

Дослідження процесів обробки

УДК 621.623

Ю. Д. Філатов^{1,*}, В. І. Сідорко¹, С. В. Ковальов¹,
А. Ю. Бояринцев², В. А. Ковальов³, О. Я. Юрчишин³

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

²Інститут сцинтиляційних матеріалів

НАН України, м. Харків, Україна

³Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”,

м. Київ, Україна

*filatov2045@gmail.com

Взаємодія наночастинок шламу та зносу полірувального порошку під час полірування полімерних оптичних матеріалів

В результаті дослідження закономірностей взаємодії наночастинок шламу та зносу полірувального порошку під час полірування полістиролу, поліметилметакрилату і поліаллідігліколькарбонату за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків встановлено, що загальна кількість наночастинок шламу, зносу полірувального порошку і притира значно перевищує кількість частинок полірувального порошку, а їхній загальний об'єм значно менше об'єму контактної зони. Показано, що розсіювання наночастинок шламу на наночастинках зносу полірувального порошку відбувається на кути 90° – 160° , а ефективний диференціальний переріз розсіювання наночастинок лежить в межах 0,3–4,4 Тб. Максимальне значення кута розсіювання та мінімальне значення ефективного диференціального перерізу розсіювання, які спостерігають під час полірування полістиролу за допомогою дисперсної системи на основі двооксиду церію, свідчать про найбільшу ймовірність утворення нальоту з наночастинок зносу полірувального порошку на оброблюваній поверхні.

Ключові слова: полімерні матеріали, розсіювання наночастинок шламу і зносу.

ВСТУП

Під час полірування оптичних поверхонь деталей з неметалевих матеріалів, в тому числі оптико-електронних елементів з полімерних оптичних матеріалів, зазвичай застосовують полірувальні дисперсійні системи з неабразивних мікро- та нанопорошків [1–3]. Підвищення продуктивності

© Ю. Д. ФІЛАТОВ, В. І. СІДОРКО, С. В. КОВАЛЬОВ, А. Ю. БОЯРИНЦЕВ, В. А. КОВАЛЬОВ, О. Я. ЮРЧИШИН, 2023

полірування та поліпшення якості оброблених поверхонь деталей з полімерних оптичних матеріалів можливі лише за удосконалення технології їхнього полірування та розробки нових полірувальних дисперсійних систем, які б забезпечували достатню швидкість зняття оброблюваного матеріалу та необхідну шорсткість полірованої поверхні за повної відсутності подряпин, нальоту та інших дефектів [4–6]. Саме тому вивчення механізму взаємодії наночастинок шламу та зносу полірувального порошку і матеріалу притира в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира [7–9] і дослідження закономірностей утворення дефектів на полірованій поверхні та локалізації нальоту із наночастинок шламу і зносу [10–12] є актуальними.

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей взаємодії наночастинок шламу та зносу полірувального порошку під час полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою полірувальних дисперсійних систем з мікро- та нанопорошків.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження закономірностей формування нанопрофілю оброблюваної поверхні здійснювали стосовно полірування плоских поверхонь деталей з оптичних полімерних матеріалів діаметром 60 мм на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притира з пінополіуретану діаметром 100 мм за зусилля притискання деталі до притира 50 Н, частоти обертання притира 90 об/хв, зміщення 30 мм та довжини штриха 80 мм, середньої температури в зоні контакту оброблюваної деталі та притира 298 К. Оброблювали полімерні матеріали, які використовують для виготовлення скінтіляторів з полістиролу (ПС) (густина $\rho_1 = 1,06 \text{ г/см}^3$), контактних та інтраокулярних лінз з поліметилметакрилату (ПММА) ($\rho_1 = 1,18 \text{ г/см}^3$), лінз для окулярів з поліаллідігліколькарбонату (CR-39) ($\rho_1 = 1,32 \text{ г/см}^3$) [13–17]. Полірування здійснювали за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків (ДС1) ($\rho_2 = 3,86 \text{ г/см}^3$) [18–20] та водяної суспензії двооксиду церію (ДС2) ($\rho_2 = 6,62 \text{ г/см}^3$) [1], яку традиційно застосовують для полірування оптичних матеріалів. Підготовку плоских поверхонь оптичних деталей під полірування здійснювали за допомогою традиційних методів тонкого та надтонкого шліфування [1, 5, 10, 21]. Частоти власних коливань молекулярних фрагментів наночастинок полірувального порошку дисперсної системи ДС1, визначені за спектрами ІЧ-поглинання (Фур'є-спектрометр Nicolet 6700), складала: 597, 733, 777, 850, 870, 943, 984, 1085 см^{-1} , а дисперсної системи ДС2 – 465, 521, 848 см^{-1} [22]. Частоти власних коливань молекулярних фрагментів досліджуваних полімерних оптичних матеріалів визначали за відповідними ІЧ спектрами: ПС – 537, 696, 702, 753, 905, 1027 см^{-1} [23, 24], ПММА – 481, 750, 754, 840, 960, 1065 см^{-1} [25–27], CR-39 – 495, 621, 792, 839 см^{-1} [28–31]. Середні розміри частинок полірувального порошку визначали за зображеннями, отриманими за допомогою растрового електронного мікроскопа Zeiss-EVO50 з системою мікроаналізу AZtec, і складала 409 нм для ДС1 і 910 нм для ДС2. Параметри шорсткості полірованих поверхонь визначали методом комп'ютерного моделювання [2, 32, 33] та контролювали за допомогою безконтактного інтерференційного 3D профілографа Micron-alpha. Зняття оброблюваного матеріалу визначали ваговим методом за допомогою аналітичних терезів.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

