

Дослідження процесів обробки

УДК 621.923.7

**Ю. Д. Філатов¹, Т. О. Пріхна¹, А. Ю. Бояринцев²,
В. І. Сідорко³, С. В. Ковальов¹**

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля
НАН України, м. Київ, Україна

²Інститут сцинтиляційних матеріалів
НАН України, м. Харків, Україна

³Державне підприємство “Інженерно-виробничий центр
АЛКОН” НТАК (АЛКОН) НАН України

*filatov2045@gmail.com

Полірування оптичних поверхонь деталей з міді і алюмінію

В результаті дослідження закономірностей полірування оптичних деталей з міді і алюмінію за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків встановлено, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу і інтенсивність зношування полірувального порошку зростають з підвищенням добротності мікрорезонатора, а також зі збільшенням часу життя квантових точок на оброблюваній поверхні й кластерів на поверхні частинок полірувального порошку в збудженому стані, коефіцієнтів об'ємного зносу та найбільш ймовірних розмірів наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку. Показано, що параметри шорсткості R_a , R_q і R_{max} полірованих поверхонь лінійно зростають з підвищенням добротності мікрорезонатора. Аналіз залежностей параметра R_z шорсткості полірованих поверхонь і співвідношення η_m/R_a від найбільш ймовірного розміру наночастинок шламу свідчить, що використання дисперсної системи з порошків двооксиду церію під час полірування міді не забезпечує виконання вимог, які висувають до полірованих оптичних поверхонь, а під час полірування алюмінію – не дозволяє досягти достатньої ефективності знімання оброблюваного матеріалу. 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. Показано, що теоретично розраховані значення швидкості знімання оброблюваного матеріалу під час полірування міді і алюмінію за допомогою дисперсних систем з метаборату міді і двооксиду церію добре узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування за відхилення 2–5 %.

© Ю. Д. ФІЛАТОВ, Т. О. ПРІХНА, А. Ю. БОЯРИНЦЕВ, В. І. СІДОРКО, С. В. КОВАЛЬОВ, 2025

Ключові слова: полірування, метаборат міді, двооксид церію, швидкість знімання матеріалу, інтенсивність зношування полірувального порошку, шорсткість поверхні.

ВСТУП

Полірування оптичних поверхонь деталей з міді і алюмінію, які широко використовують в якості високоефективних дзеркальних приладів видимого та ультрафіолетового діапазонів спектру, астрономічного обладнання обсерваторій [1, 2], дзеркал для інфрачервоного діапазону, що працюють у криогенних умовах [3, 4], здійснюють за допомогою методів алмазного мікроточіння [1, 5] і хіміко-механічного полірування [3, 6–8] за допомогою полірувальних дисперсних систем [9–14] з мікро- і нанопорошків алмаза [15], оксиду алюмінію [11], двооксиду церію [16, 17], AlCeH_3O_3 [18], МАХ-фази Ti_3AlC_2 [19–21], метаборату міді [22–27], а також іонним опроміненням [2] або анодуванням у метабораті натрію [28]. Швидкість знімання оброблюваного матеріалу, інтенсивність зношування полірувального порошку і шорсткість полірованих поверхонь, які залежать від фізико-хімічних властивостей матеріалу, притира і дисперсної системи, режимних і кінематичних параметрів процесу обробки, визначають ефективність полірування [10, 11, 14, 18, 29]. Під час полірування міді і алюмінію на швидкість знімання матеріалу суттєво впливають товщина шару окислення, яке відбувається завдяки використанню полірувальних дисперсних систем з окислювачем [7, 9, 11], а також розміри і концентрація наночастинок шламу, що утворюються. Однак, до теперішнього часу механізм знімання оброблюваного матеріалу, зношування полірувального порошку і формування нанопрофілю полірованої поверхні, які відбуваються внаслідок утворення наночастинок оброблюваного матеріалу (шламу) і наночастинок зносу полірувального порошку в результаті перенесення енергії від частинок дисперсної фази дисперсної системи до поверхні, що полірується, не вивчено остаточно. Саме тому дослідження закономірностей утворення наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку під час полірування оптичних поверхонь деталей з міді і алюмінію за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків є актуальними.

Метою роботи було дослідження закономірностей знімання оброблюваного матеріалу, зношування полірувального порошку 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.

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження закономірностей знімання оброблюваного матеріалу здійснювали 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 (CuV_2O_4 , густина 3,86 г/см³, статична діелектрична проникність 6,1, ширина забороненої зони $E_{gp} = 3,6$ еВ, параметри кристалічної ґратки $a = 1,148$ нм, $c = 0,562$ нм [22, 27, 30–35]) і ДС2 з двооксиду церію (CeO_2 , густина 6,26 г/см³, статична діелектрична проникність 21,2, ширина забороненої зони $E_{gp} = 3,3$ еВ, параметр кристалічної ґратки $a = 0,5411$ нм [16, 17, 36–38]), в яких в якості дисперсного середовища викорис-

товували гас (діелектрична проникність – 2,1). Частоти власних коливань частинок метаборату міді, які визначали за спектрами ІЧ поглинання (Фур'є-спектрометр Nicolet 6700), складала 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 см^{-1} . Характерні частоти для частинок двооксиду церію складала 465,0, 600,2, 668,4, 867,2, 951,6, 970,0, 1044,4, 1073,3 см^{-1} [16, 17, 36, 38].

