змінного струму потужністю 20 кВт. Схема такого джерела гарантує рівне співвідношення анодного і катодного струмів і можливість підвищення сумарної величини амплітудних значень анодної і катодної напруги до ~ 1000 В з ростом товщини покриттів МДО приблизно до 300 мкм. «Подвоєння» напруги за даною схемою здійснюється завдяки уніполярній провідності покриття МДО: в катодний півперіод його опір відносно невеликий і конденсатор заряджається майже до амплітудного значення напруги мережі – 500 В, яке в анодний півперіод складається з напругою мережі до тих пір, поки їх сума не досягне напруги пробою покриття. Таким чином формувальна напруга автоматично м'яко збільшується з ростом товщини покриття. Ємність конденсатора визначає струм в електричному колі.

В наших дослідженнях в режимі ДПП на змінному струмі вивчали вплив тривалості процесу МДО (1 і 2 год.) сплавів АК6 і Д16Т в різних електролітах на діелектричні показники якості покриттів за умов однакової початкової густини струму, яка дорівнювала 20 А/дм².

Другим режимом досліджень було вибрано гальваностатичний (ГС). Його нарівні з іншими використовують для реалізації процесів МДО при формуванні покриттів на виробках відносно малих партій та з відносно невеликою товщиною.

Основною перевагою ГС режиму є висока продуктивність, тобто висока швидкість нарощування функціонально-захисних покриттів, яку контролюють густиною струму. В той же час ГС режим має недолік – неможливість одержання якісних покриттів товщиною більше 60 ... 80 мкм через небезпеку переходу мікродугових розрядів в дугу.

Оскільки метою дослідження технологічних можливостей методу МДО було формування зносостійких електроізоляційних покриттів мінімально допустимої товщини, розгляд ГС електролізу в визначенні сценарію постановці експериментів доречний і доцільний.

Для реалізації ГС режиму МДО було розроблено, сконструйовано та виготовлено спеціальне трансформаторне джерело випрямленого струму, що дозволяло плавно змінювати величину поляризуючої напруги від 0 до 600 В [6]. Величина випрямленого струму – 1 А. Стабілізацію струму здійснювали

вручну, шляхом регулювання вхідної напруги. Процес МДО в ГС режимі проводили в склянці ємністю 1 л. Перемішування електроліту забезпечували барботуванням, охолодження – водою, водогоном через водяну сорочку.

Основними параметрами технологічних процесів, що впливають на якість покриттів МДО та їх товщину, окрім марки сплаву, тобто його якісного та кількісного складу, є склад електроліту, густина струму (або напруга) і тривалість процесу.

В рамках досліджень ГС режиму вивчали вплив густини анодного струму на основні показники діелектричної якості покриттів МДО – питомий об'ємний електричний опір (ρ_v) та електричну міцність (E). Значення щільності струму (j) були вибрані на основі результатів аналізу літературних джерел [7, 8] та попередніх особистих дослідів і відповідно дорівнювали: 5; 7,5; 10; 15 А/дм².

Час електролізу визначали, керуючись принципом перебігу однакової кількості електрики в кожному із експериментів за умов різних значень густини струму. Відповідно з розрахунком електроліз тривав: 40; 26,6; 20; 13,3 хв. з контролем часу за секундоміром. Це дозволяло виключити вплив товщини на значення функціонально-експлуатаційних показників, який підтверджено в дослідженнях [9, 10], оскільки встановлено [11], що товщина покриттів в основному залежить від кількості електрики і її приріст відповідає закону Фарадея.

Температуру розчину електролітів, які використовували при дослідженні ГС режиму, підтримували на рівні 20 ... 35 °С шляхом водного охолодження.

Вибір розчинів електролітів для досліджень було здійснено на основі аналізу літературних даних та з врахуванням результатів попередніх власних експериментів. Встановлено, що найбільш перспективними для технології формування електроізоляційних покриттів є розчини, які містять силікати лужних металів (або рідке скло) і власне луги – КОН або NaOH.

Якісні осадки покриттів забезпечують розбавлені електроліти, в яких концентрація силікатів не перевищує 1 ... 5 %, а лугів < 4 ... 5 г/л [12].

