

## References

1. Xi Z., Chen X., Yu X., Ma Y., et al. (2016). Synthesis and properties of a novel high temperature pyridine-containing phthalonitrile polymer. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*. 54(24), 3819–3825.
2. Keller T.M. (1994). Synthesis and polymerization of multiple aromatic ether phthalonitriles. *Chemistry of Materials*. 6, 3, 302–305.
3. Dominguez D.D., Keller T.M. (2007). Properties of phthalonitrile monomer blends and thermosetting phthalonitrile copolymers. *Polymer*. 48, 1, 91–97.
4. Ye J., Li Q., Zhang S., Liu X. (2022). Melamine modified phthalonitrile resins: synthesis, polymerization and properties. *Polymer*. 256, 125156
5. Botnar A., Tikhomirova T., Nalimova K., Erzunov D., Razumov M., Vashurin A. (2020). Novel d- and f-metal phthalocyaninates based on 4-(2,4,5-trichlorophenoxy) phthalonitrile. Synthesis, spectroscopic and fluorescent properties. *Journal of Molecular Structure*. 1205, 127626.
6. Tomoda H., Saito S., Ogawa S., Shiraishi S. (1980). Synthesis of phthalocyanines from phthalonitrile with organic strong bases. *Chemistry Letters*. 9, 10. P. 1277–1280.
7. Keller T.M. (1993). Imide-containing phthalonitrile resin. *Polymer*. 34, 5, 952–955.
8. Laskoski M., Schear M. B., Neal A., Dominguez D. D., Ricks-Laskoski H. L., Hervey J., Keller T. M. (2015). Improved synthesis and properties of aryl ether-based oligomeric phthalonitrile resins and polymers. *Polymer*. 67, 185–191.
9. Bai S., Sun X., Chen X., Yu X., Zhang Q. (2020). Synthesis and properties of a thioether bonded phthalonitrile resin. *Materials Today Communications*. 24, 101352.
10. X. Zou, Xu M., Jia K., Liu X. (2014). Synthesis, polymerization, and properties of the allyl-functional phthalonitrile. *Journal of Applied Polymer Science*. 131, 23, 41203.

УДК 621.371

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-379-387

**Ю.Д. Філатов<sup>1</sup>**, доктор технічних наук; **Т.О. Пріхна<sup>1</sup>**, академік НАН України;  
**А.Ю. Бояринцев<sup>2</sup>**, **В.І. Сідорко<sup>1</sup>**, доктори технічних наук;  
**С.В. Ковальов<sup>1</sup>**, **В.А. Ковальов<sup>3</sup>**, **О.Я. Юрчишин<sup>3</sup>**, кандидати технічних наук

<sup>1</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,  
вул. Автозаводська 2, 04074 м. Київ, e-mail: [filatov@ism.kiev.ua](mailto:filatov@ism.kiev.ua)

<sup>2</sup>Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України, пр. Науки 60, 61072 м. Харків,  
e-mail: [boyarintsev@isma.kharkov.ua](mailto:boyarintsev@isma.kharkov.ua)

<sup>3</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», пр. Перемоги 37, 03056 м. Київ, e-mail: [urchyshynoks@ukr.net](mailto:urchyshynoks@ukr.net)

## ПОЛІРУВАННЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ОПТОТЕХНІКИ З МІДІ І АЛЮМІНІЮ

Метою даної роботи є дослідження закономірностей знімання оброблюваного матеріалу і формування нанопрофілю полірованих оптичних поверхонь деталей з міді і алюмінію під час полірування за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків метаборату міді та двооксиду церію. В результаті дослідження закономірностей полірування оптичних поверхонь деталей з міді і

