

УДК 621.371

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-388-396

Ю.Д. Філатов¹, В.І. Сідорко², доктори технічних наук;
С.В. Ковальов¹, О.Я. Юрчишин³, кандидати технічних наук

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,
вул. Автозаводська 2, 04074 м. Київ, e-mail: filatov@ism.kiev.ua

²Державне підприємство “Інженерно-виробничий центр АЛКОН” НТАК (АЛКОН) НАН
України, вул. Автозаводська 2, 04074 м. Київ, e-mail: sidorko@ism.kiev.ua

³Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря
Сікорського», пр. Перемоги 37, 03056 м. Київ, e-mail: urchyshynoks@ukr.net

РОЗСІЮВАННЯ НАНОЧАСТИНОК ШЛАМУ І ЗНОСУ ПОЛІРУВАЛЬНОГО ПОРОШКУ ПІД ЧАС ПОЛІРУВАННЯ МІДІ І АЛЮМІНІЮ

Метою даної роботи є вивчення закономірностей розсіювання наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку під час полірування міді і алюмінію та утворення нальоту з цих наночастинок на поверхні притира. 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⁻¹ і $[0,7-4,8]$ Мб·ср⁻¹, суттєво зменшуються за збільшення розділення між наночастинками шламу, наночастинками зносу полірувального порошку і дисперсним середовищем за діелектричною проникністю. Показано, що повні перерізи розсіювання наночастинок σ_m і σ_p , змінюючись в межах $[0,05-1,78]$ Мб і $[0,37-0,53]$ Мб, також зменшуються за збільшення 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 випадку і з наночастинок зносу полірувального порошку – у 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 спостерігали наліт з частинок метаборату міді. Результати дослідження доцільно використовувати при розробці технологічних процесів полірування оптичних поверхонь деталей з міді і алюмінію.

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

Вступ

Полірування оптичних поверхонь деталей 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 дисперсійних систем з неабразивних мікро- та нанопорошків. Сучасні дослідження закономірностей полірування прецизійних поверхонь металевих деталей показали, що для полірування міді і алюмінію доцільно застосовувати полірувальні дисперсні системи з мікро- та нанопорошків метаборату міді, оскільки вони забезпечують необхідну шорсткість полірованих поверхонь за високої швидкості знімання оброблюваного матеріалу.

Швидкість знімання оброблюваного матеріалу, параметри шорсткості обробленої поверхні, інтенсивність зношування полірувального порошку і ймовірність утворення нальоту з наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку 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 [1–4]. Однак, до теперішнього часу механізм утворення і розсіювання наночастинок шламу і зносу полірувального порошку в системі «оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира» остаточно не вивчено, а можливість прогнозування ефективності процесу полірування з точки зору утворення нальоту з наночастинок шламу і зносу на поверхні притира практично відсутня. Разом з тим, ще не вивчено яким чином дисперсне середовище полірувальної дисперсної системи впливає на закономірності розсіювання наночастинок шламу і зносу, які 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*) між рівнями енергії донорно-акцепторних пар у відкритому мікрорезонаторі, який утворено поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку. Саме тому дослідження закономірностей розсіювання наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку під час полірування оптичних деталей 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 роботи є вивчення закономірностей розсіювання наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку під час полірування міді і алюмінію та утворення нальоту з цих наночастинок на поверхні притира.

Методика дослідження

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 і 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 та 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 у якості дисперсної фази використовували мікро- та нанопорошки метаборату міді (CuB_2O_4 , густина 3,86 г/см³, статична діелектрична проникність $\epsilon_2 = 6,05$), а в якості дисперсного середовища використовувались гас (DM1, діелектрична проникність $\epsilon_3 = 2,1$, коефіцієнт поверхневого натягу 24 мН/м, коефіцієнт динамічної в'язкості 3,6 мПа·с) або вода (DM2, діелектрична проникність $\epsilon_3 = 81$, коефіцієнт поверхневого натягу 72 мН/м, коефіцієнт динамічної в'язкості 0,9 мПа·с). Частоти власних коливань частинок метаборату міді, які визначали за спектрами ІЧ-поглинання (Фур'є-спектрометр Nicolet 6700), складала (см⁻¹): 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. Середній розмір частинок метаборату міді, який визначався за допомогою растрового електронного мікроскопу «Zeiss-EVO50» з системою мікроаналізу Aztec, складав 409 нм. Довжина шляху тертя L_t частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні складала 132 мм, а час контакту t_c частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею складав: 3,8–3,9 мкс – під час полірування міді і 2,8–2,9 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 к капілярі, а кути змочування дисперсними системами поверхонь оброблюваної деталі та притира – за допомогою мікроскопу «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 розсіювання наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку

Під час взаємодії наночастинок шламу оброблюваного матеріалу і наночастинок зносу полірувального порошку, що утворились внаслідок FRET, яке відбувається на характерних частотах $\nu_{1m}, \nu_{2m}, \nu_{1p}, \nu_{2p}$ та характеризується спектральним розділенням $\delta\nu_m = \nu_{2m} - \nu_{1m}$ і $\delta\nu_p = \nu_{1p} - \nu_{2p}$, хвильова функція їх розсіювання є суперпозицією падаючої та розсіяної хвиль, яка задовольняє рівнянню Шредінгера і має вигляд [5, 6] $\varphi(r) = e^{ikz} + \frac{f(\vartheta)e^{ikr}}{r}$ (де $k = mv/\hbar$ – хвильове число, m – маса частинки, v – швидкість частинки, $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка, ϑ – кут розсіювання, $f(\vartheta)$ – амплітуда розсіяної хвилі), а диференціальний переріз розсіювання і повний ефективний переріз розсіювання визначаються у відповідності до формул

$$I(\vartheta) = |f(\vartheta)|^2, \quad \sigma = 2\pi \int_0^\pi |f(\vartheta)|^2 \sin \vartheta d\vartheta. \quad (1)$$

Для визначення характеристик розсіювання наночастинок шламу (ЧШ) і наночастинок зносу полірувального порошку (ЧП) під час полірування використовувалась методика [2–4, 7, 8], яка базується на застосуванні методу парціальних хвиль, завдяки якій визначалась амплітуда розсіювання наночастинок у відповідності до формули

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

де l – азимутальне квантове число, яке визначає її кутовий момент, $\eta_l = \exp(2i\delta_l)$ – число, яке характеризує пружне або непружне розсіювання частинок, $P_l(\cos \vartheta)$ – поліноми Лежандра,

$\delta_l = -\int_{r_0}^{l_0} \frac{mU(r)dr}{\hbar^2 \sqrt{k^2 - \frac{(l+1/2)^2}{r^2}}}$ – фазовий зсув хвильових функцій в полі розсіяння $U(r)$, 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 їх розмірів a_m і a_p та відстані r між ними [7, 9], можна визначити формулами

$$U_m(r) = -\frac{AL_m}{16\pi} \left[\frac{f(a_m, a_p)}{r} + 2 \ln \left(\frac{f(a_m, a_p)}{r} \right) \right], \quad (3)$$

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

де $f(a_m, a_p) = \frac{a_m a_p}{a_m + a_p}$ – функція, яка залежить тільки від 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 діелектричних

проникностей і $H = [\epsilon_3/(\epsilon_1 \cdot \epsilon_2)]^{1/2}$ – розділення за діелектричною проникністю між ЧШ, ЧП і дисперсним середовищем, що характеризуються відповідними статичними діелектричними проникностями $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$.

Результати і обговорення

На основі аналізу закономірностей утворення ЧШ і ЧП під час полірування металів за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків метаборату міді з дисперсним середовищем у вигляді гасу (DM1) або води (DM2) [9] було визначено найбільш ймовірні розміри ЧШ (a_m) і ЧП (a_p), їх об'єми v_m і v_p та концентрації N_m і N_p , а також сталі Ліфшиця (AL_m, AL_p), які визначають потенціали взаємодії між ЧШ і ЧП, кінетичну енергію наночастинок (E_m, E_p) і швидкість їх руху в системі «оброблювана поверхня – дисперсна система – поверхня притира» (v_m, v_p), необхідні для визначення диференціального (I_{mp}, I_{pm}) і повного (σ_m, σ_p) перерізів розсіювання наночастинок (формули (1)) (табл. 1, 2).