Досліджували 3 типи розчинів – 1-й – власне силікатний, 12 г/л РС (РС – технічний розчин натрієвого рідкого скла, з густиною 1,4 г/л), в згадуваннях надалі також скорочуємо до «електроліт 0 : 12» і т. п.; 2-й – лужно-силікатний – 2 г/л КОН + 12 г/л РС, надалі – також «електроліт 2 : 12» і т. п.; 3-й – більш розбавлений лужно-силікатний – 1 г/л КОН + 6 г/л РС (надалі – також «електроліт 1 : 6» і т. п.).

Готування розчинів проводили в певній послідовності, оскільки від порядку змішування компонентів залежать електричні параметри процесу МДО, якість покриттів і довговічність електроліту [5]. Зокрема, спочатку в дистильованій воді розчинювали необхідну кількість КОН, а потім додавали РС. Компоненти зважували на лабораторних вагах ВТУ 210 (AXIS, Польща).

Перед проведенням оксидування приготований електроліт витримували не менш, ніж 2 години, а потім проробляли впродовж 0,5 години робочим зразком з густиною анодного струму 10 А/дм². Після кожного досліджу розчин замінювали на свіжий, щоб виключити вплив збіднення електроліту компонентами на результати досліджень.

Вимірювання об'ємного електричного опору проводили у відповідності з ГОСТ 6433.2. Сутність вимірювання полягає у вимірюванні струму об'ємного витоку в залежності від прикладеної напруги. Для вимірів використовували тераомметр Е6-13, робоча напруга складала 100 В. Відлік вимірювань проводили через хвилину після подачі напруги.

Питомий об'ємний електричний опір визначали за формулою:

$$\rho_v = R_v \cdot (S / h), \quad (1)$$

де ρ_v – питомий об'ємний електричний опір покриття, Ом·м; R_v – загальний електричний опір об'єму ізоляційного покриття, обмеженого двома металевими електродами, Ом; S – площа розрізу контактного електрода, м²; h – товщина покриття, м.

Електричну міцність покриттів (напругу пробою) виміряли на змінному струмі (50 Гц). До складу устаткування входили високовольтний трансформатор, захисний опір 5 кОм та пристрій для плавного регулювання напруги. Вимірювання проводили з боку високої напруги. Кількість пробів – не менше 5. Розрахунки проводили за формулою:

$$E = (1 / n) \cdot (U_1 + \dots + U_i + U_n) / h, \quad (2)$$

де E – електрична міцність покриття, В/мкм; n – кількість вимірювань; U_i – пробивна напруга в i -му іспиті, В; h – товщина покриття, мкм.

Вимірювання товщини сформованих покриттів проводили відповідно ГОСТ 9.302 неруйнівним методом з використанням вихрострумовевого товщиноміру NOVOTEST ТП-1, похибка вимірювання $\pm 1,5$ мкм.

Основні результати та їх обговорення. Аналізуючи результати виміру об'ємного електричного опору та відповідно розрахованого питомого об'ємного електричного опору покриттів, які були сформовані в режимі ДПП на змінному струмі (ρ_v , табл. 1), можна однозначно стверджувати, що ρ_v зменшується з ростом товщини на обох сплавах в усіх досліджуваних електролітах. Більш суттєво це погіршення проявляється на сплаві АК6 – в 4...5 разів.

Даний факт загальновідомий [9] і пояснюється як неоднорідністю структури самого покриття, що збільшується з його ростом, так і ефектом «захоплення» струмопровідних іонів електроліту оксидним шаром.

Найкращі – максимальні – показники ρ_v забезпечують покриття на обох сплавах, сформовані в лужно-силікатному електроліті 1 : 6 (1 г/л КОН + 6 г/л РС), найгірші – в розчині 2 : 12 (2 г/л КОН + 12 г/л РС).

Таблиця 1 – Товщина (h), питомий об'ємний електричний опір (ρ_v) і електрична міцність (E) покриттів МДО, сформованих в режимі ДПП з різною тривалістю процесу (τ)

Марка сплаву	Електроліт (КОН : РС)	τ , час.	h , мкм	$\rho_v \cdot 10^9$, Ом·м	E , В/мкм
АК6	0 г/л : 12 г/л	1	60	7,4	3,2
		2	120	1,5	1,3
	2 г/л : 12 г/л	1	55	5,2	1,0
		2	120	0,9	0,4
	1 г/л : 6 г/л	1	40	8,9	4,3
		2	90	2,1	2,3
Д16Т	0 г/л : 12 г/л	1	80	12,7	10,2
		2	150	7,8	7,1
	2 г/л : 12 г/л	1	100	13,1	10,0
		2	210	8,3	6,3
	1 г/л : 6 г/л	1	70	13,8	13,1
		2	170	10,1	9,6

