

Дослідження процесів обробки

УДК 621.923.7

Ю. Д. Філатов

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

*filatov2045@gmail.com

Вплив геометричної форми поверхонь деталей оптотехніки з міді на формування їхнього поверхневого шару під час полірування

В результаті дослідження закономірностей розсіювання наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку під час полірування деталей оптотехніки з міді за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків метаборату міді і гасу, а також утворення нальоту з наночастинок оксиду міді на поверхні деталі, що полірують, встановлено, що залежність повного перерізу розсіювання наночастинок шламу від радіусу колових зон деталі характеризується максимальними значеннями, які спостерігали за радіусів 10, 15, 17,5 і 20 мм і які зумовлюють найбільшу ймовірність утворення нальоту на оброблюваній поверхні саме в цих колових зонах. Під час вивчення закономірностей впливу емерджентних властивостей квантових наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку на їхню колективну поведінку, самоорганізацію і збірку під час руху в оптичному резонаторі зі змінною довжиною, що утворений поверхнями оброблюваної деталі і притира, показано, що на оброблюваній поверхні мідної деталі утворюється наліт з наночастинок шламу, фрагменти якого дискретно розташовані в концентричних колах, радіуси яких співпадають зі значеннями, розрахованими за допомогою квантової теорії розсіювання наночастинок. Показано, що під час полірування деталей оптотехніки з міді за допомогою мікро- та нанопорошків метаборату міді в дисперсному середовищі гасу швидкість знімання оброблюваного матеріалу досягає значення $28,6 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$, що добре збігається з експериментально визначеною продуктивністю полірування, яка складає $(1,5 \pm 0,1) \text{ мг/хв}$, або $(7,3 \pm 0,4) \text{ мкм/год}$, або $(28 \pm 1) \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ за відхилення 5–6 %. Експериментально підтверджено, що наліт з наночастинок шламу, фрагменти якого складались з оксиду міді, дійсно спостерігали на полірованій поверхні деталі з міді на концентричних колах радіуса 10 і 15 мм, а також в коловій зоні радіусом [17–20] мм.

Ключові слова: полірування, мідь, метаборат міді, розсіювання наночастинок, емерджентні властивості наночастинок, наліт.

ВСТУП

Згідно з результатами сучасних досліджень для полірування прецизійних поверхонь деталей оптотехніки з міді 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]. Ефективність полірування оптичних деталей з міді залежить не тільки від швидкості знімання оброблюваного матеріалу, параметрів шорсткості обробленої поверхні та інтенсивності зношування полірувального порошку, яка зумовлена характеристиками наночастинок оброблюваного матеріалу (шламу) і наночастинок зносу частинки полірувального порошку, що утворюються в результаті ферстерівського резонансного перенесення енергії (FRET) [2, 3, 5–11] між рівнями енергії донорно-акцепторних пар у відкритому мікрорезонаторі, який утворено їхніми поверхнями [12–20]. Ефективність полірування залежить також від стану поверхні притира, який зі свого боку залежить від ймовірності утворення нальоту з наночастинок шламу і наночастинок зносу внаслідок їхнього розсіювання під час переміщення у відкритому резонаторі, утвореному двома паралельними поверхнями оброблюваного матеріалу і притира [4, 12, 21–28]. Однак, до теперішнього часу закономірності формування поверхневого шару оброблюваної поверхні мідної деталі, що полірують, завдяки утвореному на ній нальоту в залежності від її геометричної форми та режимів полірування, вивчено недостатньо. Саме тому дослідження закономірностей розсіювання наночастинок шламу під час полірування міді, а також вивчення закономірностей утворення нальоту з цих наночастинок і локалізації його фрагментів на полірованій поверхні деталі, є актуальною проблемою.

Метою даного дослідження було вивчення закономірностей розсіювання наночастинок шламу під час полірування деталей оптотехніки з міді за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків метаборату міді та утворення нальоту з цих наночастинок на оброблюваній поверхні.

КВАНТОВИЙ МЕХАНІЗМ УТВОРЕННЯ І РОЗСІЮВАННЯ НАНОЧАСТИНОК ШЛАМУ ПІД ЧАС ПОЛІРУВАННЯ

Полірування оптичних поверхонь загалом являє собою два процеси, що відбуваються одночасно. Перший процес відбувається у проміжку між поверхнею частинки полірувального порошку та оброблюваною поверхнею, який є відкритим мікрорезонатором, де утворюються і видаляються з відповідних поверхонь квантові частинки – наночастинки шламу і наночастинки зносу полірувального порошку [1–3, 12, 20]. Другий процес характеризується тим, що ці наночастинки, що взаємодіють між собою, рухаються і розсіюються всередині відкритого резонатора, утвореного двома паралельними поверхнями оброблюваного матеріалу і притира [4, 12, 17, 25–28].