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

Характеристики ЧШ і параметри їх 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 ³	143,0	103,7	427,0	130,0
Концентрація N_m , $10^{14} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$	0,25	0,62	0,40	2,00
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
Диференціальний переріз розсіювання ЧШ на ЧП I_{mp} , Гб·ср ⁻¹	70,7	20,7	102,0	2,3
Повний переріз розсіювання ЧШ на ЧП σ_m , Мб	1,78	0,09	1,28	0,05

Таблиця 2. Характеристики наночастинок зносу полірувального порошку і параметри їх взаємодії з наночастинами шламу

Характеристики ЧП і параметри їх 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 ³	1941	1941	1057	760
Концентрація N_p , $10^{14} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$	0,23	0,53	0,22	0,86
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
Диференціальний переріз розсіювання ЧП на ЧШ I_{pm} , Мб·ср ⁻¹	4,8	1,6	2,1	0,7
Повний переріз розсіювання ЧП на ЧШ σ_p , Мб	0,53	0,37	0,46	0,40

Визначення відстані між поверхнями деталі і притира l_0 , яка залежить від технологічних параметрів процесу полірування і реологічних властивостей дисперсної системи, характерна для кожного з розглянутих випадків полірування міді і алюмінію в дисперсних середовищах DM1 і DM2, здійснювалось у відповідності до формули [10]

$$l_0 = \frac{1}{p_a} [\sigma_d (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) - 2\eta u],$$

де p_a – номінальний тиск притискання оброблюваної деталі до притира; u – відносна швидкість їх переміщення; σ_d – коефіцієнт поверхневого натягу дисперсного середовища; η – коефіцієнт динамічної в'язкості дисперсної системи; θ_1 і θ_2 – кути змочування дисперсною системою поверхні оброблюваної деталі і притира (табл. 3).

Таблиця 3. Реологічні і діелектричні характеристики полірувальних дисперсних систем

Характеристика	Дисперсне середовище			
	DM1	DM2	DM1	DM2
η , мПа·с	3,60	1,47	3,60	1,47
σ_d , мН/м	24	46	24	46
θ_1 , град	3	58	3	56
θ_2 , град	0	45	0	45
l_0 , мкм	1,18	1,40	1,17	1,40
ϵ_1	7,5	13,0	9,3	3,0
H	0,3	9,1	0,3	19,0

Визначення відстані r_0 граничного зближення наночастинок здійснювалось, виходячи з наступних міркувань. Потенціали взаємодії між ЧШ і ЧП $U_m(r)$ (формула (3)) і $U_p(r)$ (формула

(4)) характеризуються тим, що саме за $r = r_0$ характер взаємодії між наночастинками змінюється з «притягання» до «відштовхування» і залежить від знаку $(-/+)$ координатної функції $F(r, a_m, a_p) = \left[\frac{f(a_m, a_p)}{r} + 2 \ln \left(\frac{f(a_m, a_p)}{r} \right) \right]$, яка дорівнює 0 при $r = r_0$. Аналіз

залежностей $F(r, a_m, a_p) = f(r)$ показав, що для розглянутих випадків полірування міді і алюмінію в дисперсних середовищах DM1 і DM2 відстань граничного зближення наночастинок r_0 складає (нм): 6,0; 5,0; 7,0 і 4,5 відповідно.

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 [2, 3, 7, 8], згідно з якою за виконання наближення Борна, коли кінетична енергія частинки, яка налітає, значно більша від середньої енергії взаємодії між частинками, тобто за умов: $E_m/U_m(r) \sim 10^4 - 10^7 \gg 1$ і $E_p/U_p(r) \sim 10^5 - 10^8 \gg 1$, а порядок азимутальних квантових чисел $l_m \approx k_m r_0 \approx (1,1 - 5,1) \cdot 10^5 \gg 1$ і $l_p \approx k_p r_0 \approx (1,1 - 2,5) \cdot 10^7 \gg 1$, розраховано значення диференціальних перерізів розсіювання $I_{mp}(\vartheta=0)$ і $I_{pm}(\vartheta=\pi)$, а також повних перерізів розсіювання наночастинок σ_m і σ_p у

відповідності до формул $\sigma_m = \frac{4\pi}{k_m^2} \sum_l (2l_m + 1) \sin^2 \delta_l$ і $\sigma_p = \frac{4\pi}{k_p^2} \sum_l (2l_p + 1) \sin^2 \delta_l$ (табл. 1, 2)

