

# Дослідження процесів обробки

УДК 621.923.7

**Ю. Д. Філатов<sup>1</sup>, А. Ю. Бояринцев<sup>2</sup>, В. І. Сідорко<sup>3</sup>,  
С. В. Ковальов<sup>1</sup>, В. А. Ковальов<sup>4</sup>, О. Я. Юрчишин<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля  
НАН України, м. Київ, Україна

<sup>2</sup>Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України,  
м. Харків, Україна

<sup>3</sup>Державне підприємство “Інженерно-виробничий центр  
АЛКОН” НТАК (АЛКОН) НАН України, м. Київ, Україна

<sup>4</sup>Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”,  
м. Київ, Україна  
\*filatov2045@gmail.com

## **Розсіювання наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку під час полірування деталей оптотехніки з міді й алюмінію**

*У результаті дослідження закономірностей розсіювання наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку під час полірування міді і алюмінію за допомогою дисперсних систем з мікро- та нанопорошків метаборату міді з дисперсним середовищем у вигляді гасу або води, а також утворення нальоту з цих наночастинок на робочій поверхні притира, встановлено, що поверхні притира досягають лише частинки шламу, розсіяні вперед, і частинки зносу полірувального порошку, розсіяні назад, диференціальні перерізи яких, змінюючись в межах  $[2,3-102,0]$  Гб·ср<sup>-1</sup> і  $[0,7-4,8]$  Мб·ср<sup>-1</sup>, суттєво зменшуються у разі збільшення розділення між наночастинками шламу, наночастинками зносу полірувального порошку і дисперсним середовищем за діелектричною проникністю. Показано, що повні перерізи розсіювання наночастинок  $\sigma_m$  і  $\sigma_p$  змінюючись в межах  $[0,05-1,78]$  Мб і  $[0,37-0,53]$  Мб, також зменшуються зі збільшенням розділення між наночастинками шламу, наночастинками зносу і дисперсним середовищем за діелектричною проникністю, а максимум  $\sigma_m/\sigma_p = 3,3$  і мінімум  $\sigma_m/\sigma_p = 0,1$ , які характерні для взаємодії наночастинок в системах мідь-гас і алюміній-вода, свідчать про більш вірогідне утворення нальоту на робочій поверхні притира з наночастинок шламу – у першому разі і з наночастинок зносу полірувального порошку – у другому. Експериментально підтверджено, що під час полірування*

© Ю. Д. ФІЛАТОВ, А. Ю. БОЯРИНЦЕВ, В. І. СІДОРКО, С. В. КОВАЛЬОВ, В. А. КОВАЛЬОВ, О. Я. ЮРЧИШИН, 2026

*міді за допомогою мікро- та нанопорошків метаборату міді в дисперсному середовищі гасу на поверхні притира спостерігали наліт з частинок міді, а під час полірування алюмінію у водяному дисперсному середовищі спостерігали наліт з частинок метаборату міді.*

**Ключові слова:** полірування, мідь, алюміній, метаборат міді, розсіювання наночастинок, наліт, розділення за діелектричною проникністю.

## ВСТУП

Полірування прецизійних поверхонь деталей оптотехніки з міді і алюмінію, які широко застосовують в різних галузях фундаментальних і прикладних досліджень та виробництві наукового обладнання, оптичних приладів і апаратури, традиційно здійснюють за допомогою різних за складом полірувальних дисперсних систем з неабразивних мікро- та нанопорошків. Сучасні дослідження закономірностей полірування прецизійних поверхонь металевих деталей оптотехніки показали, що для полірування міді і алюмінію найбільш доцільно застосовувати полірувальні дисперсні системи з мікро- та нанопорошків метаборату міді, оскільки вони забезпечують необхідну шорсткість полірованих поверхонь за високої швидкості знімання оброблюваного матеріалу [1–4]. Швидкість знімання оброблюваного матеріалу і параметри шорсткості обробленої поверхні, інтенсивність зношування полірувального порошку і ймовірність утворення нальоту з наночастинок шламу і наночастинок зносу метаборату міді [5–11] на робочій поверхні притира, які залежать від фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу, притира і полірувальної дисперсної системи, режимних і кінематичних параметрів процесу оброблення, визначають ефективність процесу полірування. Однак до теперішнього часу механізм утворення і переміщення наночастинок шламу і зносу полірувального порошку в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира остаточно не з'ясовано, а можливість прогнозування ефективності процесу полірування з погляду утворення нальоту з наночастинок шламу і зносу на поверхні притира практично відсутня [11–15]. Водночас ще не вивчено у який спосіб дисперсне середовище полірувальної дисперсної системи впливає на закономірності розсіювання наночастинок шламу і зносу, що генеруються під час перенесення енергії між кластерами на поверхні частинок полірувального порошку і на оброблюваній поверхні, яке відбувається за механізмом ферстерівського резонансного перенесення енергії (FRET) [1, 2, 16–22] між рівнями енергії донорно-акцепторних пар у відкритому мікрорезонаторі, який утворено поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку [11, 23–30]. Саме тому дослідження закономірностей розсіювання наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку під час полірування деталей оптотехніки з міді і алюмінію за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків метаборату міді з дисперсним середовищем з гасу або води і утворення нальоту на поверхні притира є актуальними.

Метою даного дослідження було вивчення закономірностей розсіювання наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку під час полірування міді й алюмінію та утворення нальоту з цих наночастинок на поверхні притира.

## МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження закономірностей розсіювання наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку (метаборату міді)