Визначення розмірів та аналіз поверхні частинок дисперсної фази полірувальних дисперсних систем здійснювали за допомогою растрового електронного мікроскопу Carl Zeiss EVO 50 із системою мікроаналізу AZtec та сканувального мікроскопу-аналізатора Camscan-4DV [23, 24, 36, 39]. 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 [19, 36, 39, 40].

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 (CuO-QDs, Cu₂O-QDs, Al₂O₃-QDs), що відбуваються у відкритому мікрорезонаторі, який утворено поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку [26, 27]. Резонансне перенесення енергії від полірувального порошку до оброблюваного матеріалу і від оброблюваної поверхні до частинок полірувального порошку, яке приводить до утворення наночастинок шламу оброблюваного матеріалу і наночастинок зносу полірувального порошку, відбувається на характерних частотах $\nu_{1m}, \nu_{2m}, \nu_{1p}, \nu_{2p}$ та характеризуються енергіями $E_{1m}, E_{2m}, E_{1p}, E_{2p}$ відповідно. Співвідношення цих енергій визначають кількість елементарних комірок у кластерах на оброблюваній поверхні $\xi_{1m} = E_{1m}^4 / (E_{2m}^2 - E_{1m}^2)^2$ і на поверхні частинок полірувального порошку $\xi_{2p} = E_{2p}^4 / (E_{1p}^2 - E_{2p}^2)^2$.

Швидкість знімання оброблюваного матеріалу V_m і інтенсивність зношування полірувального порошку V_p , які залежать від розстроювання енергії $\delta E_m = E_{2m} - E_{1m}$ і $\delta E_p = E_{1p} - E_{2p}$ та добротності мікрорезонатора $Q_m = E_{1m} / (E_{2m} - E_{1m})$ і $Q_p = E_{2p} / (E_{1p} - E_{2p})$, визначають у відповідності до формули [24–27, 41–43]

$$V_{m,p} = \frac{L_t u}{d} \eta_{m,p} \tau_{m,p} Q_{m,p}, \quad (1)$$

де $\eta_{m,p}$ – коефіцієнти об'ємного зносу [24, 44]; L_t – довжина шляху тертя частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні; d – розмір частинки полірувального порошку; τ_m – час життя кластерів оброблюваної поверхні в збудженому стані; τ_p – час життя кластерів на поверхні частинки полірувального порошку в збудженому стані; u – швидкість відносного переміщення деталі та притира.

РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження механізму видалення оброблюваного матеріалу і зношування частинок полірувального порошку під час полірування міді і алюмінію за

допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків ДС1 і ДС2 здійснювали з врахуванням того, що енергія наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку, яка залежить від ширини забороненої зони квантових точок E_{gqd} на оброблюваній поверхні і ширини забороненої зони E_{gp} полірувального порошку [25–27], визначається за умови мінімуму розстроювання енергій δE_m і δE_p .

За спектрами інфрачервоного поглинання оброблюваних матеріалів і полірувальних дисперсних систем було визначено значення частот коливань кластерів на оброблюваній поверхні й на поверхні частинок полірувального порошку, спектрального розділення $\delta v_m = v_{2m} - v_{1m}$ і $\delta v_p = v_{1p} - v_{2p}$ і розстроювання енергії δE_m і δE_p . Показано, що під час полірування міді за допомогою дисперсної системи ДС1 мінімальні значення $\delta v_m = 8,3 \text{ см}^{-1}$ ($\delta E_m = 1,0 \text{ меВ}$) і $\delta v_p = 10,5 \text{ см}^{-1}$ ($\delta E_p = 1,3 \text{ меВ}$) спостерігали 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: $v_{2m} = 631,0 \text{ см}^{-1} \rightarrow v_{1m} = 622,7 \text{ см}^{-1}$ і $v_{1p} = 645,6 \text{ см}^{-1} \rightarrow v_{2p} = 635,1 \text{ см}^{-1}$ відповідно [26, 45–47]. За використання дисперсної системи ДС2 мінімальні значення $\delta v_m = 7,4 \text{ см}^{-1}$ ($\delta E_m = 0,9 \text{ меВ}$) і $\delta v_p = 11,8 \text{ см}^{-1}$ ($\delta E_p = 1,5 \text{ меВ}$) спостерігали для квантових переходів між енергетичними рівнями кластерів на поверхні частинок полірувального порошку і квантових точок CuO-QDs на оброблюваній поверхні на частотах: $v_{2m} = 1044,4 \text{ см}^{-1} \rightarrow v_{1m} = 1037,0 \text{ см}^{-1}$ і $v_{1p} = 612,0 \text{ см}^{-1} \rightarrow v_{2p} = 600,2 \text{ см}^{-1}$ відповідно [26, 48, 49].

