УДК 621.923.7

Ю. Д. Філатов, В. І. Сідорко, С. В. Ковальов, С. П. Старик
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, Україна
**filatov2045@gmail.com*

Закономірності утворення нальоту і локалізації його фрагментів на оброблюваній поверхні під час полірування деталей оптотехніки з міді

В результаті дослідження закономірностей полірування міді за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків метаборату міді з дисперсним середовищем у вигляді гасу, встановлено, що знімання оброблюваного матеріалу відбувається шляхом видалення наночастинок шламу (квантових точок Cu_2O-QDs), емерджентні властивості яких відрізняються від властивостей об'ємної фази міді, зі швидкістю 17,7 10^{-13} $м^3/с$, яка добре узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування, що складала 0,9 мг/хв, або 4,4 мкм/год, або 16,8 10^{-13} $м^3/с$ за відхилення 5 %. Під час вивчення закономірностей взаємодії наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку в проміжку між поверхнями деталі та притира, показано, що в центрі полірованої поверхні утворюється наліт у вигляді плями діаметром 5 мм і товщиною 15,0±5,0 мкм. Вивчення мікроструктури нальоту показало, що на поверхні ділянок, які складаються з частинок полірувального порошку і продуктів зносу притира, спостерігали фрагменти з наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку, елементний склад яких свідчить, що вони сформовані з оксиду міді й метаборату міді. Встановлено, що ці наночастинки збираються в компактні мікроскопічні структури розмірами 50×75 $мкм^2$ і 100×150 $мкм^2$. Показано, що для запобігання утворенню нальоту з наночастинок шламу і наночастинок зносу на поверхні деталі, необхідно, щоб товщина проміжку між поверхнями деталі і притира не перевищувала 2,74 мкм, що досягається автоматично за використання класичного методу формоутворення оптичних поверхонь під час полірування деталей оптотехніки з міді.

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

ВСТУП

Згідно з результатами сучасних досліджень продуктивність полірування, інтенсивність зношування частинок дисперсної фази полірува-

© Ю. Д. ФІЛАТОВ, В. І. СІДОРКО, С. В. КОВАЛЬОВ, С. П. СТАРИК, 2026

льної дисперсної системи, шорсткість полірованої поверхні, а також ймовірності утворення нальоту з наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку на поверхнях оброблюваної деталі і притира визначаються ефективністю двох резонансних процесів, що відбуваються одночасно [1–5]. Перший з них відбувається у відкритому мікрорезонаторі (проміжку між поверхнею частинки полірувального порошку та оброблюваною поверхнею), де утворюються і видаляються з відповідних поверхонь квантові частинки – наночастинки шламу і наночастинки зносу полірувального порошку [1–3, 5–9]. Другий процес характеризується тим, що ці наночастинки, які взаємодіють між собою, рухаються і розсіюються всередині відкритого резонатора, утвореного двома паралельними поверхнями оброблюваного матеріалу і притира, що уможливлює збірку наночастинок з утворенням фрагментів нальоту і їхньою локалізацією на вказаних поверхнях [4–6, 10–14].

Під час полірування міді за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків метаборату міді (CuB_2O_4) й гасу в результаті передачі енергії між частинками полірувального порошку і поверхнею, яку полірують, що відбувається за ферстерівським механізмом резонансного перенесення енергії, опосередкованого квантовими точками (QD-FRET) [1–3, 15–24], утворюються наночастинки шламу (квантові точки Cu_2O-QDs) і наночастинки зносу полірувального порошку (нанокристали CuB_2O_4–NCr). Наночастинки шламу, що складаються з оксиду міді (Cu_2O), мають емерджентні властивості, які визначаються квантово-механічними ефектами в макроскопічних масштабах довжини і суттєво відрізняються від властивостей об'ємної фази оброблюваного матеріалу – міді (Cu) [5, 25–27]. Емерджентні властивості наночастинок проявляються також у переважанні їхніх хвильових властивостей над корпускулярними, у відмінності їхньої колективної поведінки від поведінки окремих наночастинок; у виникненні нових фізичних властивостей (квантова інтерференція), а також можливості впорядкованої збірки наночастинок у компактні структури – фрагменти нальоту [5, 25, 28–32].

Однак, до теперішнього часу механізм формування нальоту з наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку і закономірності локалізації його фрагментів на поверхні оброблюваної деталі в залежності від її геометричної форми та режимів полірування вивчено недостатньо. Саме тому дослідження закономірностей утворення і локалізації фрагментів нальоту на полірованій поверхні під час полірування деталей оптотехніки з міді є актуальною проблемою.