У відповідності до сучасних уявлень про механізм полірування неметалевих матеріалів зняття оброблюваного матеріалу, зношування частинок полірувального порошку та зношування робочої поверхні притира є наслідком

ферстерівського резонансного перенесення енергії (FRET) [34–38] між ними, яке відбувається в резонаторі, що утворений двома паралельними поверхнями оброблюваного матеріалу і притира [39–41], і проявляється в утворенні наночастинок шламу (ЧШ), наночастинок зносу полірувального порошку (ЧП1, ЧП2) і наночастинок зносу матеріалу притира (ЧЗ). Система оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира є квантовим генератором наночастинок [42–44], який на відміну від FRET лазерів [45–49] генерує наночастинки ЧШ, ЧП1, ЧП2 і ЧЗ, які рухаються в резонаторі і мають відповідно частоти коливань молекулярних фрагментів кластерів на оброблюваній поверхні – ω_1 , на частинках полірувального порошку – ω_2 і ω_3 , на робочій поверхні притира – ω_4 . Швидкість зняття оброблюваного матеріалу, інтенсивність зношування полірувального порошку та притира визначають за потужністю генерації наночастинок і вони залежать від оптичної довжини і добротності резонатора [45, 50].

Під час полірування полімерних оптичних матеріалів наночастинки ЧШ і ЧП1, що утворюються в околі оброблюваної поверхні, рухаються вздовж нормалі до неї і мають найбільш ймовірні розміри a_1 і a_2 , а наночастинки ЧП2 і ЧЗ, які утворюються біля робочої поверхні притира, рухаються в протилежному напрямку і мають найбільш ймовірні розміри a_3 і a_4 . Концентрацію наночастинок ЧШ, ЧП1, ЧП2 і ЧЗ, які утворюються на площі контакту $S_c = 2,83 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ оброблюваної поверхні та притира за одиницю часу, визначають на основі кластерної моделі полірування у відповідності до [1, 7, 51] і мають відповідно значення N_1, N_2, N_3 і N_4 ($\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$) (див. табл. 1). Під час полірування ПС, ПММА і CR-39 за допомогою дисперсних систем ДС1 і ДС2 взаємодія наночастинок відбувається у просторі об'ємом $V_0 = S_c l \approx 12,0\text{--}19,3 \text{ мм}^3$, в якому розташовані частинки полірувального порошку розмірами ~ 400 і 900 нм з об'ємною концентрацією 1,3 і 0,6 % і поверхневою концентрацією $N \approx 10^{11}\text{--}10^{12} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ відповідно (див. табл. 1). Це означає, що загальна кількість наночастинок шламу, зносу полірувального порошку і притира ($N_1 + N_2 + N_3 + N_4 = 1,8\text{--}4,5 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$) перевищує кількість частинок полірувального порошку в 200–4000 разів.

Загальний об'єм всіх наночастинок, що утворюються в процесі полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікрота наночастинок, складає $(6\text{--}140) \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$, що значно менше об'єму V_0 (в 100–3000 разів). За таких умов, при вивченні закономірностей взаємодії наночастинок шламу, зносу полірувального порошку і притира наявністю частинок полірувального порошку в контактній зоні можна знехтувати.

Параметри взаємодії наночастинок ЧШ з ЧП1 і ЧП2 та ЧЗ під час полірування полімерних матеріалів за допомогою дисперсних систем ДС1 і ДС2, а також результати експериментального визначення швидкості зняття оброблюваного матеріалу наведено в табл. 1, 2.

Потенціал міжмолекулярної взаємодії наночастинок ЧШ з наночастинками ЧП1 і ЧП2 та ЧЗ визначали у відповідності до формули [52–54]

$$U_i(x) = -\frac{AL_{li}}{16\pi x} \cdot \frac{a_1 a_i}{a_1 + a_i} - \frac{AL_{li}}{8\pi} \ln \left[\frac{a_1 a_i}{x(a_1 + a_i)} \right],$$

де $i = 1, 2, 3$ – номер наночастинок ЧП1, ЧП2 і ЧЗ; AL_{li} – сталі Ліфшиця [1, 7, 19]; x – відстань між наночастинками.

