

УДК 621.923.7

Ю. Д. Філатов

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

*filatov2045@gmail.com

Енергія перенесення під час полірування металевих деталей оптичної техніки за допомогою дисперсних систем з мікро- та нанопорошків метаборату міді

В результаті дослідження закономірностей перенесення енергії між поверхнею оброблюваної деталі та полірувальною дисперсною системою з мікро- та нанопорошків метаборату міді з дисперсним середовищем у вигляді гасу або води встановлено, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу, інтенсивність зношування полірувального порошку і параметри шорсткості полірованої поверхні збільшуються у разі зменшення енергії перенесення, що свідчить про однакові закономірності полірування оптичних поверхонь деталей з металевих та неметалевих матеріалів. Показано, що енергія перенесення залежить від спектрального розділення між оброблюваним матеріалом і метаборатом міді і розділення за діелектричною проникністю між оброблюваним металом, полірувальним порошком і дисперсним середовищем, і визначається їхнім співвідношенням. Вивчено вплив діелектричної проникності дисперсного середовища на показники полірування деталей оптичної техніки з міді і алюмінію і показано, що це співвідношення може бути критерієм ефективності перенесення енергії від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні, оскільки дає можливість визначити відношення швидкості знімання оброблюваного матеріалу до інтенсивності зношування полірувального порошку, яке більше одиниці у разі використання дисперсного середовища у вигляді гасу, і менше одиниці у разі використання води. 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 з дисперсним середовищем із гасу або води добре узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування за відхилення 2–7 %.

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

ВСТУП

Полірування прецизійних поверхонь деталей електронної техніки та оптичних систем з неметалевих матеріалів (оптичного скла, ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів, полістиролу, поліметилметакрилату тощо) [1–5] і металевих деталей оптотехніки (мідь, алюміній) [6–8], які широко застосовують в різних галузях фізики, хімії, біології і медицини, використовують в фундаментальних і прикладних дослідженнях та виробництві наукового обладнання, приладів і апаратури, традиційно здійснюють за допомогою різних за складом паст, суспензій, колоїдів та полірувальних дисперсійних систем з неабразивних мікро- та нанопорошків. Сучасні дослідження закономірностей полірування прецизійних поверхонь металевих деталей оптотехніки показали, що для полірування міді і алюмінію доцільно застосовувати полірувальні дисперсні системи з мікро- та нанопорошків метаборату міді, оскільки вони забезпечують необхідну шорсткість полірованих поверхонь за високої швидкості знімання оброблюваного матеріалу [6–8].

Швидкість знімання оброблюваного матеріалу та інтенсивність зношування полірувального порошку зростають у разі підвищення добротності мікрорезонатора, який утворюється поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку, а також за збільшення часу життя кластерів на оброблюваній поверхні і на поверхні частинок полірувального порошку в збудженому стані, коефіцієнтів об'ємного зносу та найбільш ймовірних розмірів наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку у відповідності до загальних закономірностей полірування оптичних поверхонь [4–8]. Разом з тим, механізми перенесення енергії між оброблюваною поверхнею та полірувальною дисперсною системою вивчено недостатньо, а вплив дисперсного середовища на швидкість знімання оброблюваного матеріалу, інтенсивність зношування полірувального порошку і параметри шорсткості полірованої поверхні остаточно не з'ясовано. Саме тому дослідження закономірностей перенесення енергії від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні та в зворотному напрямку під час полірування міді й алюмінію за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків метаборату міді з дисперсним середовищем з гасу або води є актуальними.

Метою даного дослідження було вивчення закономірностей перенесення енергії між поверхнею оброблюваної деталі та полірувальною дисперсною системою з мікро- та нанопорошків метаборату міді та впливу енергії перенесення на показники полірування деталей оптотехніки з міді й алюмінію.

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження закономірностей знімання оброблюваного матеріалу і формування нанопрофілю полірованої поверхні 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 наступних режимних (зусилля притискання – 55,5 Н, частота обертання притира – 90 об/хв) і кінематичних (зміщення – 10 мм, довжина штриха – 20 мм) параметрів процесу оброблення. Полірування здійснювали за допомогою дисперсних систем, в яких у якості дисперсної фази використовували мікро- і нанопорошки метаборату міді (CuB_2O_4 , густина – $3,86 \text{ г/см}^3$, статична діелектрична проникність $\epsilon_2 = 6,05$, коефіцієнт теплопровідності – $1,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$), ширина забороненої зони $E_{gp} = 3,6 \text{ eV}$, параметри кристалічної ґратки $a = 1,148 \text{ нм}$, $c = 0,562 \text{ нм}$ [7, 9–15]), а в якості дисперсного середовища використовували гас (DM1, діелектрична проникність $\epsilon_3 = 2,1$) і воду (DM2, діелект-

рична проникність $\varepsilon_3 = 81$). 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} . Середній розмір частинок метаборату міді, який визначали за допомогою растрового електронного мікроскопа Zeiss EVO50 із системою мікроаналізу Aztec (Oxford Instruments), складав 409 нм [4, 5]. Знімання оброблюваного матеріалу визначали ваговим методом за допомогою аналітичних вагів мод. ВЛР-200. Параметри шорсткості полірованих поверхонь визначали методом комп'ютерного моделювання [5, 16–18].