Метою даного дослідження було вивчення закономірностей утворення нальоту з наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку і локалізації його фрагментів на оброблюваній поверхні під час полірування міді за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків CuB_2O_4.

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження закономірностей утворення нальоту з наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку на оброблюваній поверхні здійснювали під час полірування плоскої поверхні деталі з міді діаметром 42 мм на шліфувально-полірувальному пристрої на базі верстату мод. PM-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. Полірування здійснювали за допомогою дисперсної системи, в якій у якості дисперсної фази використовували мікро- та нанопорошки CuB_2O_4 [1–5, 33–39]), а в якос-

ті дисперсного середовища використовували гас (діелектрична проникність ε = 2,1, коефіцієнт поверхневого натягу – 24 мН/м, коефіцієнт динамічної в'язкості – 3,6 мПа·с). Середній розмір частинок CuB_2O_4, який визначали за допомогою растрового електронного мікроскопа ZEISS EVO 50 XVP ("Carl Zeiss Microscopy GmbH", Німеччина) з системою мікроаналізу Aztec, складав d = 409 нм [5, 7, 9, 40, 41].

Розміри, форму і місце локалізації фрагментів нальоту з наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку на оброблюваній поверхні досліджували за допомогою оптичних мікроскопів ЛОМО Метам Р-1, оснащеного камерою Vision STD-Res Series, і Axioscope 5 ("Carl Zeiss Microscopy GmbH", Німеччина). Мікроструктуру фрагментів нальоту досліджували за допомогою сканувального електронного мікроскопа (СЕМ) ZEISS EVO 50 XVP з використанням фазочутливого детектора Compact Zeiss BackScattered Detector (CZ BSD). Елементний склад фрагментів нальоту визначали методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (ЕРС) за допомогою аналізатора Ultim Max 100 ("Oxford Instruments plc", Велика Британія).

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) [5, 42–47].

В якості полірувального інструмента використовували притир з сірої замші діаметром 60 мм, робоча поверхня якого мала значне відхилення від площинності (> 40 мкм) і складним профілем, що описували функцією $h_t = f(r)$, де h_t – відносна товщина робочого шару; r – радіус колової зони притира (рис. 1, крива *1*). Як деталь використовували зразок з міді з увігнутою формою оброблюваної поверхні і значним відхиленням від площинності (до 20 мкм), геометричний профіль якої описували функцією $h_d = f(\rho)$, де h_d – відносна товщина деталі; ρ – радіус колової зони деталі (див. рис. 1, крива *2*).

Товщину проміжку між поверхнею оброблюваної деталі і робочою поверхнею притира, в якому розташована полірувальна дисперсна система, в системі координат (h_d, ρ), зв'язаній з центром деталі, з урахуванням їхнього взаємного розташування (притир – знизу, деталь – зверху, відстань між їхніми центрами e_p = 10 мм) визначали як $h(\rho) = h_t(\rho + e_p) + h_d(\rho)$ (рис. 2).

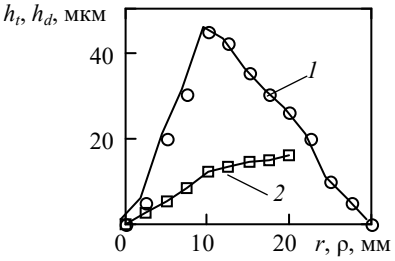


Рис. 1. Профілі робочої поверхні притира і оброблюваної поверхні деталі з міді.

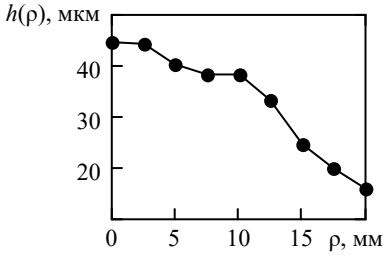


Рис. 2. Залежність товщини шару дисперсної системи від радіусу колових зон деталі.