алюмінію встановлено, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу зростає за підвищення добротності мікрорезонатора, який утворено поверхнями оброблюваного матеріалу і частинками полірувального порошку, збільшення часу життя квантових точок на оброблюваній поверхні у збудженому стані, коефіцієнту об'ємного зносу та найбільш ймовірного розміру наночастинок шламу, що свідчить про однакові закономірності полірування оптичних деталей з міді і алюмінію та неметалевих матеріалів. Встановлено, що параметри шорсткості  $R_a$ ,  $R_q$  і  $R_{max}$  полірованих поверхонь оптичних деталей з міді і алюмінію лінійно зростають за підвищення добротності мікрорезонатора і збільшення найбільш ймовірного розміру наночастинок шламу у відповідності до загальних закономірностей полірування. Показано, що теоретично розраховані значення швидкості знімання оброблюваного матеріалу під час полірування міді і алюмінію за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків метаборату міді і двооксиду церію добре узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування за відхилення 2–5 %. Обґрунтовано доцільність застосування полірувальної дисперсної системи з мікро- та нанопорошків метаборату міді для полірування оптичних поверхонь деталей з міді і алюмінію, яка забезпечує необхідну шорсткість полірованих поверхонь за високої швидкості знімання оброблюваного матеріалу. Результати дослідження доцільно використовувати при розробці технологічних процесів полірування оптичних поверхонь деталей з міді і алюмінію.

**Ключові слова:** полірування, дисперсна система, мідь, алюміній, наночастинки, швидкість зняття матеріалу, шорсткість.

### **Вступ**

Полірування прецизійних поверхонь деталей з міді і алюмінію, які використовуються в якості дзеркал для космічних і земних обсерваторій, для дзеркальних приладів видимого та ультрафіолетового діапазонів спектру, дзеркал для інфрачервоного діапазону, що працюють в криогенних умовах, здійснюється за допомогою методів алмазного мікроточіння і хіміко-механічного полірування за допомогою полірувальних дисперсних систем з мікро- і нанопорошків алмаза, оксиду алюмінію, двооксиду церію і метаборату міді [1–4].

Швидкість знімання оброблюваного матеріалу і шорсткість полірованих поверхонь, які залежать від фізико-хімічних властивостей матеріалу, притира і дисперсної системи, режимних і кінематичних параметрів процесу обробки, визначають ефективність полірування [5–7]. Однак, до теперішнього часу механізм знімання оброблюваного матеріалу і формування нанопрофілю полірованої поверхні, які відбуваються внаслідок утворення наночастинок шламу, не вивчено остаточно. Саме тому дослідження закономірностей їх утворення під час полірування оптичних поверхонь деталей з міді і алюмінію є актуальними.

Метою роботи є дослідження закономірностей знімання оброблюваного матеріалу і формування нанопрофілю полірованих оптичних поверхонь деталей з міді і алюмінію під час полірування за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків метаборату міді та двооксиду церію.

### **Методика дослідження**

Експериментальні дослідження закономірностей знімання оброблюваного матеріалу здійснювались під час полірування плоских поверхонь деталей з міді і алюмінію діаметром 42 мм на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притира із замші діаметром 100 мм за зусилля притискання 55,5 Н, частоти обертання притира 90 об/хв, зміщення 10 мм та довжини штриха 20 мм, середньої температури в зоні контакту оброблюваної деталі та притира 298 К. Полірування деталей з міді та алюмінію здійснювали за допомогою дисперсних систем ДС1 з мікро- та нанопорошків метаборату міді ( $CuB_2O_4$ , густина 3,86 г/см<sup>3</sup>, статична діелектрична проникність 6,05, ширина забороненої зони  $E_{sp} = 3,6$  еВ, параметри кристалічної ґратки  $a =$

1,148 нм,  $c = 0,562$  нм) і ДС2 з двооксиду церію ( $\text{CeO}_2$ , густина  $6,26$  г/см<sup>3</sup>, статична діелектрична проникність  $21,2$ , ширина забороненої зони  $E_{gp} = 3,3$  еВ, параметр кристалічної ґратки  $a = 0,5411$  нм), в яких як дисперсне середовище використовували гас. Частоти власних коливань частинок метаборату міді, які визначали за спектрами ІЧ-поглинання (Фур'є-спектрометр Nicolet 6700), складала (см<sup>-1</sup>): 550,0; 561,0; 571,0; 596,7; 626,2; 631,0; 635,1; 638,0; 732,6; 777,1; 849,1; 869,8; 943,5; 983,5; 994,7; 1085,6; 1109,8. Характерні частоти для частинок двооксиду церію складала (см<sup>-1</sup>): 465,0; 600,2; 668,4; 867,2; 951,6; 970,0; 1044,4; 1073,3 [6, 8].