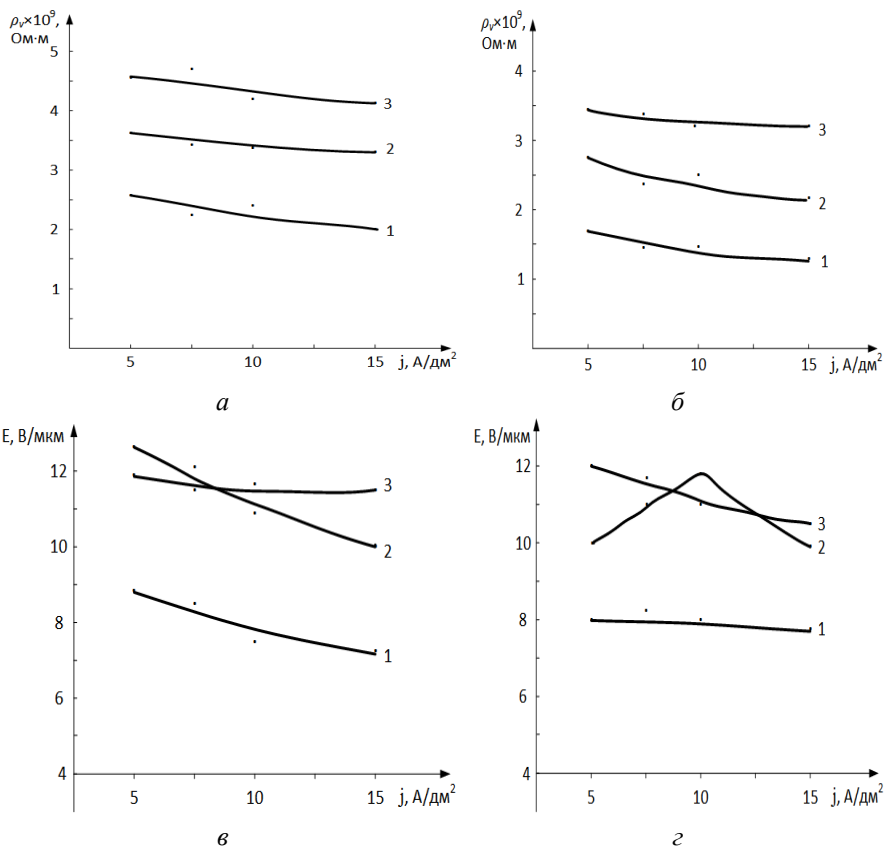
Для пояснення одержаних результатів необхідно додатково провести рентгеноструктурний аналіз покриттів, але можна припустити, що це пов'язано з підвищеною пористістю, шорсткістю, а також відносно максимальною товщиною покриттів, сформованих в електроліті 2 : 12.

Аналіз значень ρ_v покриттів, сформованих в ГС режимі (рис. 1), дозволяє зробити висновок, що в діапазоні досліджуваних величин ($5 \dots 15 \text{ А/дм}^2$) питомий об'ємний електричний опір майже не залежить від густини струму. Незначна тенденція його зменшення з ростом j , скоріше за все пов'язана зі збільшенням пор, що характерно для ГС режиму [13, 14].

Більш виразно проявляється різниця між ρ_v покриттів, сформованих в різних електролітах. Максимальне його значення зафіксовано для розчину РС 0 : 12, мінімальне – для 2 : 12.

Дані результати якісно корелюють зі значенням кінцевої напруги формування МДО (U_k), що встановлювалась в заключній фазі процесу МДО в кожному розчині незалежно від густини струму (табл. 2). Відповідно найбільше значення U_k було в чисто силікатному розчині 0 : 12 – 560 В, найменше – в лужно-силікатному 2:12, і складало 520 В.