Під час полірування алюмінію за допомогою дисперсної системи ДС1 мінімальні значення $\delta v_m = 12,1 \text{ см}^{-1}$ ($\delta E_m = 1,5 \text{ меВ}$) і $\delta v_p = 9,0 \text{ см}^{-1}$ ($\delta E_p = 1,1 \text{ меВ}$) спостерігали 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: $v_{2m} = 849,1 \text{ см}^{-1} \rightarrow v_{1m} = 837,0 \text{ см}^{-1}$ і $v_{1p} = 570,0 \text{ см}^{-1} \rightarrow v_{2p} = 561,0 \text{ см}^{-1}$ відповідно, а з використанням дисперсної системи ДС2 – мінімальні значення $\delta v_m = 24,2 \text{ см}^{-1}$ ($\delta E_m = 3,0 \text{ меВ}$) і $\delta v_p = 144,6 \text{ см}^{-1}$ ($\delta E_p = 17,9 \text{ меВ}$) досягали під час 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: $v_{2m} = 600,2 \text{ см}^{-1} \rightarrow v_{1m} = 576,0 \text{ см}^{-1}$ і $v_{1p} = 813,0 \text{ см}^{-1} \rightarrow v_{2p} = 668,4 \text{ см}^{-1}$ відповідно [27, 50, 51].

Визначення розмірів наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку здійснювали за припущення, що вони мають форму паралелепіпедів, яка зумовлює утворення нанорозмірного рельєфу полірованих поверхонь у вигляді терасно-східчастої структури [52, 53]. З врахуванням того, 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) Cu_2O (густина – $6,0 \text{ г/см}^3$, діелектрична проникність – $7,5$, параметр кристалічної ґратки – $0,42696 \text{ нм}$), CuO-QDs , які складаються з оксиду міді (II) CuO (густина – $6,315 \text{ г/см}^3$, діелектрична проникність – $12,98$, параметри кристалічної ґратки $a = 0,4684 \text{ нм}$, $b = 0,3423 \text{ нм}$, $c = 0,5129 \text{ нм}$) [26, 54–56] і $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-QDs}$, які складаються з оксиду алюмінію Al_2O_3 (густина – $3,98 \text{ г/см}^3$, діелектрична проникність – $9,3$, параметри кристалічної ґратки $a = 0,47617 \text{ нм}$ і $c = 1,29947 \text{ нм}$) [27, 57–59], було розраховано розміри паралелепіпедів і визначено кількість елементарних комірок ξ_{1m} , з яких вони складаються, а також найбільш ймовірні розміри наночастинок шламу (a_m), які утворюються в результаті QD-FRET. Розміри паралелепіпедів і кількість елементарних комірок ξ_{2p} , з яких складаються кластери на поверхні частинок полірувального поро-

шку, а також найбільш ймовірні розміри наночастинок зносу полірувального порошку (a_p) було визначено з врахуванням параметрів кристалічної ґратки частинок полірувальних порошків метаборату міді (ДС1) і двооксиду церію (ДС2) [23, 60] (табл. 1).

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

Параметр взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою	Оброблюваний матеріал			
	Мідь		Алюміній	
	Полірувальна дисперсна система			
	ДС1-CuВ ₂ O ₄	ДС2-CeO ₂	ДС1-CuВ ₂ O ₄	ДС2-CeO ₂
ξ_{1m}	1389	4875	1179	135
ξ_{2p}	899	634	955	4
a_m , нм	6,5	10,4	9,3	4,0
a_p , нм	12,3	5,7	10,0	1,4
Q_m	75,0	140,1	69,2	23,8
Q_p	60,5	50,9	62,3	4,6
τ_m , нс	957	1773	723	136
τ_p , нс	222	217	233	25
η_m , 10^{-12} м ² /с	0,79	1,16	1,87	0,42
η_p , 10^{-12} м ² /с	2,46	0,32	2,32	0,02

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 $0,394m_e$, $0,381m_e$ і $0,161m_e$ (де $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг – маса електрону) для Cu₂O-QDs, CuO-QDs і Al₂O₃-QDs відповідно [26, 27, 54, 56, 59, 61], складала: 2,26 еВ (ДС1), 1,34 еВ (ДС2) – у разі полірування міді і 2,71 еВ (ДС1), 2,75 еВ (ДС2) – у разі полірування алюмінію. Водночас енергія наночастинок шламу E_m , які утворились під час полірування міді і алюмінію за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків ДС1 і ДС2, складала відповідно: 1,4 еВ (ДС1), 10,0 еВ (ДС2) і 1,9 еВ (ДС1), 11,4 еВ (ДС2). Енергія наночастинок зносу полірувального порошку, утворених під час полірування міді і алюмінію за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків ДС1 і ДС2, яка залежить від ширини забороненої зони E_{gp} і розмірів наночастинок зносу полірувального порошку a_p [23, 25–27], складала відповідно: 79,4 еВ (ДС1), 53,5 еВ (ДС2) і 74,1 еВ (ДС1), 0,3 еВ (ДС2).

На основі загальної методики [23–27, 36, 39, 41, 43, 52, 53, 62] відповідно до формули (1) було розраховано добротності мікрорезонатора Q_m і Q_p , коефіцієнти об'ємного зносу η_m , і η_p , час життя квантових точок на оброблюваній поверхні τ_m і кластерів на поверхні частинок полірувального порошку τ_p у збудженому стані (див. табл. 1), а також швидкість знімання оброблюваного матеріалу V_m , інтенсивність зношування полірувального порошку V_p і параметри шорсткості полірованих поверхонь оптичних деталей з міді і алюмінію (табл. 2).

