

# 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 сцинтиляційних 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](mailto:filatov2045@gmail.com)

## **Утворення і локалізація нальоту з наночастинок зносу полірувального порошку на оброблюваній поверхні під час полірування полімерних оптичних матеріалів**

*В результаті дослідження закономірностей утворення і локалізації нальоту з наночастинок зносу полірувального порошку на оброблюваній поверхні під час полірування полімерних матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків встановлено, що повний переріз розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу нелінійно зростає за підвищення середньої швидкості їхнього руху, екстремально залежить від добутку спектрального розділення на розділення за діелектричною проникністю між оброблюваним матеріалом, полірувальним порошком і дисперсною системою і експоненціально збільшується за підвищення розладнання резонатора. Показано, що утворення нальоту на оброблюваній поверхні є найбільш ймовірним під час полірування полістиролу за допомогою мікропорошку двооксиду церію у разі досягнення найбільшого значення повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу 49,7 Мб. Експериментально підтверджено, що локалізація нальоту з наночастинок зносу полірувального порошку на оброблюваній поверхні відбувається у відповідності до функції розподілу повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу за коловими зонами, яка добре узгоджується з результатами експериментів за відхилення 12,5 %. Експериментально*

© Ю. Д. ФІЛАТОВ, В. І. СІДОРКО, С. В. КОВАЛЬОВ, А. Ю. БОЯРИНЦЕВ, В. А. КОВАЛЬОВ, О. Я. ЮРЧИШИН, 2024

*визначено середню товщину фрагментів нальоту з наночастинок зносу полірувального порошку, що утворюють повне або часткове покриття поверхні деталі, яка складає 1,1–1,5 мкм.*

**Ключові слова:** полірування, полімерні матеріали, розсіювання наночастинок, фрагменти нальоту.

## ВСТУП

Для полірування деталей електронної техніки і оптичних систем з неметалевих матеріалів зазвичай застосовують інструменти зі зв'язаним полірувальним порошком або полірувальні дисперсні системи з неабразивних мікро- та нанопорошків [1–5]. Ефективність використання суспензій і колоїдних розчинів полірувальних порошків визначається шорсткістю оброблених поверхонь [6–10], до якої у відповідності до міжнародних стандартів висувають жорсткі вимоги, за достатньої продуктивності полірування оброблюваного матеріалу [2, 3, 8, 11, 12]. Підвищення ефективності полірування полімерних оптичних матеріалів, які використовують для виготовлення сцинтиляторів з полістиролу, контактних та інтраокулярних лінз з поліметилметакрилату, а також лінз для окулярів з поліаллідігліколькарбонату, можна досягти лише за рахунок застосування новітніх полірувальних дисперсних систем, які забезпечують не тільки збільшення продуктивності полірування та зменшення шорсткості полірованих поверхонь, а й виключають можливість дефектоутворення, що виникає внаслідок утворення нальоту з частинок шламу та частинок зносу полірувального порошку на оброблюваній поверхні і поверхні інструменту (притира) [2, 13–20]. У зв'язку з цим вивчення закономірностей утворення нальоту з частинок зносу полірувального порошку і локалізації його фрагментів на полірованій поверхні, які відбуваються внаслідок розсіювання наночастинок зносу на наночастинках шламу в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира є актуальною проблемою.

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу та утворення нальоту і локалізації його фрагментів на полірованій поверхні під час полірування полімерних матеріалів.

## МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження закономірностей розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу, а також утворення і локалізації нальоту на полірованій поверхні здійснювали під час полірування плоских поверхонь деталей з полістиролу (ПС), поліметилметакрилату (ПММА) і поліаллідігліколькарбонату (CR-39) [21–25] 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. Полірування здійснювали за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків (ДС1, густина  $\rho_2 = 3,86 \text{ г/см}^3$ ) та водяної суспензії двооксиду церію (ДС2, густина  $\rho_2 = 6,26 \text{ г/см}^3$ ) [1, 2, 5, 8], які застосовували для полірування оптичних матеріалів. Підготовку плоских поверхонь оптичних деталей під полірування здійснювали за допомогою методів тонкого та надтонкого шліфування [1, 13, 17, 26–28]. Частоти власних коливань молекулярних фрагментів частинок полірувального порошку дисперсної системи ДС1, які визначали за спектрами ІЧ поглинання (Фур'є-спектрометр Nicolet 6700), складали 597, 733, 777, 850,