При взаємодії наночастинок ЧШ з наночастинками ЧП1 і ЧП2 та ЧЗ у відповідності до відомих закономірностей динаміки молекулярних зіткнень і

класичної теорії розсіювання частинок [7, 55] для двочасткових зіткнень кут θ_i розсіювання визначали у відповідності до формули [56]

$$\theta_i = \pi - 2 \int_{R_{\min}}^i \frac{b_i dx}{x^2 \sqrt{1 - \left(\frac{b_i}{x}\right)^2 - \frac{U_i(x)}{E_k}}},$$

де $b_i = \frac{1}{2}(a_1 + a_i)$ – прицільна відстань, R_{\min} – відстань найбільшого зближення наночастинок, E_k – кінетична енергія наночастинок шламу.

Таблиця 1. Параметри взаємодії наночастинок ЧШ з ЧП1 і ЧП2 та ЧЗ під час полірування полімерних оптичних матеріалів

Параметри	Оброблюваний матеріал					
	ПС	ПММА	CR-39	ПС	ПММА	CR-39
	Полірувальна дисперсна система					
	ДС1			ДС2		
$\omega_1 \cdot 10^{-13}, \text{с}^{-1}$ (см^{-1})	13,12 (696)	14,14 (750)	14,93 (792)	14,19 (753)	15,83 (840)	14,93 (792)
$\omega_2 \cdot 10^{-13}, \text{с}^{-1}$ (см^{-1})	13,82 (733)	13,82 (733)	11,25 (597)	15,98 (848)	8,765 (465)	8,765 (465)
$\omega_3 \cdot 10^{-13}, \text{с}^{-1}$ (см^{-1})	13,82 (733)			8,765 (465)		
$\omega_4 \cdot 10^{-13}, \text{с}^{-1}$ (см^{-1})	14,42 (756)			9,425 (500)		
Кінетична енергія наночастинок шламу, еВ	8,8	21,6	4,0	1,0	5,3	4,3
Швидкість наночастинок шламу, м/с	215	196	198	166	50	193
Розміри наночастинок, нм						
ЧШ – a_1	5,2	7,1	3,9	3,0	14,3	4,1
ЧП1 – a_2	11,9	16,7	9,1	3,3	5,3	3,5
ЧП2 – a_3		8,6			3,4	
ЧЗ – a_4		3,7			2,3	
Концентрація наночастинок $\times 10^{-14}, \text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$						
ЧШ – N_1	1,2	0,8	2,0	1,9	0,1	0,9
ЧП1 – N_2	0,6	0,5	0,6	1,1	0,3	0,5
ЧП2 – N_3		1,1			1,0	
ЧЗ – N_4		0,2			0,5	
Концентрація частинок полірувального порошку $N \cdot 10^{-10}, \text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	160,6	153,2	164,1	10,3	9,1	8,1
Довжина резонатора l , мкм	4,5	4,3	4,6	6,8	6,0	5,4

Таблиця 2. Швидкість зняття оброблюваного матеріалу у разі полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою дисперсних систем ДС1 і ДС2

Оброблюваний матеріал	ПС	ПММА	CR-39	ПС	ПММА	CR-39
Дисперсна система	ДС1			ДС2		
Продуктивність полірування, мкм/год	5,0	19,2	0,4	0,03	92,0	0,3
$\times 10^{-13}, \text{м}^3/\text{с}$	39,3	150,7	3,4	0,24	725,0	2,5

Враховуючи, що потенціали міжмолекулярної взаємодії наночастинок ЧШ з ЧП1, ЧП2 і ЧЗ (10^{-4} – 10^{-3} еВ) значно менші, ніж кінетична енергія наночастинок шламу (1–20 еВ), і визначаючи $R_{\min} = \max(a_1, a_i)$, було досліджено залежності кутів розсіювання наночастинок ЧШ на ЧП1, ЧП2 і ЧЗ від розміру a_1 ЧШ, що утворюються під час полірування ПС, ПММА і CR-39 за допомогою дисперсних систем ДС1 і ДС2 (рис. 1), та їхньої залежності від розмірів наночастинок ЧП1 (a_2), ЧП2 (a_3) і ЧЗ (a_4) (рис. 2).

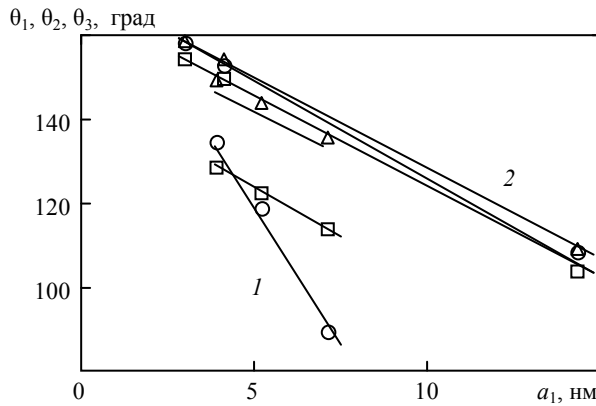


Рис. 1. Залежності кута розсіювання наночастинок ЧШ на наночастинокках ЧП1 і ЧП2 та ЧЗ від розміру ЧШ: 1 – ДС1; 2 – ДС2.