Під час полірування міді за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків метаборату міді і гасу наночастинки шламу (квантові точки $\text{Cu}_2\text{O-QDs}$) і наночастинки зносу полірувального порошку (нанокристали $\text{CuB}_2\text{O}_4\text{-NCr}$) видаляються з оброблюваної поверхні та з поверхні частинки полірувального порошку і рухаються в дисперсному середовищі між поверхнями оброблюваного матеріалу і притира як хвилі. Їхні властивості визначаються квантово-механічними ефектами на макроскопічних масштабах довжини і демонструють відоме явище емерджентності, яке полягає у відмінності колективної поведінки ансамблів наночастинок від властивостей окремих наночастинок та об'ємних матеріалів, а також у виникненні нових фізико-

хімічних властивостей, які суттєво відрізняються від властивостей відповідної об'ємної фази і залежать від кількості та розміру наночастинок [29–33]. Емерджентні властивості проявляються також у можливості збірки наночастинок у компактні ієрархічні структури внаслідок взаємодії між ними, коли наночастинок знаходяться на близькій відстані одна від одної [34–37].

Утворення наночастинок шламу відбувається внаслідок резонансного перенесення енергії від полірувального порошку до оброблюваного матеріалу під час квантових переходів між енергетичними рівнями нанокристалів Cu_2O на поверхні частинок полірувального порошку і квантових точок $\text{Cu}_2\text{O-QDs}$ на оброблюваній поверхні на характерних частотах: $\nu_{2m} = 631,0 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{1m} = 622,7 \text{ см}^{-1}$, та характеризується спектральним розділенням $\delta\nu_m = 8,3 \text{ см}^{-1}$ [2, 3]. Швидкість знімання оброблюваного матеріалу V_m визначається у відповідності до формули [1–4, 10, 11, 38, 39]

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

де η_m – коефіцієнт об'ємного зносу; L_t – довжина шляху тертя частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні; $Q_m = \nu_{1m}/(\nu_{2m} - \nu_{1m}) = 75$ – добротність мікрорезонатора; $\tau_m = 957 \text{ нс}$ – час життя квантових точок $\text{Cu}_2\text{O-QDs}$ на оброблюваній поверхні у збудженому стані; d – розмір частинок полірувального порошку; u – швидкість відносного переміщення деталі та притира.

Наночастинок шламу, що утворились поблизу оброблюваної поверхні і характеризуються довжиною хвилі $\lambda_m = 16,059 \text{ мкм}$ (частота $\omega_m = 1,174 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$), рухаються в резонаторі довжиною l_0 , яка залежить від геометричної форми поверхонь оброблюваної деталі і притира, і можуть бути спрямовувані на поверхню деталі, що полірується, в результаті взаємодії з наночастинок зносу полірувального порошку (довжина хвилі $\lambda_p = 15,746 \text{ мкм}$, частота $\omega_p = 1,197 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$) [4, 24–28, 40, 41].

Потенціал взаємодії між наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку визначали у відповідності до формули

$$U_m(r) = -\frac{AL_m}{16\pi} F(r, a_m, a_p), \quad (2)$$

$$\text{де } F(r, a_m, a_p) = \left[\frac{f(a_m, a_p)}{r} + 2 \ln \left(\frac{f(a_m, a_p)}{r} \right) \right], \quad f(a_m, a_p) = \frac{a_m a_p}{a_m + a_p}, \quad a_m = 6,5 \text{ нм}$$

і $a_p = 12,2 \text{ нм}$ – розміри наночастинок [4], $AL_m = 0,28 \text{ меВ}$ – стала Ліфшиця [3, 23, 24, 42–43].

Визначення повного ефективного перерізу розсіювання наночастинок шламу на наночастинок зносу полірувального порошку здійснювали у відповідності до формул [25–28, 40, 41]

$$\sigma_m = \frac{4\pi}{k^2} \sum_l (2l+1) \sin^2 \delta_l; \quad (3)$$

$$\delta_l = -\int_{r_0}^{l_0} \frac{\rho_m V U_m(r) dr}{\hbar^2 \sqrt{k^2 - \frac{(l+1/2)^2}{r^2}}}, \quad (4)$$

де l – азимутальне квантове число; $k = \rho_m V / \hbar$ – хвильове число; $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – стала Планка; $\rho_m = 6,0 \text{ г/см}^3$, $V = 143 \text{ нм}^3$ і $v = 22,0 \text{ м/с}$ – густина, об'єм і швидкість наночастинок шламу ($\text{Cu}_2\text{O-QDs}$) відповідно; r –

відстань між наночастинками; $r_0 = 6,0$ нм – відстань граничного зближення наночастинок [4].