870, 943, 984, 1085  $\text{cm}^{-1}$ . Частоти власних коливань молекулярних фрагментів частинок полірувального порошку дисперсної системи ДС2 склали 465, 521, 848  $\text{cm}^{-1}$  [29]. Досліджувані полімерні оптичні матеріали мали частоти власних коливань молекулярних фрагментів: ПС – 537, 696, 753, 905, 1027  $\text{cm}^{-1}$  [30, 31]; ПММА – 481, 750, 840, 960, 1065  $\text{cm}^{-1}$  [32–34]; CR-39 – 495, 621, 792, 839  $\text{cm}^{-1}$  [35–38]. Фрагменти нальоту на полірованих поверхнях досліджували за допомогою оптичного мікроскопа ЛОМО Метап Р-1, оснащеного камерою Vision STD-Res Series. Розміри, форму і місце локалізації нальоту на полірованих поверхнях досліджували за допомогою аналітичних терезів мод. ВЛР-200 та вимірювальної скоби, оснащеної індикатором годинникового типу (1 мкм). Відносну товщину нальоту вимірювали на поверхнях деталей з полістиролу після полірування дисперсною системою ДС2 в напрямку від центра до периферії і усереднювали за вісьмома трасами сканування.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

У відповідності до сучасних уявлень про механізм полірування полімерних оптичних матеріалів швидкість зняття оброблюваного матеріалу [39] і шорсткість полірованих поверхонь [40] суттєво залежать від енергії міжмолекулярної взаємодії частинок полірувального порошку з оброблюваною поверхнею [41] та структури оброблюваного матеріалу [42], а також від спектроскопічних параметрів [43] та діелектричних сталей [44] оброблюваного матеріалу, полірувального порошку та дисперсної системи. Зняття оброблюваного матеріалу, зношування частинок полірувального порошку і формування нанорельєфу полірованої поверхні відбувається в резонаторі, утвореному двома паралельними поверхнями оброблюваного матеріалу і притира, внаслідок ферстерівського резонансного перенесення енергії (FRET) між ними [45–49]. Наночастинки шламу (ЧШ) і наночастинки зносу полірувального порошку (ЧП1 і ЧП2), що утворюються в околі оброблюваної поверхні і поверхні притира, генеруються в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира і рухаються вздовж вісі резонатора, розсіюючись тільки вперед і назад [50–52]. Повний переріз розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу і фазовий зсув хвильових функцій визначають у відповідності до формул

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

$$\delta_l = -\int_{r_0}^{l_0} \frac{\rho_2 w_2 U(r) dr}{\hbar^2 \sqrt{k^2 - \frac{(l+1/2)^2}{r^2}}}, \quad (2)$$

де  $k$  – хвильове число;  $l$  – азимутальне квантове число;  $r$  – відстань між наночастинами;  $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – стала Планка;  $U(r)$  – потенціал взаємодії наночастинок зносу полірувального порошку з наночастинами шламу,  $w_2$  – об'єм наночастинки зносу;  $l_0$  – довжина резонатора;  $r_0$  – відстань граничного зближення наночастинок.

Характеристики наночастинок зносу полірувального порошку, дані розрахунку спектрального розділення і розділення за діелектричною проникністю між оброблюваним матеріалом, полірувальним порошком і дисперсним середовищем полірувальної дисперсної системи, довжина резонатора, а також результати розрахунку повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу у відповідності до формули (1) наведено в табл. 1.

**Таблиця 1. Характеристики наночастинок зносу полірувального порошку і параметри їхнього розсіювання на наночастинках шламу**

Характеристики наночастинок	Оброблюваний матеріал					
	ПС	ПММА	CR-39	ПС	ПММА	CR-39
	Полірувальна дисперсна система					
	ДС1			ДС2		
Довжина хвилі $\lambda_1$ , мкм	14,37	13,33	12,63	13,28	11,91	12,62
Довжина хвилі $\lambda_2$ , мкм	13,64	13,64	16,76	11,80	21,51	21,51
Довжина хвилі $\lambda_3$ , мкм		13,64			21,51	
Середня швидкість руху $v_m$ , м/с	24,1	16,5	20,2	75,2	29,1	30,3
Спектральне розділення						
$\delta\omega_{21}$ , $10^{13}$ с $^{-1}$	0,7	0,3	3,7	1,8	7,1	6,2
$\delta\omega_{31}$ , $10^{13}$ с $^{-1}$	0,7	0,3	1,1	5,4	7,1	6,2
$\delta\omega$ , $10^{13}$ с $^{-1}$	0,7	0,3	2,0	3,5	7,1	6,2
Розділення за діелектричною проникністю $H$	19,6	15,7	9,8	9,9	7,9	5,0
Довжина резонатора $l_0$ , мкм	4,5	4,2	4,6	6,9	6,0	5,4
Оптична довжина резонатора $L_{\text{опт}}$ , мкм	40,1	38,3	41,0	61,6	54,4	48,6
Повний переріз розсіювання $\sigma$ , Мб	0,27	0,03	0,6	49,7	0,9	20,1