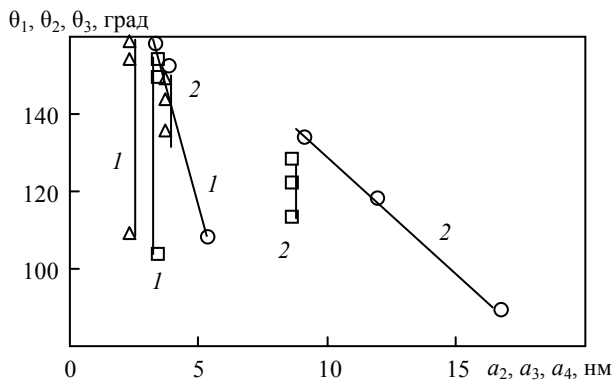


Рис. 2. Залежності кута розсіювання наночастинок ЧШ на наночастинокках ЧП1 і ЧП2 та ЧЗ від розмірів ЧП1 (○), ЧП2 (□) і ЧЗ (Δ): 1 – ДС1; 2 – ДС2.

Аналіз цих залежностей показує, що кути розсіювання наночастинок ЧШ на ЧП1 і ЧП2 та ЧЗ змінюються в межах 90° – 160° і суттєво залежать лише від розмірів наночастинок ЧШ і ЧП1, лінійно зменшуючись за їхнього зростання. Встановлено, що ефективний диференціальний переріз розсіювання наночастинок шламу на наночастинокках зносу полірувального порошку $\sigma = \frac{\pi}{4}(a_1 + a_2)^2$ змінюється в межах від 0,3 до 4,4 Тб ($1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2$) і також залежить від розмірів наночастинок ЧШ і ЧП1 (рис. 3), лінійно зростаючи за їхнього підвищення.

Кількість наночастинок шламу, що розсіюються в тілесний кут $d\Omega = 2\pi \sin \theta d\theta$ за одиницю часу, визначають у відповідності до формули [55] $dN_1 = N_1 N_2 \sigma d\Omega$, що дозволяє представити залежність кількості розсіяних

наночастинок шламу $\frac{dN_1}{d\theta} = 2\pi N_1 N_2 \sigma \sin \theta$ від кута розсіювання (рис. 4), яка показує, що під час полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків найбільша кількість наночастинок шламу розсіюється на кути $\sim 90^\circ$. Залежність густини розподілу наночастинок шламу $\frac{dN_1}{d\Omega} = N_1 N_2 \sigma$ від кута розсіювання на наночастинках ЧПІ (рис. 5), показує, що вона спадає за підвищення кута розсіювання під час полірування полімерних матеріалів за допомогою дисперсної системи ДС1, маючи максимальне значення $\left(\frac{dN_1}{d\Omega}\right)_{\max} = 17,8 \cdot 10^{11} \text{ ср}^{-1}$ за значення кута $\theta = 89,4^\circ$ для ПММА.

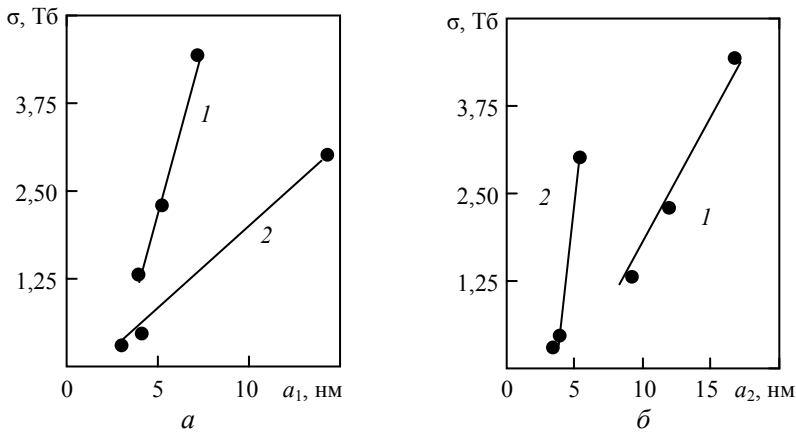


Рис. 3. Залежності ефективного диференціального перерізу розсіювання наночастинок ЧШ на наночастинках ЧПІ від розмірів ЧШ (а) і ЧПІ (б): 1 – ДС1; 2 – ДС2.

