

# Дослідження процесів обробки

УДК 621.923.7

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

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

<sup>2</sup>Державне підприємство “Інженерно-виробничий центр  
АЛКОН” НТАК (АЛКОН) НАН України, м. Київ, Україна

<sup>3</sup>Інститут скінтіляційних матеріалів НАН України,  
м. Харків, Україна

<sup>4</sup>Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”,  
м. Київ, Україна

\**filatov2045@gmail.com*

## **Розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу під час полірування полімерних оптичних матеріалів**

*В результаті дослідження закономірностей взаємодії наночастинок зносу полірувального порошку з наночастинками шламу під час полірування полімерних матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків на підставі ab initio розрахунків у відповідності до квантової теорії розсіювання встановлено, що наночастинок зносу полірувального порошку пружно розсіюються на наночастинках шламу виключно на кути  $0^\circ$  і  $180^\circ$  за диференціального перерізу розсіювання, який перевищує його значення для інших кутів в  $10^4$ – $10^5$  разів. Показано, що повний переріз розсіювання наночастинок зносу на наночастинках шламу експоненціально зменшується зі збільшенням їхнього середнього розміру та зростає у разі підвищення концентрації. Під час полірування полімерних матеріалів за допомогою дисперсної системи ДС1 з підвищенням добротності резонатора повний переріз розсіювання наночастинок зносу на наночастинках шламу експоненціально зменшується. У разі використання дисперсної системи ДС2 повний переріз розсіювання наночастинок зносу на наночастинках шламу не залежить від добротності резонатора. Показано, що утворення нальоту з частинок зносу полірувального порошку на поверхні деталі найбільш ймовірно за максимальних значень повного перерізу розсіювання. Експериментально встановлено наявність нальоту у вигляді плівки товщиною 1,5 і 0,3 мкм, яка утворює*

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

*повне або часткове покриття поверхні деталі під час полірування полістиролу і поліаллідігліколькарбонату за допомогою дисперсної системи ДС2.*

**Ключові слова:** полірування, полімерні матеріали, розсіювання наночастинок, добротність резонатора.

## ВСТУП

Під час полірування деталей оптоелектронної техніки і оптичних систем з полімерних оптичних матеріалів використовують полірувальні дисперсні системи з неабразивних мікро- та нанопорошків [1–3]. Підвищення ефективності полірування полімерних матеріалів, які використовують для виготовлення скінтіляторів з полістиролу (ПС), контактних та інтраокулярних лінз з поліметилметакрилату (ПММА), лінз для окулярів з поліаллідігліколькарбонату (CR-39), збільшення швидкості видалення оброблюваного матеріалу у процесі полірування, зменшення шорсткості та поліпшення якості оброблених поверхонь можна досягти лише за рахунок застосування новітніх або удосконалених технологій їхнього полірування, які забезпечують повну відсутність дефектів на полірованій поверхні, в тому числі нальоту з частинок зносу полірувального порошку [4–6]. В зв'язку з цим вивчення закономірностей розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках оброблюваного матеріалу (шламу) в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира [7–9] і дослідження закономірностей утворення нальоту на полірованій поверхні [10–12] є актуальною проблемою.

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу та утворення нальоту під час полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою полірувальних дисперсних систем з мікро- та нанопорошків.

## МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження закономірностей розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу здійснювали стосовно процесу полірування плоских поверхонь деталей з ПС (густина  $\rho_1 = 1,06 \text{ г/см}^3$ ), ПММА ( $\rho_1 = 1,18 \text{ г/см}^3$ ) і CR-39 ( $\rho_1 = 1,32 \text{ г/см}^3$ ) [13–17] діаметром 60 мм на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притира з пінополіуретану діаметром 100 мм із зусиллям притискання деталі до притира 50 Н, частоті обертання притира 90 об/хв, зміщенні 30 мм та довжині штриха 80 мм, середній температурі в зоні контакту оброблюваної деталі та притира 298 К. 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], що традиційно застосовують для полірування оптичних матеріалів. Підготовку плоских поверхонь оптичних деталей під полірування здійснювали за допомогою методів тонкого та надтонкого шліфування [1, 5, 10, 21]. Частоти власних коливань молекулярних фрагментів частинок полірувального порошку дисперсної системи ДС1, визначені за спектрами ІЧ поглинання (Фур'є-спектрометр Nicolet 6700), склали 597, 733, 777, 850, 870, 943, 984,  $1085 \text{ см}^{-1}$ , а дисперсної системи ДС2 – 465, 521,  $848 \text{ см}^{-1}$  [22]. Досліджувані полімерні оптичні матеріали характеризувались частотами власних коливань молекулярних фрагментів, які визначали за відповідними ІЧ-спектрами: ПС – 537, 696, 753, 905,  $1027 \text{ см}^{-1}$  [23, 24], ПММА – 481, 750, 840, 960,  $1065 \text{ см}^{-1}$  [25–27], CR-39 – 495, 621, 792,  $839 \text{ см}^{-1}$  [28–31]. Стан полірованих поверхонь досліджували за допомогою оптичного мікроскопа