під час полірування та утворення нальоту з цих наночастинок на поверхні притира здійснювали під час полірування плоских поверхонь деталей з міді й алюмінію діаметром 42 мм на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притира з сірої замші діаметром 100 мм за наступних режимів: зусилля притискання – 55,5 Н, частота обертання притира – 90 об/хв, зміщення – 10 мм, довжина штриха – 20 мм, час полірування – 90 хв, середня температура в зоні контакту оброблюваної деталі та притира – 298 К. Полірування здійснювали за допомогою дисперсних систем, в яких в якості дисперсної фази використовували мікро- та нанопорошки метаборату міді ( $\text{CuB}_2\text{O}_4$ , густина –  $3,86 \text{ г/см}^3$ , статична діелектрична проникність  $\epsilon_2 = 6,05$ , ширина забороненої зони  $E_{gp} = 3,6 \text{ еВ}$ , параметри кристалічної ґратки  $a = 1,148 \text{ нм}$ ,  $c = 0,562 \text{ нм}$  [1, 3, 5, 8]), а як дисперсне середовище – газ (DM1, діелектрична проникність  $\epsilon_3 = 2,1$ , коефіцієнт поверхневого натягу –  $24 \text{ мН/м}$ , коефіцієнт динамічної в'язкості –  $3,6 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ ) або воду (DM2, діелектрична проникність  $\epsilon_3 = 81$ , коефіцієнт поверхневого натягу –  $72 \text{ мН/м}$ , коефіцієнт динамічної в'язкості –  $0,9 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ ). Частоти власних коливань частинок метаборату міді, які визначали за спектрами ІЧ-поглинання (Фур'є-спектрометр Nicolet 6700), складали 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;  $1109,8 \text{ см}^{-1}$ . Середній розмір частинок метаборату міді, який визначали за допомогою растрового електронного мікроскопу Zeiss EVO50 із системою мікроаналізу Aztec, дорівнював  $409 \text{ нм}$  [4, 29, 30, 31]. Довжина шляху тертя  $L_t$  частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні складала  $132 \text{ мм}$ , а час контакту  $t_c$  частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею дорівнював  $3,8\text{--}3,9 \text{ мкс}$  під час полірування міді і  $2,8\text{--}2,9 \text{ мкс}$  під час полірування алюмінію. Кінематичну в'язкість дисперсних систем визначали за допомогою віскозиметра мод. ВЗ-246, густину – за допомогою Density Meter DMA 35N, коефіцієнт поверхневого натягу – крапельним методом та за висотою підняття рідини в капілярі, а кути змочування дисперсними системами поверхонь оброблюваної деталі та притира – за допомогою мікроскопа Мир-12. Наліт з наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку на робочій поверхні притира спостерігали за допомогою оптичного мікроскопа ЛОМО Метап Р-1, оснащеного камерою Vision STD-Res Series. Знімання оброблюваного матеріалу визначали ваговим методом за допомогою аналітичних терезів мод. ВЛР-200.

## МЕХАНІЗМ РОЗСПИВАННЯ НАНОЧАСТИНОК ШЛАМУ І НАНОЧАСТИНОК ЗНОСУ ПОЛІРУВАЛЬНОГО ПОРОШКУ

Утворення наночастинок шламу оброблюваного матеріалу і наночастинок зносу полірувального порошку, яке є наслідком FRET, відбувається на характерних частотах  $\nu_{1m}$ ,  $\nu_{2m}$ ,  $\nu_{1p}$ ,  $\nu_{2p}$  та характеризується спектральним розділенням  $\delta\nu_m = \nu_{2m} - \nu_{1m}$  і  $\delta\nu_p = \nu_{1p} - \nu_{2p}$ . Швидкість знімання оброблюваного матеріалу  $V_m$  і інтенсивність зношування полірувального порошку  $V_p$  визначаються у відповідності до формул [3, 4, 21, 22, 32]

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

де  $\eta_{m,p}$  – коефіцієнти об'ємного зносу;  $L_t$  – довжина шляху тертя частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні;  $Q_m = \nu_{1m}/\delta\nu_m$  і  $Q_p = \nu_{2p}/\delta\nu_p$  – добротність мікрорезонатора;  $\tau_m$  і  $\tau_p$  – час життя кластерів на оброблюваній поверхні і на поверхні частинки полірувального порошку в збудженому стані.

Під час взаємодії наночастинок хвильова функція їхнього розсіювання є суперпозицією падаючої та розсіяної хвилі, яка задовольняє рівнянню Шредінгера і має вигляд

$$\varphi(r) = e^{ikz} + \frac{f(\theta)e^{ikr}}{r},$$

де  $k = mv/\hbar$  – хвильове число;  $m$  – маса частинки;  $v$  – швидкість частинки;  $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – стала Планка;  $\theta$  – кут розсіювання;  $f(\theta)$  – амплітуда розсіяної хвилі, а диференціальний переріз розсіювання і повний ефективний переріз розсіювання визначаються у відповідності до формул [33, 34]

$$I(\theta) = |f(\theta)|^2, \quad \sigma = 2\pi \int_0^\pi |f(\theta)|^2 \sin \theta d\theta. \quad (2)$$

Для визначення характеристик розсіювання наночастинок шламу (ЧШ) і наночастинок зносу полірувального порошку (ЧП) під час полірування використовують методику [35–38], яка базується на застосуванні методу парціальних хвиль, завдяки якій визначають амплітуду розсіювання наночастинок у відповідності до формули

$$f(\theta) = \frac{1}{2ik} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) P_l(\cos \theta) (\eta_l - 1), \quad (3)$$

де  $l$  – азимутальне квантове число; яке визначає її кутовий момент;  $\eta_l = \exp(2i\delta_l)$  – число, яке характеризує пружне або непружне розсіювання

частинки;  $P_l(\cos \theta)$  – поліноми Лежандра;  $\delta_l = -\int_{r_0}^{l_0} \frac{mU(r)dr}{\hbar^2 \sqrt{k^2 - \frac{(l+1/2)^2}{r^2}}}$  – фазо-

вий зсув їхніх хвильових функцій в полі розсіювання  $U(r)$ ;  $l_0$  – відстань між поверхнями деталі і притира;  $r_0 = \frac{\sqrt{l(l+1)}}{k}$  – відстань граничного зближення наночастинок.

Потенціали взаємодії між ЧШ і ЧП в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира, які залежать від їхніх розмірів  $a_m$  і  $a_p$  та відстані  $r$  між ними [15, 36, 37, 39], можна визначити формулами

$$U_m(r) = -\frac{AL_m}{16\pi} \left[ \frac{f(a_m, a_p)}{r} + 2 \ln \left( \frac{f(a_m, a_p)}{r} \right) \right]; \quad (4)$$

$$U_p(r) = -\frac{AL_p}{16\pi} \left[ \frac{f(a_m, a_p)}{r} + 2 \ln \left( \frac{f(a_m, a_p)}{r} \right) \right], \quad (5)$$

де  $f(a_m, a_p) = \frac{a_m a_p}{a_m + a_p}$  – функція розмірів частинок;  $AL_m = \hbar \delta v_m E_{ds}$  і

$AL_p = \hbar \delta v_p E_{ds}$  – сталі Ліфшиця;  $E_{ds} = \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_3)(\epsilon_2 - \epsilon_3)}{(\epsilon_1 + \epsilon_3)(\epsilon_2 + \epsilon_3)}$  – функція діелектрич-

них проникностей, яка залежить від розділення за діелектричною проникністю  $H = [\epsilon_3/(\epsilon_1 \cdot \epsilon_2)]^{1/2}$  між ЧШ, ЧП і дисперсним середовищем, що характеризуються відповідними статичними діелектричними проникностями  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_3$  [4, 13, 15, 31, 36–38, 40].

## РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

В результаті досліджень механізму утворення ЧШ і ЧП під час полірування міді й алюмінію за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків метаборату міді з дисперсним середовищем DM1 (гас) або DM2 (вода) встановлено наступне [1–4, 41–44].

Під час полірування міді у вуглеводневому дисперсному середовищі (DM1) ЧШ і ЧП утворюються в результаті FRET [1, 3, 4, 45–49] між кластерами на поверхні частинок метаборату міді ( $\text{CuB}_2\text{O}_4$ ) і кластерами на оброблюваній поверхні у вигляді квантових точок  $\text{Cu}_2\text{O-QDs}$  [50–53], яке відбувається під час квантових переходів між енергетичними рівнями, що характеризуються частотами:  $\nu_{2m} = 631,0 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{1m} = 622,7 \text{ см}^{-1}$  і  $\nu_{1p} = 645,6 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{2p} = 635,1 \text{ см}^{-1}$ . У разі використання дисперсної системи з водяним середовищем (DM2) FRET [4, 47, 48] між кластерами на поверхні частинок  $\text{CuB}_2\text{O}_4$  і кластерами на оброблюваній поверхні у вигляді квантових точок  $\text{CuO-QDs}$  [47, 50, 54, 55] відбувається під час квантових переходів між енергетичними рівнями, що характеризуються частотами:  $\nu_{2m} = 635,1 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{1m} = 622,7 \text{ см}^{-1}$  і  $\nu_{1p} = 645,6 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{2p} = 635,1 \text{ см}^{-1}$ .

Під час полірування алюмінію в дисперсному середовищі DM1 ЧШ і ЧП утворюються в результаті FRET [2, 4, 56–59] між кластерами на поверхні частинок  $\text{CuB}_2\text{O}_4$  і кластерами на оброблюваній поверхні у вигляді квантових точок  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-QDs}$  [60–62], яке відбувається під час квантових переходів між енергетичними рівнями, що характеризуються частотами:  $\nu_{2m} = 849,1 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{1m} = 837,0 \text{ см}^{-1}$  і  $\nu_{1p} = 570,0 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{2p} = 561,0 \text{ см}^{-1}$ . У разі використання дисперсної системи з водяним середовищем (DM2) FRET [4, 63–67] між кластерами на поверхні частинок  $\text{CuB}_2\text{O}_4$  і кластерами оброблюваної поверхні у вигляді нанокристалів  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [68–70] відбувається під час квантових переходів між енергетичними рівнями на частотах:  $\nu_{2m} = 777,1 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{1m} = 746,0 \text{ см}^{-1}$  і  $\nu_{1p} = 746,0 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{2p} = 732,6 \text{ см}^{-1}$ .

На основі наведених результатів було визначено найбільш ймовірні розміри ЧШ ( $a_m$ ) і ЧП ( $a_p$ ), їхні об'єми  $v_m$  і  $v_p$  та концентрації  $N_m$  і  $N_p$ , а також добротність мікрорезонатора  $Q_m$  і  $Q_p$ , час життя кластерів на оброблюваній поверхні і на поверхні частинки полірувального порошку в збудженому стані  $\tau_m$  і  $\tau_p$ , коефіцієнти об'ємного зносу  $\eta_m$  і  $\eta_p$ , необхідні для розрахунку швидкості знімання оброблюваного матеріалу  $V_m$  й інтенсивності зношування полірувального порошку  $V_p$  у відповідності до формули (1) (табл. 1, 2). Результати розрахунку сталих Ліфшиця ( $AL_m$ ,  $AL_p$ ), які визначають потенціали взаємодії між ЧШ і ЧП, кінетичної енергії наночастинок ( $E_m$ ,  $E_p$ ) і швидкості їхнього руху в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира ( $v_m$ ,  $v_p$ ), необхідні для визначення диференціального ( $I_{mp}$ ,  $I_{pm}$ ) і повного ( $\sigma_m$ ,  $\sigma_p$ ) перерізів розсіювання наночастинок (формули (2), (3)), наведено в табл. 1, 2.

Для визначення відстані між поверхнями деталі і притира  $l_0$ , яка залежить від режимів полірування (номінального тиску притискання оброблюваної деталі до притиру і відносної швидкості їхнього переміщення) і реологічних властивостей дисперсної системи (коефіцієнта поверхневого натягу  $\sigma_n$ , динамічної в'язкості дисперсної системи  $\eta$  та кутів змочування дисперсною системою поверхні оброблюваної деталі  $\theta_1$  і притира  $\theta_2$ ) [10], було використано дані експериментів, на основі яких розраховано відповідні значення  $l_0$  (табл. 3).

Визначення відстані  $r_0$  граничного зближення наночастинок здійснювали за умови, що потенціали взаємодії між ЧШ і ЧП  $U_m(r)$  і  $U_p(r)$  (формули (4),

$$(5)), \text{ які залежать від функції } F(r, a_m, a_p) = \left[ \frac{f(a_m, a_p)}{r} + 2 \ln \left( \frac{f(a_m, a_p)}{r} \right) \right],$$

дорівнюють 0 у разі  $r = r_0$ . З наведених на рис. 1 залежностей  $F(r, a_m, a_p) = f(r)$  випливає, що відстань граничного зближення наночастинок  $r_0$  складає 6,0, 5,0, 7,0 і 4,5 нм для взаємодії між ЧШ і ЧП в системах Cu-DM1, Cu-DM2, Al-DM1, Al-DM2 відповідно.

**Таблиця 1. Характеристики наночастинок шламу і параметри їхньої взаємодії з наночастинами зносу полірувального порошку**