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження закономірностей розсіювання наночастинок шламу на наночастинках зносу полірувального порошку, а також формування поверхневого шару поверхні мідної деталі, що полірували, завдяки утворенню нальоту в залежності від її геометричної форми та режимів полірування, здійснювали під час полірування плоскої поверхні деталі з міді діаметром 42 мм на шліфувально-полірувальному пристрої на базі верстату мод. РМ-3 POLERKA METALOGRAFICZNA за наступних умов: зусилля притискання притира до деталі – 10 Н, частота обертання деталі – 535 об/хв, відстань між центрами притира і деталі – 10 мм, середня температура в зоні їхнього контакту $T = 287$ К. Полірування здійснювали за допомогою дисперсної системи, в якій у якості дисперсної фази використовували мікро- та нанопорошки метаборату міді (CuB_2O_4 , густина – $3,86$ г/см³, статична діелектрична проникність 6,1, ширина забороненої зони 3,6 еВ, параметри кристалічної ґратки: 1,148 нм і 0,562 нм [1–4, 44–50]), а в якості дисперсного середовища використовували гас (діелектрична проникність $\epsilon_3 = 2,1$, коефіцієнт поверхневого натягу – 24 мН/м, коефіцієнт динамічної в'язкості – 3,6 мПа·с). Середній розмір частинок метаборату міді, який визначали за допомогою растрового електронного мікроскопу Zeiss-EVO50 із системою мікроаналізу Aztec, складав 409 нм [3, 19, 20, 42].

Розміри, форму і місце локалізації фрагментів нальоту з частинок шламу на оброблюваній поверхні досліджували за допомогою оптичного мікроскопа ЛОМО Метам Р-1, оснащеного камерою Vision STD-Res Series. Знімання оброблюваного матеріалу визначали ваговим методом за допомогою аналітичних терезів мод. ВЛР-200. Форму оброблюваної поверхні і робочої поверхні притира контролювали за допомогою вимірювальної скоби, оснащеної індикатором годинникового типу (1 мкм).

В якості полірувального інструмента використовували притир діаметром 60 мм з оптичного скла марки К8, робоча поверхня якого після тонкого алмазного шліфування за допомогою мікропорошків АСМ 20/14 мала шорсткість $Ra = 0,3$ мкм і точність геометричної форми $N = 3\text{--}4$ інтерференційних кільця (відхилення від площинності 0,88 мкм) [51–53].

Для полірування використовували зразок з міді, зі складною формою оброблюваної поверхні, яка являла собою “яму з зірваним краєм”, мала значне (до 20 мкм) відхилення від площинності і геометричний профіль, що описувався функцією $h = f(\rho)$, де $h = 2,4, 2,4, 0,6, 0,65, 1,65, 1,06, 19,3, 18, 2,2$ мкм – відносна товщина деталі, $\rho = 0, 2,5, 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20$ мм – радіус колової зони деталі (рис. 1).

Під час полірування оброблювана деталь і притир взаємодіяли на площі контакту – кільцевої зони, обмеженої радіусами $R_1 = 14$ мм і $R_2 = 19$ мм, що відповідали рівню половини максимальної відносної товщини деталі $h_{\text{max}} = 18,7$ мкм (див. рис. 1), яка складала 518,4 мм². Довжину шляху тертя L_t частинки полірувального порошку по оброб-

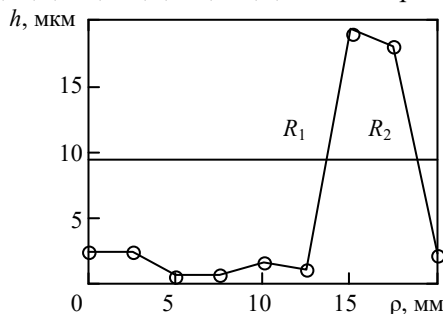


Рис. 1. Профіль оброблюваної поверхні деталі з міді.