Визначення розмірів та аналіз поверхні частинок дисперсної фази полірувальних дисперсних систем здійснювали за допомогою растрового електронного мікроскопу «Zeiss-EVO50» з системою мікроаналізу AZtec та сканувального мікроскопу-аналізатора Camscan-4DV. Середній розмір частинок полірувального порошку в дисперсних системах складав 409 нм (ДС1) і 910 нм (ДС2). Довжина шляху тертя  $L_t$  частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні складала 132 мм, а час контакту  $t_c$  частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею складав 3,2–3,3 мкс (ДС1) і 7,3–8,9 мкс (ДС2). Знімання оброблюваного матеріалу визначали ваговим методом за допомогою аналітичних терезів мод. «ВЛР-200». Параметри шорсткості полірованих поверхонь визначали методом комп'ютерного моделювання [6, 9].

### Механізм утворення частинок шламу під час полірування

Згідно з результатами останніх досліджень закономірностей полірування міді і алюмінію за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків утворення і видалення наночастинок шламу є наслідком передачі енергії від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні за механізмом QD-FRET, опосередкованого квантовими точками, які утворюються на їхніх поверхнях ( $\text{CuO-QDs}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O-QDs}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-QDs}$ ), що відбуваються у відкритому мікрорезонаторі, утвореному поверхнями оброблюваного матеріалу і частинками полірувального порошку [8, 10, 11]. Резонансне перенесення енергії від полірувального порошку до оброблюваного матеріалу, яке приводить до утворення наночастинок шламу оброблюваного матеріалу, відбувається на характерних частотах  $\nu_{1m}$ ,  $\nu_{2m}$  та характеризуються енергіями  $E_{1m}$ ,  $E_{2m}$  відповідно. Співвідношення цих енергій визначає кількість елементарних комірок в квантових точках оброблюваної поверхні  $\xi_m = E_{1m}^4 / (E_{2m}^2 - E_{1m}^2)^2$ .

Швидкість знімання оброблюваного матеріалу  $V_m$ , яка залежить від розстроювання енергії  $\delta E_m = E_{2m} - E_{1m}$  та добротності мікрорезонатора  $Q_m = E_{1m} / (E_{2m} - E_{1m})$ , визначається відповідно до формули [8]:

$$V_m = \frac{L_t u}{d} \eta_m \tau_m Q_m, \quad (1)$$

де  $\eta_m$  – коефіцієнти об'ємного зносу,  $L_t$  – довжина шляху тертя частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні,  $d$  – розмір частинки полірувального порошку,  $\tau_m$  – час життя квантових точок оброблюваної поверхні у збудженому стані [5, 6, 8].

### Результати і обговорення

Дослідження механізму видалення оброблюваного матеріалу під час полірування міді і алюмінію за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків ДС1 і ДС2 здійснювали з врахуванням того, що в результаті QD-FRET енергія наночастинок шламу залежить від ширини забороненої зони квантових точок  $E_{gqd}$  на оброблюваній поверхні [8, 10], а їх енергії визначаються за умови мінімуму розстроювання енергій  $\delta E_m$ .

За спектрами інфрачервоного поглинання оброблюваних металів і полірувальних дисперсних систем було визначено значення частот коливань кластерів на оброблюваній

поверхні і на поверхні частинок полірувального порошку, спектрального розділення  $\delta\nu_m = \nu_{2m} - \nu_{1m}$  і розстроювання енергії  $\delta E_m$ . Показано, що під час полірування міді за допомогою дисперсної системи ДС1 мінімальні значення  $\delta\nu_m = 8,3 \text{ см}^{-1}$  ( $\delta E_m = 1,0 \text{ меВ}$ ) спостерігались для квантових переходів між енергетичними рівнями кластерів на поверхні частинок полірувального порошку і квантових точок  $\text{Cu}_2\text{O-QDs}$  на оброблюваній поверхні на частотах:  $\nu_{2m} = 631,0 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{1m} = 622,7 \text{ см}^{-1}$ . За використання дисперсної системи ДС2 мінімальні значення  $\delta\nu_m = 7,4 \text{ см}^{-1}$  ( $\delta E_m = 0,9 \text{ меВ}$ ) спостерігались для квантових переходів між енергетичними рівнями кластерів на поверхні частинок полірувального порошку і квантових точок  $\text{CuO-QDs}$  на оброблюваній поверхні на частотах:  $\nu_{2m} = 1044,4 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{1m} = 1037,0 \text{ см}^{-1}$  [12–14].