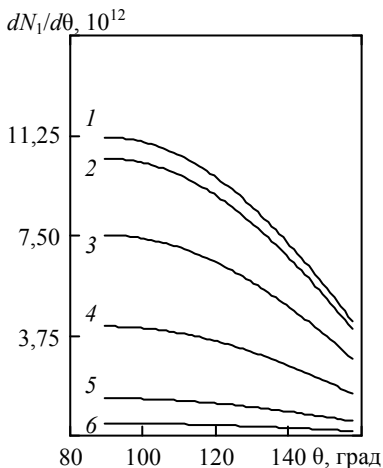


Рис. 4. Кутова залежність кількості розсіяних наночастинок ЧШ $\frac{dN_1}{d\theta}$: ДС1 (1 – ПММА; 2 – ПС; 3 – CR-39) і ДС2 (4 – ПС, 5 – CR-39, 6 – ПММА).

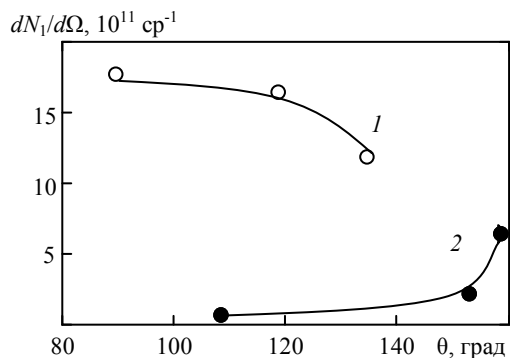


Рис. 5. Залежність густини розподілу $\frac{dN_1}{d\Omega}$ наночастинок ЧШ від кута розсіювання на наночастинках ЧПІ: 1 – ДС1; 2 – ДС2.

Під час полірування полімерних матеріалів за допомогою ДС2 густина розподілу наночастинок шламу зростає за підвищення кута розсіювання, маючи максимальне значення $\left(\frac{dN_1}{d\Omega}\right)_{\max} = 6,5 \cdot 10^{11} \text{ ср}^{-1}$ за значення кута $\theta = 158,3^\circ$ для

ПС. Протилежний характер зміни густини розподілу наночастинок шламу $\frac{dN_1}{d\Omega}$ за зростання кута розсіювання пояснюється тим, що при розсіюванні

ЧШ на ЧП1 під час полірування полімерних оптичних матеріалів в дисперсній системі ДС1 розміри наночастинок ЧП1 більші за менших значень кутів розсіювання, а в дисперсній системі ДС2 розміри наночастинок шламу більші за більших кутів розсіювання (див. табл. 1). Крім того, ефективний диференціальний переріз розсіювання ЧШ на ЧП1, який визначається їхніми розмірами і залежить від потужності генерації ЧШ в підсистемі оброблювана поверхня–дисперсна система, є залежним від швидкості зняття оброблюваного матеріалу під час полірування. Це підтверджується наведеними на рис. 6 лінійно-зростаючими залежностями ефективного диференціального перерізу розсіювання наночастинок шламу від продуктивності полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків.

Варто зауважити, що наночастинки ЧШ і ЧП1 генетично пов'язані між собою, оскільки їхнє утворення відбувається внаслідок FRET від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні і в зворотному напрямку одночасно, і є результатом квантових переходів між різними енергетичними рівнями, які характеризуються різними частотами коливань молекулярних фрагментів кластерів на їхніх поверхнях. Саме тому, ефективні диференціальні перерізи розсіювання ЧП1 на ЧШ, розраховані на основі класичної теорії розсіювання частинок, а також залежності кількості розсіяних наночастинок зносу полірувального порошку $\frac{dN_2}{d\theta}$ і густини їхнього розподілу $\frac{dN_2}{d\Omega}$ від кута розсіювання на наночастинках шламу, співпадають з параметрами розсіювання ЧШ на ЧП1.

В результаті аналізу закономірностей взаємодії наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку в зоні контакту оброблюваної поверхні і притира на основі закономірностей динаміки молекулярних зіткнень і класичної теорії розсіювання частинок встановлено, що під час розсіювання наночастинок шламу на наночастинках зносу полірувального порошку, які утворюються під час полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків, кут розсіювання змінюється від 90° до 160° , ефективний диференціальний переріз розсіювання наночастинок лежить в межах $0,3\text{--}4,4 \text{ Тб}$, а $\frac{dN_{12}}{d\theta} = (0,5\text{--}11,2) \cdot 10^{12}$ і $\frac{dN_{12}}{d\Omega} = (0,7\text{--}17,8) \cdot 10^{11} \text{ ср}^{-1}$.

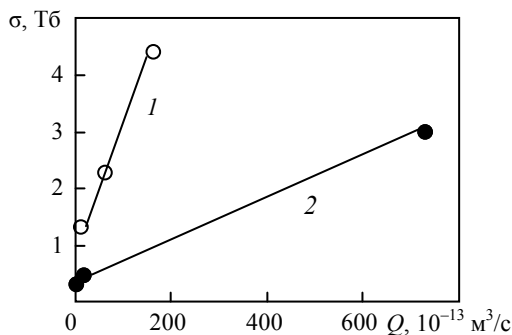


Рис. 6. Залежності ефективного диференціального перерізу розсіювання наночастинок ЧШ від продуктивності полірування полімерних матеріалів: 1 – ДС1; 2 – ДС2.