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 ν_{1m} , ν_{2m} , ν_{1p} , ν_{2p} та характеризується спектральним розділенням $\delta\nu_m = \nu_{2m} - \nu_{1m}$ і $\delta\nu_p = \nu_{1p} - \nu_{2p}$. Швидкість знімання оброблюваного матеріалу V_m та інтенсивність зношування полірувального порошку V_p визначають у відповідності до формул [6–8, 19–21]

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

$$V_p = \frac{L_t u}{d} \eta_p \tau_p Q_p, \quad (2)$$

де η_m і η_p – коефіцієнти об'ємного зносу; L_t – довжина шляху тертя частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні; $Q_m = \nu_{1m}/(\nu_{2m} - \nu_{1m})$ і $Q_p = \nu_{2p}/(\nu_{1p} - \nu_{2p})$ – добротність мікрорезонатора; τ_m і τ_p – час життя кластерів на оброблюваній поверхні і на поверхні частинки полірувального порошку у збудженому стані; d – розмір частинки полірувального порошку; u – швидкість відносного переміщення деталі та притира.

РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження механізму утворення наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку під час полірування міді й алюмінію за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків метаборату міді, здійснювали, виходячи з порівняння спектрів інфрачервоного поглинання оброблюваного матеріалу і полірувального порошку з урахуванням впливу дисперсного середовища (DM1 або DM2) на хімічне модифікування поверхневого шару і механічне видалення оксидів, що утворюються [22–27]. Оскільки енергія коливань молекулярних фрагментів, з яких складаються кластери на поверхні частинок метаборату міді, яка складає 75–135 меВ, набагато менше, ніж енергія коливань атомів в кластерах оброблюваної поверхні міді (2,0–2,4 еВ) [6] або алюмінію (1,5–8,0 еВ) [7], ферстерівське резонансне перенесення енергії (FRET) від частинок полірувального порошку до поверхні металу безпосередньо неможливе [8]. За припущення, що наночастинки шламу, які видаляються з оброблюваної поверхні під час полірування, мають такі ж оптичні характеристики, як наночастинки Cu-NPs, CuO-NPs, Cu₂O-NPs [28–34] і Al-NPs, Al₂O₃-NPs, Al(OH)₃-NPs [35–43], можна визначити частоти коливань молекулярних фрагментів кластерів на оброблюваній поверхні й на поверхні частинки полірувального порошку ν_1 , ν_2 , за яких досягаються мінімальні значення спектрального розділення $\delta\nu_m$ і $\delta\nu_p$ [6–8].

Враховуючи, що наночастинки Cu-NPs, CuO-NPs і Cu₂O-NPs мають характерні смуги і піки в спектрах ІЧ-поглинання, характерні для зв'язків Cu–O і Cu–O–H: 522,54–523,98 см⁻¹ [28, 32], 550–570; 622,72–645,61; 876,76–877,08 см⁻¹ [28, 44], 1113, 1037 і 1180 см⁻¹ [31, 32, 34, 45, 46], показано, що під час полірування міді за допомогою дисперсної системи з вуглеводневим середовищем (DM1) мінімальні значення $\delta\nu_m = 8,3 \text{ см}^{-1}$ і $\delta\nu_p = 10,5 \text{ см}^{-1}$ досягаються під час квантових переходів між енергетичними рівнями кластерів на поверхні частинок полірувального порошку і кластерів на оброблюваній поверхні (квантових точок Cu₂O-QDs) на частотах: $\nu_{2m} = 631,0 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{1m} = 622,7 \text{ см}^{-1}$ і $\nu_{1p} = 645,6 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{2p} = 635,1 \text{ см}^{-1}$ відповідно (див. рис. 1) [6, 28, 31, 32]. Врахування фізико-механічних властивостей квантових точок Cu₂O-QDs, що складаються з оксиду міді (I) Cu₂O [47–51] (табл. 1), дозволило визначити найбільш ймовірні розміри наночастинок шламу a_m . Найбільш ймовірні розміри наночастинок зносу полірувального порошку a_p було визначено з врахуванням параметрів кристалічної ґратки метаборату міді [52, 53]. Визначено також добротність мікрорезонатора Q_m і Q_p (табл. 2, 3).

Таблиця 1. Фізико-механічні властивості кластерів на оброблюваній поверхні, що утворюються під час полірування міді і алюмінію

Фізико-механічні характеристики	Оброблюваний матеріал			
	Мідь		Алюміній	
	Дисперсне середовище			
	DM1	DM2	DM1	DM2
Кластер на оброб- люваній поверхні	Cu ₂ O-QDs	CuO-QDs	Al ₂ O ₃ -QDs	Al(OH) ₃ -NCr
Густина ρ ₁ , 10 ³ кг/м ³	6,0	6,3	4,0	2,4
Статична діелектри- чна проникність ε ₁	7,5	13,0	9,3	3,0
Коефіцієнт теплопровідності λ ₁ , Вт/(м·К)	6,3	33,0	30,3	30,0
Ширина забороненої зони E _g , eВ	2,2	1,3	2,6	5,0
Параметри кристалі- чної ґратки, нм	a = 0,42696	a = 0,4684, b = 0,3423, c = 0,5129.	a = 0,47617, c = 1,29947.	a = 0,8676, b = 0,5070, c = 0,9721.