Під час полірування алюмінію за допомогою дисперсної системи ДС1 мінімальні значення  $\delta\nu_m = 12,1 \text{ см}^{-1}$  ( $\delta E_m = 1,5 \text{ меВ}$ ) спостерігались для квантових переходів між енергетичними рівнями кластерів на поверхні частинок полірувального порошку і квантових точок  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-QDs}$  на оброблюваній поверхні на частотах:  $\nu_{2m} = 849,1 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{1m} = 837,0 \text{ см}^{-1}$ , а за використання дисперсної системи ДС2 – мінімальні значення  $\delta\nu_m = 24,2 \text{ см}^{-1}$  ( $\delta E_m = 3,0 \text{ меВ}$ ) досягались при квантових переходах – на частотах:  $\nu_{2m} = 600,2 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{1m} = 576,0 \text{ см}^{-1}$  [2–4].

Визначення розмірів наночастинок шламу здійснювали за припущення, що вони мають форму паралелепіпедів, яка зумовлює утворення нанорозмірного рельєфу полірованих поверхонь у вигляді терасно-східчастої структури [6, 9]. Враховуючи, що під час полірування міді і алюмінію на оброблюваній поверхні утворюються квантові точки  $\text{Cu}_2\text{O-QDs}$ , які складаються з оксиду міді (I)  $\text{Cu}_2\text{O}$  (густина  $6,0 \text{ г/см}^3$ , діелектрична проникність  $7,5$ , параметр кристалічної ґратки  $0,42696 \text{ нм}$ ),  $\text{CuO-QDs}$ , які складаються з оксиду міді (II)  $\text{CuO}$  (густина  $6,315 \text{ г/см}^3$ , діелектрична проникність  $12,98$ , параметри кристалічної ґратки  $a = 0,4684 \text{ нм}$ ,  $b = 0,3423 \text{ нм}$ ,  $c = 0,5129 \text{ нм}$ ) і  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-QDs}$ , які складаються з оксиду алюмінію  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (густина  $3,98 \text{ г/см}^3$ , діелектрична проникність  $9,3$ , параметри кристалічної ґратки  $a = 0,47617 \text{ нм}$  і  $c = 1,29947 \text{ нм}$ ), було розраховано розміри паралелепіпедів і визначено кількість елементарних комірок  $\xi_{1m}$ , з яких вони складаються, а також найбільш ймовірні розміри наночастинок шламу ( $a_m$ ), які утворюються в результаті *QD-FRET*.

Ефективна ширина забороненої зони квантових точок  $E_{gqd}$  на оброблюваній поверхні, яка була розрахована в залежності від розміру наночастинок шламу  $a_m$  і ефективної маси екситонів  $0,394 m_e$ ,  $0,381 m_e$  і  $0,161 m_e$  (де  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$  – маса електрону) для  $\text{Cu}_2\text{O-QDs}$ ,  $\text{CuO-QDs}$  і  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-QDs}$  відповідно [10, 15–17], складала:  $2,26 \text{ еВ}$  (ДС1),  $1,34 \text{ еВ}$  (ДС2) – при поліруванні міді і  $2,71 \text{ еВ}$  (ДС1),  $2,75 \text{ еВ}$  (ДС2) – при полірування алюмінію.

Відповідно до формули (1) було розраховано добротність мікрорезонатора  $Q_m$ , коефіцієнти об'ємного зносу  $\eta_m$ , час життя квантових точок на оброблюваній поверхні  $\tau_m$  у збудженому стані (табл. 1), а також швидкість знімання оброблюваного матеріалу  $V_m$  і параметри шорсткості полірованих поверхонь оптичних деталей з міді і алюмінію (табл. 2).