Менш виразно ця кореляція спостерігається на сплаві Д16Т, але в загальному випадку зберігається основний висновок щодо ρ_v , значення якого в більшій мірі залежить від складу електроліту, а не від густини струму. Зокрема, як і на сплаві АК6, а також на обох сплавах, оброблених змінним струмом, найменшим електричним опором характеризувались покриття, сформовані в розчині 2 : 12. Однією із вірогідних причин такого результату може бути травильна дія розчину за рахунок підвищеної концентрації гідроксиду калію. З одного боку це призводить до збільшення загальної пористості покриття, а з іншого – до збагачення його якісного складу іонами лужних металів, що разом сприяє погіршенню електричного опору.



Електроліт (КОН : РС): 1 – 2 г/л : 12 г/л; 2 – 1 г/л : 6 г/л; 3 – 0 г/л : 12 г/л

Рисунок 1 – Залежності питомого об’ємного електричного опору (*a*, *б*) та електричної міцності (*в*, *г*) покриттів МДО, сформованих в ГС режимі на алюмінієвих сплавах АК6 (*a*, *в*) і Д16Т (*б*, *г*), від густини анодного струму

Результати досліджень електричної міцності покриттів МДО, сформованих змінним струмом в режимі ДПП (табл. 1), показують, що як і показник питомого об’ємного електричного опору, вона однозначно зменшується з ростом товщини, хоча загальна напруга пробою при цьому збільшується. Останнє пов’язують зі зниженням відкритої пористості та наскрізних дефектів, які, зазвичай, виступають «слабким місцем», оскільки електрична міцність повітря в них складає ~ 3 В/мкм.

Причина погіршення електричної міцності E з ростом товщини покриття h ті ж самі, що спричиняють погіршення об’ємного електричного опору –

неоднорідність структури, покращення умов для міграції та дифузії іонів лужних металів (K і Na) під дією температури, «захоплення» струмопровідних іонів [9].

Таблиця 2 – Режими електролізу та товщина покриттів МДО, сформованих в ГС режимі

Марка сплаву	Режим електролізу		Електроліт (KOH : PC)					
			0 г/л : 12 г/л		2 г/л : 12 г/л		1 г/л : 6 г/л	
	j , А/дм ²	τ , хв.	$U_{кв}$, В	h , мкм	$U_{кв}$, В	h , мкм	$U_{кв}$, В	h , мкм
АК6	5	40	560	33	520	37	540	30
	7,5	26,6	560	33	520	36	540	29
	10	20	560	33	520	37	540	29
	15	13,3	560	34	520	37	540	29
Д16Т	5	40	580	42	520	44	550	36
	7,5	26,6	580	42	520	44	550	37
	10	20	580	43	520	44	550	37
	15	13,3	580	43	520	45	550	38

Показник E в меншій мірі, ніж ρ_v , залежить від марки сплаву та складу електроліту, але констатуємо, що незначну перевагу по ньому, на 10...30%, мають покриття МДО, сформовані в режимі ДПП в електроліті 1 : 6.

Аналіз характеру зміни електричної міцності від досліджуваних чинників для покриттів, які сформовані в ГС режимі (рис. 1) показує, що він очікувано схожий на залежність питомого об'ємного електричного опору від них.

Зокрема, спостерігається мінімальний вплив густини струму, а більш відчутно показник E реагує на якісний та кількісний склад електроліту. Так, максимальна напруга пробою i , відповідно, електрична міцність спостерігаються на покриттях МДО сплава АК6, що сформовані в розчинах 0 : 12 і 1 : 6, найменші значення цих показників зафіксовані в розчині 2 : 12 (\sim в 1,5-1,7 рази).

Напруга пробою покриттів на сплаві Д16Т дещо вища, ніж на сплаві АК6. Але за рахунок того, що товщина покриттів на сплаві Д16Т теж більша, електрична міцність на обох сплавах виявилась майже співмірною. Як і для сплава АК6, кращі показники забезпечили силікатний (0 : 12) та розведений лужньо-силікатний (1 : 6) розчини, відносно гірші – більш концентрований електроліт 2 : 12.

В цілому, якщо порівнювати електрофізичні показники ρ_v і E покриттів МДО, сформованих за двома електричними режимами – ГС і ППД, можна говорити про кореляцію одержаних результатів досліджень і висновків щодо вибору найбільш придатного для процесу МДО електроліту. В обох випадках стійку перевагу мають розчини 1 : 6 і 0 : 12.