люваній поверхні визначали як довжину дуги кола радіуса $R_p = 15$ мм, утвореної за перетину з колами радіуса R_1 і R_2 , у відповідності до формули

$$L_t = 2R_p \int_a^b (R_p^2 - x^2)^{-1/2} dx,$$

де $a = -1,8$ мм і $b = 6,45$ мм – абсциси точок перетину, і складала $L_t = 16,9$ мм. Швидкість відносного переміщення деталі та притира і час контакту частинок полірувального порошку з оброблюваною поверхнею складали $u = 0,5$ м/с і $t_c = 0,8$ мкс відповідно. Відстань між поверхнями деталі і притира, яка залежить від тиску притискання оброблюваної деталі до притиру (19,3 кПа), відносної швидкості їхнього переміщення, коефіцієнту поверхневого натягу, динамічної в'язкості дисперсної системи та кутів змочування дисперсною системою поверхні оброблюваної деталі $\theta_1 = 3^\circ$ і притира $\theta_2 = 2^\circ$ [4, 45, 54], складала $l_t = 2,3$ мкм.

РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Під час дослідження закономірностей зняття оброблюваного матеріалу у процесі полірування деталі з міді за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків метаборату міді і гасу у відповідності до наведеної методики встановлено, що в результаті утворення і видалення з оброблюваної поверхні наночастинок шламу (квантових точок $\text{Cu}_2\text{O-QDs}$), що характеризуються енергією 1,3 еВ, концентрацією $0,66 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ і коефіцієнтом об'ємного зносу $\eta_m = 1,89 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$, швидкість знімання оброблюваного матеріалу досягає розрахункового значення $V_m = 28,6 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ (формула (1)), яке практично збігається з експериментально визначеною за допомогою вагового метода продуктивністю полірування, що складала $(1,5 \pm 0,1) \text{ мг/хв}$, або $(7,3 \pm 0,4) \text{ мкм/год}$, або $(28,0 \pm 1,0) \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$, за відхилення 5–6 %.

Вивчення закономірностей розсіювання наночастинок шламу на наночастинках зносу полірувального порошку, потенціал взаємодії яких визначається формулою (2), що рухаються всередині відкритого резонатора, утвореного поверхнями оброблюваного матеріалу і притира, довжина якого змінюється в залежності від радіусу колових зон деталі у відповідності до формули $l_0(\rho) = l_t + h_{\max} - h(\rho)$ (рис. 2), показало, що наночастинки шламу, які утворились біля обробленої поверхні деталі з міді в колових зонах радіуса ρ , розсіюються на наночастинках зносу полірувального порошку. Повний переріз їхнього розсіювання, який було визначено у відповідності до формул (3) і (4) і має середнє значення $11,6 \text{ Мб}$ ($1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2$), що набагато перевищує значення повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу ($0,5 \text{ Мб}$), визначене за аналогічними формулами. Залежність повного перерізу розсіювання наночастинок шламу на наночастинках зносу полірувального порошку від радіусу ρ колових зон деталі, що наведена на рис. 3, характеризується максимальними значеннями, які спостерігали в колових зонах радіуса 10, 15, 17,5 і 20, мм і які зумовлюють найбільшу ймовірність утворення нальоту з наночастинок шламу на оброблюваній поверхні саме в цих колових зонах.

Аналіз стану полірованої поверхні деталі з міді діаметром 42 мм дозволив виявити наявність нальоту з наночастинок шламу, що складались з оксиду міді Cu_2O (коричневого кольору), який розташувався на концентричних колах радіусом 10 і 15 мм, а також в коловій зоні радіуса $\rho = [17\text{--}20] \text{ мм}$ (рис. 4), що співпадає з положеннями максимумів залежності повного перерізу розсіювання наночастинок шламу на наночастинках зносу полірувального порошку від радіусу колових, наведеної на рис. 3.

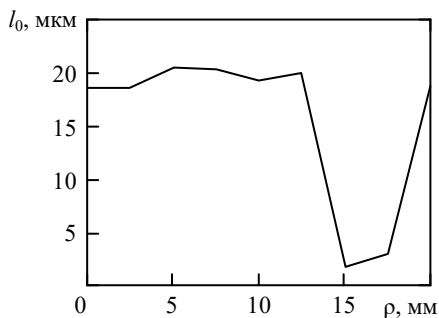


Рис. 2. Залежність довжини резонатора від радіусу колових зон деталі.

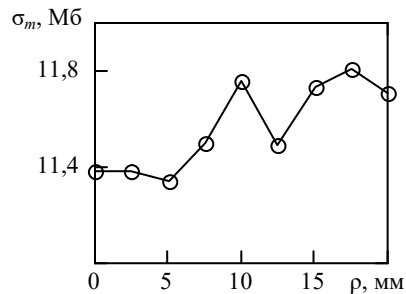


Рис. 3. Залежність повного перерізу розсіювання наночастинок шламу σ_m від радіусу колових зон деталі.