| Характеристики ЧШ<br>і параметри їхньої взаємодії з ЧП                | Мідь                 |           | Алюміній   |             |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------|------------|-------------|
|                                                                       | Дисперсне середовище |           |            |             |
|                                                                       | DM1                  | DM2       | DM1        | DM2         |
| Розмір ЧШ $a_m$ , нм                                                  | 6,5                  | 4,6       | 9,3        | 5,0         |
| Об'єм ЧШ $v_m$ , нм <sup>3</sup>                                      | 143,0                | 103,7     | 427,0      | 130,0       |
| Концентрація $N_m$ , 10 <sup>14</sup> м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> | 0,25                 | 0,62      | 0,40       | 2,00        |
| Спектральне розділення $\delta v_m$ , см <sup>-1</sup>                | 8,3                  | 12,4      | 12,1       | 31,1        |
| Стала Ліфшиця $AL_m$ , меВ                                            | 0,28                 | 0,96      | 0,46       | 3,09        |
| Енергія ЧШ $E_m$ , еВ                                                 | 1,3                  | 54,9      | 1,8        | 12,7        |
| Швидкість ЧШ $v_1$ , м/с                                              | 22,3                 | 163,8     | 18,4       | 113,7       |
| $\tau_m$ , нс                                                         | 957                  | 338       | 723        | 92          |
| $Q_m$                                                                 | 75,0                 | 50,2      | 69,2       | 24,0        |
| $\eta_m$ , 10 <sup>-12</sup> м <sup>2</sup> /с                        | 0,79                 | 0,67      | 1,87       | 0,67        |
| Швидкість знімання матеріалу                                          |                      |           |            |             |
| $V_m$ , 10 <sup>-13</sup> м <sup>3</sup> /с                           | 19,6                 | 3,9       | 43,3       | 0,70        |
| експериментальні дані: 10 <sup>-13</sup> м <sup>3</sup> /с (мг/хв)    | 20,5 (1,1)           | 3,7 (0,2) | 42,6 (0,7) | 0,62 (0,01) |
| Диференціальний переріз розсіювання                                   |                      |           |            |             |
| ЧШ на ЧП $I_{mp}$ , Гб·ср <sup>-1</sup>                               | 70,7                 | 20,7      | 102,0      | 2,3         |
| Повний переріз розсіювання ЧШ на ЧП                                   |                      |           |            |             |
| $\sigma_m$ , Мб                                                       | 1,78                 | 0,09      | 1,28       | 0,05        |

Для дослідження закономірностей утворення нальоту з наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку на поверхні притира і визначення характеристик розсіювання ЧШ на ЧП і ЧП на ЧШ під час полірування було використано методику [35–38, 71, 72], згідно з якою за виконання наближення Борна, коли кінетична енергія частинки, яка налітає, значно більша від середньої енергії взаємодії між частинками, тобто за умов:  $E_m/U_m(r) \sim 10^4\text{--}10^7 \gg 1$  і  $E_p/U_p(r) \sim 10^5\text{--}10^8 \gg 1$ , а порядок азимутальних квантових чисел  $l_m \approx k_m r_0 \approx (1,1\text{--}5,1) \cdot 10^5 \gg 1$  і  $l_p \approx k_p r_0 \approx (1,1\text{--}2,5) \cdot 10^7 \gg 1$ , розраховано значення диференціальних перерізів розсіювання  $I_{mp}(\theta = 0)$  і  $I_{pm}(\theta = \pi)$ , а також повних перерізів розсіювання наночастинок  $\sigma_m$  і  $\sigma_p$  у відповідності до формул (див. табл. 1, 2);

$$\sigma_m = \frac{4\pi}{k_m^2} \sum_l (2l_m + 1) \sin^2 \delta_l = \frac{4\pi}{k_m} \text{Im}[f_m(\theta = 0)];$$

$$\sigma_p = \frac{4\pi}{k_p^2} \sum_l (2l_p + 1) \sin^2 \delta_l = \frac{4\pi}{k_p} \text{Im}[f_p(\theta = \pi)].$$

Таблиця 2. Характеристики наночастинок зносу полірувального порошку і параметри їхньої взаємодії з наночастинками шламу

| Характеристики ЧП і параметри їхньої взаємодії з ЧШ                                  | Мідь                 |      | Алюміній |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------|----------|------|
|                                                                                      | Дисперсне середовище |      |          |      |
|                                                                                      | DM1                  | DM2  | DM1      | DM2  |
| Розмір ЧП $a_p$ , нм                                                                 | 12,2                 | 12,2 | 10,0     | 9,0  |
| Об'єм ЧП $v_p$ , нм <sup>3</sup>                                                     | 1941                 | 1941 | 1057     | 760  |
| Концентрація $N_p$ , 10 <sup>14</sup> м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>                | 0,23                 | 0,53 | 0,22     | 0,86 |
| Спектральне розділення $\delta v_p$ , см <sup>-1</sup>                               | 10,5                 | 10,5 | 9,0      | 13,4 |
| Стала Ліфшиця $AL_p$ , меВ                                                           | 0,36                 | 0,81 | 0,34     | 1,33 |
| Енергія ЧП $E_p$ , еВ                                                                | 78,1                 | 78,1 | 72,8     | 74,3 |
| Швидкість ЧП $v_2$ , м/с                                                             | 56,9                 | 56,9 | 74,4     | 88,7 |
| $\tau_p$ , нс                                                                        | 222                  | 222  | 251      | 192  |
| $Q_p$                                                                                | 60,5                 | 60,5 | 62,3     | 54,7 |
| $\eta_p$ , 10 <sup>-12</sup> м <sup>2</sup> /с                                       | 2,46                 | 2,11 | 2,32     | 1,49 |
| Інтенсивність зношування метаборату міді $V_p$ , 10 <sup>-13</sup> м <sup>3</sup> /с | 11,4                 | 9,7  | 16,8     | 7,0  |
| Диференціальний переріз розсіювання ЧП на ЧШ $I_{pm}$ , Мб·ср <sup>-1</sup>          | 4,8                  | 1,6  | 2,1      | 0,7  |
| Повний переріз розсіювання ЧП на ЧШ $\sigma_p$ , Мб                                  | 0,53                 | 0,37 | 0,46     | 0,40 |

Таблиця 3. Реологічні і діелектричні характеристики полірувальних дисперсних систем

| Параметр            | Дисперсне середовище |      |      |      |
|---------------------|----------------------|------|------|------|
|                     | DM1                  | DM2  | DM1  | DM2  |
| $\eta$ , мПа·с      | 3,60                 | 1,47 | 3,60 | 1,47 |
| $\sigma_{ш}$ , мН/м | 24                   | 46   | 24   | 46   |
| $\theta_1$ , град   | 3                    | 58   | 3    | 56   |
| $\theta_2$ , град   | 0                    | 45   | 0    | 45   |
| $l_0$ , мкм         | 1,18                 | 1,40 | 1,17 | 1,40 |
| $\epsilon_1$        | 7,5                  | 13,0 | 9,3  | 3,0  |
| $Eds$               | 0,27                 | 0,62 | 0,31 | 0,80 |
| $H$                 | 0,3                  | 9,1  | 0,3  | 19,0 |

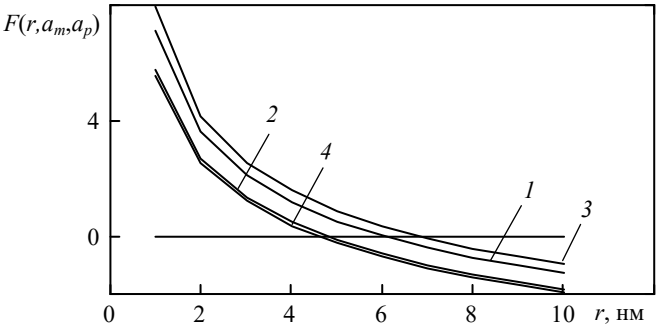


Рис. 1. Залежності потенціалів взаємодії між ЧШ і ЧП від відстані  $r$  між ними: 1 – Cu-DM1; 2 – Cu-DM2; 3 – Al-DM1; 4 – Al-DM2.