Швидкість відносного переміщення деталі і притира та час контакту частинок полірувального порошку з оброблюваною поверхнею складали u = 0,5 м/с і t_c = 0,8 мкс відповідно. Площа контакту поверхонь оброблюваної деталі і притира (кола радіусом 7,5 мм) складала S_k = 176,7 мм^2, а тиск притискання оброблюваної деталі до притира (67,9 кПа) зумовлював мінімальне значення відстані між поверхнями деталі і притира, яка залежить від відносної швид-

кості їхнього переміщення, коефіцієнта поверхневого натягу, динамічної в'язкості дисперсної системи та кутів змочування дисперсною системою поверхні оброблюваної деталі $\theta_1 = 3^o$ і притира $\theta_2 = 1°$ [4, 5, 34, 43], і складала 0,7 мкм, що значно менше реальної товщини шару дисперсної системи $h(\rho)$. Довжину шляху тертя L_t частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні визначали як довжину дуги кола радіуса R_p = 10 мм, утвореної за перетину з колом радіуса 7,5 мм, за формулою

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

де a = 7,5 мм і b = 10,0 мм, і вона складала 14 мм.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження закономірностей зняття оброблюваного матеріалу в процесі полірування деталі з міді за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків CuB_2O_4 з дисперсним середовищем з гасу у відповідності до наведеної методики показали, що в результаті утворення і видалення з оброблюваної поверхні наночастинок шламу (квантових точок Cu_2O-QDs) відбувається знімання оброблюваного матеріалу зі швидкістю V_m, яку визначали у відповідності до формули

$$V_m = \frac{L_t u}{d} \eta_m \tau_m Q_m ,$$

де η_m = 1,45 10^{-12} м^2/с – коефіцієнт об'ємного зносу; Q_m = 75 – добротність мікрорезонатора, утвореного поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку; τ_m = 957 нс – час життя квантових точок Cu_2O-QDs на оброблюваній поверхні у збудженому стані [1–5, 10, 20, 21, 44], і складала V_m = 17,7 10^{-13} м^3/с. Отримане значення швидкості знімання оброблюваного матеріалу добре узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування, що складала 0,9 мг/хв, або 4,4 мкм/год, або 16,8 10^{-13} м^3/с за відхилення 5 %.

Дослідження закономірностей утворення нальоту з наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку і локалізації його фрагментів на оброблюваній поверхні базувались на вивченні явища квантової інтерференції наночастинок [5, 25, 48–51], яке проявлялось як резонанс Фано, який виникає в результаті інтерференції хвильових функції цих квантових частинок, що підсилюються (конструктивна інтерференція) або послаблюються (деструктивна інтерференція) під час руху, розсіювання і взаємодії між ними всередині резонатора, утвореного поверхнями оброблюваного матеріалу і притира [5, 50, 52–55]. Резонанс Фано широко застосовують в наноелектроніці і нанооптиці під час дослідження і розробки штучних фотонних молекул, діелектричних, плазмонних гетеро- і наноструктур та метаматеріалів [56–60].

Наночастинки шламу і наночастинки зносу полірувального порошку, які характеризуються близькими за значеннями довжинами хвиль λ_m = 16,059 мкм (частота ω_m = 1,174·10^{14} с$^{-1}$) і λ_p = 15,746 мкм (частота ω_p = 1,197·10^{14} с$^{-1}$), рухаються як хвилі в резонаторі, довжина якого $h(\rho)$ (див. рис. 2) залежить від геометричної форми поверхонь оброблюваної деталі і притира [4, 5, 11–14]. Ці хвилі розповсюджуються вздовж осі z резонатора в напрямку від поверхні притира до поверхні, що полірують, характеризуються хвильовими числами $k_m = 2\pi/\lambda_m$ = 3,91 10^5 м$^{-1}$ і $k_p = 2\pi/\lambda_p$ = 3,99 10^5 м$^{-1}$ і накла-

даються одна на одну. Результуюча хвиля у вигляді хвильового пакету з частотою $\omega_0 = (\omega_m + \omega_p)/2 = 1{,}186 \cdot 10^{14}$ с$^{-1}$ і довжиною хвилі $\lambda_0 = 2\pi/k_0 = 4\pi/(k_m + k_p) =$ 15,9 мкм характеризується амплітудно-модульованою функцією від координати z і часу t, яка має вигляд

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

де $\Delta\omega = (\omega_p - \omega_m)/2$, $\Delta k = (k_p - k_m)/2$, і наведена на рис. 3.