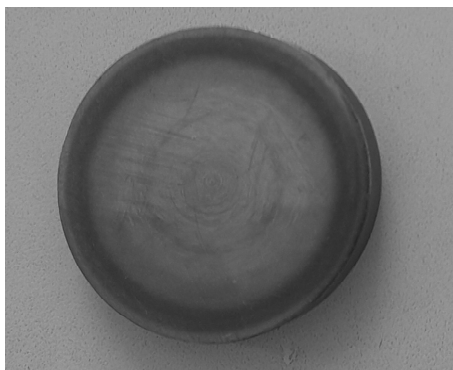


Рис. 4. Розташування нальоту з наночастинок шламу Cu_2O в колових зонах на оброблюваній поверхні деталі з міді.

Колективна поведінка і самоорганізація наночастинок, їхня збірка в компактні структури та дискретне розташування фрагментів нальоту з наночастинок шламу (Cu_2O) на обробленій поверхні деталі з міді під час полірування за допомогою дисперсної системи, що складалась з дисперсної фази – мікро- і нанопорошків метаборату міді та дисперсного середовища – гасу, можуть бути пояснені емерджентними властивостями квантових наночастинок [30, 32, 34] і переважанням хвильових властивостей наночастинок над корпускулярними [55].

Потоки наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку являють собою хвилі, які характеризуються близькими за значеннями частотами ω_m і ω_p і хвильовими числами $k_m = 2\pi/\lambda_m$ і $k_p = 2\pi/\lambda_p$. Під час розповсюдження в оптичному резонаторі, утвореному поверхнями оброблюваної деталі й притира, ці хвилі рухаються в напрямку поверхні, що полірується, і накладаються одна на одну. Результуюча хвиля характеризується хвильовою функцією “з биттям” у точках, в яких відбувається деструктивна інтерференція і хвилі взаємно знищуються, а її вигляд описується нормованою функцією від часу t і координати z (в напрямку вздовж осі резонатора від поверхні притира до оброблюваної поверхні), що має вигляд

$$\psi(z, t) = \cos[\Delta kz - \Delta\omega t] \cdot \sin[\omega_0 t - k_0 z],$$

де $\omega_0 = (\omega_m + \omega_p)/2 = 1,186 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$; $\Delta\omega = (\omega_p - \omega_m)/2 = 1,15 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$; $k_0 = (k_m + k_p)/2 = 3,95 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$; $\Delta k = (k_p - k_m)/2 = 3,89 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$.

За умови, що $\Delta\omega/\omega_0 = 9,7 \cdot 10^{-3} \ll 1$ і $\Delta k/k_0 = 9,84 \cdot 10^{-3} \ll 1$, хвильова функція $\psi(z,t)$, що наведена на рис. 5, характеризує амплітудно-модульовану хвилю у вигляді хвильового пакету, що рухається вздовж координати z , з несучою частотою ω_0 і довжиною хвилі $\lambda_0 = 2\pi/k_0 = 15,9$ мкм.

Під час розповсюдження хвиль в резонаторі, оптична довжина якого $L_{\text{опт}} = l_0 n$ ($n = (\epsilon_3)^{1/2}$ – показник заломлення) суттєво залежить від радіусу ρ колових зон оброблюваної деталі (див. рис. 2), за виконання умови $L_{\text{опт}} \ll \lambda_0$ хвилі наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку рухаються у протифазі, відбувається їхня деструктивна інтерференція, що призводить до мінімуму відбиття і максимуму поглинання частинок шламу поверхнею, що полірують. За умови $L_{\text{опт}} \approx \lambda_0$, інтерференційний мінімум досягали у разі, коли оптична довжина резонатора дорівнює напівцілому числу півхвиль $L_{\text{опт}} = \lambda_0/2 \cdot (m + 1/2)$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) [28].

Виконання цих умов оцінювали за розстроюванням резонатора, що визначали за формулою $\delta L = |L_{\text{опт}} - (m + 1/2)\lambda_0/2|$ і суттєво залежало від радіусу колових зон деталі, що полірували (рис. 6). Найменші значення розстроювання резонатора, які не перевищують 1,5 мкм, складають відповідно: $\delta L = 0,2$ мкм для $m = 3$, $\rho = 10$ мм; $\delta L = 0,4$ мкм для $m = 0$, $\rho = 17,5$ мм; $\delta L = 0,6$ мкм для $m = 3$, $\rho = 20$ мм; $\delta L = 1,5$ мкм для $m = 0$, $\rho = 15$ мм.

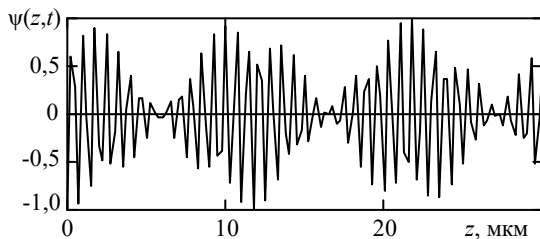


Рис. 5. Залежність хвильової функції $\psi(z,t)$ від координати z .