В результаті розрахунків показано, що повний переріз розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу, який експоненціально зменшується за збільшення їхнього середнього розміру та зменшення концентрації [52], нелінійно зростає за підвищення середньої швидкості, з якою вони рухаються в момент генерування в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира (рис. 1). Найбільшого значення повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку  $\sigma = 49,7$  Мб ( $1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2$ ) досягають за середньої швидкості їхнього руху  $v_m = 75,2$  м/с під час полірування полістиролу за допомогою дисперсної системи ДС2, коли утворення нальоту на поверхні деталі, що полірують, є найбільш ймовірним [52].

Оскільки розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку і шламу, як квантових частинок, залежить від фазового зсуву хвильових функцій  $\delta_l$ , який визначається потенціалом їхньої взаємодії, значення повного перерізу розсіювання є залежним від сталих Ліфшиця і функції діелектричних проникностей [12, 44, 51], тобто від спектрального розділення між наночастинками:

$$\delta\omega = \frac{\delta\omega_{21}N_2 + \delta\omega_{31}N_3}{N_2 + N_3},$$

де  $\delta\omega_{21} = 2\pi c \frac{|\lambda_2 - \lambda_1|}{\lambda_2\lambda_1}$ ;  $\delta\omega_{31} = 2\pi c \frac{|\lambda_3 - \lambda_1|}{\lambda_3\lambda_1}$ ;  $c$  – швидкість світла;  $N_2$  і  $N_3$  – концентрації наночастинок ЧП1 і ЧП2 відповідно, а також розділення між оброблюваним матеріалом, полірувальним порошком і дисперсною системою за діелектричною проникністю  $H = \frac{\epsilon_3}{\sqrt{\epsilon_1\epsilon_2}}$  ( $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  – статичні діелектричні

проникності оброблюваного матеріалу, полірувального порошку і дисперсного середовища полірувальної дисперсної системи відповідно).

Залежності повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу від спектрального розділення  $\delta\omega$  (рис. 2, *a*), характерні для полірування полімерних оптичних матеріалів, суттєво відрізняються, оскільки їх описують зростаючими функціями для дисперсної системи ДС1 і спадаючими – для ДС2. У залежності від розділення за діелектричною проникністю  $H$  (див. рис. 2, *б*) повний переріз розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу описують екстремальними функціями, мінімуми яких відповідають максимальній продуктивності полірування ПММА за допомогою дисперсних систем ДС1 і ДС2 [51].

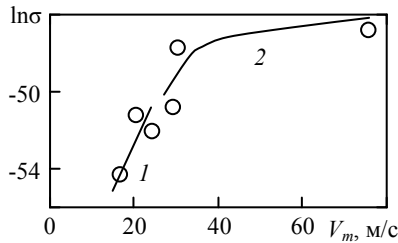


Рис. 1. Залежність повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу від їхньої середньої швидкості: 1 – ДС1; 2 – ДС2.

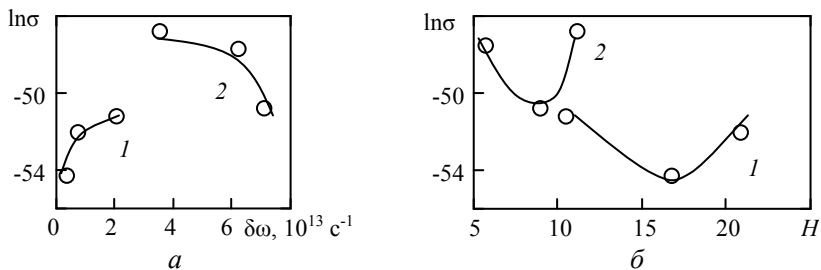


Рис. 2. Залежності повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу від спектрального розділення (*a*) і розділення за діелектричною проникністю (*б*): 1 – ДС1; 2 – ДС2.