Слід зауважити, що ГС режим в усіх досліджуваних електролітах забезпечує формування покриттів товщиною 30...45 мкм (табл. 2), які відповідають вимогам щодо електроізоляційних властивостей. Зокрема, з урахуванням реальної площі S (м²) загального посадочно-кріпильного контакту ААІ при його установці на шпindelю верстата [15] та відомих значеннях товщини h (м) та питомого об'ємного електричного опору ρ_v (Ом·м) покриття, загальний об'ємний електричний опір R_v (Ом) останнього з визначенням за перетворюванням (1) відносно R_v перевищує значення $10^7...10^8$ Ом. Цього цілком достатньо, щоб розірвати електричний ланцюг в колі: деталь – інструмент (шліфувальний круг) – корпус верстата – деталь [16].

Вимоги щодо напруги пробою покриттів, яка повинна в 8...11 разів перевищувати робочу, повністю задовольняють покриття на обох сплавах, що сформовані в розчинах 0 : 12 і 1 : 6, і частково – в розчині 2 : 12.

В той же час за абсолютними значеннями показники ρ_v і E покриттів МДО, сформованих в ГС режимі, при співмірних товщинах дещо поступаються показникам, що характеризують покриття, одержані окисдуванням змінним струмом в режимі ДПП. В залежності від сплаву і складу розчину ρ_v може бути меншим в 1,5...2,5 рази, а E – в 1,4...2,1 рази.

Одержані результати не випадають із загально прийнятого розуміння цього факту, оскільки за іншими досліджуваними ознаками якості покриттів встановлено [14], що оксидні шари, одержані на змінному струмі, відрізняються відносно більшою однорідністю, меншою дефектністю і, вірогідно, саме ці показники позитивно впливають на визначеність електрофізичних критеріїв.

Висновки. Проведені дослідження дозволили науково обґрунтувати практичне застосування анодно-іскрових покриттів по методу МДО в якості електроізоляційних на алюмінієво-сплавних металевих корпусах алмазних шліфувальних кругів, які можуть бути використані в технологіях комбінованих електрофізикохімічних методів шліфування, зокрема алмазну-іскровому шліфуванні, без створення додаткових засобів струмозахисту шпindelних вузлів верстатів на універсальному устаткуванні.

Показано, що покриття за МДО товщиною 30...60 мкм, сформовані в ГС і ДПП режимах, відповідають вимогам щодо електроізоляційних властивостей – забезпечують загальний об'ємний електричний опір на посадковому отворі круга $10^7...10^8$ Ом і напругу пробою 350...760 В. Подальше зростання товщини покриттів призводить до погіршення питомих показників цих характеристик – електричної міцності та питомого об'ємного електричного опору.

За електрофізичними показниками питомого об'ємного електричного опору і електричної міцності покриття, сформовані на змінному струмі в режимі ДПП, перевершують аналогічні характеристики покриттів із

співрозмірною товщиною, одержаних в ГС режимі на випрямленому струмі. В залежності від сплаву і складу розчину питомий об'ємний електричний опір може бути більшим в 1,5...2,5 рази, а електрична міцність – в 1,4...2,1 рази. З урахуванням цього режим ДПП як більш функціонально ефективний у вирішенні поставленої задачі є кращим і є базовим для проведення досліджень з натурними зразками і розробки технології формування електроізоляційних покриттів на корпусах алмазних шліфувальних кругів.

Найкращі показники діелектричної якості отриманих за методом МДО покриттів – максимальні значення питомого об'ємного електричного опору і електричної міцності – на обох сплавах, АК6 і Д16Т, та в обох досліджених режимах МДО, ДПП і ГС, забезпечує лужно-силікатний розчин із співвідношенням масових часток КОН і рідкого скла у розчині 1 : 6, що є підставою для вибору цього електроліту в якості базового для подальших технологічних досліджень і практичних експериментальних втілень технічної ідеології МДО у функціонально локально достатніх діелектричних покриттях посадкових поверхонь алюмінієвих корпусів алмазно-абразивних інструментів, для виконання ними алмазно-іскрового шліфування на універсальних верстатах без модернізації відповідального за точність обробки шпиндельного вузла.

Представлені дослідження виконані відповідно завдань НДР «Розробка конструкційно-технологічних основ і технічних рішень алмазних інструментів підвищеної функціональності в реалізації електрофізикохімічних методів шліфування» (№ держ. реєстрації 0109U007406) за проектом ID 64244 від 26.08.2016 р. і планом наукових досліджень і розробок закладів Міністерства науки і освіти України з фінансуванням із державного бюджету у 2017-2018 рр.