В результаті аналізу закономірностей розсіювання ЧШ і ЧП під час полірування міді й алюмінію за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків метаборату міді з дисперсним середовищем DM1 або DM2 з урахуванням відстаней між поверхнями деталі і притира  $l_0$ , граничного зближення наночастинок  $r_0$  і порядку азимутальних квантових чисел  $l_m$  і  $l_p$ , характерних для кожного з розглянутих варіантів, показано наступне.

Під час дослідження кутових залежностей диференціального перерізу розсіювання ЧШ на ЧП ( $I_{mp}$ ) і ЧП на ЧШ ( $I_{pm}$ ) показано, що у разі зміни в межах  $I_{mp} \in [2,3; 102,0] \text{ Гб} \cdot \text{ср}^{-1}$  і  $I_{pm} \in [0,7; 4,8] \text{ Мб} \cdot \text{ср}^{-1}$  ( $1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2$ ), вони досягають максимальних значень за кутів розсіювання  $\theta = 0$  (розсіювання вперед) і  $\theta = \pi$  (розсіювання назад), перевершуючи їхні значення для інших кутів в  $10^5$ – $10^7$  разів, а фазовий зсув хвильових функцій наночастинок  $|\eta_l| = 1$ , що є характерним для чисто пружного розсіювання, коли абсолютні значення імпульсу і енергії частинки не змінюються, а змінюється лише напрямок руху [34, 36, 37]. Це означає, що квантові наночастинок, які утворюються і рухаються в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира під час полірування, розсіюються так, що робочої поверхні притира можуть досягти лише ЧШ, розсіяні вперед, і ЧП, розсіяні назад.

Встановлено також, що значення диференціального перерізу розсіювання наночастинок  $I_{mp}(0)$  і  $I_{pm}(\pi)$  зменшуються за підвищення сталих Ліфшиця ( $AL_m, AL_p$ ), їхньої швидкості руху ( $v_m, v_p$ ) і концентрації ( $N_m, N_p$ ) (див. табл. 1, 2), а також збільшення функції діелектричних проникностей  $E_{ds}$  і розділення між ЧШ, ЧП і дисперсним середовищем за діелектричною проникністю  $H$  (рис. 2, табл. 3).

В результаті порівняння значень диференціального перерізу розсіювання ЧП  $I_{pm}(\pi)$  і ЧШ  $I_{mp}(0)$ , що рухаються в напрямку поверхні притира, показано, що максимальне значення їхнього відношення, яке дорівнює  $I_{pm}(\pi)/I_{mp}(0) \approx 300 \gg 1$ , свідчить про найбільш вірогідне утворення нальоту з наночастинок зносу полірувального порошку на поверхні притира у разі полірування алюмінію за допомогою дисперсної системи, в якій в якості дисперсного середовища використовували воду (DM2).

Розрахунки повного перерізу розсіювання ЧШ на ЧП ( $\sigma_m$ ) і ЧП на ЧШ ( $\sigma_p$ ) показали, що вони, змінюючись в межах  $\sigma_m \in [0,05; 1,78] \text{ Мб}$  і  $\sigma_p \in [0,37; 0,53] \text{ Мб}$  (див. табл. 1, 2), однаково залежать від параметрів процесу полірування і характеристик відповідних наночастинок, а саме: вони збільшуються за підвищення найбільш ймовірних розмірів  $a_m$  і  $a_p$ , добротності мікрорезонатора  $Q_m$  і  $Q_p$ , а також швидкості знімання оброблюваного матеріалу  $V_m$  і інтенсивності зношування полірувального порошку  $V_p$ . У разі збільшення концентрації наночастинок  $N_m$  і  $N_p$ , сталих Ліфшиця  $AL_m, AL_p$ , кінетичної енергії наночастинок  $E_m, E_p$  і швидкості їхнього руху  $v_m, v_p$ , а також функції діелектричних проникностей  $E_{ds}$  і розділення за діелектричною проникністю  $H$  між ЧШ, ЧП і дисперсним середовищем, повні перерізи розсіювання наночастинок  $\sigma_m$  і  $\sigma_p$  зменшуються (див. табл. 1–3).

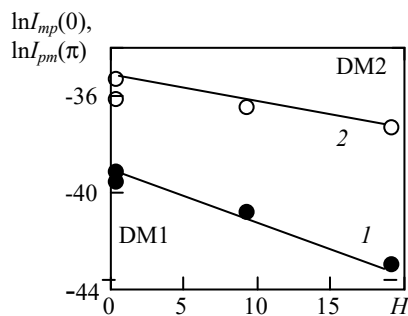


Рис. 2. Залежності диференціальних перерізів розсіювання  $I_{mp}(\vartheta = 0)$  (1) і  $I_{pm}(\vartheta = \pi)$  (2) від розділення між ЧШ, ЧП і дисперсним середовищем за діелектричною проникністю.

Варто зауважити, що для визначення функцій діелектричних проникностей  $Eds$  і розділення  $H$  між ЧШ, ЧП і дисперсним середовищем, враховано, що статичні діелектричні проникності  $\epsilon_1$  наночастинок шламу, які мають вигляд квантових точок  $Cu_2O$ -QDs,  $CuO$ -QDs,  $Al_2O_3$ -QDs чи нанокристалів  $Al(OH)_3$ -NCr, принципово відрізняються від діелектричних характеристик металу, що полірується, і складають 7,5, 13,0, 9,3 і 3,0 відповідно ([4], див. табл. 3), а статична діелектрична проникність  $\epsilon_2$  наночастинок зносу полірувального порошку не відрізняється від діелектричної сталої об'ємного матеріалу  $CuB_2O_4$ .

Крім того, показано, що відношення повних перерізів розсіювання наночастинок  $\sigma_m/\sigma_p$  суттєво залежить від розділення між ЧШ, ЧП і дисперсним середовищем за діелектричною проникністю  $H$  (рис. 3, а) і відношення швидкості знімання оброблюваного матеріалу до інтенсивності зношування полірувального порошку  $V_m/V_p$  (рис. 3, б).