На рис. 3 наведено залежність повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу від добутку спектрального розділення  $\delta\omega$  на розділення за діелектричною проникністю  $H$ , яка характерна для полірування полістиролу (ПС), поліметилметакрилату (ПММА) і поліалілідігліколькарбонату (CR-39) за допомогою дисперсних систем ДС1 і ДС2. Ця залежність має екстремальний характер і показує, що за певних спектроскопічних параметрів та діелектричних сталих оброблюваного матеріалу, полірувального порошку та дисперсної системи, добуток яких складає  $4 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$ , коли повний переріз розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу максимальний, а швидкість зняття оброблюваного матеріалу та інтенсивність зношування полірувального порошку – мінімальні, суттєво збільшується ймовірність утворення нальоту на поверхні деталі, що полірується.

Оскільки хвильова функція розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу в резонаторі, що утворений поверхнями оброблюваного матеріалу і притира, є суперпозицією падаючих та розсіяних хвиль з довжинами  $\lambda_2$  (ЧП1) і  $\lambda_3$  (ЧП2), повний переріз їхнього розсіювання, швидкість зняття оброблюваного матеріалу та інтенсивність зношування

полірувального порошку, в загальному випадку, будуть залежними від добротності резонатора на відповідній довжині хвилі, а значить і від оптичної довжини резонатора, яка визначається добутком довжини резонатора  $l_0$  на показник заломлення  $n = (\epsilon_3)^{1/2}$  ( $\epsilon_3$  – статична діелектрична проникність дисперсної системи). Водночас максимальне підсилення коливань в резонаторі відбувається за виконання умови утворення стоячих хвиль, коли оптична довжина резонатора дорівнює цілому числу півхвиль  $L_{\text{опт}} = l_0 n = k_2 \lambda_2 / 2 = k_3 \lambda_3 / 2$  ( $k_2, k_3$  – цілі числа) [12, 40, 51, 52]. Виконання цієї умови можна оцінити за величиною розладнання резонатора  $\delta L = L_{\text{опт}} - k\lambda / 2$  ( $k = \min(k_2, k_3)$  – ціле число,  $\lambda = \max(\lambda_2, \lambda_3)$ ), яка складає  $\delta L = 6,0, 4,2, 7,5$  мкм для мод  $k = (5, 5, 4)$  стоячих хвиль з довжиною  $\lambda = 13,64, 13,64, 16,76$  мкм відповідно – під час полірування ПС, ПММА і CR-39 за допомогою дисперсної системи ДС1 і  $\delta L = 7,8; 0,6; 5,6$  мкм – для  $k = (5, 5, 4)$  і  $\lambda = 21,51$  мкм – під час полірування ПС, ПММА і CR-39 за допомогою дисперсної системи ДС2.

На рис. 4 наведено залежності повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинок шламу від розладнання резонатора під час полірування полістиролу, поліметилметакрилату і поліалілдгіolkолькарбонату за допомогою дисперсних систем ДС1 (пряма 1) і ДС2 (пряма 2). Аналіз залежностей  $\ln(\sigma) = f(\delta L)$  показує, що у разі збільшення розладнання резонатора повний переріз розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинок шламу експоненціально збільшується відповідно до функції, яка має вигляд

$$\sigma = \sigma_0 \exp[\alpha \delta L],$$

де  $\sigma_0 = \begin{cases} 0,7 \\ 681,1 \end{cases}$  кб,  $\alpha = \begin{cases} 9,2 \cdot 10^5 \\ 5,7 \cdot 10^5 \end{cases} \text{ м}^{-1}$  – коефіцієнти, які визначено за методом найменших квадратів, похибка апроксимації  $< 1 \%$ ).

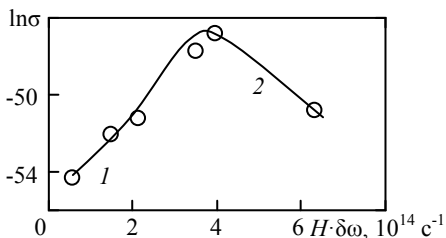


Рис. 3. Залежність повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинок шламу від добутку спектрального розділення на розділення за діелектричною проникністю: 1 – ДС1; 2 – ДС2.