В результаті аналізу даних, наведених в табл. 1, 2, встановлено, що під час полірування оптичних деталей з міді і алюмінію за допомогою полірувальних дисперсних систем з мікро- і нанопорошків ДС1 і ДС2 швидкість знімання оброблюваного матеріалу нелінійно зростає за підвищення добротності мікрорезонатора. Показано, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу нелінійно зростає за збільшення часу життя квантових точок на оброблюваній поверхні  $\tau_m$  у збудженому стані, підвищення коефіцієнту об'ємного зносу  $\eta_m$  та зростання найбільш ймовірного розміру наночастинок шламу  $a_m$  відповідно до рівняння (1), що свідчить про однакові закономірності полірування поверхонь деталей з неметалевих матеріалів і металів.

Встановлено, що визначені методом комп'ютерного моделювання параметри шорсткості  $Ra$ ,  $Rq$  і  $Rmax$  полірованих поверхонь оптичних деталей з міді і алюмінію, які залежать від структури оброблюваного матеріалу, частот коливань квантових точок на

оброблюваній поверхні і кластерів на поверхні частинок полірувального порошку  $\nu_{1m}$ ,  $\nu_{2m}$ , спектрального розділення  $\delta\nu_m$ , розстроювання енергії  $\delta E_m$ , лінійно зростають за підвищення добротності мікрорезонатора  $Q_m$  відповідно до загальних закономірностей полірування.

Таблиця 1. Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою під час полірування міді і алюмінію

Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою	Оброблюваний матеріал			
	Мідь		Алюміній	
	Полірувальна дисперсна система			
	ДС1	ДС2	ДС1	ДС2
Квантова точка	Cu <sub>2</sub> O-QD	CuO-QD	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -QD	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -QD
Квантові переходи: $\nu_{2m} \rightarrow \nu_{1m}$ , см <sup>-1</sup>	631,0 → 622,7	1044,4 → 1037,0	849,1 → 837,0	600,2 → 576,0
Спектральне розділення $\delta\nu_m$ , см <sup>-1</sup>	8,3	7,4	12,1	24,2
Розстроювання енергії $\delta E_m$ , меВ	1,0	0,9	1,5	3,0
Кількість елементарних комірок $\xi_m$	1389	4875	1179	135
Найбільш ймовірний розмір $a_m$ , нм	6,5	10,4	9,3	4,0
Ефективна ширина забороненої зони $E_{gqd}$ , еВ	2,26	1,34	2,71	2,75
Добротність мікрорезонатора $Q_m$	75,0	140,1	69,2	23,8
Час життя збудженого стану КТ $\tau_m$ , нс	957	1773	723	136
Коефіцієнт об'ємного зносу $\eta_m$ , 10 <sup>-12</sup> м <sup>2</sup> /с	0,79	1,16	1,87	0,42

Аналіз залежності параметра  $Rz$  шорсткості полірованих поверхонь від найбільш ймовірного розміру наночастинок шламу  $a_m$  дозволяє зробити висновок, що використання дисперсної системи ДС2 на основі полірувальних порошоків двооксиду церію для полірування міді не забезпечує виконання вимог, які висуваються до полірованих оптичних поверхонь ( $Rz = 0,085$  мкм  $>$  0,05 мкм). Варто зазначити, що, незважаючи на мінімальні значення параметрів шорсткості (табл. 2), швидкість знімання оброблюваного матеріалу під час полірування алюмінію за допомогою дисперсної системи ДС2 – недостатня (маса знятого матеріалу знаходиться в межах похибки вимірювань).

Це означає, що для полірування оптичних поверхонь деталей з міді і алюмінію доцільно використовувати полірувальну дисперсну систему з мікро- та нанопорошків метаборату міді, яка забезпечує необхідну шорсткість полірованих поверхонь за високої швидкості знімання оброблюваного матеріалу.

Таблиця 2. Показники полірування оптичних поверхонь деталей з міді і алюмінію

Показники полірування	Оброблюваний матеріал			
	Мідь		Алюміній	
	Полірувальна дисперсна система			
	ДС1	ДС2	ДС1	ДС2
Швидкість знімання оброблюваного матеріалу $V_m, 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	19,6	42,5	43,3	0,24
Експеримент: мкм/год	5,3	10,6	11,1	Маса знятого матеріалу – в межах похибки вимірювань
мг/хв.	1,1	2,2	0,7	
$10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	20,5	40,7	42,6	
Похибка розрахунку, %	4	5	2	
Параметри шорсткості:				
$Ra, \text{ нм}$	9,0±0,4	16,9±1,0	9,8±0,3	5,2±0,2
$Rq, \text{ нм}$	9,5±0,5	18,4±0,6	10,2±0,4	5,5±0,3
$R_{\text{max}}, \text{ нм}$	12,8±1,0	29,6±1,3	16,4±1,4	9,9±1,0
$Rz, \text{ мкм}$	0,045	0,085	0,049	0,026