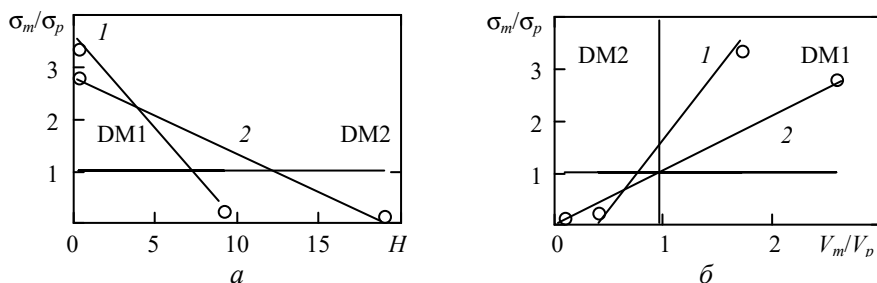


Рис. 3. Залежності відношення повних перерізів розсіювання наночастинок  $\sigma_m/\sigma_p$  від  $H$  (а) і  $V_m/V_p$  (б): 1 – Cu; 2 – Al.

Аналіз цих залежностей показав, що під час полірування міді й алюмінію за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків метаборату міді з дисперсним середовищем з гасу (DM1), коли відбувається ефективне знімання оброблюваного матеріалу ( $V_m/V_p > 1$ ), значення повного перерізу розсіювання ЧШ на ЧП  $\sigma_m$  значно перевищує значення повного перерізу розсіювання ЧП на ЧШ  $\sigma_p$ , характерне для полірування в дисперсному середовищі з води (DM2), коли відбувається ефективне зношування полірувального порошку ( $V_m/V_p < 1$ ):  $\sigma_m/\sigma_p = 14$  – для міді,  $\sigma_m/\sigma_p = 23$  – для алюмінію.

Максимальне значення відношення повних перерізів розсіювання  $\sigma_m/\sigma_p = 3,3$ , характерне для взаємодії між ЧШ і ЧП в системі Cu-DM1, коли  $H = 0,3$ , і мінімальне значення  $\sigma_m/\sigma_p = 0,1$ , характерне для їхньої взаємодії в системі Al-DM2, коли  $H = 19,0$ , свідчать про більш вірогідне утворення нальоту на робочій поверхні притира з ЧШ у першому випадку і з ЧП у другому. Це підтверджено наведеними на рис. 4 мікроскопічними зображеннями поверхні притира.

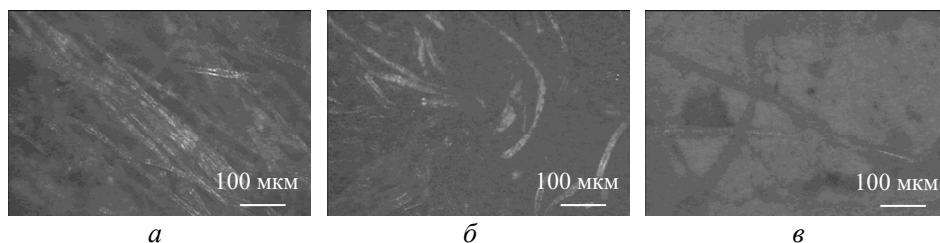


Рис. 4. Наліт на поверхні притира: а – вихідна поверхня, б – наліт з наночастинок шламу міді, утворених в середовищі гасу (DM1), в – наліт з наночастинок метаборату міді, утворених у водяному середовищі (DM2)).

Отже, показано, що під час полірування міді й алюмінію за допомогою дисперсних систем, які складались з мікро- і нанопорошків метаборату міді й дисперсного середовища (гасу або води), фактором, який визначає не тільки ефективність знімання оброблюваного матеріалу та інтенсивність зношування полірувального порошку, а і суттєво впливає на закономірності розсіювання ЧШ і ЧП та утворення нальоту з цих наночастинок на поверхні притира, є розділення між ЧШ, ЧП і дисперсним середовищем за діелектричною проникністю  $H$ .

## ВИСНОВКИ

В результаті дослідження закономірностей розсіювання наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку під час полірування міді і алюмінію за допомогою дисперсних систем з мікро- та нанопорошків метаборату міді з дисперсним середовищем у вигляді гасу або води, а також утворення нальоту з цих наночастинок на робочій поверхні притира, встановлено, що поверхні притира досягають лише частинки шламу, розсіяні вперед, і частинки зносу полірувального порошку, розсіяні назад, диференціальні перерізи яких, змінюючись в межах  $[2,3-102,0]$  Гб·ср<sup>-1</sup> і  $[0,7-4,8]$  Мб·ср<sup>-1</sup>, суттєво зменшуються за збільшення розділення між наночастинами шламу, наночастинами зносу полірувального порошку і дисперсним середовищем за діелектричною проникністю.

Показано, що повні перерізи розсіювання наночастинок  $\sigma_m$  і  $\sigma_p$ , що змінюються у межах  $[0,05-1,78]$  і  $[0,37-0,53]$  Мб, також зменшуються у разі збільшення розділення між ЧШ, ЧП і дисперсним середовищем за діелектричною проникністю, а максимум  $\sigma_m/\sigma_p = 3,3$  і мінімум  $\sigma_m/\sigma_p = 0,1$ , які характерні для взаємодії наночастинок в системах мідь-гас і алюміній-вода, свідчать про більш вірогідне утворення нальоту на робочій поверхні притира з наночастинок шламу в першому разі й з наночастинок зносу полірувального порошку в другому.

Експериментально підтверджено, що під час полірування міді за допомогою мікро- та нанопорошків метаборату міді в дисперсному середовищі гасу на поверхні притира спостерігали наліт з частинок міді, а під час полірування алюмінію у водяному дисперсному середовищі – наліт з частинок метаборату міді.

## ФІНАНСУВАННЯ

Дану роботу не фінансували із зовнішніх джерел.

## КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори роботи заявляють, що не мають конфлікту інтересів.

Yu. D. Filatov<sup>1</sup>, A. Y. Boyarintsev<sup>2</sup>, V. I. Sidorko<sup>3</sup>, S. V. Kovalev<sup>1</sup>,  
V. A. Kovalev<sup>4</sup>, O. Y. Yurchyshyn<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Institute for Scintillation Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

<sup>3</sup>State Enterprise "Engineering and Production Center Alkon"

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>4</sup>National Technical University of Ukraine

"Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky", Kyiv, Ukraine

# Scattering of sludge nanoparticles and polishing powder wear nanoparticles during polishing of optical components made of copper and aluminum