У результаті аналізу даних, наведених у 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, а інтенсивність зношування поліруваль-

ного порошку лінійно зростають з підвищенням добротності мікрорезонатора, який утворюється поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку (рис. 1). Показано також, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу і інтенсивність зношування полірувального порошку зростають зі збільшенням часу життя квантових точок на оброблюваній поверхні τ_m і кластерів на поверхні частинок полірувального порошку τ_p у збудженому стані (рис. 2), підвищення їхніх коефіцієнтів об'ємного зносу η_m і η_p (рис. 3) та зростання найбільш ймовірних розмірів наночастинок шламу a_m і наночастинок зносу полірувального порошку a_p (рис. 4) у відповідності до рівняння (1), що свідчить про однакові закономірності полірування оптичних поверхонь деталей з неметалевих матеріалів і металів.

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

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

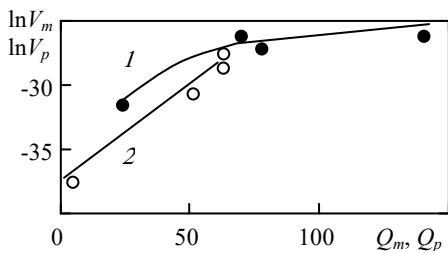


Рис. 1. Залежності швидкості знімання оброблюваного матеріалу (1) та інтенсивності зношування полірувального порошку (2) від добротності мікрорезонатора.

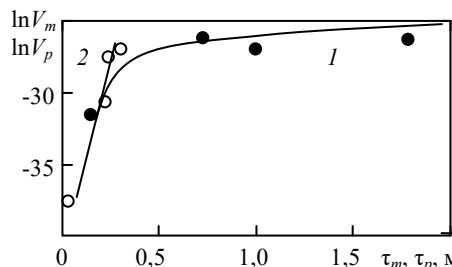


Рис. 2. Залежності швидкості знімання матеріалу (1) та інтенсивності зношування полірувального порошку (2) від часу життя збудженого стану квантових точок на оброблюваній поверхні і кластерів на поверхні частинок полірувального порошку.

Встановлено, що параметри шорсткості Ra , Rq і R_{max} полірованих поверхонь деталей з міді і алюмінію, які залежать від структури матеріалу, частот коливань кластерів на оброблюваній поверхні і на поверхні частинок полірувального порошку ν_{1m} , ν_{2m} , спектрального розділення $\delta\nu_m$, розстроювання енергії δE_m , розділення між оброблюваним матеріалом, полірувальним порошком і дисперсною системою за діелектричною проникністю, розміру нано-

частинок шламу a_m [24, 36, 52, 53, 60, 62, 63], лінійно зростають за підвищення добротності мікрорезонатора Q_m (рис. 5) у відповідності до загальних закономірностей полірування.

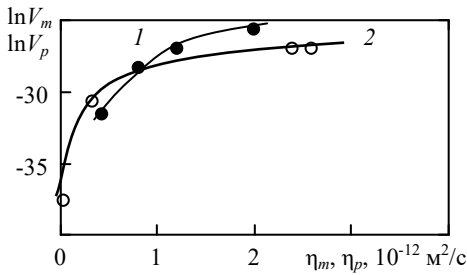


Рис. 3. Залежності швидкості знімання оброблюваного матеріалу (1) та інтенсивності зношування полірувального порошку (2) від коефіцієнтів об'ємного зносу.

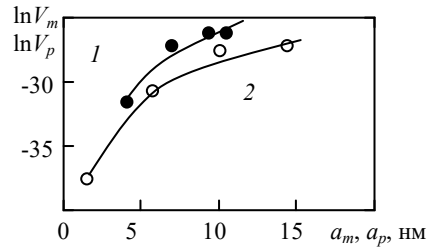


Рис. 4. Залежності швидкості знімання матеріалу (1) та інтенсивності зношування полірувального порошку (2) від найбільш ймовірних розмірів наночастинок шламу a_m і наночастинок зносу a_p .

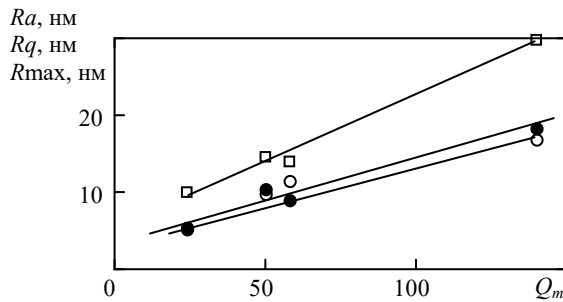


Рис. 5. Залежності параметрів шорсткості Ra (\circ), Rq (\bullet), $Rmax$ (\square) полірованих поверхонь від добротності мікрорезонатора Q_m .

Наведені на рис. 6 залежності параметра Rz шорсткості полірованих поверхонь від найбільш ймовірного розміру наночастинок шламу a_m (пряма 1 – Cu, пряма 2 – Al) дозволили зробити висновок, що використання дисперсної системи ДС2 на основі полірувальних порошоків двооксиду церію під час полірування міді не забезпечує виконання вимог, які висуваються до полірованих оптичних поверхонь ($Rz = 0,085$ мкм $>$ $0,05$ мкм).