Під час експериментальної перевірки наведених результатів показано, що теоретично розраховані значення швидкості знімання оброблюваного матеріалу під час полірування міді і алюмінію за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків метаборату міді і двооксиду церію, в яких як дисперсне середовище використовували гас, добре узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування (табл. 2) за відхилення розрахункових і експериментальних даних 2–5 %. Це свідчить, що під час полірування утворення і видалення наночастинок шламу є наслідком передачі енергії від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні і відбувається за механізмом QD-FRET, опосередкованого квантовими точками, які утворюються на поверхнях міді (CuO-QDs, Cu<sub>2</sub>O-QDs) і алюмінію (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-QDs).

### Висновки

В результаті дослідження закономірностей полірування оптичних поверхонь деталей з міді і алюмінію за допомогою полірувальних дисперсних систем з мікро- і нанопорошків встановлено, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу зростає за підвищення добротності мікрорезонатора і збільшення часу життя квантових точок на оброблюваній поверхні у збудженому стані, коефіцієнту об'ємного зносу та найбільш ймовірного розміру наночастинок шламу строго відповідно до рівняння (1), що свідчить про однакові закономірності полірування оптичних деталей з міді і алюмінію та неметалевих матеріалів.

Встановлено, що параметри шорсткості  $Ra$ ,  $Rq$  і  $R_{\text{max}}$  полірованих поверхонь оптичних деталей з міді і алюмінію лінійно зростають за підвищення добротності мікрорезонатора і збільшення найбільш ймовірного розміру наночастинок шламу відповідно до загальних закономірностей полірування.

Обґрунтовано доцільність застосування полірувальної дисперсної системи ДС1 з мікро- та нанопорошків метаборату міді для полірування оптичних поверхонь деталей з міді і алюмінію, яка забезпечує необхідну шорсткість полірованих поверхонь за високої швидкості знімання оброблюваного матеріалу.

Показано також, що теоретично розраховані значення швидкості знімання

оброблюваного матеріалу під час полірування міді і алюмінію за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків метаборату міді і двооксиду церію добре узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування за відхилення 2–5 %.

Y.D. Filatov, T.O. Prikhna<sup>1</sup>, A.Y. Boyarintsev<sup>2</sup>, V.I. Sidorko<sup>1</sup>,  
S.V. Kovalev<sup>1</sup>, V.A. Kovalev, O.Ya. Yurchyshyn<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*N : V : Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine,*

<sup>2</sup>*Institute for Scintillation Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine,*

<sup>3</sup>*National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky», Ukraine*

### POLISHING OF FLAT SURFACES OF COPPER AND ALUMINUM OPTICAL PARTS

*The purpose of this work is to study the regularities of removal of the processed material and the formation of a nanoprofile of polished optical surfaces of copper and aluminum parts during polishing using disperse systems of micro- and nanopowders of copper metaborate and cerium dioxide. As a result of the study of the regularities of polishing optical surfaces of parts made of copper and aluminum, it was found that the removal rate of the processed material increases with an increase in the quality factor of the microresonator formed by the surfaces of the processed material and particles of polishing powder, an increase in the lifetime of quantum dots on the processed surface in the excited state, the volumetric wear coefficient, and the most probable size of sludge nanoparticles, which indicates the same regularities of polishing optical parts made of copper and aluminum and non-metallic materials. It is established that the roughness parameters Ra, Rq and Rmax of polished surfaces of optical parts made of copper and aluminum increase linearly with increasing Q factor of the microresonator and increasing the most probable size of sludge nanoparticles in accordance with the general laws of polishing. It is shown that the theoretically calculated values of the removal rate of the processed material during polishing of copper and aluminum using disperse systems of micro- and nanopowders of copper metaborate and cerium dioxide are in good agreement with the data of experimental determination of polishing productivity with a deviation of 2–5%. The feasibility of using the polishing disperse system of micro- and nanopowders of copper metaborate for polishing optical surfaces of parts made of copper and aluminum, which provides the required roughness of polished surfaces at a high removal rate of the processed material, is substantiated. The results of the study should be used in the development of technological processes for polishing optical surfaces of copper and aluminum parts.*