ВИСНОВКИ

В результаті дослідження закономірностей взаємодії наночастинок шламу та наночастинок зносу полірувального порошку під час полірування ПС, ПММА і CR-39 за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків встановлено, що загальна кількість наночастинок шламу, зносу полірувального порошку і притира $((1,8-4,5) \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1})$ перевищує кількість частинок полірувального порошку більш, ніж у 150 разів, а їхній загальний об'єм значно менше (в 100–3000 разів) об'єму контактної зони.

Аналіз взаємодії наночастинок на основі класичної теорії розсіювання показав, що під час розсіювання наночастинок шламу на наночастинках зносу полірувального порошку кут розсіювання змінюється від 90° до 160° , ефективний диференціальний переріз розсіювання наночастинок лежить в межах

$0,3-4,4 \text{ Тб}$, а густина розподілу наночастинок складає $\frac{dN_{12}}{d\theta} = (0,5-1,2) \cdot 10^{12} \text{ і}$

$$\frac{dN_{12}}{d\Omega} = (0,7-17,8) \cdot 10^{11} \text{ ср}^{-1}.$$

Показано, що максимальне значення кута розсіювання та мінімальне значення ефективного диференціального перерізу розсіювання спостерігали під час полірування полістиролу за допомогою дисперсної системи на основі діоксиду церію, що дозволяє прогнозувати найбільшу ймовірність утворення нальоту з наночастинок зносу полірувального порошку на оброблюваній поверхні.

Yu. D. Filatov¹, V. I. Sidorko¹, S. V. Kovalev¹, A. Y. Boyarintsev²,
V. A. Kovalev³, O. Ya. Yurchyshyn³

¹Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Institute for Scintillation Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

³National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Interaction of sludge particles and wear particles of polishing
powder during polishing of polymeric optical materials

As a result of studying the laws of interaction of sludge particles and polishing powder wear particles during polishing of polystyrene, polymethyl methacrylate and polyallyldiglycarbonate using dispersed systems of micro- and nanopowders, it was found that the total number of sludge nanoparticles, nanoparticles of wear powder, nanoparticles tools, exceeds the number of particles of polishing powder. Their total volume is much smaller than the volume of the contact zone. It is shown that the scattering of sludge particles on the wear particles of the polishing powder occurs at angles of $90^\circ-160^\circ$. The effective differential cross section of nanoparticle scattering is in the range $(0.3-4.4) \text{ Tb}$. The maximum value of the scattering angle and the minimum value of the effective differential scattering cross section, which are observed when polishing polystyrene using a dispersed system based on cerium dioxide, indicate the highest probability of plaque formation from nanoparticles of polishing powder wear on the treated surface.

Keywords: polymeric materials, scattering of sludge particles and wear particles.

1. Filatov Y.D. Polishing of precision surfaces of optoelectronic device elements made of glass, siall, and optical and semiconductor crystals: A review. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 1. P. 30–48.