ЛОМО Метам Р-1, оснащеного камерою Vision STD-Res Series. Наявність нальоту з частинок зносу полірувального порошку на оброблених поверхнях фіксували за зміною маси деталі під час полірування за допомогою аналітичних терезів мод. ВЛР-200.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

У відповідності до сучасних уявлень про механізм полірування неметалевих матеріалів [32–35] зняття оброблюваного матеріалу та зношування частинок полірувального порошку відбувається внаслідок ферстерівського резонансного перенесення енергії (FRET) [36–40] між ними та утворення і видалення наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку, які генеруються в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира і рухаються вздовж вісі оптичного резонатора, який утворений двома паралельними поверхнями оброблюваного матеріалу і притира. Наночастинки шламу і наночастинки зносу полірувального порошку є квантовими частинками, які характеризуються довжинами хвилі  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , кінетичною енергією  $E$  і швидкістю  $v$ , а також розмірами  $a$  і концентраціями  $N$  (табл. 1).

**Таблиця 1. Характеристики наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку, які утворюються під час полірування полімерних оптичних матеріалів**

Характеристика наночастинок	Оброблюваний матеріал					
	ПС	ПММА	CR-39	ПС	ПММА	CR-39
	Полірувальна дисперсна система					
	ДС1			ДС2		
$\lambda_1$ , мкм	14,37	13,33	12,63	13,28	11,91	12,62
$\lambda_2$ , мкм	13,64	13,64	16,76	11,80	21,51	21,51
$\lambda_3$ , мкм		13,64			21,51	
	Кінетична енергія наночастинок, еВ					
$E_2$ (ЧП1)	30,8	43,7	9,0	5,8	12,1	2,0
$E_3$ (ЧП2)		4,38			8,13	
	Швидкість руху наночастинок, м/с					
$v_2$ (ЧП1)	60	43	49	136	98	74
$v_3$ (ЧП2)		4,5			8,4	
	Розміри наночастинок, нм					
$a_1$ (ЧШ)	5,2	7,1	3,9	3,0	14,3	4,1
$a_2$ (ЧП1)	11,9	16,7	9,1	3,3	5,3	3,8
$a_3$ (ЧП2)		8,6			3,4	
	Концентрація наночастинок, $10^{14} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$					
$N_2$ (ЧП1)	0,6	0,5	0,6	1,1	0,3	0,5
$N_3$ (ЧП2)		1,1			1,0	

Примітка. ЧШ – наночастинки шламу; ЧП1 і ЧП2 – наночастинки зносу полірувального порошку.

Під час взаємодії наночастинок зносу полірувального порошку з наночастинками шламу їхня хвильова функція є суперпозицією падаючої та розсіяної хвиль, яка задовольняє рівнянню Шредінгера і має вигляд

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

де  $k = \frac{mV}{\hbar}$  – хвильове число;  $m$  – маса частинки;  $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – стала

Планка;  $\vartheta$  – кут розсіювання;  $f(\vartheta)$  – амплітуда розсіяної хвилі, а диференціальний переріз розсіювання визначається у відповідності до формули

$$I(\vartheta) = |f(\vartheta)|^2 [41].$$

Амплітуда розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на

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

рез поліноми Лежандра  $P_l(\cos \vartheta)$  і залежить від азимутального квантового числа  $l$ , що визначає їхній кутовий момент, від числа  $\eta_l = \exp(2i\delta_l)$ , що характеризує процес пружного розсіювання частинок, і фазового зсуву хвильових функцій

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

де  $r$  – відстань між наночастинками;  $l_0$  – довжина резонатора;  $r_0 = \frac{a_1 + a_i}{2}$  – від-

стань граничного зближення наночастинок ЧП1 ( $i = 2$ ) і ЧП2 ( $i = 3$ ) [40–42].