**Key words:** *polishing, dispersed system, copper, aluminum, nanoparticles, material removal rate, roughness.*

#### Література

1. Hazarika J., Patil C.S., Rajaraman P.V. Formulation of slurry for chemical mechanical polishing of Cu substrates. *Mater. Today: Proc.* 2021. Vol. 39, Part 4. P. 1781–1785.
2. Ulitschka M., Bauer J., Frost F., Arnold T. Improvement of the optical properties after surface error correction of aluminium mirror surfaces. *J. Europ. Opt. Soc.-Rapid Public.* 2021. Vol. 17, N 1. P. 1–13.
3. Liu F., Jia P., Shen H., Xu Y. Optical performance of aluminum mirror for cryogenic applications. *Optik.* 2021. Vol. 231, 166282.
4. Chioetto P., Zuppella P., Da Deppo V., Pace E., Morgante G., Terenzi L., Brienza D., Missaglia N., Bianucci G., Spinelli S., Guerriero E., Rossi M., Grèzes-Besset C., Bondet C., Chauveau G., Porta C., Malaguti G., Micela G. Qualification of the thermal stabilization, polishing and coating procedures for the aluminum telescope mirrors of the ARIEL mission. *Experim. Astronom.* 2022. Vol. 53. P. 885–904.
5. Filatov Yu.D. Polishing of Precision Surfaces of Optoelectronic Device Elements Made of

- Glass, Sital, and Optical and Semiconductor Crystals: A Review. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, N 1. P. 30–48.
6. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Філатов О.Ю., Ковальов С.В. Фізичні засади формоутворення прецизійних поверхонь під час механічної обробки неметалевих матеріалів. К.: Наук. думка, 2017. 248 с.
  7. Filatov Yu.D. Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing / eds. J. Zhang et al. Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining *Springer Tracts in Mechanical Engineering*. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019. P. 129–165.
  8. Filatov Yu.D., Boyarintsev A.Yu., Kolesnikov O.V., et al. Polishing of Optotechnical Parts Made of Semiconductor Materials. *J. Superhard Mater.* 2025. Vol. 47, N 2. P. 125–136.
  9. Filatov Y.D., Sidorko V.I., Sokhan' S.V. et al. Roughness of Polished Surfaces of Optoelectronic Components Made of Polymeric Optical Materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, N 1. P. 54–64.
  10. Бардашевська С.Д., Будзуляк І.М., Будзуляк С.І., Рачій Б.І., Бойчук А.М. Напівпровідникові квантові точки як матеріали для лазерів на їх основі. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2018. Т. 19, № 2. – С. 113–129.
  11. Saha J., Datta Roy A., Dey D. et al. Role of quantum dot in designing FRET based sensors. *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5, N 1. P. 2306–2313.
  12. Moniri S., Ghoranneviss M., Hantehzadeh M.R., Asadabad M. A. Synthesis and optical characterization of copper nanoparticles prepared by laser ablation. *Bulletin of Mater. Sci.* 2017. Vol. 40, N 1. P. 37–43.
  13. Mohamed E.A. Green synthesis of copper & copper oxide nanoparticles using the extract of seedless dates. *Heliyon*. 2020. Vol. 6, N 1. art. e03123.
  14. Matei A., Craciun G., Romanitan C., Pachiu C., Tucureanu V. Biosynthesis and Characterization of Copper Oxide Nanoparticles. *Eng. Proc.* 2023. Vol.37, N 54. P. 1–7.
  15. Lee M.Y., Kim S.-H., Park I.-K. Cu<sub>2</sub>O quantum dots emitting visible light grown by atomic layer deposition. *Physica B: Condensed Matter*. 2016. Vol. 500. P. 4–8.
  16. Rathod K.N., Savaliya C., Babiya K.R., Vasvani S. H., Ramani R. V., Ramani B. M., Joshi A. D., Pandya D., Shah N. A., Markna J. H. Preparation of CuO Quantum Dots by Cost-Effective Ultrasonication Technique. *Internat. J. Nanosci.* 2017. Vol. 16, N 5, 6. art. 1750019.
  17. Nemade K.R., Waghuley S.A. Low temperature synthesis of semiconducting  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> quantum dots. *Ceramics International*. 2014. Vol. 40, N 4. P. 6109–6113.