Під час полірування міді за допомогою дисперсної системи з водяним середовищем (DM2) мінімальні значення $\delta\nu_m = 12,4 \text{ см}^{-1}$ і $\delta\nu_p = 10,5 \text{ см}^{-1}$ досягаються під час квантових переходів між енергетичними рівнями кластерів на поверхні частинок полірувального порошку і кластерів на оброблюваній поверхні (CuO-QDs) на частотах: $\nu_{2m} = 635,1 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{1m} = 622,7 \text{ см}^{-1}$ і $\nu_{1p} = 645,6 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{2p} = 635,1 \text{ см}^{-1}$ (див. рис. 1) [6, 28, 31, 32]. Врахування фізико-механічних властивостей квантових точок CuO-QDs, які складаються з оксиду міді (II) CuO [32, 33, 44, 47, 51, 54, 55] (див. табл. 1), дозволило визначити найбільш ймовірні розміри наночастинок шламу a_m і наночастинок зносу полірувального порошку a_p , а також добротність мікрорезонатора Q_m і Q_p (див. табл. 2, 3).

З огляду на те, що наночастинки Al₂O₃-NPs характеризуються смугами і піками в спектрах ІЧ-поглинання: 570, 571, 573, 576 і 813, 815, 820, 837 см⁻¹

[37], та мають частоти, характерні для зв'язків Al–O–Al: 517, 558, 625, 664, 700, 732, 757, 881 см^{-1} [35, 38, 40]; Al–O: 811, 1020, 1100, 1160 см^{-1} [35, 36, 38, 40], а наночастинки Al(OH)₃-NPs характеризуються частотами: 520, 746, 1027 см^{-1} [39, 40] і 480, 600, 750, 970, 1025 см^{-1} [43, 44], показано, що під час полірування алюмінію за допомогою дисперсної системи з дисперсним середовищем, що складалось з гасу (DM1), мінімальні значення $\delta\nu_m = 12,1 \text{ см}^{-1}$ і $\delta\nu_p = 9,0 \text{ см}^{-1}$ були досягнуті під час квантових переходів між енергетичними рівнями кластерів на поверхні частинок полірувального порошку і кластерів на оброблюваній поверхні (Al₂O₃-QDs) на частотах: $\nu_{2m} = 849,1 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{1m} = 837,0 \text{ см}^{-1}$ і $\nu_{1p} = 570,0 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{2p} = 561,0 \text{ см}^{-1}$ відповідно (див. рис. 1) [35–38, 56]. Врахування фізико-механічних властивостей квантових точок Al₂O₃-QDs [7, 53, 56, 57, 58] (див. табл. 1) дозволило визначити найбільш ймовірні розміри наночастинок шламу a_m і наночастинок зносу полірувального порошку a_p , а також відповідні значення добротності мікрорезонатора Q_m і Q_p (див. табл. 2, 3).

Таблиця 2. Параметри і характеристики процесу утворення наночастинок шламу під час полірування міді і алюмінію

Параметри і характеристики	Оброблюваний матеріал			
	Мідь		Алюміній	
	Дисперсне середовище			
	DM1	DM2	DM1	DM2
Кластер оброблюваного матеріалу	Cu ₂ O-QDs	CuO-QDs	Al ₂ O ₃ -QDs	Al(OH) ₃ -NCr
a_m , нм	6,5	4,6	9,3	5,0
E_{gqd} , еВ	2,26	1,49	2,71	$E_g = 5,0$ еВ
w_m , 10 ⁷ , с ⁻¹	6,17	6,21	8,30	7,60
Ψ_m	0,987	0,980	0,986	0,960
E_{Tm} , еВ	3,6	56,4	4,5	17,7
E_m , еВ	1,3	54,9	1,8	12,7
U_m^* , 10 ¹⁰ , Дж/кг	6,2	120,9	2,4	76,4
H	0,31	9,14	0,28	19,01
τ_m , нс	957	338	723	92
Q_m	75,0	50,2	69,2	24,0
η_m , 10 ⁻¹² , м ² /с	0,79	0,67	1,87	0,67

Показано, що під час полірування алюмінію за допомогою дисперсної системи з водяним середовищем (DM2) мінімальних значень $\delta\nu_m = 31,1 \text{ см}^{-1}$ і $\delta\nu_p = 13,4 \text{ см}^{-1}$ було досягнуто під час квантових переходів між енергетичними рівнями кластерів на поверхні частинок полірувального порошку і кластерів на оброблюваній поверхні (нанокристалів Al(OH)₃) на частотах: $\nu_{2m} = 777,1 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{1m} = 746,0 \text{ см}^{-1}$ і $\nu_{1p} = 746,0 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{2p} = 732,6 \text{ см}^{-1}$ (див. рис. 1) [39–43]. Найбільш ймовірні розміри наночастинок шламу a_m і наночастинок зносу полірувального порошку a_p , а також відповідні значення добротності мікрорезонатора Q_m і Q_p (див. табл. 2, 3), було визначено з врахуванням фізико-механічних властивостей нанокристалів гідроксиду алюмінію Al(OH)₃-NCr [59–61] (див. табл. 1).