As a result of studying the patterns of scattering of sludge nanoparticles and polishing powder wear nanoparticles during polishing of copper and aluminum using dispersed systems of copper metaborate micro- and nanopowders with a dispersed medium in the form of kerosene or water, as well as the formation of a deposit of these nanoparticles on the working surface of the lapping tool, it was found that only sludge particles scattered forward and polishing powder wear particles scattered backward reach the lapping tool, the differential cross sections of which, varying within the limits of  $[2.3\text{--}102.0]$   $\text{Gb}\cdot\text{sr}^{-1}$  and  $[0.7\text{--}4.8]$   $\text{Mb}\cdot\text{sr}^{-1}$ , significantly decrease with increasing separation between sludge nanoparticles, polishing powder wear nanoparticles and dispersed medium by dielectric permittivity. It is shown that the total scattering cross sections of nanoparticles  $\sigma_m$  and  $\sigma_p$ , varying within the limits of  $[0.05\text{--}1.78]$  Mb and  $[0.37\text{--}0.53]$  Mb, also decrease with increasing separation between sludge nanoparticles, polishing powder wear nanoparticles and dispersed medium in terms of dielectric permittivity, and the maximum  $\sigma_m/\sigma_p = 3.3$  and the minimum  $\sigma_m/\sigma_p = 0.1$ , which are characteristic of the interaction of nanoparticles in the “copper–kerosene” and “aluminum–water” systems, indicate a more probable formation of a deposit on the working surface of the lapping tool from sludge nanoparticles – in the first case and from nanoparticles of polishing powder wear – in the second. It has been experimentally confirmed that during the polishing of copper using micro- and nanopowders of copper metaborate in a dispersed medium of kerosene, a deposit of copper particles was observed on the surface of the lapping tool, and during the polishing of aluminum in a water dispersed medium, a deposit of copper metaborate particles was observed.

**Keywords:** polishing, copper, aluminum, copper metaborate, scattering of nanoparticles, deposit, separation by dielectric permittivity.

1. 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.
2. Filatov Yu.D., Prikhna T.O., Boyarintsev A.Yu., Sidorko V.I., Kovalev V.A. Mechanism of polishing aluminum optical components. *J Superhard Mater.* 2025. Vol. 47, no 5. P. 388–395.
3. Filatov Yu.D., Prikhna T.O., Boyarintsev A.Yu., 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.
4. Filatov Yu.D. Energy transfer during the polishing of metal optic parts with disperse systems of copper metaborate micro- and nanopowders. *J. Superhard Mater.* 2026. Vol. 48, no. 2. P. 142–152.
5. Філатов Ю.Д., Бояринцев А.Ю., Сідорко В.І., Ковальов С.В., Ветров А.Г. Спосіб полірування оптичних деталей. Пат. на корисну модель № 161049 Україна, МПК B24D 3/34. № u202500659. Заявл. 14.02.2025; Опубл. 05.11.2025, Бюл. № 45.
6. 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  $\text{CuB}_2\text{O}_4$ . *Phys. Rev. B.* 2013. Vol. 88, art. 094301.
7. Tomov V., Rafailov P.M., Yankova L. Raman spectroscopy investigation of the polar vibrational modes in  $\text{CuB}_2\text{O}_4$ . *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. Vol. 682, art. 012028.
8. Ursu D., Dabici A., Miclau M., Miclau N. Low-temperature hydrothermal synthesis of hierarchical flower-like  $\text{CuB}_2\text{O}_4$  superstructures. *Proc. Appl. Ceram.* 2020. Vol. 14, no. 2. P. 113–118.
9. Mero R.D., Lai C.-H., Du C.-H., Liu H.-L. Spectroscopic signature of spin–charge–lattice coupling in  $\text{CuB}_2\text{O}_4$ . *J. Phys. Chem. C.* 2021. Vol. 125, no. 7. P. 4322–4329.
10. 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.
11. 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.
12. Filatov Yu.D., Monteil G., Sidorko V.I., Filatov O.Y. Formation of a deposit on workpiece surface in polishing nonmetallic materials. Smart Sensors, Actuators, and MEMS VI. *Proc. SPIE.* 2013. Vol. 8763, art. 876336.

13. Filatov Yu.D. Interaction between debris particles and polishing powder wear particles in polishing optoelectronic components. *J. Superhard Mater.* 2018. Vol. 40, no. 4. P. 282–289.
14. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Filatov A.Yu., Yashuk V.P., Heisel W., Storchak M. Surface quality control in diamond abrasive finishing. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI. Proc. SPIE.* 2009. Vol. 7389, art. 73892O.
15. 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.
16. Wang Yu., Wang L.V. Forster resonance energy transfer photoacoustic microscopy. *J. Biomed. Opt.* 2012. Vol. 17, no. 8, art. 086007.
17. Cortes C.L., Jacob Z. Fundamental figures of merit for engineering Förster resonance energy transfer. *Opt. Express.* 2018. Vol. 26, no. 15. P. 19371–19387.
18. Jones G.A., Bradshaw D.S. Resonance energy transfer: from fundamental theory to receipt applications. *Front. Phys.* 2019. Vol. 7, no. 100. P. 1–19.
19. Singldinger A., Gramlich M., Gruber C., Lampe C., Urban A.S. Nonradiative energy transfer between thickness-controlled halide perovskite nanoplatelets. *ACS Energy Lett.* 2020. Vol. 5. P. 1380–1385.
20. Gordon F., Elcoroaristizabal S., Ryder A.G. Modelling Förster resonance energy transfer (FRET) using anisotropy resolved multi-dimensional emission spectroscopy (ARMES). *Biochim. Biophys. Acta – Gen. Subj.* 2021. Vol. 1865, no. 2, art. 129770.
21. 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.
22. 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.
23. Andrew P., Barnes W.L. Forster energy transfer in an optical microcavity. *Science.* 2000. Vol. 290, no. 5492. P. 785–788.
24. Du M., Martinez-Martinez L.A., Ribeiro R.F., Hu Z., Menon V., Yuen-Zhou J. Theory for polariton-assisted remote energy transfer. *Chem. Sci.* 2018. Vol. 9. P. 6659–6669.
25. Dovzhenko D., Lednev M., Mochalov K., Vaskan I., Rakovich Yu., Nabiev I. Polariton-assisted manipulation of energy relaxation pathways: donor–acceptor role reversal in a tuneable microcavity. *Chem. Sci.* 2021. Vol. 12. P. 12794–12805.
26. Nabiev I. Strong light-matter coupling for optical switching through the fluorescence and FRET control. *PhysBioSymp* 2019. *J. Phys.: Conf. Series.* 2021. Vol. 2058, no. 1, art. 012001.
27. Filatov Yu.D., Rogov V.V. A cluster model of mechanism of silica-containing material fatigue wear in polishing. *Sverkhtrverdye Materialy.* 1994. Part 1. no. 3. P. 40–43; Part 2. no. 4. P. 45–51.
28. 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.
29. Filatov Yu.D. Material removal rate in polishing polymethymethacrylate parts. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 3. P. 212–220.
30. Filatov Yu.D. Quantum mechanism of optical glass polishing. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 4. P. 303–313.
31. 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.
32. 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.
33. Eyring Henry, Lin S. H., Lin S. M. Basic Chemical Kinetics. John Wiley & Sons, 1980. 493 p.
34. ЮХНОВСЬКИЙ І.Р. Основи квантової механіки: Навч. посібник. Либідь, 2002. 392 с.
35. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Boyarintsev A.Y., Kovalev V.A., Yurchyshyn O.Y. Interaction of sludge particles and wear particles of polishing powder in the process of polishing of polymeric optical materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 3. P. 199–207.
36. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Boyarintsev A.Y., Kovalev V.A., Yurchyshyn O.Y. Scattering of sludge nanoparticles during the polishing of optical materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 5. P. 370–378.

37. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Boyarintsev A.Y., Kovalev V.A., Yurchyshyn O.Y. Scattering of polishing powder wear nanoparticles on sludge nanoparticles during the polishing of polymer optical materials *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 6. P. 451–459.
38. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Boyarintsev A.Yu., Kovalev V.A., Yurchyshyn O.Y. Deposition and localization of polishing powder wear nanoparticles on the processed surface of polymeric optical materials. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 1. P. 55–64.
39. 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.
40. 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.
41. Hazarika J., Patil C.S., Rajaraman P.V. Formulation of slurry for chemical mechanical polishing of Cu substrates. *Mater. Today: Proc.* 2020. Vol. 39, art. 545.
42. 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.
43. Zhoua J., Niua X., Yanga C., Huoa Z., Lua Y., Wanga Z., Cuia Y., Wang 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.
44. 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. Aspects.* 2023. Vol. 656, Part B, no. 5, art. 130500.
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. Neeli Ch., Sarika K.S., Manikanta B., Swapna S.N. Structural and optical properties of copper nanoparticles synthesized via wet chemical route. *Proc. Int. Conf. Physics of Materials and Nanotechnology ICPN 2019. AIP Conf. Proc.* 2020. Vol. 2244, art. 070020.
47. Mohamed E.A. Green synthesis of copper & copper oxide nanoparticles using the extract of seedless dates. *Heliyon.* 2020. Vol. 6, no. 1, art. e03123.
48. 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.
49. 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.
50. 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.
51. Tang D., Xu D., Luo Z., Ke J., Zhou Y., Li L., Sun J. Highly dispersion Cu<sub>2</sub>O QDs decorated Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> S-scheme heterojunction for enhanced photocatalytic water oxidation. *Nanomaterials.* 2022. Vol. 12. P. 2455–2465.
52. Karunarathna P.G.D.C.K., Samarakoon S.P.A.U.K., Fernando C.A.N. Explanation of the photocurrent generation of Cu<sub>2</sub>O quantum dots (QDs) sensitized p-CuSCN stable photoelectrochemical cells. *Mater. Res. Express.* 2018. Vol. 5, no. 1, art. 015005.
53. 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: Condens. Matter.* 2016. Vol. 500. P. 4–8.
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. *Int. J. Nanosci.* 2017. Vol. 16, nos. 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. Chem. C.* 2013. Vol. 1, no. 11. P. 2112–2120.
56. Nila A.S.S., Radha K.P. Synthesis and XRD, FTIR Studies of alumina nanoparticle using co-precipitation method. *IJRASET.* 2018. Vol. 6, no. III. P. 2493–2496.
57. 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, nos. 10–12. P. 595–603.
58. Gholizadeh Z., Aliannezhadi M., Ghominejad M., Tehrani F.S. High specific surface area  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles synthesized by facile and low-cost co-precipitation method. *Sci. Rep.* 2023. Vol. 13. P. 6131–6141.

59. Atrak K., Ramazani A., Fardood Taghavi 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.
60. Nemade K.R., Waghuley S.A. Low temperature synthesis of semiconducting  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> quantum dots. *Ceram. Int.* 2014. Vol. 40, no. 4. P. 6109–6113.
61. Telmer M.R., Hilario M.S., Hoff B.W., Lanagan M.T., Reeja-Jayan B. Anisotropy of W-band complex permittivity in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *J. Phys.: Condens. Matter.* 2019. Vol. 31, art. 225702.
62. Abbas I.A., Al-Mayalee K.H. Structural and optical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanostructures prepared by hot water treatment method. *Rev. Compos. Matér. Avanc. J. Compos. Adv. Mater.* 2024. Vol. 34, no. 4. P. 527–532.
63. Goudarzi M., Ghanbari D., Salavati-Niasari M., Ahmadi A. Synthesis and characterization of Al(OH)<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticles and Polymeric Nanocomposites. *J. Clust. Sci.* 2016. Vol. 27. P. 25–38.
64. Kolar T., Mušič B., Korošec R.C., Kokol V. Addition of Al(OH)<sub>3</sub> versus AlO(OH) nanoparticles on the optical, thermo-mechanical and heat/oxygen transmission properties of microfibrillated cellulose films. *Cellulose.* 2021. Vol. 28. P. 9441–9460.
65. 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 antiflame agents. *J. Mater. Res. Technol.* 2020. Vol. 9. P. 8937–8952.
66. 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.
67. Prabu S., Wang H.-W. Hydrogen generation from the reaction of Al and H<sub>2</sub>O using a synthesized Al(OH)<sub>3</sub> nanoparticle catalyst: the role of urea. *Catal. Sci. Technol.* 2021. Vol. 11, no. 13. P. 4636–4649.
68. Yu B., Tian Z., Xiong J., Xiang L. Synthesis of Al(OH)<sub>3</sub> nanostructures from Al(OH)<sub>3</sub> micro-agglomerates via dissolution-precipitation route. *J. Nanomater.* 2013. Vol. 2013, art. 718979.
69. Kim C., He T., Jiang P., Wei P., Huang X., Jin Z. Dielectric properties of  $\gamma$ -irradiated POE highly filled with aluminum hydroxide. *Polym. Eng. Sci.* 2006. Vol. 46, no. 12. P. 1721–1727.
70. Kim J., Im H., Kim J., Kim J. Thermal and electrical conductivity of Al(OH)<sub>3</sub> covered graphene oxide nanosheet/epoxy composites. *J. Mater. Sci.* 2011. Vol. 47, no. 3. P. 1418–1426.
71. Filatov Y.D., Filatov O.Y., Monteil G., Heisel U., Storchak M.G. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials. *Opt. Eng.* 2011. Vol. 50, no. 6, art. 063401.
72. Filatov O.Yu., Sidorko V.I. Localization of fragments of a deposit on the workpiece surface in polishing nonmetallic materials. *J. Superhard Mater.* 2011. Vol. 33, no. 5. P. 340–351.

Надійшла до редакції 07.08.25

Після доопрацювання 11.08.25

Прийнята до опублікування 12.08.25