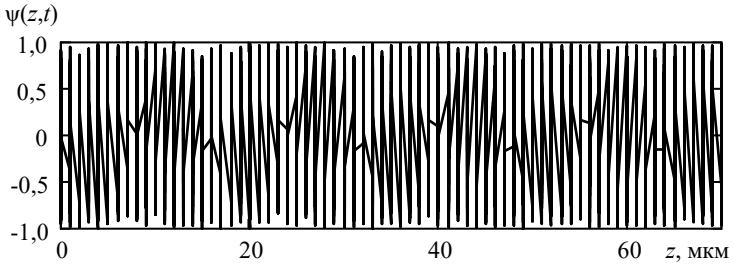


Рис. 3. Залежність хвильової функції $\psi(z,t)$ від координати z.

Для резонансу Фано, який виникає внаслідок двохвильової інтерференції, є властивою нормована амплітудна характеристика [54, 61–64], що виражається функцією

$$I_F = \frac{|q + \xi|}{\sqrt{(1+q^2)(1+\xi^2)}},$$

де $\xi = 2Q_m(\omega - \omega_0)/\omega_0$, ω – частота; ω_0 – резонансна частота; q – параметр асиметрії.

Характеристики Фано з симетричним ($q = 0$) і асиметричним профілем ($q = 1$) показують, що максимум і мінімум I_F відповідають повному проходженню (поглинанню) і повному відбиттю хвилі відповідно (рис. 4).

Під час розповсюдження хвиль в резонаторі зі змінною оптичною довжиною $L_{\text{опт}}(\rho) = h(\rho)\,(\varepsilon)^{1/2}$, де ε – діелектрична проникність дисперсного середовища, їхнє максимальне поглинання поверхнею оброблюваної деталі за рахунок конструктивної інтерференції відбувається за умови, коли оптична довжина резонатора дорівнює цілому числу півхвиль $L_{\text{опт}}(\rho) = m\lambda_0/2$ (m = 1, 2, … – ціле число) і суттєво залежить від радіусу колових зон деталі, що полірували (див. рис. 2) [5, 14]. Виконання цих умов оцінювали за значенням розстроювання резонатора, яке визначали за формулою $\delta L = |L_{\text{опт}}(\rho) - m\lambda_0/2|$. Найменші значення розстроювання резонатора, які складали $\delta L \approx 1{,}0$ мкм для $m = 8$, $\rho = 0$ і $\delta L \approx 0{,}9$ мкм для $m = 8$, $\rho = 2{,}5$ мм (рис. 5), відповідали коловій зоні діаметром 5 мм, розташованій в центрі оброблюваної поверхні.

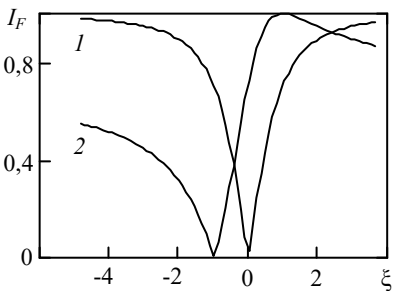


Рис. 4. Характеристики Фано: 1– $q = 0$; 2 – $q = 1$.

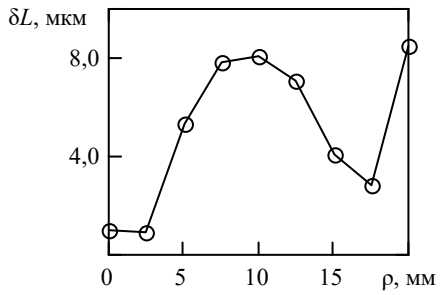


Рис. 5. Залежність розстроювання резонатора δL від радіусу колових зон деталі.

Аналіз стану полірованої поверхні деталі з міді за допомогою методів оптичної мікроскопії дозволив виявити наліт з наночастинок шламу, наночастинок зносу полірувального порошку, частинок зносу поверхні притира і частинок дисперсної фази дисперсної системи, які не були видалені із контактної зони під час полірування протягом 120 с. Цей наліт мав вигляд плями діаметром ~ 5 мм, товщина якої, виміряна за допомогою мікроскопа ЛОМО Метам Р-1, складала 15,0±5,0 мкм (рис. 6). З врахуванням, що густина наночастинок шламу (Cu_2O), наночастинок зносу полірувального порошку (CuB_2O_4) і матеріалу притира (замші) складала: $\rho_1 = 6{,}0$ г/см^3, $\rho_2 = 3{,}86$ г/см^3 і $\rho_3 = 1{,}4$ г/см^3 відповідно, за вагою нальоту, що складала $M_d = 10{,}7$ мг, можна оцінити середню густину нальоту $\rho_d = (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3)/3 = 3{,}8$ г/см^3, а відтак і його товщину $h_н = M_d/\rho_d S_k = 15{,}9$ мкм, яка узгоджується з експериментальними даними.