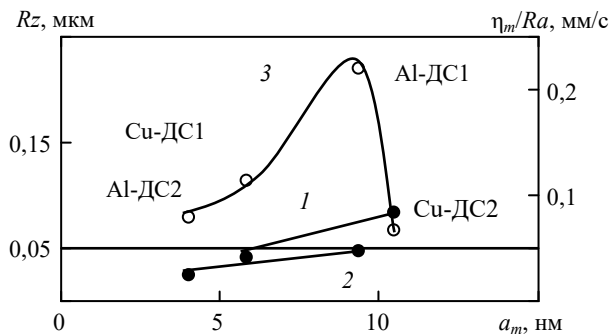


Рис. 6. Залежності параметра Rz шорсткості полірованих поверхонь і співвідношення η_m/Ra від найбільш ймовірного розміру наночастинок шламу a_m .

Крім того, слід зауважити, що для оцінки ефективності процесу полірування оптичних поверхонь, коли відбуваються знімання оброблюваного матеріалу, що характеризується коефіцієнтом об'ємного зносу η_m , та формування нанорельєфу поверхні, що характеризується параметрами шорсткості, використовують співвідношення η_m/Ra , яке одночасно характеризує швидкість видалення оброблюваного матеріалу та зменшення шорсткості обробленої поверхні [60, 62]. Залежність співвідношення η_m/Ra від найбільш ймовірного розміру наночастинок шламу a_m (див. рис. 6, крива 3) свідчить, що, незважаючи на мінімальні значення параметрів шорсткості (див. табл. 2), ефективність полірування алюмінію за допомогою дисперсної системи ДС2 – недостатня. Це означає, що для полірування оптичних поверхонь деталей з міді і алюмінію доцільно використовувати полірувальну дисперсну систему ДС1 з мікро- та нанопорошків метаборату міді (CuB_2O_4), яка забезпечує необхідну шорсткість полірованих поверхонь за високої швидкості знімання оброблюваного матеріалу.

Під час експериментальної перевірки наведених результатів показано, що теоретично розраховані значення швидкості знімання оброблюваного матеріалу в процесі полірування міді і алюмінію за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків метаборату міді (CuB_2O_4) і двооксиду церію (SeO_2) добре узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування (див. табл. 2). Незначне відхилення розрахункових і експериментальних даних, що складало 2–5 %, свідчить, що під час полірування оптичних поверхонь, яке здійснюється в мікрорезонаторі, утвореному поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку, утворення і видалення наночастинок шламу внаслідок передачі енергії від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні відбувається за механізмом QD-FRET – ферстерівського резонансного перенесення енергії, опосередкованого квантовими точками, які утворюються на поверхнях міді (CuO -QDs, Cu_2O -QDs) і алюмінію (Al_2O_3 -QDs).

ВИСНОВКИ

У результаті дослідження закономірностей полірування оптичних деталей з міді і алюмінію за допомогою полірувальних дисперсних систем з мікро- і нанопорошків встановлено, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу і інтенсивність зношування полірувального порошку зростають з підвищенням добротності мікрорезонатора, який утворюється поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку, а також зі збільшенням часу життя квантових точок на оброблюваній поверхні і кластерів на поверхні частинок полірувального порошку в збудженому стані, коефіцієнтів об'ємного зносу та найбільш ймовірних розмірів наночастинок шламу і наночастинок зносу у відповідності до рівняння (1), що свідчить про однакові закономірності полірування оптичних поверхонь деталей з міді і алюмінію та неметалевих матеріалів.

Встановлено, що параметри шорсткості Ra , Rq і $Rmax$ полірованих поверхонь оптичних деталей з міді і алюмінію лінійно зростають з підвищенням добротності мікрорезонатора у відповідності до загальних закономірностей полірування. Аналіз залежностей параметра Rz шорсткості полірованих поверхонь і співвідношення η_m/Ra від найбільш ймовірного розміру наночастинок шламу показав, що використання дисперсної системи ДС2 на основі полірувальних порошків двооксиду церію для полірування міді не забезпечує виконання вимог, які висувають до полірованих оптичних поверхонь ($Rz < 0,05$ мкм), а

для полірування алюмінію не дозволяє досягти достатньої ефективності знімання оброблюваного матеріалу, дав можливість обґрунтувати доцільність застосування полірувальної дисперсної системи ДС1 з мікро- та нанопорошків метаборату міді (CuB_2O_4) 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 %.

Yu. D. Filatov¹, T. O. Prikhna¹, A. Y. Boyarintsev², V. I. Sidorko³,
S. V. Kovalev¹

¹Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Institute for Scintillation Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

³State Enterprise "Engineering and Production Center Alkon"
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Polishing optical surfaces of copper and aluminum parts

As a result of the study of the regularities of polishing optical parts made of copper and aluminum using dispersed systems of micro- and nanopowders, it was found that the removal rate of the processed material and the intensity of wear of the polishing powder increase with increasing the Q factor of the microresonator, as well as with increasing the lifetime of quantum dots on the processed surface and clusters on the surface of polishing powder particles in the excited state, volumetric wear coefficients and the most probable sizes of sludge nanoparticles and wear nanoparticles of polishing powder. It is shown that the roughness parameters R_a , R_q and R_{max} of polished surfaces increase linearly with increasing the Q factor of the microresonator. Analysis of the dependences of the parameter R_z of the roughness of polished surfaces and the ratio η_m/R_a on the most probable size of sludge nanoparticles shows that the use of a dispersed system of cerium dioxide powders during copper polishing does not ensure the fulfillment of the requirements imposed on polished optical surfaces, and during aluminum polishing does not allow achieving sufficient efficiency of removal of the processed material. The feasibility of using a polishing dispersed system of copper metaborate micro- and nanopowders for polishing optical surfaces of copper and aluminum parts, which provides the required roughness of polished surfaces at a high removal rate of the processed material, is substantiated. It is shown that theoretically calculated values of the removal rate of the processed material during polishing of copper and aluminum using dispersed systems of copper metaborate and cerium dioxide agree well with the data of experimental determination of polishing productivity with a deviation of 2–5 %.