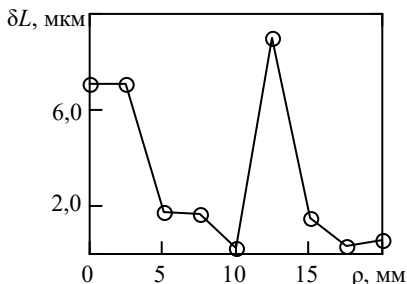


Рис. 6. Залежність розстроювання резонатора δL від радіусу колових зон деталі.

Це означає, що під час полірування міді полірувальною дисперсною системою з метаборату міді, внаслідок взаємодії наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку в оптичному резонаторі, утвореному поверхнями оброблюваної деталі і притира, відбувається їхня самоорганізація, збірка і утворення нальоту, фрагменти якого дискретно розташовуються на оброблюваній поверхні в концентричних колах, радіус яких складав: 10, 15, 17,5 і 20 мм, що добре узгоджується з даними експерименту (див. рис. 4).

Отже, вивчення закономірностей розсіювання наночастинок шламу на наночастинках зносу полірувального порошку, а також дослідження впливу емерджентних властивостей квантових наночастинок на утворення нальоту з

цих наночастинок та їхню локалізацію на оброблюваній поверхні, показало, що на полірованій поверхні деталі з міді утворюється наліт з наночастинок шламу, фрагменти якого склались з оксиду міді та були дискретно розташовувані на концентричних колах радіусом 10 і 15 мм, а також в колівій зоні радіусом [17–20] мм.

ВИСНОВКИ

В результаті дослідження закономірностей розсіювання наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку під час полірування міді за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків метаборату міді з дисперсним середовищем у вигляді гасу, а також утворення нальоту з наночастинок оксиду міді на поверхні деталі, яку полірують, встановлено, що залежність повного перерізу розсіювання наночастинок шламу від радіусу колових зон деталі характеризується максимальними значеннями, які спостерігають за радіусів 10, 15, 17,5 і 20 мм і зумовлюють найбільшу ймовірність утворення нальоту на оброблюваній поверхні саме в цих колових зонах.

Під час вивчення закономірностей впливу емерджентних властивостей квантових наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку за умови переважання їхніх хвильових властивостей над корпускулярними на їхню колективну поведінку, самоорганізацію і збірку під час руху в оптичному резонаторі, утвореному поверхнями оброблюваної деталі і притира, зі змінною довжиною, показано, що на оброблюваній поверхні мідної деталі утворюється наліт з наночастинок шламу (Cu_2O), фрагменти якого дискретно розташовуються в концентричних колах, радіуси яких співпадають зі значеннями, розрахованими за допомогою квантової теорії розсіювання наночастинок.

Показано, що під час полірування деталей оптотехніки з міді за допомогою мікро- та нанопорошків метаборату міді в дисперсному середовищі гасу швидкість знімання оброблюваного матеріалу досягає значення $28,6 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$, яке добре збігається з експериментально визначеною продуктивністю полірування, що складала $(1,5 \pm 0,1) \text{ мг/хв}$, або $(7,3 \pm 0,4) \text{ мкм/год}$, або $(28,0 \pm 1,0) \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ за відхилення 5–6 %. Експериментально підтверджено, що наліт з наночастинок шламу, фрагменти якого склались з оксиду міді, дійсно утворювався на полірованій поверхні деталі з міді і розташовувався на концентричних колах радіусом 10 і 15 мм, а також в колівій зоні радіусом [17–20] мм.

ФІНАНСУВАННЯ

Дану роботу не фінансували із зовнішніх джерел.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

Yu. D. Filatov

Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Influence of the geometric shape of the surfaces of copper optical parts on the formation of their surface layer during polishing