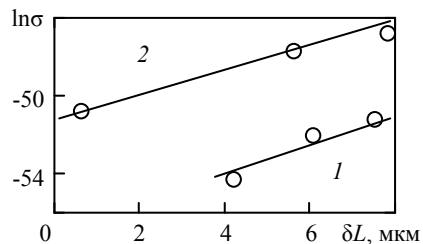


Рис. 4. Залежність повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинок шламу від розладнання резонатора: 1 – ДС1; 2 – ДС2.

Крім того, повний переріз розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинок шламу  $\sigma_0$  за розладнання резонатора  $\delta L = 0$  під час полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою водяної суспензії двооксиду церію (ДС2) на три порядки вище, ніж за використання дисперсної системи ДС1. Це означає, що утворення нальоту з частинок зносу полірувального порошку на оброблюваній поверхні найбільш ймовірно під час полірування полістиролу за допомогою дисперсної системи ДС2, коли максимальне значення повного перерізу розсіювання наночастинок зносу

полірувального порошку на наночастинках шламу ( $\sigma = 49,7$  Мб) досягається у разі розладнання резонатора  $\delta L = 7,8$  мкм, яке відповідає відхиленню довжини резонатора  $\delta l_0 \approx 1$  мкм.

При формуванні плоских оптичних поверхонь методом притирання поверхні оброблюваної деталі і притира, що притираються одна до одної, зазвичай, є сферичними з великим радіусом кривини, перша з них – увігнута (“яма”), а друга – опукла (“бугор”) [2], що призводить до відмінності товщини проміжку між ними в центральних і крайніх колових зонах деталі. Це означає, що довжина резонатора  $l_0$ , яка залежить не тільки від режимних параметрів полірування і реологічних властивостей дисперсної системи [5], а і від геометричної форми поверхонь оброблюваної деталі і притира, в центрі зони контакту оброблюваної поверхні і поверхні притира менше, ніж на її периферії. Оскільки під час полірування оптичних поверхонь середньої точності відхилення від площинності оброблюваної поверхні, зазвичай, складає  $\sim 1$  мкм (3–4 інтерференційних кільця) [2], залежність товщини  $l$  проміжку між поверхнями оброблюваного матеріалу і притира, заповненого дисперсною системою, від радіуса  $\rho$  колових зон оброблюваної поверхні можна описати наближеною лінійною функцією  $l(\rho) = l_0 + \beta\rho$  ( $\beta = 4 \cdot 10^{-5}$  – коефіцієнт), яка показує, що фактична довжина резонатора в центрі оброблюваної поверхні  $l(\rho = 0)$  менша, ніж на краю  $l(\rho = 30$  мм) на  $\sim 1$  мкм.

Визначаючи фазовий зсув хвильових функцій розсіяння наночастинок зносу полірувального порошку за формулою (2) в залежності від фактичної довжини резонатора  $l(\rho)$ , можна дослідити закономірності розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку ЧП1 і ЧП2 на наночастинках шламу, визначити диференціальний і повний переріз їхнього розсіювання [52] та вивчити особливості залежності повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу від радіуса  $\rho$  колових зон оброблюваної поверхні, що визначає як фрагменти нальоту локалізуються на ній. На рис. 5 наведена залежність повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу від радіуса колових зон оброблюваної поверхні (суцільна крива), характерна для полірування полістиролу за допомогою дисперсної системи ДС2, яка показує, що фрагменти нальоту з наночастинок зносу полірувального порошку нерівномірно розподілені на поверхні, що полірується.

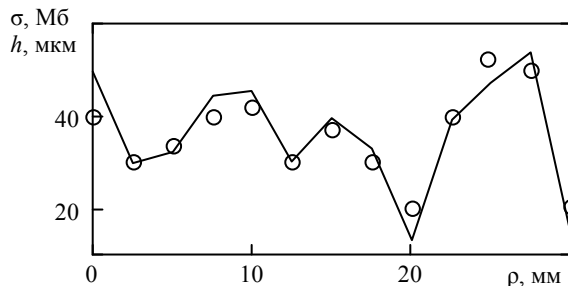


Рис. 5. Залежність повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу від радіуса  $\rho$  колових зон оброблюваної поверхні (○) та мікропрофіль нальоту на ній (—).