Енергетичний аналіз процесу утворення наночастинок шламу під час полірування як переходу кластерів оброблюваного матеріалу зі зв'язаного стану

у вільний [5, 19, 52], показав, що наночастинка шламу відокремлюється від оброблюваної поверхні металу тільки тоді, коли енергія E_{Tm} , яка переноситься до неї від частинки полірувального порошку, перевищує ефективну ширину E_{gqd} забороненої зони квантових точок $\text{Cu}_2\text{O-QDs}$, CuO-QDs , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-QDs}$, або ширину E_g забороненої зони $\text{Al}(\text{OH})_3\text{-NCr}$, а їхня різниця визначає кінетичну енергію наночастинок шламу E_m . Це стосується і наночастинок зносу полірувального порошку, енергія E_p яких визначається як різниця між енергією E_{Tp} , що переноситься під час FRET від оброблюваної поверхні до частинки полірувального порошку, і шириною E_g забороненої зони нанокристалів метаборату міді.

Таблиця 3. Параметри і характеристики процесу утворення наночастинок зносу полірувального порошку під час полірування міді і алюмінію

Параметри і ха- рактеристики	Оброблюваний матеріал			
	Мідь		Алюміній	
	Дисперсне середовище			
	DM1	DM2	DM1	DM2
a_p , нм	12,3	12,3	10,0	9,0
w_p , 10^7 c^{-1}	6,31	6,31	5,57	7,29
ψ_p	0,984	0,984	0,984	0,982
E_{Tp} , eB	81,7	81,7	76,5	77,9
E_p , eB	78,1	78,1	72,9	74,3
U^*_p , 10^{10} Дж/кг	11,0	11,0	16,7	31,0
τ_p , нс	222	222	251	192
Q_p	60,5	60,5	62,3	54,7
η_p , $10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$	2,46	2,11	2,32	1,49

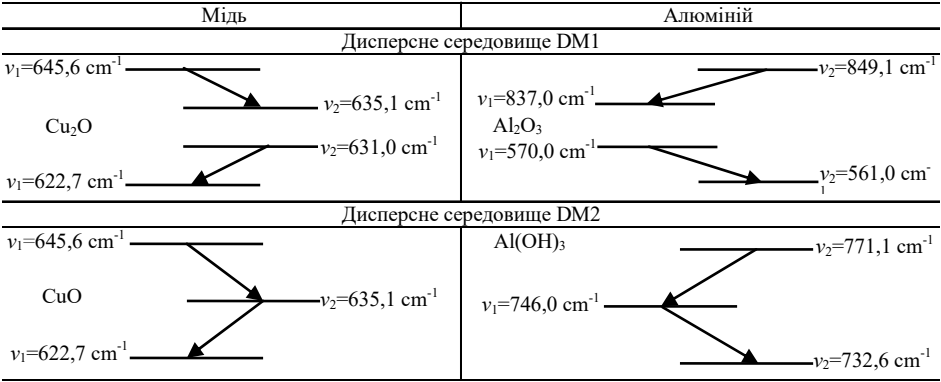


Рис. 1. Схема квантових переходів під час полірування міді і алюмінію.

Водночас було враховано залежність ефективної ширини забороненої зони квантових точок E_{gqd} від їхніх розмірів a_m у відповідності до квантово-розмірного ефекту [6–8, 50, 54, 56], що дозволило визначити значення E_{gqd} для $\text{Cu}_2\text{O-QDs}$, CuO-QDs і $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-QDs}$, які склали 2,26 еВ, 1,49 еВ і 2,78 еВ відповідно (див. табл. 2). Враховано також, що енергія E_{Tm} , яка переноситься до оброблюваної поверхні від частинки полірувального порошку, і енергія E_{Tp} , що переноситься у зворотному напрямку, залежать від коефіцієнтів ефективності передачі енергії ψ_m і ψ_p , які визначають як відношення часу життя

збудженого стану донора за наявності акцептора до часу його життя за відсутності акцептора [19]. Ймовірність квантових переходів зі збудженого стану донора у всі стани акцептора з меншою енергією визначали у відповідності до теорії квантових переходів [4, 5, 19] за формулами

$$w_m = (8\pi c/3) \cdot \alpha^3 v_{2m} \text{ і } w_p = (8\pi c/3) \cdot \alpha^3 v_{1p},$$

де $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$ – стала тонкої структури; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд електрона; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла; $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка. Це дозволило визначити час життя кластерів на оброблюваній поверхні $\tau_m = N_m/w_m$ та час життя кластерів на поверхні частинки полірувального порошку $\tau_p = N_p/w_p$ (N_m , N_p – кількість переходів) у збудженому стані (див. табл. 2, 3). Тут наведено значення енергії E_{Tm} , що переноситься від частинки полірувального порошку до оброблюваної поверхні, енергії наночастинок шламу E_m , а також енергії E_{Tp} , що переноситься від оброблюваної поверхні до частинки полірувального порошку, і енергії наночастинок зносу метаборату міді E_p .

Енергія перенесення, яка показує енергетичні витрати, необхідні для видалення з оброблюваної поверхні або з частинки полірувального порошку одиниці маси матеріалу під час полірування [19, 20], залежить від енергії E_{Tm} (E_{Tp}), ймовірності відповідних квантових переходів w_m (w_p) та маси матеріалу, що переноситься у відповідності до формул

$$U_m^* = \frac{E_{Tm} w_m}{\rho_1 V_1} \left(\frac{\rho_m}{\rho_1} \right); \quad (3)$$

$$U_p^* = \frac{E_{Tp} w_p}{\rho_2 V_2}, \quad (4)$$

де ρ_1 , ρ_2 і V_1 , V_2 – густина і об'єми частинок шламу і частинок зносу полірувального порошку, ρ_m – густина металу, що полірують.