Потенціал взаємодії між наночастинками зносу полірувального порошку і наночастинками шламу визначали у відповідності до формули [43, 44]

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

де  $AL_{li} = 2\pi c \hbar E_{ds} \frac{|\lambda_i - \lambda_1|}{\lambda_i \lambda_1}$  – сталі Лівшиця;  $c$  – швидкість світла;  $E_{ds}$  – функція

діелектричної проникності [35, 41, 42].

За виконання умови, коли кінетична енергія частинки, яка налітає, значно більша від середньої енергії взаємодії між частинками, тобто за умови

$\frac{E_i}{U_i(r_0)} \gg 1$  (наближення Борна [41]), а також за виконання нерівності

$\left| \frac{mU_i(r_0)(l_0 - r_0)}{\hbar^2} \right| \gg 1$ , коли порядок азимутального квантового числа  $l \gg 1$ , із

застосуванням методу парціальних хвиль можна визначити повний переріз розсіювання наночастинок за формулою [5, 9–11, 41, 44]

$$\sigma = \frac{4\pi}{k^2} \sum_l (2l+1) \sin^2 \delta_l = \frac{4\pi}{k} \text{Im}[f(0)].$$

Результати розрахунку сталих Ліфшиця, які визначають потенціали взаємодії між наночастинками, диференціального і повного перерізів розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу, параметрів оптичного резонатора, а також дані розрахунку інтенсивності зношування полірувального порошку під час полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків наведено в табл. 2.

**Таблиця 2. Параметри розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира**

Параметри взаємодії наночастинок	Оброблюваний матеріал					
	ПС	ПММА	CR-39	ПС	ПММА	CR-39
	Полірувальна дисперсна система					
	ДС1			ДС2		
Сталі Ліфшиця,						
$AL_{21}$ , меВ	3,7	1,6	16,0	6,0	22,8	16,6
$AL_{31}$ , меВ	3,7	1,6	4,9	19,2	24,1	18,1
Диференціальний переріз розсіювання наночастинок						
$I_{21}$ , Гб·ср <sup>-1</sup>	1,5	2,7	78,8	718,6	47,8	928,9
$I_{31}$ , Гб·ср <sup>-1</sup>	2,0	0,2	0,6	328,2	0,9	120,1
Повний переріз розсіювання наночастинок						
$\sigma_{21}$ , Мб	0,01	0,02	0,6	6,7	0,7	3,5
$\sigma_{31}$ , Мб	0,4	0,03	0,6	96,9	1,0	28,3
Довжина резонатора						
$l_0$ , мкм	4,5	4,1	4,6	6,9	6,0	5,4
Добротність резонатора						
$q_2$	37,4	43,2	24,5	14,8	29,0	15,5
$q_3$	19,7	43,2	12,5	1,6	1,2	1,4
Інтенсивність зношування полірувального порошку						
$I_{t2}$ , 10 <sup>-13</sup> м <sup>3</sup> /с	1640	7195	217	2	146	53
$I_{t3}$ , 10 <sup>-13</sup> м <sup>3</sup> /с		557			39	

На підставі *ab initio* розрахунків показано, що наночастинок зносу полірувального порошку ЧП1 і ЧП2 пружно розсіюються на наночастинках шламу, оскільки фазовий зсув їхніх хвильових функцій  $|\eta_l| = 1$ . Визначені залежності диференціального перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку ЧП1 ( $I_{21}$ ) і ЧП2 ( $I_{31}$ ) на наночастинках шламу від кута розсіювання показали, що залежності  $I_{21} = f(\vartheta)$  (рис. 1) розташовані між кривими 1 (ПС–ДС1) і 2 (CR-39–ДС2) так, що максимальні значення досягаються при кутах розсіювання  $\vartheta = 0^\circ$  (розсіювання вперед) і  $\vartheta = 180^\circ$  (розсіювання назад), за яких максимальне значення диференціального перерізу розсіювання (табл. 2) перевищує його значення для інших кутів в  $(2,8\text{--}4,9) \cdot 10^5$  разів, а залежності  $I_{31} = f(\vartheta)$  (рис. 2), які розташовані між кривими 1 (ПММА–ДС1) і 2 (ПС–ДС2), характеризуються максимумами за кутів розсіювання  $\vartheta = 0^\circ$  і  $180^\circ$  (табл. 2), що перевершують його значення для інших кутів в  $(2,0\text{--}3,5) \cdot 10^4$  разів. Це означає, що квантові наночастинок зносу полірувального порошку, які генеруються в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира, рухаючись вздовж вісі резонатора, розсіюються на наночастинках шламу тільки вперед і назад.