Дослідження мікроструктури нальоту показали, що на поверхні окремих ділянок, що складаються з частинок полірувального порошку і продуктів зносу поверхні притира із замші, спостерігали фрагменти, що складаються з наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку, які утворились під час полірування (рис. 7).

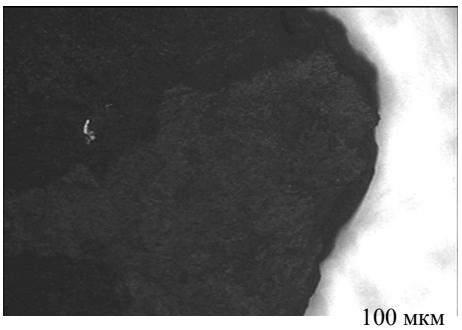


Рис. 6. Наліт в центрі оброблюваної поверхні мідної деталі.

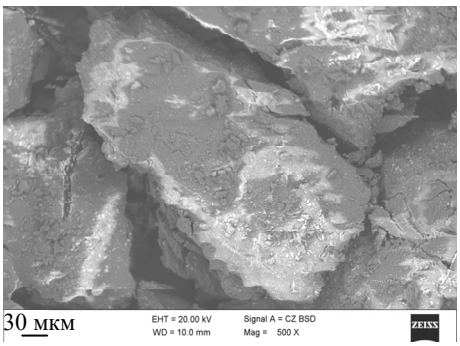


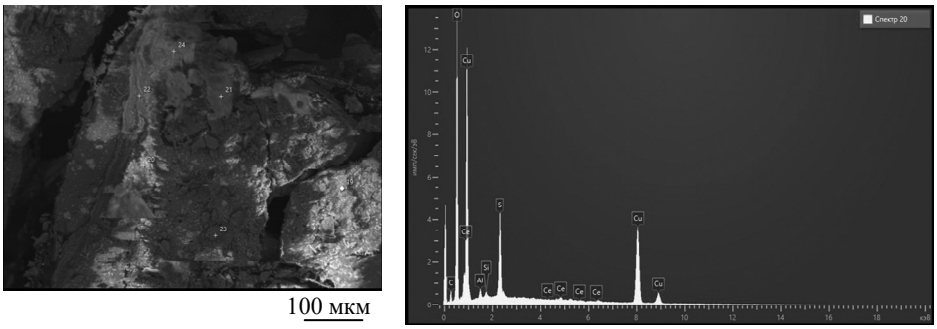
Рис. 7. СЕМ-зображення мікроструктури фрагментів нальоту.

Елементний склад фрагментів нальоту визначали в шести окремих зонах, які пронумеровано як 19–24 (рис. 8, *а*), методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії за відповідними спектрами (рис. 8, *б*). Усереднені дані по елементному складу фрагментів нальоту, які наведено в таблиці, показують, що вони зформовані в основному з Cu_2O і CuB_2O_4 (більше 83 %). Присутність вуглецю і сірки, а також алюмінію, церію і кремнію пояснюється їхнім вмістом в матеріалі притира і незначним забрудненням робочої зони верстату, яке сталося після полірування деталей з алюмінію і кремнію за допомогою дисперсної системи з двооксиду церію.

Детальний аналіз мікроскопічних зображень, отриманих за допомогою оптичного мікроскопа Axioscope 5 (рис. 9), показав, що в центральній зоні оброблюваної деталі спостерігали накопичення фрагментів нальоту з наночастинок шламу, що складались з Cu_2O (червоного кольору), і наночастинок зносу полірувального порошку, що складались з CuB_2O_4 (блакитного кольору).

Показано також, що наночастинки шламу і наночастинки зносу полірувального порошку, найбільш ймовірний розмір яких складав 6,5 і 12,2 нм [1–4], збираються в компактні мікроскопічні структури, розміри яких досягали 50×75 мкм^2 і 100×150 мкм^2 відповідно (рис. 10), що вказує на значний вплив емерджентних властивостей наночастинок на утворення на-

льоту і локалізацію його фрагментів на полірованій поверхні мідної деталі [4–6, 14, 29–31].



а *б*

Рис. 8. СЕМ-зображення фрагментів нальоту (*а*) та ЕРС-спектр елементів, з яких вони складаються (*б*).