Варто зауважити, що формула (3) враховує відмінність мас видаленого матеріалу у вигляді квантових точок $\text{Cu}_2\text{O-QDs}$, CuO-QDs , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-QDs}$ чи нанокристалів $\text{Al}(\text{OH})_3\text{-NCr}$ від маси металу, що полірують, а в формулі (4) відсутній множник, який оцінює відношення густини частинки зносу полірувального порошку і об'ємного матеріалу (CuB_2O_4), оскільки вони однакові. Розраховані значення енергії перенесення U_m^* і U_p^* наведено в табл. 2, 3.

На основі загальної методики [5, 7, 18, 19, 21] було визначено коефіцієнти об'ємного зносу η_m і η_p (див. табл. 2, 3), які залежать від розмірів наночастинок шламу a_m і наночастинок зносу полірувального порошку a_p , розміру частинок полірувального порошку, а також режимних параметрів полірування і коефіцієнтів теплопровідності кластерів на оброблюваній поверхні (див. табл. 1) і на поверхні частинки метаборату міді, а також швидкість знімання оброблюваного матеріалу V_m (формула (1)), інтенсивність зношування полірувального порошку V_p (формула (2)) і параметри шорсткості полірованих поверхонь деталей оптотехніки з міді і алюмінію (табл. 4).

В результаті аналізу даних, наведених в табл. 1–4, встановлено, що під час полірування деталей оптотехніки з міді і алюмінію за допомогою полірувальних дисперсних систем з мікро- і нанопорошків метаборату міді і дисперсного середовища у вигляді гасу (DM1) або води (DM2) швидкість знімання оброблюваного матеріалу та інтенсивність зношування полірувального порошку зменшуються за підвищення енергії перенесення U_m^* і U_p^* відповідно (рис. 2), шорсткість полірованих поверхонь погіршується за зменшення енергії пере-

несення U_m^* (рис. 3). Крім того, показано, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу V_m і параметри шорсткості Ra , Rq , $R_{\max}$ полірованих поверхонь суттєво зменшуються у разі заміни дисперсного середовища DM1 на DM2.

Таблиця 4. Показники полірування оптичних поверхонь деталей з міді і алюмінію

Показники полірування	Оброблюваний матеріал			
	Мідь		Алюміній	
	Дисперсне середовище			
	DM1	DM2	DM1	DM2
Швидкість знімання матеріалу				
$V_m, 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	19,6	3,9	43,3	0,70
Експеримент: мг/хв	1,1	0,2	0,7	0,01
$10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	20,5	3,7	42,6	0,62
Похибка розрахунку, %	4	4	2	7
Інтенсивність зношування метаборату міді $V_p, 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	11,4	9,7	16,8	7,0
Параметри шорсткості:				
$Ra, \text{ нм}$	9,0±0,4	8,0±0,2	9,8±0,3	6,2±0,4
$Rq, \text{ нм}$	9,5±0,5	8,4±0,2	10,2±0,4	6,5±0,5
$R_{\text{max}}, \text{ нм}$	12,8±1,0	12,5±0,4	16,4±1,4	11,0±1,6

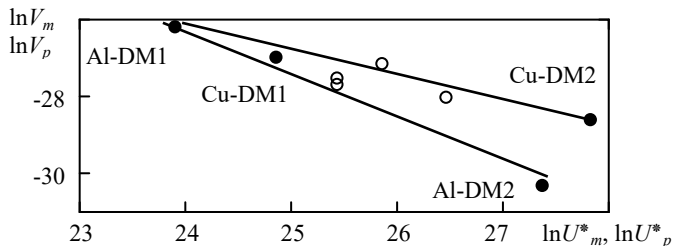


Рис. 2. Залежності швидкості знімання оброблюваного матеріалу (●) та інтенсивності зношування полірувального порошку (○) від енергії перенесення.

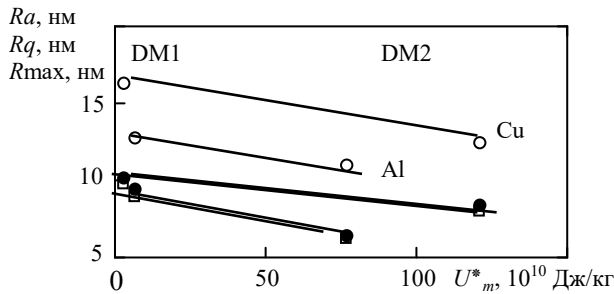


Рис. 3. Залежності параметрів шорсткості Ra (□), Rq (●), $R_{\max}$ (○) полірованих поверхонь від енергії перенесення U_m^* .

Для пояснення впливу дисперсного середовища на показники полірування слід скористатись залежністю енергії перенесення від потенціалу взаємодії частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею [62], який визначається сталою Ліфшиця [5], залежною від спектрального розділення

δv_m і розділення за діелектричною проникністю $H = [\epsilon_3/(\epsilon_1 \cdot \epsilon_2)]^{1/2}$ між оброблюваним матеріалом, полірувальним порошком і дисперсним середовищем (див. табл. 2) [5, 63, 64]. На рис. 4 наведено залежність енергії перенесення U_m^* від співвідношення $(\delta v_m/H)$, яка показує, що використання в дисперсній системі з мікро- і нанопорошків метаборату міді дисперсного середовища з більшою діелектричною проникністю (води) (DM2) забезпечує підвищення енергії перенесення і відповідно зменшення продуктивності полірування і покращення шорсткості полірованих поверхонь металевих деталей. При використанні в якості дисперсного середовища рідини з меншою діелектричною проникністю (газу) (DM1) навпаки – енергія перенесення зменшується, що зумовлює підвищення швидкості знімання оброблюваного матеріалу і зростання параметрів шорсткості поверхні, що полірується.