В результаті визначення повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку ЧП1 ( $\sigma_{21}$ ) і ЧП2 ( $\sigma_{31}$ ) на наночастинках шламу (табл. 2) розраховано повний переріз розсіювання частинок зносу полірува-

льного порошку  $\sigma_2 = (\sigma_{21}N_2 + \sigma_{31}N_3)/(N_2 + N_3)$ , який суттєво залежить від їхнього середнього розміру  $a_m = (a_2N_2 + a_3N_3)/(N_2 + N_3)$ . Показано що значення повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинок шламу  $\sigma_2$  змінюється на три порядки і має максимальні значення 49,7 і 20,1 Мб (1 барн =  $10^{-28}$  м<sup>2</sup>), характерні для полірування ПС і CR-39 за допомогою дисперсної системи ДС2, а також мінімальні значення 0,03 і 0,3 Мб, характерні для полірування ПММА і ПС за допомогою дисперсної системи ДС1.

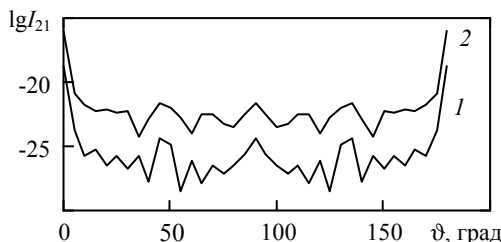


Рис. 1. Залежність диференціального перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку ЧП1 на наночастинок шламу від кута розсіювання: ПС–ДС1 (1), CR-39–ДС2 (2).

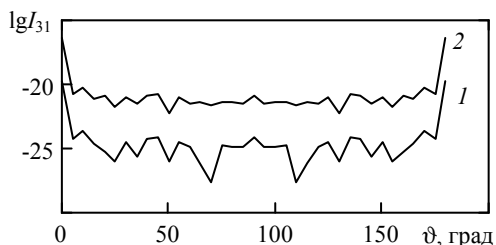


Рис. 2. Залежність диференціального перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку ЧП2 на наночастинок шламу від кута розсіювання: ПММА–ДС1 (1), ПС–ДС2 (2).

Аналіз залежностей  $\ln(\sigma_2) = f(a_m)$ , наведених на рис. 3 в напівлогарифмічному масштабі, показує, що за збільшення середнього розміру наночастинок зносу полірувального порошку повний переріз їхнього розсіювання на наночастинок шламу експоненціально зменшується відповідно до функції, що має вигляд  $\sigma_2 = \exp[\alpha_1 a_m - \beta_1]$  (де  $\alpha_1 = \begin{cases} -1,3 \\ -8,4 \end{cases} \cdot 10^9 \text{ м}^{-1}$ ,  $\beta_1 = \begin{cases} 39,4 \\ 18,3 \end{cases}$  – коефіцієн-

ти, які визначено за методом найменших квадратів, похибка апроксимації менше 1 %).

На рис. 4 наведено залежності повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинок шламу від концентрації наночастинок зносу  $N_{20} = N_2 + N_3$  (табл. 1), характерні для полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою дисперсних систем ДС1 і ДС2. Вони показують, що повний переріз розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинок шламу збільшується зі збільшенням концентрації наночастинок зносу.

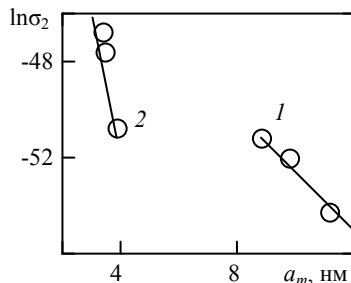


Рис. 3. Залежність повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинок шламу від їхнього середнього розміру: ДС1 (1), ДС2 (2).

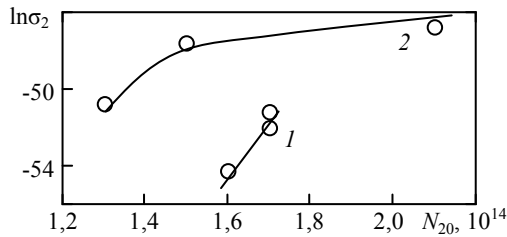


Рис. 4. Залежність повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинок шламу від їхньої концентрації: ДС1 (1), ДС2 (2).