Елементний склад фрагментів нальоту

Елементи	C	O	Cu	S	Al, Si, Ce	Всього
Вміст, %	9,09	39,24	44,18	4,36	3,13	100

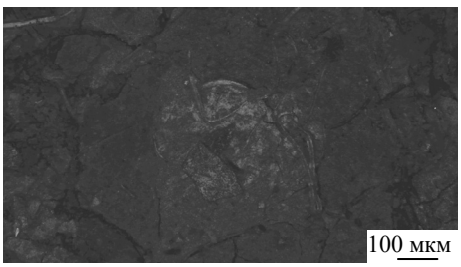


Рис. 9. Наліт з наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку.

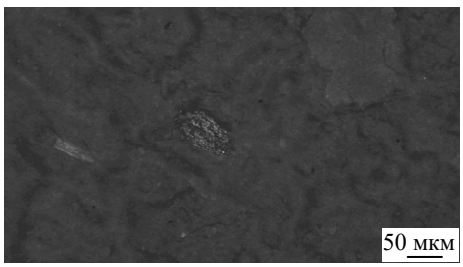


Рис. 10. Фрагменти нальоту з Cu_2O і CuB_2O_4.

Отже, вивчення закономірностей утворення нальоту з наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку і локалізації його фрагментів на оброблюваній поверхні під час полірування міді за допомогою дисперсної системи, в якій в якості дисперсної фази використовували мікро- та нанопорошки CuB_2O_4, а як дисперсне середовище гас, показало, що в центральній зоні діаметром 5 мм спостерігали фрагменти нальоту з наночастинок шламу або наночастинок зносу полірувального порошку, які самоорганізувались і утворили компактні мікроструктури з Cu_2O або з CuB_2O_4, що складались з великої кількості (до 10^8) наночастинок.

Слід зауважити, що для запобігання утворення нальоту з наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку на поверхні деталі з міді, що полірували, необхідно, щоб товщина проміжку між поверхнею оброблюваної деталі і робочою поверхнею притира $h(\rho)$ не перевищувала критичного значення $h^* = \lambda_0/4(\varepsilon)^{1/2} = 2{,}74$ мкм (див. рис. 3), за якого внаслідок деструктивної інтерференції хвильових функції цих наночастинок характеристика Фано (див. рис. 4) має мінімальне значення, що відповідає повному відбиттю хвиль. В реальному процесі полірування деталей оптотехніки з міді це обмеження виконується автоматично, оскільки за використання класичного

методу формоутворення оптичних поверхонь похибки форми поверхні, що підготовлена для полірування, знаходяться в межах 2–3 інтерференційних смуг, тобто 0,50–0,75 мкм [65].

ВИСНОВКИ

У результаті дослідження закономірностей полірування міді за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків CuB_2O_4 з дисперсним середовищем у вигляді гасу встановлено, що знімання оброблюваного матеріалу відбувається шляхом видалення наночастинок шламу (квантових точок Cu_2O-QDs), емерджентні властивості яких відрізняються від властивостей об'ємної фази міді, зі швидкістю 17,7 10^{-13} $м^3/с$, яка добре узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування, що складала 0,9 мг/хв, або 4,4 мкм/год, або 16,8 10^{-13} $м^3/с$ за відхилення 5 %.

Під час вивчення закономірностей взаємодії наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку в проміжку між поверхнями деталі і притира, заповненому полірувальною дисперсною системою, показано, що в центрі полірованої поверхні утворюється наліт у вигляді плями діаметром 5 мм і товщиною 15±5 мкм. Вивчення мікроструктури нальоту показало, що на поверхні ділянок, які складаються з частинок полірувального порошку і продуктів зносу притира, спостерігали фрагменти з наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку, елементний склад яких свідчить, що вони сформовані з Cu_2O і CuB_2O_4 відповідно. Встановлено, що наночастинки шламу і наночастинки зносу полірувального порошку збираються в компактні мікроскопічні структури розмірами 50×75 і 100×150 $мкм^2$ відповідно, що складаються з великої (до 10^8) кількості наночастинок.

Показано, що для запобігання утворенню нальоту з наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку на поверхні деталі, необхідно, щоб товщина проміжку між поверхнями деталі і притира не перевищувала 2,74 мкм, що досягається автоматично за використання класичного методу формоутворення оптичних поверхонь під час полірування деталей оптотехніки з міді.