Keywords: *polishing, copper metaborate, cerium dioxide, material removal rate, wear intensity of polishing powder, surface roughness.*

1. ter Horst R., Tromp N., de Haan M., Navarro R., Venema L., Pragt J. Directly polished light weight aluminum mirror. *Proc. SPIE*. 2008. Vol. 7018, art. 701808.
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. Society-Rapid Publications*. 2021. Vol. 17, art. 1.
3. Liu F., Jia P., Shen H., Xu Y. Optical performance of aluminum mirror for cryogenic applications. *Optik*. 2021. Vol. 231, art. 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., Besset C.-G., Bondet C., Chauveau G., Porta C., Malaguti G., Micela G. Qualification of the thermal stabilization, polishing and coating proce-

- dures for the aluminum telescope mirrors of the ARIEL mission. *Exp. Astron.* 2022. Vol. 53. P. 885–904.
5. Moeggenborg K., Vincer T., Lesiak S., Salij R. Super-polished aluminum mirrors through the application of chemical mechanical polishing techniques. *Proc. SPIE.* 2006. Vol. 62880L-1-9.
 6. Zhao G., Wie Z., Wang W., Feng D., Xu A., Liu W., Song Z. Review on modeling and application of chemical mechanical polishing. *Nanotechnol. Rev.* 2020. Vol. 9. P. 182–189.
 7. Ogawa H., Tokuyama Y., Yanagisawa M., Nakagawa H., Kikuchi J., Horiike Y. Study on the mechanisms of chemical mechanical polishing on copper and aluminum surfaces employing in situ infrared spectroscopy. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2003. Vol. 42. Part 1, no. 6A. P. 3582–3587.
 8. Liu X., Liu Y., Liang Y., Zhao Z., Gao B. Kinetics model incorporating both the chemical and mechanical effects on material removal for copper chemical mechanical polishing. *Microelectron. Eng.* 2012. Vol. 91. P. 19–23
 9. Hazarika J., Patil C.S., Rajaraman P.V. Formulation of slurry for chemical mechanical polishing of Cu substrates. *Mater. Today: Proc.* 2020. 5 p.
 10. Wang Y., Chen Y., Zhao Y., Min P., Qi F., Liu X., Zhao D. Chemical mechanical planarization of Al alloy in alkaline slurry at low down pressure. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2016. Vol. 28, no. 4. P. 3364–3372.
 11. Li T., Sun H., Wang D., Huang J., Li D., Lei F., Sun D. High-performance chemical mechanical polishing slurry for aluminum alloy using hybrid abrasives of zirconium phosphate and alumina. *Appl. Surf. Sci.* 2021. Vol. 537, art. 147859.
 12. Filatov Y.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Effect of interaction between polishing powder particles and a treated material on polishing characteristics of optical surfaces. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no. 4. P. 296–302.
 13. Filatov Yu.D. Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing. In: *Simulation and Experiments of Material-oriented Ultra-precision Machining* / eds. J. Zhang, B. Guo, J. Zhang. Springer Tracts in Mechanical Engineering, Singapore: Springer, 2019. P. 129–165. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3335-4_6.
 14. Filatov Yu.D. New patterns of polishing surfaces of parts made of nonmetallic materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 2. P. 140–149.
 15. Filatov Yu.D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 6. P. 427–433.
 16. Prabaharana D.M.D.M., Sadaiyandib K., Mahendran M., Sagadevand S., Structural, optical, morphological and dielectric properties of cerium oxide nanoparticles. *Mater. Research.* 2016. Vol. 19, no. 2. P. 478–482.
 17. Babitha K.K., Sreedevi A., Priyanka K.P., Bobby S., Thomas V. Structural characterization and optical studies of CeO₂ nanoparticles synthesized by chemical precipitation. *Ind. J. Pure Appl. Phys.* 2015. Vol. 53. P. 596–603.
 18. Song P., Yang C., Bai Y., Ding J., Guo J., Li C., Wang Y., Xue C. High-precision turning and ultra-smooth direct polishing of aluminum alloy mirrors. *Opt. Express.* 2023. Vol. 31, Is. 19. P. 30340–30358.
 19. Filatov Yu.D., Vetrov A.G., Sidorko V.I., Filatov A.Yu., Kovalev S.V. A mechanism of diamond-abrasive finishing of monocrystalline silicon carbide. *J. Superhard Mater.* 2013. Vol. 35, no. 5. P. 303–308.
 20. Filatov Yu.D., Vetrov A.G., Sidorko V.I., Filatov O.Yu., Kovalev S.V., Kurilovich V.D., Danil'chenko M.A., Prikhna T.A., Borimsky A.I., Kutsai A.M., Poltorats'kyi V.G. Polishing of optoelectronic components made of monocrystalline silicon carbide. *J. Superhard Mater.* 2015. Vol. 37, no. 1. P. 48–56.
 21. Prikhna T.A., Starostina A.V., Lizkendorf D., Petrusha I.A., Ivakhnenko S.A., Borimskii A.I., Filatov Yu.D., Loshak M.G., Serga M.A., Tkach V.N., Turkevich V.Z., Sverdun V.B., Klimenko S.A., Turkevich D.V., Dub S.N., Basyuk T.V., Karpets M.V., Moshchil V.E., Kozyreva A.V., Il'nitskaya G.D., Kovylyayev V.V., Cabiosh T., Chartier P. Studies of the oxidation stability, mechanical characteristics of materials based on max phases of the Ti–Al–(C, N) systems, and of the possibility of their use as tool bonds and materials for polishing. *J. Superhard Mater.* 2014. Vol. 36, no. 1. P. 9–17.
 22. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Effect of the rheological properties of a dispersed system on the polishing indicators of optical glass and glass ceramics. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no. 1. P. 65–73.
 23. Filatov Yu.D., Boyarintsev A.Yu., Sidorko V.I., Kovalev V.A., Kolesnikov O.V., Novgorodtsev V.O., Polupan Ya.I. Mechanism of polishing for polystyrene based scintillators. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 5. P. 390–401.