Крім того, показано, що ефективність полірування металевих деталей оптотехніки можна оцінювати за відношенням швидкості знімання оброблюваного матеріалу до інтенсивності зношування полірувального порошку (V_m/V_p), яке визначають у відповідності до формул (1) і (2) і є лінійно залежним від співвідношення $(\delta v_m/H)$ (рис. 5). Встановлено, що у разі використання дисперсного середовища DM1 (газу) відношення $(V_m/V_p) > 1$, а за використання DM2 (води) – $(V_m/V_p) < 1$, що означає ефективне перенесення енергії від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні – у першому разі і екранування перенесення енергії від оброблюваної поверхні до частинок полірувального порошку – у другому.

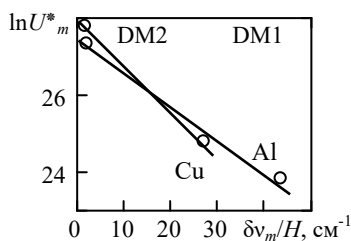


Рис. 4. Залежність енергії перенесення U_m^* від спектрального розділення δv_m і розділення за діелектричною проникністю H .

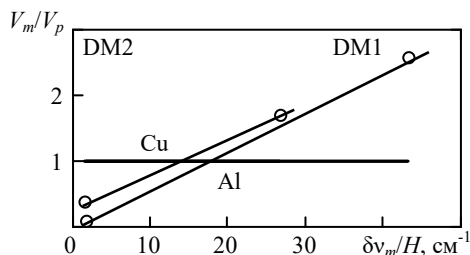


Рис. 5. Залежність співвідношення V_m/V_p від спектрального розділення δv_m і розділення за діелектричною проникністю H .

Отже, показано можливість визначення оптимального значення енергії перенесення, за якого досягають припустимих параметрів шорсткості, що обмежені вимогами до оптичних поверхонь, і максимальної швидкості знімання оброблюваного матеріалу, яка використовує як критерій співвідношення $\delta v_m/H$, що залежить від діелектричної проникності дисперсного середовища.

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 (CuB_2O_4) з дисперсним середовищем з газу (DM1) або води (DM2) добре узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування (див. табл. 4). Відхилення розрахункових і експериментальних даних, яке складало 2–7 %, свідчить, що під час полірування поверхонь металевих деталей оптотехніки, яке здійснюють в мікрорезонаторі, утвореному поверхнями оброблюваного матеріалу і полірува-

льної частинки метаборату міді, швидкість знімання оброблюваного матеріалу, інтенсивність зношування полірувального порошку і шорсткість полірованих поверхонь визначаються енергією перенесення.

ВИСНОВКИ

В результаті дослідження закономірностей перенесення енергії між поверхнею оброблюваної деталі та полірувальною дисперсною системою з мікро- та нанопорошків метаборату міді з дисперсним середовищем у вигляді гасу або води встановлено, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу, інтенсивність зношування полірувального порошку і параметри шорсткості полірованої поверхні збільшуються у разі зменшення енергії перенесення, що свідчить про однакові закономірності полірування оптичних поверхонь деталей з металевих та неметалевих матеріалів.

Показано, що енергія перенесення залежить від спектрального розділення між оброблюваним матеріалом і метаборатом міді і розділення за діелектричною проникністю між оброблюваним металом, полірувальним порошком і дисперсним середовищем, і визначається їхнім співвідношенням, що дозволило вивчити вплив діелектричної проникності дисперсного середовища на показники полірування деталей оптотехніки з міді і алюмінію.

Встановлено, що це співвідношення може бути критерієм ефективності перенесення енергії від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні, оскільки дає можливість визначити відношення швидкості знімання оброблюваного матеріалу до інтенсивності зношування полірувального порошку, яке більше одиниці у разі використання дисперсного середовища у вигляді гасу, і менше одиниці у випадку використання води.

Також 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 з дисперсним середовищем із гасу або води добре узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування за відхилення 2–7 %.

Yu. D. Filatov

Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Energy transfer during polishing of metal optical components
using dispersed systems of copper metaborate micro-
and nanopowders

As a result of the study of the regularities of energy transfer between the surface of the workpiece and the polishing dispersed system of micro- and nanopowders of copper metaborate with a dispersed medium in the form of kerosene or water, it was found that the removal rate of the processed material, the wear intensity of the polishing powder and the roughness parameters of the polished surface increase with a decrease in the transfer energy, which indicates the same regularities of polishing the optical surfaces of parts made of metallic and non-metallic materials. It is shown that the transfer energy depends on the spectral separation between the processed material and copper metaborate and the separation by dielectric permittivity between the processed metal, polishing powder and dispersed medium, and is determined by their ratio. The influence of the dielectric constant of the dispersed medium on the polishing performance of optical components made of copper and aluminum was studied and it was shown that this ratio can be a criterion for the efficiency of energy transfer from polishing powder particles to the treated surface, since it makes it possible to determine the ratio of the removal rate of the processed material to the wear intensity of the polishing powder, which is greater than 1 in the case of using a dispersed medium in the form of kerosene, and less than 1

when using water. It was also shown that the theoretically calculated values of the removal rate of the processed material during polishing of copper and aluminum using dispersed systems of micro- and nanopowders of copper metaborate with a dispersed medium of kerosene or water are in good agreement with the data of experimental determination of polishing performance with a deviation of 2–7 %.