Під час експериментальних вимірювань двох зразків з полістиролу діаметром 60 мм їхні поліровані поверхні сканували вздовж діаметра у довільних взаємно перпендикулярних напрямках за допомогою вимірювальної скоби, яка

дозволяла визначити відносну товщину деталі за зміни  $\rho \in [0; 30 \text{ мм}]$  з кроком  $\sim 2,5 \text{ мм}$  за 8 трасами сканування. Через визначення сталої приладу і врахування клиновидності оброблених поверхонь за результатами вимірювань побудовано середній профіль нальоту на полірованої поверхні деталі з полістиролу, який задано табличним методом (табл. 2, рис. 5, експериментальні точки). Відхилення розрахованої функції розподілу повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу за коловими зонами оброблюваної поверхні від експериментально визначеного мікропрофілю нальоту складає  $\Lambda = \frac{1}{13} \sum_{i=0}^{12} \frac{2|\sigma_i - h_i|}{\sigma_i - h_i} \cdot 100 = 12,5 \%$ .

**Таблиця 2. Профіль полірованої поверхні в радіальному напрямку**

$\rho$ , мм	0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0
$h$ , мкм	40,0	30,0	33,5	40,0	42,0	30,0	37,0	30,0	21,5	40,0	54,0	50,0	20,0

Експериментально встановлено, що під час полірування плоскої поверхні полістиролу за допомогою дисперсної системи ДС2 на ній утворюється наліт, локалізація фрагментів якого відповідає залежності повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу від радіусу колових зон оброблюваної поверхні. На рис. 6 зображено наліт, який має вигляд окремих фрагментів (а) або плівки, яка утворює повне або часткове покриття поверхні деталі (б). За масою нальоту, який утворився на оброблених поверхнях деталей з полістиролу під час полірування протягом 30 хв за допомогою дисперсної системи ДС2 (густина двооксиду церію  $6,26 \text{ г/см}^3$ ), що визначена ваговим методом за допомогою аналітичних терезів мод. ВЛР-200 і склала 21 і 28 мг відповідно, можна оцінити його середню товщину як 1,1–1,5 мкм. Під час дослідження фрагментів нальоту на полірованих поверхнях за допомогою оптичного мікроскопа ЛОМО Метап Р-1, оснащеного камерою Vision STD-Res Series, показано, що їхня середня товщина складає  $\sim 1,4 \text{ мкм}$  (див. рис. 6, а).

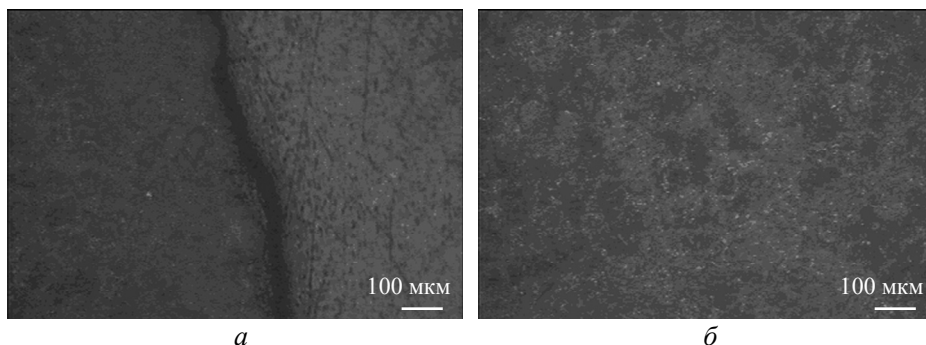


Рис. 6. Наліт з наночастинок зносу полірувального порошку двооксиду церію на полірованій поверхні деталі з полістиролу.

В результаті вивчення закономірностей розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира встановлено, що повний переріз їхнього розсіювання нелінійно зростає з підвищенням середньої швидкості їхнього руху, екстремально залежить від добутку спектрального розді-



лення на розділення за діелектричною проникністю між оброблюваним матеріалом, полірувальним порошком і дисперсною системою і експоненціально збільшується зі збільшенням розладнання резонатора. Показано, що ймовірність утворення нальоту на поверхні деталі, що полірується, змінюється пропорційно повному перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу. Встановлено, що утворення нальоту на оброблюваній поверхні є найбільш ймовірним під час полірування полістиролу за допомогою дисперсної системи ДС2 за найбільшого значення повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу. Експериментально показано, що теоретично розрахована функція розподілу повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу за коловими зонами оброблюваної поверхні добре узгоджується з експериментально визначеною функцією мікропрофілю нальоту за відхилення, яке не перевищує 12,5 %, а середня товщина фрагментів нальоту складає 1,1–1,5 мкм.