Список использованных источников: 1. Бакуль, В.Н. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента : Учеб. пособие для техникумов / В.Н. Бакуль, Ю.И. Никитин, Е.Б. Верник, В.Ф. Селех. – М. : Машиностроение, 1975. – 296 с. 2. Калашиников, А.Т. Исследование физических особенностей и технологических возможностей алмазно-искрового шлифования : Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.03 – обработка материалов резанием / А.Т. Калашиников, Харьк. политех. ин-т [выполнена], Моск. высш. техн. училище им. Н.Э. Баумана [защита]; науч. рук.: М.Ф. Семко, Н.К. Беззубенко. – М., 1976. – 22 с. 3. Гуцаленко Ю.Г. Алмазно-искровое шлифование : обзор сорокалетия разработки харьковской научной школы физики процессов резания / Ю.Г. Гуцаленко // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве : Тр. 18-й междунар. науч.-практ. конф., 5-6 дек. 2012 г. – Харьков : ГП ХМЗ «ФЭД», 2012. – С. 79-88. 4. Черненко, В.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом / В.И. Черненко, Л.А. Снежко, И.И. Папанова. – Л. : Химия, 1991. – 128 с. 5. Суминов, И.В. Микродуговое оксидирование (обзор) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин и др. // Приборы. – 2001. – № 9. – С. 13-23. 6. Стысло, Б.А. Источник питания экспериментальной установки микродугового оксидирования / Б.А. Стысло, Ю.Г. Гуцаленко, Е.К. Севидова // Фізичні та комп'ютерні технології : Матеріали XXIII Міжнар. наук.-практ. конф., 21–22 груд. 2017 р., м. Харків. – Одеса : ОНПУ, 2018. – С. 94-96. 7. Снежко, Л.А. Анодно-искровое осаждение силикатов на перемennom токе / Л.А. Снежко, Л.С. Тихая, Ю.Э. Удовенко, В.И. Черненко // Защита металлов. – 1991. – Т. 27. – № 3. – С. 425-430. 8. Руднев, В.С. Исследование кинетики МДО-покрытий на сплавах алюминия в

гальваностатическом режиме / В.С. Руднев, П.С. Гордиенко, А.Г. Курносова, Т.И. Орлова // Электрохимия. – 1990. – Т. 26. – № 7. – С. 832-846. **9.** Павлюс, С.Г. Диэлектрические свойства анодно-искровых силикатных покрытий на алюминии / С.Г. Павлюс, В.И. Соборницкий, Ю.А. Шенрут и др. // Электронная обработка материалов. – 1987. – № 3. – С. 34-36. **10.** Филяк, М.М. Электрофизические свойства анодного оксида алюминия / М.М. Филяк, О.Н. Каныгина // Вестник ОГУ. – 2013. – № 9 (158). – С. 240-243. **11.** Баковец, В.В. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов / В.В. Баковец, О.В. Поляков, И.П. Долговесова. – Новосибирск : Наука, Sib. отд-ние, 1991. – 168 с. **12.** Кучмин, И.Б. Микродуговое анодирование алюминиевых сплавов в малоцентрированном силикатно-щелочном электролите : дис. ... канд. техн. наук : 02.00.05 – электрохимия / И.Б. Кучмин; СГТУ им. Ю.А. Гагарина. – Саратов, 2014. – 152 с. **13.** Чигринова, Н.М. Формирование покрытий методом анодного микродугового оксидирования и их эксплуатация в теплонпряженных узлах / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев // Порошковая металлургия. – 2001. – № 5/6. – С. 13-23. **14.** Михеев, А.Е. Технологические возможности микродугового оксидирования алюминиевых сплавов / А.Е. Михеев, Н.А. Терехин, В.В. Стаюра // Вестник машиностроения. – 2003. – № 2. – С. 56-63. **15.** ГОСТ 16181-82 : Круги алмазные шлифовальные. Технические условия / Межгосударственный стандарт. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 25 с. **16.** Медисон, В.В. Повышение стойкости режущего инструмента методом электроизоляции / В.В. Медисон, В.Ф. Пезашкин, В.И. Голубев, Д.В. Кашаник, С.М. Мурыженников // Технология машиностроения. – 2012. – №10. – С. 13-16.