На рис. 5 в напівлогарифмічному масштабі наведено залежності повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинок шламу від результуючої добротності резонатора, яку визначають за формулою  $q_m^{-1} = q_2^{-1} + q_3^{-1}$  (табл. 2). Вони показують, що під час полірування полімерних матеріалів за допомогою дисперсної системи ДС1 (див. рис. 5, пряма 1) наночастинок зносу полірувального порошку розсіюються на наночастинок шламу за повного перерізу розсіювання, який експоненціально зменшується у разі підвищення добротності резонатора у відповідності до функції, яка має вигляд  $\sigma_2 = \exp(\alpha_2 q_m - \beta_2)$ , де  $\alpha_2 = 0,2$ ,  $\beta_2 = 49,1$  – коефіцієнти, які визначено за методом найменших квадратів, похибка апроксимації менша 1 %. Під час полірування ПС, ПММА і CR-39 за допомогою дисперсної системи ДС2 повний переріз розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинок шламу практично не залежить від добротності резонатора (див. рис. 5, пряма 2) і характеризується значно більшим значенням.

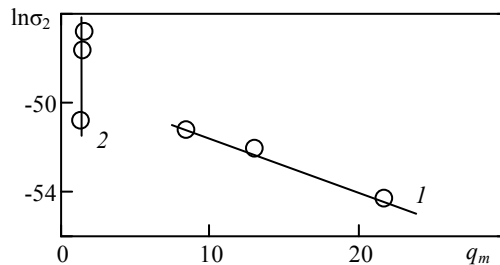


Рис. 5. Залежність повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинок шламу від добротності резонатора: ДС1 (1), ДС2 (2).

В зв'язку з тим, що зі збільшенням добротності резонатора відбувається підвищення швидкості зняття оброблюваного матеріалу та інтенсивності зношування полірувального порошку [38, 42], було вивчено вплив інтенсивності зношування полірувального порошку  $I_p = It_2 + It_3$  (табл. 2) на значення повного перерізу розсіювання наночастинок ЧП1 і ЧП2 на наночастинок шламу. На рис. 6 в логарифмічному масштабі наведено залежність повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинок шламу від інтенсивності його зношування під час полірування полістиролу, поліметилметакрилату і поліалілідігліколькарбонату за допомогою дисперсних систем ДС1 і ДС2, яка може бути апроксимована лінійною функцією

$$\ln(\sigma_2) = \alpha_3 \ln I_p + \beta_3,$$

де  $\alpha_3 = -1,3$ ,  $\beta_3 = -81,8$  – коефіцієнти, які визначено за методом найменших квадратів, похибка апроксимації – 2 %. Ця залежність разом з аналогічною залежністю повного перерізу розсіювання наночастинок шламу  $\sigma_1$  на наноча-

стинках зносу полірувального порошку і притира від швидкості зняття  $Q$  оброблюваного матеріалу ( $\ln(\sigma_1) = -0,67\ln Q - 67,18$  [41]) свідчить, що в разі зменшення добротності резонатора інтенсивність зношування полірувального порошку та оброблюваної поверхні зменшуються, а повний переріз розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу зростає вдвічі ( $1,3/0,67 \approx 2$ ) швидше, ніж повний переріз розсіювання наночастинок шламу на наночастинках зносу полірувального порошку і притира, що призводить до більш ймовірного утворення нальоту з частинок зносу полірувального порошку на поверхні деталі, що полірують.

В результаті вивчення закономірностей розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу встановлено, що чим більші розміри наночастинок зносу, чим більша добротність резонатора і чим менша їхня концентрація, тим менше вони розсіюються під час руху в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира. Найменші значення повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу (0,03 і 0,3 Мб) спостерігають під час полірування поліметилметакрилату і полістиролу за допомогою дисперсної системи ДС1 в резонаторі з добротністю 21,6 і 12,9, а найбільші значення (49,7 і 20,1 Мб) характерні для полірування полістиролу і поліалілідігліколькарбонату CR-39 за допомогою дисперсної системи ДС2 в резонаторі з добротністю 1,5 і 1,3. Експериментально показано, що під час полірування деталі з полістиролу діаметром 60 мм за допомогою дисперсної системи ДС2 (густина двооксиду церію –  $6,62 \text{ г/см}^3$ ) на оброблюваній поверхні спостерігали наліт з частинок зносу полірувального порошку, масу якого визначали як збільшення маси деталі після полірування протягом 30 хв за допомогою аналітичних терезів мод. ВЛР-200 і вона досягала 28 мг. Це означає, що за умови рівномірного покриття нальотом поверхні деталі його середня товщина складала 1,5 мкм. Встановлено, що збільшення маси деталі після полірування спостерігали також у випадку полірування поліалілідігліколькарбонату за допомогою дисперсної системи ДС2, коли маса нальоту досягала 6 мг, що дозволило визначити його середню товщину, яка складала  $\sim 0,3$  мкм.