As a result of studying the patterns of scattering of sludge nanoparticles and nanoparticles of polishing powder wear during polishing of copper optical parts using a dispersed system of micro- and nanopowders of copper metaborate and kerosene, as well as the

formation of a deposit of copper oxide nanoparticles on the surface of the part being polished, it was established that the dependence of the total scattering cross sections of sludge nanoparticles on the radius of the circular zones of the part is characterized by maximum values, which are observed at radii (mm): 10, 15, 17.5 and 20 and cause the greatest probability of the formation of a deposit on the treated surface precisely in these circular zones. When studying the patterns of the influence of emergent properties of quantum nanoparticles of sludge and nanoparticles of wear of polishing powder on their collective behavior, self-organization and assembly during movement in an optical resonator with a variable length formed by the surfaces of the processed part and the lapping, it was shown that a coating of sludge nanoparticles is formed on the processed surface of the copper part, the fragments of which are discretely arranged in concentric circles, the radii of which coincide with the values calculated based on the quantum theory of nanoparticle scattering. It is shown that during polishing of copper optical parts using micro- and nanopowders of copper metaborate in a dispersed medium of kerosene, the removal rate of the processed material reaches $28.6 \cdot 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$, which coincides well with the experimentally determined polishing productivity, which was $(1.5 \pm 0.1) \text{ mg}/\text{min.}$, or $(7.3 \pm 0.4) \mu\text{m}/\text{h}$, or $(28.0 \pm 1.0) \cdot 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$ with a deviation of 5–6 %. It was experimentally confirmed that the deposit of nanoparticles of sludge, fragments of which consisted of copper oxide, was indeed observed on the polished surface of the copper parts and was located on concentric circles with a radius of 10 mm and 15 mm, as well as in a circular zone with a radius of [17–20] mm.

Keywords: polishing, copper, copper metaborate, nanoparticle scattering, emergent properties of nanoparticles, deposit.

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. <https://doi.org/10.3103/S1063457625040033>
2. 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. <https://doi.org/10.3103/S1063457625060073>
3. 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. <https://doi.org/10.3103/S1063457626020073>.
4. Філатов Ю.Д., Бояринцев А.Ю., Сідорко В.І., Ковальов С.В., Ковальов В.А., Юрчишин О.Я. Розсіювання наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку під час полірування деталей оптотехніки з міді і алюмінію. *Надтверді матеріали*. 2026. № 3. С. 64–77.
5. Abeywickrama Ch., Premaratne M., Andrews D.L. Analysis of Förster resonance energy transfer (FRET) in the vicinity of a charged metallic nanospere via nonlocal. *Proc. SPIE*. 2020. 113451B. <https://doi.org/10.1117/12.2554147>
6. 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. <https://doi.org/10.1364/OE.26.019371>.
7. Jones G.A., Bradshaw D.S. Resonance energy transfer: from fundamental theory to recent applications. *Front. Phys.* 2019. Vol. 7, no. 100. P. 1–19. <https://doi.org/10.3389/fphy.2019.00100>.
8. 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. <https://doi.org/10.3389/fphy.2019.00100>
9. Gordon F., Elcoroaristizabal S., Ryder A.G. Modelling Förster resonance energy transfer (FRET) using anisotropy resolved multi-dimensional emission spectroscopy (ARMES). *Biochim. Biophys. Acta (BBA)-Gen. Subj.* 2021. Vol. 1865, no. 2, art. 129770. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2020.129770>.
10. 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. <https://doi.org/10.3103/S1063457622020058>
11. 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. <https://doi.org/10.3103/S1063457622030030>
12. 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. <https://doi.org/10.3103/S1063457624050034>

13. Andrew P., Barnes W.L. Forster energy transfer in an optical microcavity. *Science*. 2000. Vol. 290, no. 5492. P. 785–788. <http://dx.doi.org/10.1126/science.290.5492.785>
14. 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. <https://doi.org/10.1039/c9sc90224d>
15. 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. <https://doi.org/10.1039/d1sc02026a>
16. 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. P. 012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2058/1/012001>
17. 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. <https://doi.org/10.3103/S106345762302003X>
18. Filatov Yu.D., Rogov V.V. A cluster model of mechanism of silica-containing material fatigue wear in polishing. *Sverkhтвердые Материалы*. 1994. Part 1. no. 3. P. 40–43; Part 2. no. 4. P. 45–51.
19. Filatov Yu.D. Material removal rate in polishing polymethymethacrylate parts. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 3. P. 212–220. <https://doi.org/10.3103/S1063457624030031>
20. Filatov Yu.D. Quantum mechanism of optical glass polishing. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 4. P. 303–313. <https://doi.org/10.3103/S106345762404004X>
21. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Filatov A.Yu., Yashuk V.P., Heisel W., Storchak M. Surface quality control in diamond abrasive finishing. *Opt. Measur. Syst. for Industr. Inspec. VI. Proc. SPIE*. 2009. Vol. 7389, art. 73892O. <https://doi.org/10.1117/12.827368>
22. 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. <https://doi.org/10.1117/12.2016913>
23. 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. <https://doi.org/10.3103/S1063457618040081>
24. 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. <https://doi.org/10.3103/S1063457621040043>
25. 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. <https://doi.org/10.3103/S1063457623030140>
26. 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. <https://doi.org/10.3103/S1063457623050052>
27. 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. <https://doi.org/10.3103/S1063457623060035>
28. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Boyarintsev A.Y., 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. <https://doi.org/10.3103/S1063457624010040>
29. Sieroka N., Lossau T., Neudecker T. Emergent properties in chemistry – relating molecular properties to bulk behavior. *Chem. Eur. J.* 2024. Vol. 30, no. 25, art. e202303868. <https://doi.org/10.1002/chem.202303868>
30. Kivelson S., Kivelson S.A. Defining emergence in physics. *npj Quantum Mater.* 2016. Vol. 1, art. 16024. <https://doi.org/10.1038/npjquantmats.2016.24>
31. Wang Y. Nanogeochemistry: Nanostructures, emergent properties and their control on geochemical reactions and mass transfers. *Chem. Geology*. 2014. Vol. 378–379. P. 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.04.007>