Надійшла 14.07.2025

## References

1. Hazarika J., Patil C.S., Rajaraman P.V. (2020). Formulation of slurry for chemical mechanical polishing of Cu substrates. *Mater. Today: Proc.*, 39(4), 1781–1785.
2. Ulitschka M., Bauer J., Frost F., et al. (2021). Improvement of the optical properties after surface error correction of aluminium mirror surfaces. *J. Europ. Opt. Soc.-Rapid Public.*, 17(1), 1–13.
3. Liu F., Jia P., Shen H., et al. (2021). Optical performance of aluminum mirror for cryogenic applications. *Optik.*, 231, 166282.
4. Chioetto P., Zuppella P., Da Deppo V., et al. (2022). Qualification of the thermal stabilization, polishing and coating procedures for the aluminum telescope mirrors of the ARIEL mission. *Experim. Astronom.*, 53, 885–904.

5. Filatov Yu.D. (2020). Polishing of Precision Surfaces of Optoelectronic Device Elements Made of Glass, Sital, and Optical and Semiconductor Crystals: A Review. *J. Superhard Mater.*, 42(1), 30–48.
6. Filatov, Iu.D., Sidorko, V.I., Filatov, O.Iu., et al., *Fizychni zasady formoutvorennia pretsyziinykh poverkhon pid chas mekhanichnoi obrobky nemetalevykh materialiv [Physical principles of forming precision surfaces during machining of non-metallic materials]*. Naukova dumka [in Ukrainian].
7. Filatov Yu.D. (2019). Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing / eds. J. Zhang et al. Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining. *Springer Tracts in Mechanical Engineering. Springer Nature Singapore Pte Ltd.*, 129–165.
8. Filatov Yu.D., Boyarintsev A.Yu., Kolesnikov O.V., et al. (2025). Polishing of Optotechnical Parts Made of Semiconductor Materials. *J. Superhard Mater.*, 47(2), 125–136.
9. Filatov Y.D., Sidorko V.I., Sokhan' S.V. et al. (2023). Roughness of Polished Surfaces of Optoelectronic Components Made of Polymeric Optical Materials. *J. Superhard Mater.*, 45(1), 54–64.
10. Bardashevskaya, S.D., Budzuliak, I.M., Budzuliak, S.I. et al. (2018). Napivprovidnykovi kvantovi tochky yak materialy dlia lazeriv na ikh osnovi [Semiconductor quantum dots as materials for lasers based on them]. *Fizyka i Khimiia Tverdoho Tila – Physics and chemistry of solids*, 16(2), 113–129.
11. Saha J., Datta Roy A., Dey D. et al. (2018). Role of quantum dot in designing FRET based sensors. *Materials Today: Proceedings.*, 5(1), 2306–2313.
12. Moniri S., Ghoranneviss M., Hantehzadeh M.R., et al. (2017). Synthesis and optical characterization of copper nanoparticles prepared by laser ablation. *Bulletin Mater. Sci.*, 40(1), 37–43.
13. Mohamed E.A. (2020). Green synthesis of copper & copper oxide nanoparticles using the extract of seedless dates. *Heliyon.*, 6(1), e03123.
14. Matei A., Craciun G., Romanitan C., et al. (2023). Biosynthesis and Characterization of Copper Oxide Nanoparticles. *Eng. Proc.*, 37(54), 1–7.
15. Lee M.Y., Kim S.-H., Park I.-K. (2016). Cu<sub>2</sub>O quantum dots emitting visible light grown by atomic layer deposition. *Physica B: Condensed Matter.*, 500, 4–8.
16. Rathod K.N., Savaliya C., Babiya K.R. et al. (2017). Preparation of CuO Quantum Dots by Cost-Effective Ultrasonication Technique. *Internat. J. Nanosci.* 16(5–6), 1750019.
17. Nemade K.R., Waghuley S.A. (2014). Low temperature synthesis of semiconducting  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> quantum dots. *Ceram. Internat.*, 40(4), 6109–6113.