## ВИСНОВКИ

В результаті дослідження закономірностей взаємодії наночастинок зносу полірувального порошку з наночастинками шламу під час полірування ПС, ПММА і CR-39 за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків на підставі *ab initio* розрахунків у відповідності до квантової теорії розсіювання встановлено, що наночастинок зносу полірувального порошку пружно розсіюються на наночастинках шламу виключно на кути  $0^\circ$  і  $180^\circ$  за диференціального перерізу розсіювання, який перевищує його значення для інших кутів в  $10^4$ – $10^5$  разів.

Показано, що повний переріз розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу, що змінюється в широких (0,03–49,7 Мб) межах, експоненціально зменшується зі збільшенням їхнього середнього розміру та зростає з підвищенням концентрації. З підвищенням добротності резонатора, який утворюється поверхнями оброблюваного матеріалу і притира,

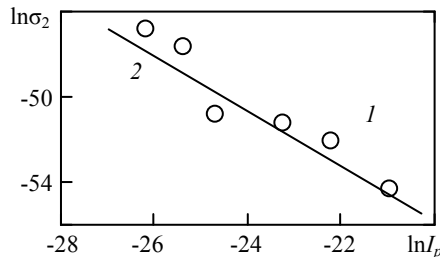


Рис. 6. Залежність повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу від інтенсивності його зношування під час полімерних матеріалів ДС1 (1), ДС2 (2).



від 8,3 до 21,6 повний переріз розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинок шламу експоненціально зменшується з 0,6 до 0,03 Мб під час полірування полімерних матеріалів за допомогою дисперсної системи ДС1. У разі полірування полістиролу, ПММА і CR-39 за допомогою дисперсної системи ДС2 повний переріз розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинок шламу змінюється від 0,9 до 49,7 Мб і практично не залежить від добротності резонатора.

Показано, що утворення нальоту з частинок зносу полірувального порошку на поверхні деталі, що полірують, є найбільш ймовірним за максимальних значень повного перерізу їхнього розсіювання на наночастинок шламу. Експериментально підтверджено, що під час полірування ПС і CR-39 за допомогою дисперсної системи ДС2 дійсно спостерігали наліт у вигляді плівки товщиною 1,5 і 0,3 мкм відповідно, яка утворює повне або часткове покриття поверхні деталі.

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

<sup>1</sup>Bakul Institute for Superhard Materials,  
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>State Enterprise “Engineering and Production Center ALKON”,  
Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup>Institute for Scintillation Materials,  
National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

<sup>4</sup>National Technical University of Ukraine  
“Kyiv Polytechnic Institute Igor Sikorsky”, Kyiv, Ukraine

Scattering of wear nanoparticles of polishing powder on sludge  
nanoparticles during polishing of polymer optics materials

*As a result of the study of the regularities of the interaction of wear nanoparticles of polishing powder with sludge nanoparticles during polishing of polymeric materials using dispersed systems of micro- and nanopowders, based on ab initio calculations in accordance with the quantum theory of scattering, it was established that wear nanoparticles of polishing powder elastically scattering on sludge nanoparticles exclusively at angles 0° and 180° with a differential scattering cross section that exceeds its value for other angles by 10<sup>4</sup>–10<sup>5</sup> times. It is shown that the total scattering cross section of wear nanoparticles on sludge nanoparticles decreases exponentially with an increase in their average size and increases with an increase in concentration. During the polishing of polymer materials with the help of the dispersion system DS1, the total scattering cross section of wear nanoparticles on sludge nanoparticles decreases exponentially due to the increase in the Q-factor of the resonator. When using the DS2 dispersion system, the total scattering cross section of wear nanoparticles on sludge nanoparticles does not depend on the Q factor of the resonator. It is shown that the formation of a deposit from the wear particles of the polishing powder on the surface of the part is most likely at the maximum values of the total scattering cross section. The presence of plaque in the form of a film with a thickness of 1.5 μm and 0.3 μm, which forms a complete or partial coating of the surface of the part during polishing of polystyrene and polyallyldiglycolcarbonate using the DS2 dispersion system, was experimentally established.*