24. Filatov Yu.D., Boyarintsev A.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Kolesnikov O.V. Polishing of polystyrene scintillators. *Functional Mater.* 2023. Vol. 30, no. 3. P. 424–430.
25. Filatov Yu.D., Boyarintsev A.Yu., Kolesnikov O.V., Galkin S.M., Novgorodtsev V.O., Polupan Ya.I., Pylypenko O.I., Sidorko V.I., Kovalev S.V. Polishing of optotechnical parts made of semiconductor materials. *J. Superhard Mater.* 2025. Vol. 47, no 2. P. 125–136.
26. Filatov Yu.D., Prikhna T.O., Boyarintsev A.Yu., Sidorko V.I., Kovalev V.A., Rybalka I.A. Polishing techniques for optical components of glass, semiconductors, and copper. *J. Superhard Mater.* 2025. Vol. 47, no 4. P. 300–310.
27. Філатов Ю.Д., Прихна Т.О., Бояринцев А.Ю., Сідорко В.І., Ковальов С.В. Механізм полірування деталей оптотехніки з алюмінію. *Надтверді матеріали.* 2025. № 5. С. 62–72.
28. Iwai M., Kikuchi T. A novel polishing process for ultra-smooth aluminum surfaces via anodizing in sodium metaborate. *J. Electrochemical Soc.* 2023. Vol. 170. art. 073506.
29. Yin Z., Yi Z. Direct polishing of aluminum mirrors with higher quality and accuracy. *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54, no. 26. P. 7835–7841.
30. Tomov V., Rafailov P.M., Yankova L. Raman spectroscopy investigation of the polar vibrational modes in CuB_2O_4 . *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. Vol. 682, art. 012028.
31. Ivanov V.G., Abrashev M.V., Todorov N.D., Tomov V., Nikolova R.P., Litvinchuk A.P., Iliev M.N. Phonon and magnon Raman scattering in CuB_2O_4 . *Phys. Rev. B.* 2013. Vol. 88, art. 094301.
32. Feng Y., Xu H.-G., Zheng W., Zhao H., Kandalam A.K., Jena P. Structures and photoelectron spectroscopy of $\text{Cu}_n(\text{BO}_2)_m$ – ($n, m = 1, 2$) clusters: Observation of hyperhalogen behavior. *J. Chem. Phys.* 2011. Vol. 134, no. 094309.
33. Ursu D., Dabici A., Miclau M., Miclau N. Low-temperature hydrothermal synthesis of hierarchical flower-like CuB_2O_4 superstructures. *Proc. Appl. Ceram.* 2020. Vol. 14, no. 2. P. 113–118.
34. Mero R.D., Lai C.-H., Du C.-H., Liu H.-L. Spectroscopic signature of spin–charge–lattice coupling in CuB_2O_4 . *J. Phys. Chem. C.* 2021. Vol. 125. no. 7. P. 4322–4329.
35. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Boyarintsev A.Y., Kovalev S.V., Garachenko V.V., Kovalev V.A. Effect of the spectroscopic parameters of the processed material and polishing powder on the parameters of polishing of optical surfaces. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no 1. P. 37–45.
36. Filatov Yu.D. Quantum mechanism of optical glass polishing. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 4. P. 303–313.
37. Murarka S.P., Eizenberg M., Sinha A.K. Interlayer Dielectrics for Semiconductor Technologies. Elsevier Academic Press, 2003. 444 p.
38. Mukherjee D., Rao B.G., Reddy B.M., Characterization of ceria-based nano-oxide catalysts by raman spectroscopy. *Topics in Catalysis.* 2017. Vol. 60, no. 19–20. P. 1673–1681.
39. Filatov Yu.D. Material removal rate in polishing polymethacrylate parts. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 3. P. 212–220.
40. Filatov Yu.D. Polishing of aluminosilicate materials with tools with bound polishing powder. *Sverkhtverdye Materialy.* 2001. no. 3. P. 36–49.
41. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Boyarintsev A.Y., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Transfer energy in the interaction of an optical surface with a polishing disperse system. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 2. P. 117–126.
42. Filatov Yu.D. Relationship between the transfer coefficients and transfer energy during the polishing of nonmetallic materials. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 3. P. 226–228.
43. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Boyarintsev A.Y., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Performance efficiency of the polishing of polymer optical materials. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 5. P. 358–367.
44. Filatov Y.D., Sidorko V.I. Statistical approach to wear of nonmetallic workpiece surfaces in polishing. *Sverkhtverdye Materialy.* 2005. no. 1. 58–66.
45. Moniri S., Ghoranneviss M., Hantehzadeh M. R., Asadabad M. A. Synthesis and optical characterization of copper nanoparticles prepared by laser ablation. *Bull. Mater. Sci.* 2017. Vol. 40, no. 1. P. 37–43.
46. Mohamed E.A. Green synthesis of copper & copper oxide nanoparticles using the extract of seedless dates. *Heliyon.* 2020. Vol. 6, no. 1. art. e03123.
47. Pandit R., Gaikwad S., Rai M. Biogenic fabrication of CuNPs, Cu bioconjugates and in vitro assessment of antimicrobial and antioxidant activity. *IET Nanobiotechnology.* 2017. Vol. 11, no. 5. P. 568–575.