ФІНАНСУВАННЯ

Дану роботу не фінансували із зовнішніх джерел.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Yu. D. Filatov, V. I. Sidorko, S. V. Kovalev, S. P. Starik
Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Patterns of deposit formation and localization of its fragments on the treated surface during polishing of copper optical components

As a result of studying the regularities of copper polishing using a dispersed system of copper metaborate micro- and nanopowders with a dispersed medium in the form of kerosene, it was found that the removal of the processed material occurs by removing sludge nanoparticles (Cu_2O-QDs quantum dots), the emergent properties of which differ from the properties of the bulk copper phase, at a speed of 17,7 10–13 m^3/s, which is in good agreement with the data of the experimental determination of the polishing productivity, which was 0.9 mg/min, or 4,4 μm/h, or 16,8 10–13 m^3/s with a deviation of 5 %. When studying the patterns of interac-

tion of sludge nanoparticles and nanoparticles of wear of polishing powder in the gap between the surfaces of the part and the lapping, it was shown that in the center of the polished surface a deposit is formed in the form of a spot with a diameter of 5 mm and a thickness of 15,0 ± 5,0 μm. The study of the microstructure of the deposit showed that on the surface of the areas consisting of particles of polishing powder and products of wear of the lapping, fragments of sludge nanoparticles and nanoparticles of wear of polishing powder are observed, the elemental composition of which indicates that they are formed from copper oxide (Cu_2O) and copper metaborate (CuB_2O_4). It was established that these nanoparticles are collected into compact microscopic structures with dimensions of 50 × 75 μm^2 and 100 × 150 μm^2. It is shown that to prevent the formation of a deposit of sludge nanoparticles and wear nanoparticles on the surface of the part, it is necessary that the thickness of the gap between the surfaces of the part and the lapping does not exceed 2.74 μm, which is achieved automatically using the classical method of shaping optical surfaces during polishing of copper optical components.

Keywords: *polishing, copper, copper metaborate, 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. Filatov Yu.D., Boyarintsev A.Y., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Kovalev V.A., Yurchyshyn O.Y. Scattering of sludge and polishing powder wear nanoparticles during the polishing of optical components made of copper and aluminum. *J. Superhard Mater*. 2026. Vol. 48, no 3. P. 221–232. https://doi.org/10.3103/S1063457626030044
5. Філатов Ю.Д. Вплив геометричної форми поверхонь деталей оптотехніки з міді на формування їхнього поверхневого шару під час полірування. *Надтверді матеріали*. 2026. № 4. С. 66–77.
6. 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
7. 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
8. Filatov Yu.D., Rogov V.V. A cluster model of mechanism of silica-containing material fatigue wear in polishing. *Sverkhtverdye Materialy*. 1994. Part 1. no. 3. P. 40–43; Part 2. no. 4. P. 45–51.
9. 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
10. 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
11. 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
12. 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
13. 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
14. 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. https://doi.org/10.3103/S1063457624010040
15. 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
16. 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
17. Jones G.A., Bradshaw D.S. Resonance energy transfer: from fundamental theory to recept applications. *Front. Phys.* 2019. Vol. 7, no. 100. P. 1–19. https://doi.org/10.3389/fphy.2019.00100
18. 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
19. 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
20. 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
21. 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
22. 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
23. 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
24. 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. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2058/1/012001
25. 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/vnanu_2014_10_6
26. 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
27. 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
28. Kivelson S., Kivelson S.A. Defining emergence in physics. *npj Quantum Mater*. 2016. Vol. 1, art. 16024. https://10.1038/npjquantmats.2016.24
29. 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
30. 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
31. 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
32. 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
33. Філатов Ю.Д., Бояринцев А.Ю., Сідорко В.І., Ковальов С.В., Вєтров А.Г. Спосіб полірування оптичних деталей. Пат. № 161049, Україна. МПК B24D 3/34, № u202500659; Заявл. 14.02.2025; Опубл. 05.11.2025, Бюл. № 45.
34. 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