**Keywords:** polishing, polymeric materials, scattering of nanoparticles, Q factor of the resonator.

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. *Functional 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. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection 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. Optical Eng. Appl.* 2010. Vol. 7786. P. 77861–77869.
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. P. 063401–7.
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. Macromolecular Science Part B.* 2014, Vol. 53, no. 3. P. 529–540.
15. Abdul-Kader A.M., Zaki M.F., Basma A.El-Badry, Modified the optical and electrical properties of CR-39 by gamma ray irradiation. *J. Radiation 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 Y.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 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.
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 CeO<sub>2</sub> 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. Sciences.* 2016. Vol. 9, no. 3. P. 321–331.
24. Luo Q., Zeng S., Shu Y., Fu Z., Zhao H., Su S. 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 Aguiar V., da Silva 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. e20180086.
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  $\gamma$ -radiolysis. *Appl. Polym. Sci*. 2003. Vol. 91, no. 3. P. 1937–1950.
28. Hussain A.Al-J., Nasreen R.Jb., Abbas H.Al-Sh, Mazin K.H. Physiochemical properties of crystalline etch products for CR-39 track detector after  $\alpha$ -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. Prot. Dosim*. 2017. Vol. 177, no. 3. P. 272–279.
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. Nucl. Phys*. 2016. Vol. 61. P. 1006–1007.
31. Yamauchi T., Nakai H., Somaki Y., Oda K. Formation of CO<sub>2</sub> 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 Y.D. Mechanism of surface microrelief formation during glass treatment. *Sverkhtverdye Materialy*. 1991, no. 5. P. 61–65.
33. Prikhna T.A., Starostina A.V., Lizkendorf D., Petrusha I.A., Ivakhnenko S.A., Borimskii A.I., Filatov Yu.D., Loshak M.G., Serga M.A., Tkach V.N., Turkevich V.Z., Sverdun V.B., Klimenko S.A., Turkevich D.V., Dub S.N., Basyuk T.V., Karpets M.V., Moshchil V.E., Kozyrev A.V., Il' nitskaya G.D., Kovylyaev V.V., Cabiosh T., Chartier P. Studies of the oxidation stability, mechanical characteristics of materials based on MAX phases of the Ti–Al–(C,N) system, and of the possibility of their use as tool bonds and materials for polishing. *J. Superhard Mater*. 2014. Vol. 36, no. 1. P. 9–17.
34. Filatov Yu.D., Sidorko V.I. Statistical approach to wear of nonmetallic workpiece surfaces in polishing. *Sverkhtverdye Materialy*. 2005. no. 1. P. 58–66.
35. Filatov Yu.D. Polishing of aluminosilicate materials with tools with bound polishing powder. *Sverkhtverdye Materialy*. 2001. no. 3. P. 36–49.
36. 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.
37. Nabiev I. Strong light-matter coupling for optical switching through the fluorescence and FRET control. *PhysBioSymp* 2019. *J. Phys.: Conf. Series*. 2021. Vol. 2058, art. 012001.
38. 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.
39. 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.
40. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Boyarintsev A.Yu., Kovalev V.A., Yurchyshyn O.Ya. 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.
41. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Ковальов С.В., Бояринцев А.Ю., Ковальов В.А., Юрчишин О.Я. Розсіювання наночастинок шламу під час полірування полімерних оптичних матеріалів. *Надтверді матеріали*. 2023. № 5. С. 62–73.
42. 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.
43. Filatov Yu.D., Rogov V.V. Features of a glass-polishing process using a tool with bonded polishing powder. *Optics Spectroscopy*. 1993. Vol. 74, no. 6. P. 727–730.
44. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Філатов О.Ю., Ковальов С.В. Фізичні засади формування прецизійних поверхонь під час механічної обробки неметалевих матеріалів. Монограф. Київ: Наук. думка, 2017. 248 с.

Надійшла до редакції 13.09.22

Після доопрацювання 28.09.22

Прийнята до опублікування 03.11.22