Keywords: polishing, copper metaborate, energy transfer, material removal rate, wear intensity of polishing powder, surface roughness.

1. Filatov Y.D. Mechanism of surface microrelief formation during glass treatment. *Sverkhtverdye Materialy*. 1991. No. 5. P. 61–65.
2. Filatov Yu.D., Rogov V.V. A cluster model of mechanism of silica-containing material fatigue wear in polishing. Part 1, 2. *Sverkhtverdye Materialy*. 1994. No. 3. P. 40–43; No. 4. P. 45–51.
3. Filatov Yu.D. Polishing of aluminosilicate materials with tools with bound polishing powder. *Sverkhtverdye Materialy*. 2001. No. 3. P. 36–49.
4. Filatov Yu.D. Material removal rate in polishing polymethymethacrylate parts. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 3. P. 212–220.
5. Filatov Yu.D. Quantum mechanism of optical glass polishing. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 4. P. 303–313.
6. Filatov Yu.D., Prikhna T.O., Boyarintsev A.Y., 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.
7. Filatov Yu.D., Prikhna T.O., Boyarintsev A.Y., Sidorko V.I., Kovalev V.A. Mechanism of polishing aluminum optical components. *J. Superhard Mater.* 2025. Vol. 47, no. 5. P. 388–395.
8. Filatov Yu.D., Prikhna T.O., Boyarintsev A.Y., Sidorko V.I., Kovalev V.A. Polishing techniques for optical-grade copper and aluminum parts. *J. Superhard Mater.* 2025. Vol. 47, no. 6. P. 477–486.
9. 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.
10. 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.
11. 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, art. 094309.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Filatov Yu.D., Yashuk V.P., Filatov A.Yu., Heisel W., Storchak M., Monteil G. Assessment of surface roughness and reflectance of nonmetallic products upon diamond abrasive finishing. *J. Superhard Mater.* 2009. Vol. 31, no. 5. P. 338–346.
18. 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.
19. 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.

20. 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.
21. 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.
22. Hazarika J., Patil C.S., Rajaraman P.V. Formulation of slurry for chemical mechanical polishing of Cu substrates. *Mater. Today: Proc.* 2020. 5 p.
23. 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.
24. 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.
25. Zhang Z., Cui J., Zhang J., Liu D., Yu Z., Guo D. Environment friendly chemical mechanical polishing of copper. *Appl. Surf. Sci.* 2019. Vol. 467–468. P. 5–11.
26. Zhoua J., Niua X., Yanga C., Huoa Z., Lua Y., Wanga Z., Cuia Y., Wanga R. Surface action mechanism and planarization effect of sarcosine as an auxiliary complexing agent in copper film chemical mechanical polishing. *Appl. Surf. Sci.* 2020. Vol. 529, art. 147109.
27. Liu D., Zhang Z., Feng J., Yu Z., Meng F., Shi Ch., Xu G., Shi Sh., Liu W. Environment-friendly chemical mechanical polishing for copper with atomic surface confirmed by transmission electron microscopy. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2023. Vol. 656, Part B, no. 5, art. 130500.
28. 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.
29. Khan A., Rashid A., Younas R., Chong R. A chemical reduction approach to the synthesis of copper nanoparticles. *Int. Nano Lett.* 2015. Vol. 6, no. 1. P. 21–26.
30. 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.
31. Pandit R., Gaikwad S., Rai M. Biogenic fabrication of CuNPs, Cu bioconjugates and in vitro assessment of antimicrobial and antioxidant activity. *IET Nanobiotechnol.* 2017. Vol. 11, no. 5. P. 568–575.
32. Mohamed E.A. Green synthesis of copper & copper oxide nanoparticles using the extract of seedless dates. *Heliyon.* 2020. Vol. 6, no. 1. art. e03123.
33. Yin M., Wu C.-K., Lou Y., Burda C., Koberstein J. T., Zhu Y., O'Brien S. Copper oxide nanocrystals. *J. Am. Chem. Soc.* 2005. Vol. 127, no. 26. P. 9506–9511.
34. 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.
35. Nila A.S.S., Radha K.P. Synthesis and XRD, FTIR Studies of alumina nanoparticle using Co-precipitation method. *Int. J. Res Appl. Sci. Eng. Technol. (IJRASET).* 2018. Vol. 6, no. III. P. 2493–2496.
36. 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.
37. 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.
38. Atrak K., Ramazani A., Taghavi Fardood S. Green synthesis of amorphous and gamma aluminum oxide nanoparticles by tragacanth gel and comparison of their photocatalytic activity for the degradation of organic dyes. *J. Mater. Sci.: Mater. Electr.* 2018. Vol. 29, no. 10. P. 8347–8353.
39. Goudarzi M., Ghanbari D., Salavati-Niasari M., Ahmadi A. Synthesis and characterization of $\text{Al}(\text{OH})_3$, Al_2O_3 nanoparticles and polymeric nanocomposites. *J. Clust. Sci.* 2016. Vol. 27. P. 25–38.
40. Kolar T., Mušič B., Korošec R.C., Kokol V. Addition of $\text{Al}(\text{OH})_3$ versus $\text{AlO}(\text{OH})$ nanoparticles on the optical, thermo-mechanical and heat/oxygen transmission properties of microfibri-llated cellulose films. *Cellulose.* 2021. Vol. 28. P. 9441–9460.