2. Filatov O.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Filatov Yu.D., Vetrov A.G. Polished surface roughness of optoelectronic components made of monocrystalline materials. *J. Superhard Mater.* 2016. Vol. 38, no. 3. P. 197–206.
3. Filatov O.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Filatov Y.D., Vetrov A.G. Polishing substrates of single crystal silicon carbide and sapphire for optoelectronics. *Funct. Mater.* 2016. Vol. 23, no. 1. P. 104–110.
4. 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. Indust. Inspect. VI. Proc. SPIE.* 2009. Vol. 7389, art. 73892O.
5. Filatov Yu.D., Filatov O.Y., Monteil G, Heisel U., Storchak M.G. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials. *Proc. SPIE. Opt. Eng. Appl.* 2010. Vol. 7786. P. 7861–77869.
6. Filatov Yu.D., Filatov O.Y., Heisel U., Storchak M.G., Monteil G. In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method. *Proc. SPIE. Opt. Micro- Nanometrol.* 2010. Vol. 7718, art. 77181J.
7. 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.
8. Filatov Yu.D., Filatov A.Yu., Syrota O.O., Yashchuk V. P., Monteil G., Heisel U., Storchak M. The influence of tool wear particles scattering in the contact zone on the workpiece surface microprofile formation in polishing quartz. *J. Superhard Mater.* 2010. Vol. 32, no. 6. P. 415–422.
9. Filatov O.Yu., Poperenko L.V., Yashchuk V.P., Sidorko V.I., Heisel W., Storchak M., Wear particles deposit formation on the polishing tool working surface. *J. Superhard Mater.* 2011. Vol. 33, no. 1. P. 44–53.
10. Filatov Y.D., Filatov O.Y., Monteil G., Heisel U., Storchak M.G. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials. *Opt. Eng.* 2011. Vol. 50, iss. 6, art. 063401.
11. Filatov Yu.D., Monteil G., Sidorko V.I., Filatov O.Y. Formation of a deposit on workpiece surface in polishing nonmetallic materials. *Proc. SPIE. Smart Sensors, Actuators, and MEMS VI.* 2013. Vol. 8763, art. 876336.
12. Filatov O.Yu., Sidorko V.I. Localization of fragments of a deposit on the workpiece surface in polishing nonmetallic materials. *J. Superhard Mater.* 2011. Vol. 33, no. 5. P. 340–351.
13. Vishal Mathur, Kananbala Sharma. Thermal response of polystyrene/poly methyl methacrylate (PS/PMMA) polymeric blends. *Heat Mass Transfer.* 2016. Vol. 52. P. 2901–2911.
14. Eissa M.F. Effect of transferred electronic energy density on optical, electrical and structural properties of polyallyl-diglycol carbonate (CR-39) polymer. *J. Macromol. Sci. Part B.* 2014, Vol. 53, no. 3. P. 529–540.
15. Abdul-Kader A.M., Zaki M.F., El-Badry B.A. Modified the optical and electrical properties of CR-39 by gamma ray irradiation. *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* 2014. Vol. 7, no. 3. P. 286–291.
16. Zhang H.Q, Jin Y., Qiul Y. The optical and electrical characteristics of PMMA film prepared by spin coating method. *Global Conf. on Polymer and Composite Materials (PCM 2015), IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.* 2015. Vol. 87. P. 1–5.
17. Ashry A.H., Abou-Leila M., Abdalla A.M. Detection efficiency of alpha particles in CR-39 nuclear track detector: experimental study. *Adv. Sci. Eng. Med.* 2012. Vol. 4, no. 4. P. 341–344.
18. 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.
19. Filatov Yu.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.
20. 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.
21. Filatov Yu.D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 6. P. 427–433.
22. Babitha K.K., Sreedevi A., Priyanka K.P., et al., Structural characterization and optical studies of CeO₂ nanoparticles synthesized by chemical precipitation. *Indian J. Pure Appl. Phys.* 2015. Vol. 53. P. 596–603.

23. Mahasin F. Hadi Al-Kadhemy, Zahraa S. Rasheed, Sanaa R. Salim. Fourier transform infrared spectroscopy for irradiation coumarin doped polystyrene polymer films by alpha ray. *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* 2016. Vol. 9, no. 3. P. 321–331.
24. Qionglin Luo, Shunqin Zeng, You Shu, Zaihui Fu, Hongran Zhaoc, Shengpei Su. A novel green process for tannic acid hydrolysis using an internally sulfonated hollow polystyrene sphere as catalyst. *RSC Adv.* 2018. Vol. 8. P. 17151–17158.
25. Aziz Sh.B., Abdullah O.Gh., Hussein Ah.M., Ahmed H.M. From insulating PMMA polymer to conjugated double bond behavior: green chemistry as a novel approach to fabricate small band gap polymers. *Polymers.* 2017. Vol. 9, no. 626. P. 1–15.
26. Tommasinia F.J., da Cunha Ferreirab L., Tienneb L.G.P., de Oliveira Aguiarb V., da Silvaa M.H.P., da Mota Rochab L.F., de Fatima Vieira Marquesb M. Poly (methyl methacrylate)–SiC nanocomposites prepared through in situ polymerization. *Mater. Res.* 2018, Vol. 21, no. 6, art. 20180086. P. 1–7.
27. Sayyah S.M., El-Shafiey Z.A., Barsoum B.N., Khaliel A.B. Infrared spectroscopic studies of poly(methyl methacrylate) doped with a new sulfur-containing ligand and its cobalt(II) complex during γ -radiolysis. *Appl. Polym. Sci.* 2003, Vol. 91. no. 3. P. 1937–1950.
28. Hussain A. Al-Jobouri, Nasreen R. Jber, Abbas H. Al-Shukrawi and Mazin K. Hamid, Physicochemical properties of crystalline etch products for CR-39 track detector after α -particles irradiation, *Adv. Appl. Sci. Res.* 2013. Vol. 4. no. 4. P. 501–507.
29. Zaki M.F., Elshaer Y.H., Taha D.H. Studying the structural, optical, chemical and electrochemical etching changes of CR-39 for dosimetric applications. *Radiat. Protect. Dosimetry.* 2017. P. 1–8.
30. Jain R.K., Kumar A., Chakraborty R.N., Singh B.K. FTIR spectra of UV induced CR-39 plastic detector. *Proc. DAE-BRNS Symp. on Nucl. Phys.* 2016. Vol. 61. P. 1006–1007.
31. Yamauchi T., Nakai H., Somaki Y., Oda K. Formation of CO₂ gas and OH groups in CR-39 plastics due to gamma-ray and ions irradiation. *Radiat. Meas.* 2003. Vol. 36 (1–6). P. 99–103.
32. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Boyarintsev A.Y., Kovalev S.V., Garachenko V.V., Kovalev V.A. Effect of the spectroscopic parameters of the processed material and polishing powder on the parameters of polishing of optical surfaces. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 1. P. 37–45.
33. 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.
34. Jones G.A., Bradshaw D.S. Resonance energy transfer: from fundamental theory to receipt applications. *Front. Phys.* 2019. Vol. 7, art. 100, P. 1–19.
35. 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.
36. Abeywickrama Ch., Premaratne M., Andrews D.L. Analysis of Förster resonance energy transfer (FRET) in the vicinity of a charged metallic nanopere via nonlocal. *Proc. SPIE, Nanophotonics VIII.* 2020. Vol. 113451B.
37. Cortes Cristian L., Zubin Jacob. Fundamental figures of merit for engineering Förster resonance energy transfer. *Optics Express.* 2018. Vol. 26. no. 15. P. 19371–19387.
38. Gordon F., Elcoroaristizabal S., Ryder A. G. Modelling Förster resonance energy transfer (FRET) using anisotropy resolved multi-dimensional emission spectroscopy (ARMES). *BBA-Gen. Subjects.* 2021. Vol. 1865(2). P. 129770-11.
39. 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.
40. 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.
41. Nabiev I. Strong light-matter coupling for optical switching through the fluorescence and FRET control. *PhysBioSymp* 2019. *J. Physics: Conf. Series.* 2021. Vol. 2058, art. 012001.
42. 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.
43. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Sokhan' S.V., Kovalev S.V., Boyarintsev A.Y., Kovalev V.A., Yurchyshyn O.Ya. Roughness of polished surfaces of optoelectronic components made of polymeric optical materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 1. P. 54–64.