35. Feng Y., Xu H.-G., Zheng W., Zhao H., Kandalam A.K., Jena P. Structures and photoelectron spectroscopy of $Cu_n(BO_2)_m^-$ (n, m = 1, 2) clusters: Observation of hyperhalogen behavior. *J. Chem. Phys*. 2011. Vol. 134, no. 094309. https://doi.org/10.1063/1.3556818
36. 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
37. 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
38. 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
39. 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
40. 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
41. 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.
42. 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
43. 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
44. 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
45. 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
46. 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
47. 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
48. 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
49. 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
50. Gehring P., Sadeghi H., Sangtarash S., Lau C.S., Liu J., Ardavan A., Warner J.H., Lambert C.J., Briggs G.A.D., Mol J.A. Quantum interference in graphene nanoconstrictions. *Nano Lett.* 2016. Vol. 16, no. 7. P. 4210–4216. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b01104
51. Zhang K., Maniyara R.A., Wang Y., Jain A., Wetherington M.T., Mai T.T., Dong C., Bowen T., Wang K., Rotkin S.V., Walker A.R.H., Crespi V., Robinson J., Huang S. Tunable phononic quantum interference induced by two-dimensional metals. *Sci. Adv.* 2025. Vol. 11, no. 32. eadw1800. DOI: 10.1126/sciadv.adw1800
52. Zhou J., Xu X., Han W., Mu D., Song H., Meng Y., Leng X., Yang J., Di X., Chang Q. Fano resonance of nanoparticles embedded in Fabry-Perot cavities. *Opt. Exp*. 2013. Vol. 21, no. 10, art. 12159. https://doi:10.1364/OE.21.012159

53. Stassi S., Chiadò A., Calafiore G., Palmara G., Cabrini S., Ricciardi C. Experimental evidence of Fano resonances in nanomechanical resonators. 2017. *Sci. Rep. 7*, art. 1065. https://doi.org/10.1038/s41598-017-01147-y
54. Zi-Ming Meng, Anhui Liang, Zhi-Yuan Li. Fano resonances in photonic crystal nanobeams side-coupled with nanobeam cavities. *J. Appl. Phys.* 2017. Vol. 121, art. 193102. http://dx.doi.org/10.1063/1.4983450
55. Xie Y.-J., Zhang M.-N., Wang R., Wang L.-F., Huang Q.-A. Experimental realization of tunable Fano resonances in two coupled silicon micromechanical resonators. *Phys. Rev. Res*. 2025. Vol. **7**, art. 013002. https://doi:10.1103/PhysRevResearch.7.013002.
56. Cao G., Dong S., Zhou L.-M., Zhang Q., Deng Y., Wang C., Zhang H., Chen Y., Qiu C.-W., Liu X. Fano resonance in artificial photonic molecules. *Adv. Opt. Mater*. 2020. Vol. 8, no. 10, art. 1902153. https://doi:10.1002/adom.201902153
57. Limonov M.F., Rybin M.V., Poddubny A.N., Kivshar Yu.S. Fano resonances in photonics. *Nature Photonics*. 2017. Vol. 11. P. 543–554. https://doi:10.1038/nphoton.2017.142
58. Szalay Z., Nagy L. Complex permittivity measurement by Fano-resonance*. Proc. Engineering,* 2016. Vol. 168. P. 1346–1349. https://doi:10.1016/j.proeng.2016.11.370
59. Rahmani M., Luk'yanchuk B., Hong M. Fano resonance in novel plasmonic nanostructures. *Laser Photonics Rev.* 2013. Vol. 7, Iss. 3. P. 329–349. https://doi:10.1002/lpor.201200021.
60. Jiao J., Wang Z. Fano-chain: the Fano resonances in a nanoparticles chain. *J. Mod. Opt.* 2012. Vol. 59, no. 16. P. 1434–1438. http://dx.doi.org/10.1080/09500340.2012.723757
61. Nelin E.A., Nepochatykh Yu.V. Fano resonance in transmission line. *Visnyk NTUU KPI, Seriia – Radiotekhnika Radioaparatobuduvannia.* 2021. No. 84. P. 88–94. https://doi:10.20535/ RADAP.2021.84.88-94
62. Miroshnichenko A.E., Flach S. Kivshar Y.S. Fano resonances in nanoscale structures. *Rev. Mod. Phys.* 2010. Vol. 82, no. 3. P. 2257–2298. https://doi:10.1103/RevModPhys.82.2257
63. Chen H.L., Gao L. Tunablity of the unconventional Fano resonances in coated nanowires with radial anisotropy. *Optics Express*. 2013. Vol. 21, no. 20. P. 23619–23630. https://doi:10.1364/OE.21.023619
64. Qu K., Agarwal G.S. Fano resonances and their control in optomechanics. *Phys. Rev. A.* 2013. Vol. 87, art. 063813. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.87.063813
65. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Філатов О.Ю., Ковальов С.В. Фізичні засади формоутворення прецизійних поверхонь під час механічної обробки неметалевих матеріалів. Київ: Наук. думка, 2017. 248 с.

Надійшла до редакції 27.05.2026
Після доопрацювання 03.06.26
Прийнята до опублікування 05.06.26