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

При дослідженні кутових залежностей диференціального перерізу розсіювання ЧШ на ЧП (I_{mp}) і ЧП на ЧШ (I_{pm}) показано, що змінюючись в межах $I_{mp} \in [2,3; 102,0]$ Гб·ср⁻¹ і $I_{pm} \in [0,7; 4,8]$ Мб·ср⁻¹ (1 барн = 10⁻²⁸ м²), вони досягають максимальних значень за кутів розсіювання $\vartheta = 0$ (розсіювання вперед) і $\vartheta = \pi$ (розсіювання назад), перевершуючи їх значення для інших кутів в 10⁵–10⁷ разів, а фазовий зсув хвильових функцій наночастинок $|\eta_l| = 1$, що є характерним для чисто пружного розсіювання. Це означає, що квантові наночастинки, 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), їх швидкості руху (v_m, v_p) і концентрації (N_m, N_p) (табл. 1, 2), а також збільшення розділення між ЧШ, ЧП і дисперсним середовищем за діелектричною проникністю H (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 максимальна величина їхнього відношення, яка складає $(I_{pm}(\pi)/I_{mp}(0)) \approx 300 \gg 1$, свідчить про найбільш вірогідне утворення нальоту з наночастинок зносу полірувального порошку на поверхні притира у випадку полірування алюмінію за допомогою дисперсної системи, в якій в якості дисперсного середовища використовувалась вода (DM2).

Розрахунки повного перерізу розсіювання ЧШ на ЧП (σ_m) і ЧП на ЧШ (σ_p) показали, що вони, змінюючись в межах $\sigma_m \in [0,05; 1,78]$ Мб і $\sigma_p \in [0,37; 0,53]$ Мб (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 . За збільшення концентрації наночастинок N_m і N_p , сталих Ліфшиця (AL_m , AL_p), кінетичної енергії наночастинок (E_m , E_p) і швидкості їх руху (v_m , v_p), а також розділення за діелектричною проникністю H між ЧШ, ЧП і дисперсним середовищем, повні перерізи розсіювання наночастинок σ_m і σ_p зменшуються (табл. 1–3).

Варто зауважити, що для визначення функцій діелектричних проникностей E_{ds} і розділення H між ЧШ, ЧП і дисперсним середовищем, враховано, що статичні діелектричні проникності ε_1 наночастинок шламу, які мають вигляд квантових точок $\text{Cu}_2\text{O-QDs}$, CuO-QDs , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-QDs}$ чи нанокристалів $\text{Al}(\text{OH})_3\text{-NCr}$, принципово відрізняються від діелектричних характеристик метала, що полірується, і складають 7,5; 13,0; 9,3 і 3,0 відповідно ([9], табл. 3), а статична діелектрична проникність ε_2 наночастинок зносу полірувального порошку не відрізняється від діелектричної сталої об'ємного матеріалу (CuV_2O_4).

Крім того, показано, що відношення повних перерізів розсіювання наночастинок σ_m/σ_p суттєво залежить від розділення між ЧШ, ЧП і дисперсним середовищем за діелектричною проникністю H . 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 їх 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, що підтверджено експериментально за мікроскопічними зображеннями поверхні притира.

Таким чином, показано, що під час полірування міді і алюмінію за допомогою дисперсних систем, які складались з мікро- і нанопорошків метаборату міді і дисперсного середовища (гасу або води), визначальним фактором, який 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 ЧШ, розсіяні вперед, і ЧП, розсіяні назад, диференціальні перерізи яких, змінюючись в межах $[2,3\text{--}102,0]$ $\text{Гб}\cdot\text{ср}^{-1}$ і $[0,7\text{--}4,8]$ $\text{Мб}\cdot\text{ср}^{-1}$, суттєво зменшуються за збільшення розділення між ЧШ, ЧП і дисперсним середовищем за діелектричною проникністю. Показано, що повні перерізи розсіювання σ_m і σ_p , змінюючись в межах $[0,05\text{--}1,78]$ Мб і $[0,37\text{--}0,53]$ Мб , також зменшуються за 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 ЧШ – у першому випадку і з ЧП – у 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.

Y.D. Filatov¹, V.I. Sidorko², S.V. Kovalev¹, O.Ya. Yurchyshyn³

¹N :V :Bakul Institut for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine,

²State Enterprise "Engineering and Production Center Alkon" National Academy of Sciences of Ukraine,

³National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky", Ukraine

SCATTERING OF NANOPARTICLES IN SLUDGE AND WEAR DURING POLISHING OF COPPER AND ALUMINUM

The purpose of this work is to study 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 $[2.3-102.0] \text{ Gb}\cdot\text{sr}^{-1}$ and $[0.7-4.8] \text{ Mb}\cdot\text{sr}^{-1}$, 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 σ_m and σ_p , varying within the limits of $[0.05-1.78] \text{ Mb}$ and $[0.37-0.53] \text{ Mb}$, 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.