32. Nie Z., Petukhova A. Kumacheva E. Properties and emerging applications of self-assembled structures made from inorganic nanoparticles. *Nature Nanotech.* 2010. Vol. 5. P. 15–25. <https://doi.org/10.1038/nnano.2009.453>
33. Lau C.N., Xia F. Cao L. Emergent quantum materials. *MRS Bulletin*. 2020. Vol. 45. P. 340–347. <https://doi.org/10.1557/mrs.2020.125>.
34. Marino E., LaCour R.A., Kodger T.E. Emergent properties from three-dimensional assemblies of (nano)particles in confined spaces. *Cryst. Growth Des.* 2024. Vol 24, no. 14. P. 6060–6080. <https://10.1021/acs.cgd.4c00260>
35. Firestone M.A., Hayden S.C., Huber D.L. Greater than the sum: Synergy and emergent properties in nanoparticle–polymer composites. *MRS Bull.* 2015. Vol. 40. P. 760–767. <https://doi.org/10.1557/mrs.2015.202>
36. Sugi K.S., Maier A., Scheele M. Emergent properties in supercrystals of atomically precise nanoclusters and colloidal nanocrystals. *Chem. Commun.* 2022. Vol. 58, no. 50. P. 6998–7017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.06050>
37. Li X, Lu Z, Wang T. Self-assembly of semiconductor nanoparticles toward emergent behaviors on fluorescence. *Nano Research*. 2021. Vol. 14, no. 5. P. 1233–1243. <https://doi.org/10.1007/s12274-020-3140-y>
38. 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. <https://doi.org/10.3103/S106345762505003X>
39. 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. <https://doi.org/10.3103/S1063457622050021>
40. Eyring Henry, Lin S. H., Lin S. M. Basic chemical kinetics. John Wiley & Sons, 1980. 493 p.
41. Юхновський І.Р. Основи квантової механіки: Навч. посібник. Либідь, 2002. 392 с.
42. 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. <https://doi.org/10.3103/S1063457623010045>
43. 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. <https://doi.org/10.3103/S1063457622040037>
44. Філатов Ю.Д., Бояринцев А.Ю., Сідорко В.І., Ковальов С.В., Ветров А.Г. Спосіб полірування оптичних деталей. Пат. № 161049, Україна. МПК B24D 3/34, № u202500659; Заявл. 14.02.2025; Опубл. 05.11.2025, Бюл. № 45.
45. 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. <https://doi.org/10.3103/S1063457621010032>
46. Feng Y., Xu H.-G., Zheng W., Zhao H., Kandalam A.K., Jena P. Structures and photoelectron spectroscopy of $\text{Cu}_n(\text{BO}_2)_m$ ($n, m = 1, 2$) clusters: Observation of hyperhalogen behavior. *J. Chem. Phys.* 2011. Vol. 134, no. 094309. <https://doi.org/10.1063/1.3556818>
47. 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, no. 094301. <https://10.1103/PhysRevB.88.094301>
48. 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. <https://10.1088/1742-6596/682/1/012028>
49. 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. <https://10.2298/PAC2002113U>
50. 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. <https://10.1021/acs.jpcc.1c00111>
51. 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. <https://doi.org/10.3103/S1063457609050098>

52. 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. <https://doi.org/10.3103/S1063457613050067>
53. 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. <https://doi.org/10.3103/S1063457623010045>
54. 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. <https://doi.org/10.3103/S1063457621060058>
55. Чекман І.С., Покровський В.О., Савченко Д.С. Оптичні властивості наноматеріалів. *Вісн. НАН України*. 2014. № 10. С. 30–41. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnapu_2014_10_6

Надійшла до редакції 25.02.26

Після доопрацювання 17.04.26

Прийнята до опублікування 20.04.26