Bibliography (transliterated): 1. Bakul', V.N., et al. *Osnovy proektirovaniya i tehnologija izgotovleniya abrazivnogo ialmaznogo instrumenta*. Moscow: Mashinostroenie, 1975. Print. 2. Kalashnikov, A.T. *Issledovanie fizicheskikh osobennostej i tekhnologicheskikh vozmozhnostej almazno-iskrovogo shlifovaniya. Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk*. Moscow, 1976. Print. 3. Gutsalenko, Yu.G. "Almazno-iskrovое shlifovanie: obzor sorokaletija razrabotki har'kovskoj nauchnoj shkoly fiziki processov rezaniya". *Fizicheskie i komp'juternye tehnologii v narodnom hozjajstve: Tr. 18-j mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 5th-6th Dec. 2012*. Kharkov: GP HMZ "FED", 2012. Print. 4. Chernenko, V.I., L.A. Snezhko, I.I. Papanova. "Poluchenie pokrytij anodno-iskrovym jelektrolizom". Leningrad: Himija, 1991. Print. 5. Suminov, I.V., et al. "Mikrodugovoe oksidirovanie (obzor)". *Pribory*. 2001. No. 9: 13-23. Print. 6. Styslo, B.A., Ju.G. Gutsalenko, and E.K. Sevidova. "Istozhnik pitanija jeksperimental'noj ustanovki mikrodugovogo oksidirovaniya". *Fizichni ta komp'juterni tehnologii: Materiali XXIII Mizhmar. nauk.-prakt. konf., 21–22 grud. 2017 r., m. Kharkiv*. Odesa: ONPU, 2018. 94-96. Print. 7. Snezhko, L.A., et al. "Anodno-iskrovое osazhdenie silikatov na peremennom toke". *Zashhita metallov*. 1991. Vol. 27. No. 3: 425-430. Print. 8. Rudnev, V.S., et al. "Issledovanie kinetiki MDO-pokrytij na splavah aljuminija v gal'vanostaticeskom rezhime". *Jelektrohimija*. 1990. Vol. 26. No. 7.: 832-846. Print. 9. Pavljus, S. G., et al. "Dijelektricheskie svojstva anodno-iskrovых silikatnyh pokrytij na aljuminii". *Jelektroonnaja obrabotka materialov*. 1987. No. 3. 34-36. Print. 10. Filjak, M.M., and O.N. Kanygina. "Jelektrofizicheskie svojstva anodnogo oksida aljuminija". *Vestnik OGU*. 2013. No. 9 (158): 240-243. Print. 11. Bakovec, V.V., O.V. Poljakov, and I.P. Dolgovesova. *Plazmenno-jelektroliticheskaja anodnaja obrabotka metallov*. Novosibirsk: Nauka, Sib. otd-nie, 1991. Print. 12. Kuchmin, I.B. *Mikrodugovoe anodirovanie aljuminievых splavov v malokoncentrirovanom silikatno-shhelochnom jelektrolite*: dis. ... kand. tehn. nauk: 02.00.05 – jelektrohimija. SGTU im. Ju.A. Gagarina. Saratov, 2014. Print. 13. Chigrinova, N.M., V.E. Chigrinov, A.A. Kuharev. "Formirovanie pokrytij metodom anodnogo mikrodugovogo oksidirovaniya i ih jekspluatacija v teplonaprjazhennyh uzлах". *Poroshkovaja metallurgija*. 2001. No. 5/6: 13-23. Print. 14. Miheev, A.E., N.A. Terehin, and V.V. Stacura. "Tehnologicheskie vozmozhnosti mikrodugovogo oksidirovaniya aljuminievых splavov". *Vestnik mashinostroenija*. 2003. No. 2: 56-63. Print. 15. ГОСТ 16181-82: *Krugi almaznye shlifoval'nye. Tehnicheskie uslovija*. Mezhgosudarstvennyj standart. Moscow: IPK Izd-vo standartov, 2003. Print. 16. Medison, V.V., et al. "Povyshenie stojkosti rezhushhego instrumenta metodom jelektroizoljacji". *Tehnologija mashinostroenija*. 2012. No. 10: 13-16. Print.

Поступила в редколлегию 25.06.2018