44. Філатов Ю.Д. Нові закономірності полірування поверхонь деталей з неметалевих матеріалів. *Надтверді матеріали*. 2023. № 2. С. 70–82.
45. Zheng L., Zhi M., Chan Y., Khan S.A. Multi-color lasing in chemically open droplet cavities. *Sci. Reports*. 2018. Vol. 8, no. 1. P. 1–8.
46. Chan Qiao, Chunhuan Zhang, Zhonghao Zhou, Jiannian Yao, Yong Sheng Zhao. An optically reconfigurable Förster resonance energy transfer process for broadband switchable organic single-mode microlasers. *CCS. Chemistry*. 2022. Vol. 4, no. 1. P. 250–258.
47. Rivera J.A., Desai K.V., Eden J.G. Fluorophore-gold nanoparticle FRET/plasmonic lasers with the streptavidin-biotin complex as the acceptor–donor linkage. *AIP Adv.* 2021. Vol. 11, P. 125033.
48. Cerdán L., Enciso E., Martín V., Bañuelos J., López-Arbeloa I., Costela A., García-Moreno I. FRET-assisted laser emission in colloidal suspensions of dye-doped latex nanoparticles. *Nat. Photonics*. 2012. Vol. 6, no. 9, P. 621–626.
49. Chen Q., Kiraz A., Fan X. An optofluidic FRET laser using quantum dots as donor. *Frontiers in Biological Detection: From Nanosensors to Systems VIII. Proc. SPIE*. 2016. Vol. 9725. P. 97250I-1.
50. Aas M., Chen Q., Jona's A., Kiraz A., Fan X. Optofluidic FRET Lasers and Their Applications in Novel Photonic Devices and Biochemical Sensing. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*. 2016. Vol. 22, no. 4. P. 7000215.
51. Filatov Yu.D., Sidorko V.I. Statistical approach to wear of nonmetallic workpiece surfaces in polishing. *Sverkhverdye Materialy*. 2005. Vol. 27, no. 1. P. 58–66.
52. Filatov Yu.D., Rogov V.V. Features of a glass-polishing process using a tool with bonded polishing powder. *Opt. Spectrosc.* 1993. Vol. 74, no. 6. P. 727–730.
53. Кац Е.И. Силы Ван-дер-Ваальса, Казимира и Лифшица в мягкой материи. *Успехи физ. наук*. 2015. Т. 185, № 9. С. 964–969.
54. Дерягин Б.В., Абrikосова И.И., Лифшиц Е.М. Молекулярное притяжение конденсированных тел. *Успехи физ. наук*. 2015. Т. 185, № 9. С. 981–1001.
55. Эйринг Г., Лин С.Г., Лин С.М. Основы химической кинетики: Пер. с англ. Москва: Мир, 1983. 528 с.
56. Юхновський І.Р. Основи квантової механіки: Навч. Посібник. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ: Либідь, 2002. 392 с.

Надійшла до редакції 29.06.22

Після доопрацювання 21.07.22

Прийнята до опублікування 25.07.22