41. Kim M., Lee D., Woo H.-Y., Kim T.-H., Paik T., Kim K.-S. Synthesis of colloidal aluminum hydroxide nanoparticles for transparent luminescent polymer nanocomposite films. *Mater. Des.* 2019. Vol. 175. art. 107800.
42. Prabu S., Wang H.-W. Hydrogen generation from the reaction of Al and H₂O using a synthesized Al(OH)₃ nanoparticle catalyst: the role of urea. *Catal. Sci. Technol.* 2021. Vol. 11, no. 13. P. 4636–4649.
43. Silva F.K., Santa R.A.A.B., Fiori M.A., Aquino T.F., Soares C., Martins M.A.P.M., Padoina N., Riella H.G. Synthesis of aluminum hydroxide nanoparticles from the residue of aluminum anodization for application in polymer materials as ant flame agents. *J. Mater. Res. Technol.* 2020. Vol. 9. P. 8937–8952.
44. Amaliyah S., Pangesti D.P., Masruri M., Sabarudin A., Sumitro S.B. Green synthesis and characterization of copper nanoparticles using Piper retrofractum Vahl extract as bioreductor and capping agent. *Heliyon*. 2020. Vol. 6, no. 8. art. e04636.
45. Yokhebed N., Ramelan A.H., Wahyuningsih S., Kawuri K.R. The synthesis of cuprous nanoparticles using chemical reduction method. *J. Phys. Conf. Ser.* 2022. Vol. 2190. art. 012038.
46. Kayani Z.N., Umer M., Riaz S., Naseem S. Characterization of copper oxide nanoparticles fabricated by the sol–gel method. *J. Electronic Mater.* 2015. Vol. 44, no. 10. P. 3704–3709.
47. Cao Z., Leeuw B.J., Xie T., Singh A.K. Numerical study of a copper oxide-based thermochemical heat storage system. *Case Stud. Therm. Eng.* 2024. Vol. 63. art. 105315.
48. Tang D., Xu D., Luo Z., Ke J., Zhou Y., Li L., Sun J. Highly dispersion Cu₂O QDs decorated Bi₂WO₆ S-scheme heterojunction for enhanced photocatalytic water oxidation. *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12. P. 2455–2465.
49. Karunarathna P.G.D.C.K., Samarakoon S.P.A.U.K., Fernando C.A.N. Explanation of the photocurrent generation of Cu₂O quantum dots (QDs) sensitized p-CuSCN stable photoelectrochemical cells. *Mater. Res. Express*. 2018. Vol. 5, no. 1. art. 015005.
50. Lee M.Y., Kim S.-H., Park I.-K. Cu₂O quantum dots emitting visible light grown by atomic layer deposition. *Physica B: Condensed Matter*. 2016. Vol. 500. P. 4–8.
51. Linnera J., Sansone G., Maschio L., Karttunen A.J. Thermoelectric properties of p-type Cu₂O, CuO, and NiO from hybrid density functional theory. *J. Phys. Chem. C*. 2018. Vol. 122, no. 27. art. 15180.
52. 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.
53. 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.
54. 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. *In. J. Nanoscience*. 2017. Vol. 16, no. 5, 6. art. 1750019.
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. 2112–2120.
56. Nemade K.R., Waghuley S.A. Low temperature synthesis of semiconducting α -Al₂O₃ quantum dots. *Ceram. Int.* 2014. Vol. 40, no. 4. P. 6109–6113.
57. Telmer M.R., Hilario M.S., Hoff B.W., Lanagan M.T., Reeja-Jayan B. Anisotropy of W-band complex permittivity in Al₂O₃. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2019. Vol. 31, art. 225702.
58. Abbas I.A., Al-Mayalee K.H. Structural and Optical Properties of Al₂O₃ Nanostructures prepared by hot water treatment method. *Rev. Composit. Matér. Avanc. J. Composit Advanc. Mater.* 2024. Vol. 34, no. 4. P. 527–532.
59. Yu B., Tian Z., Xiong J., Xiang L. Synthesis of Al(OH)₃ Nanostructures from Al(OH)₃ microagglomerates via dissolution-precipitation route. *J. Nanomater.* 2013. Vol. 22. Is. 1.
60. Kim C., He T., Jiang P., Wei P., Huang X., Jin Z. Dielectric properties of γ -irradiated POE highly filled with aluminum hydroxide. *Polymer Eng. Sci.* 2006. Vol. 46, no. 12. P. 1721–1727.
61. Kim J., Im H., Kim J., Kim J. Thermal and electrical conductivity of Al(OH)₃ covered graphene oxide nanosheet/epoxy composites. *J. Mater. Sci.* 2011. Vol. 47, no. 3. P. 1418–1426.
62. 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.

63. Filatov Y.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.
64. Filatov Y.D. New patterns of polishing surfaces of parts made of nonmetallic materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 2. P. 140–149.

Надійшла до редакції 15.07.25

Після доопрацювання 22.07.25

Прийнята до опублікування 23.07.25