48. Neeli Ch., Sarika K.S., Manikanta B., Swapna S.N. Structural and optical properties of copper nanoparticles synthesized via wet chemical route. *Proc. Internat. Conf. Physics of Materials and Nanotechnology ICPN 2019. AIP Conf. Proc.* 2020. Vol. 2244, art. 070020.
49. Matei A., Craciun G., Romanitan C., Pachiu C., Tucureanu V. Biosynthesis and characterization of copper oxide nanoparticles. *Eng. Proc.* 2023. Vol. 37, no. 54. P. 1–7.
50. Goswami R., Goswami Y.C., Shahrestasni M. Synthesis and characterization of aluminium oxide nano adsorbents via a sustainable combustion method for methyl red remediation. *Rev. Roum. Chim.* 2024. Vol. 69, no. 10–12. P. 595–603.
51. Gholizadeh Z., Aliannezhadi M., Ghominejad M., Tehrani F.S. High specific surface area γ - Al_2O_3 nanoparticles synthesized by facile and low-cost co-precipitation method. *Sci. Rep.* 2023. Vol. 13. P. 6131–6141.
52. Filatov O.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Filatov Y.D., Vetrov A.G. Material removal rate in polishing anisotropic monocrystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2016. Vol. 38, no. 2. P. 123–131.
53. Filatov O.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Filatov Yu.D., Vetrov A.G. Polished surface roughness of optoelectronic components made of monocrystalline materials. *J. Superhard Mater.* 2016. Vol. 38, no. 3. P. 197–206.
54. Lee M.Y., Kim S.-H., Park I.-K. Cu_2O quantum dots emitting visible light grown by atomic layer deposition. *Physica B: Condens. Matter.* 2016. Vol. 500. P. 4–8.
55. Vaseem M., Hong A.-R., Kim R.-T., Hahn Y.-B. Copper oxide quantum dot ink for inkjet-driven digitally controlled high mobility field effect transistors. *J. Mater. Chemistry C.* 2013. Vol. 1, no. 11. P. 2112–2121.
56. 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. *Int. J. Nanosci.* 2017. Vol. 16, no. 5, 6. art. 1750019. 5 p.
57. Telmer M.R., Hilario M.S., Hoff B.W., Lanagan M.T., Reeja-Jayan B. Anisotropy of W-band complex permittivity in Al_2O_3 . *J. Phys.: Condens. Matter.* 2019. Vol. 31, no. 225702. P. 1–10.
58. Abbas I.A., Al-Mayalee K.H. Structural and optical properties of Al_2O_3 nanostructures prepared by hot water treatment method. *Rev. Composit. Matér. Avanc. J. Composit Advanc. Mater.* 2024. Vol. 34, no. 4. P. 527–532.
59. Nemade K.R., Waghuley S.A. Low temperature synthesis of semiconducting α - Al_2O_3 quantum dots. *Ceram. Int.* 2014. Vol. 40, no. 4. P. 6109–6113.
60. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Effect of the processed material structure on the polishing quality of optical surfaces. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no. 6. P. 435–443.
61. Бардашевська С.Д., Будзуляк І.М., Будзуляк С.І., Рачій Б.І., Бойчук А.М. Нанівпровідникові квантові точки як матеріали для лазерів на їх основі. *Фізика і хімія твердого тіла.* 2018. Т. 19, № 2. С. 113–129.
62. Filatov Y.D., Sidorko V.I., Sokhan' S.V. Kovalev S.V., Boyarintsev A.Y., Kovalev V.A., Yurchyshyn O.Y. Roughness of polished surfaces of optoelectronic components made of polymeric optical materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 1. P. 54–64.
63. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Boyarintsev A.Y., Kovalev S. V., Kovalev V.A. Effect of the dielectric characteristics of a treated material, a polishing powder, and a disperse system on the energy of their interaction in the polishing of optical surfaces. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 4. P. 276–284.

Надійшла до редакції 08.05.25

Після доопрацювання 08.05.25

Прийнята до опублікування 16.05.25