Key words: polishing, copper, aluminum, copper metaborate, scattering of nanoparticles, deposit, separation by dielectric permittivity.

Література

1. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Філатов О.Ю., Ковальов С.В. Фізичні засади формоутворення прецизійних поверхонь під час механічної обробки неметалевих матеріалів. К.: Наук. думка, 2017. 248 с.
2. Filatov Y.D., Filatov O.Y., Monteil G. et al. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials. *Opt. Eng.* 2011. Vol. 50, N 6. P. 063401–7.
3. Filatov Yu.D., Monteil G., Sidorko V.I. et al. Formation of a deposit on workpiece surface in polishing nonmetallic materials. *Smart Sensors, Actuators, and MEMS VI. Proc. SPIE.* 2013. Vol. 8763, art. 876336.
4. 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, N 5. P. 340–351.
5. Eyring Henry, Lin S. H., Lin S. M. Basic Chemical Kinetics. John Wiley & Sons, 1980. 493 p.
6. Юхновський І.Р. Основи квантової механіки: Навч. посібник. К.: Либідь, 2002. 392 с.
7. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V. et al. Scattering of sludge nanoparticles during the polishing of optical materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, N 5. P. 370–378.
8. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V. et al. Scattering of polishing powder wear nanoparticles on sludge nanoparticles during the polishing of polymer optical materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, N 6. P. 451–459.

9. Філатов Ю.Д., Прихна Т.О., Бояринцев А.Ю., Сідорко В.І., Ковальов С.В. Механізм полірування деталей оптотехніки з алюмінію. *Надтверді матеріали*. 2025. N 5. С. 62–72.
10. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V. et al. 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, N 1. P. 65–73.

Надійшла 13.08.2025

References

1. Filatov, Yu.D., Sidorko, V.I., Filatov, O.Yu., et al. (2017). *Fizychni zasady formoutvorennia pretsyziinykh poverkhon pid chas mekhanichnoi obrobky nemetalevykh materialiv [Physical principles of forming precision surfaces during machining of non-metallic materials]*. Naukova dumka [in Ukrainian].
2. Filatov, Y.D., Filatov, O.Y., Monteil, G. et al. (2011). Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials. *Opt. Eng.*, 50(6), 063401–7.
3. Filatov, Yu.D., Monteil, G., Sidorko, V.I. et al. (2013). Formation of a deposit on workpiece surface in polishing nonmetallic materials. *Smart Sensors, Actuators, and MEMS VI. Proc. SPIE.*, 8763, 876336.
4. Filatov, O.Yu., Sidorko, V.I. (2011). Localization of fragments of a deposit on the workpiece surface in polishing nonmetallic materials. *J. Superhard Mater.*, 33(5), 340–351.
5. Eyring, H., Lin, S. H., Lin, S.M. (1980). *Basic Chemical Kinetics*. John Wiley & Sons.
6. Yukhnovskyi, I.R. (2002). *Osnovy kvantovoi mekhaniki [Fundamentals of quantum mechanics]*. Lybid [in Ukrainian].
7. Filatov, Yu.D., Sidorko, V.I., Kovalev, S.V. et al. (2023). Scattering of sludge nanoparticles during the polishing of optical materials. *J. Superhard Mater.*, 45(5), 370–378.
8. Filatov, Yu.D., Sidorko, V.I., Kovalev, S.V. et al. (2023). Scattering of polishing powder wear nanoparticles on sludge nanoparticles during the polishing of polymer optical materials. *J. Superhard Mater.*, 45(6), 451–459.
9. Filatov, Iu.D., Prikhna, T.O., Boiarintsev, A.Yu. et al. (2025). *Mekhanizm poliruvannia detalei optotekhniki z aliuminiu [Mechanism of polishing of aluminum optical components]*. *Nadtverdi materialy.*, 5, 62–72.
10. Filatov, Yu.D., Sidorko, V.I., Kovalev, S.V. et al. (2021). Effect of the rheological properties of a dispersed system on the polishing indicators of optical glass and glass ceramics. *J. Superhard Mater.*, Vol. 43(1), 65–73.