### ВИСНОВКИ

В результаті дослідження закономірностей утворення і локалізації нальоту з наночастинок зносу полірувального порошку на оброблюваній поверхні під час полірування полістиролу, поліметилметакрилату і поліаллідігліколькарбонату за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків встановлено, що внаслідок розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира на поверхні деталі, що полірують, формуються фрагменти нальоту.

Показано, що повний переріз розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку нелінійно зростає за підвищення середньої швидкості їхнього руху, екстремально залежить від добутку спектрального розділення на розділення за діелектричною проникністю між оброблюваним матеріалом, полірувальним порошком і дисперсною системою і експоненціально збільшується з підвищенням розладнання резонатора.

Встановлено, що утворення нальоту на оброблюваній поверхні є найбільш ймовірним під час полірування полістиролу за допомогою дисперсної системи ДС2, коли досягають найбільшого (49,7 Мб) значення повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу.

Експериментально підтверджено, що локалізація нальоту з наночастинок зносу полірувального порошку на оброблюваній поверхні відбувається у відповідності до функції розподілу повного перерізу розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку на наночастинках шламу за коловими зонами, яка добре узгоджується з результатами експериментів за відхилення 12,5 %.

Експериментально показано, що середня товщина фрагментів нальоту з наночастинок зносу полірувального порошку, які утворюють повне або часткове покриття поверхні деталі, складає від 1,1 до 1,5 мкм.

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

*As a result of the study of the regularities of the formation and localization of deposit from nanoparticles of polishing powder wear on the treated surface during the polishing of polymeric materials with the help of dispersed systems of micro- and nanopowders, it was established that the full scattering cross section of nanoparticles wear of polishing powder on sludge nanoparticles increases nonlinearly with an increase in the average speed of their movement, extremely depends on the product of the spectral separation by the separation by dielectric permeability between the processed material, the polishing powder and the dispersion system and increases exponentially with the increase of the detuning of the resonator. It is shown that the formation of deposit on the treated surface is most likely during the polishing of polystyrene with the help of micropowder of cerium dioxide, when the largest value of the total scattering cross section of the wear nanoparticles of the polishing powder on the sludge nanoparticles is reached, 49.7 Mb. It has been experimentally confirmed that the localization of deposit from nanoparticles of polishing powder wear on the treated surface occurs in accordance with the distribution function of the full cross-section of scattering of nanoparticles of polishing powder wear on sludge nanoparticles in circular zones, which is in good agreement with the results of experiments with a deviation of 12.5 %. The average thickness of deposit fragments from wear nanoparticles of polishing powder, which form a complete or partial coating of the surface of the part, which is 1.1–1.5 microns, was experimentally determined.*

**Keywords:** polishing, polymeric materials, scattering of nanoparticles, deposit.

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. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Філатов О.Ю., Ковальов С.В. Фізичні засади формоутворення прецизійних поверхонь під час механічної обробки неметалевих матеріалів. Монограф. Київ: Наук. думка, 2017. 248 с.
3. Filatov Yu.D. Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing. *Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining* / eds. J. Zhang, B. Guo, J. Zhang. Springer Tracts in Mechanical Engineering. Singapore: Springer, 2019. P. 129–165.
4. Prikhna T.A., Starostina A.V., Litzendorf D., Petruscha 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., Kovylyayev 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.
5. 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.
6. Filatov Yu.D. Mechanism of formation of surface microrelief in machining glass, *Sverkhtverdye Materialy.* 1991. no 5. P. 61–65.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.

11. Filatov O.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Filatov Yu.D., Vetrov A.G. Material removal rate in polishing anisotropic monocrystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2016. Vol. 38, no. 2. P. 123–131.
12. 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.
13. 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. 77861–77869.
14. 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.
15. 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 micro-profile formation in polishing quartz. *J. Superhard Mater.* 2010. Vol. 32, no. 6. P. 415–422.
16. Filatov A.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.
17. 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.
18. 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. P. 876336.
19. Filatov A.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.
20. Filatov Yu.D., Rogov V.V. Features of a glass-polishing process using a tool with bonded polishing powder. *Optics and spectroscopy.* 1993. Vol. 74, no. 6. P. 727–730.
21. Mathur V., Sharma K. Thermal response of polystyrene/poly methyl methacrylate (PS/PMMA) polymeric blends. *Heat Mass Transfer.* 2016. Vol. 52. P. 2901–2911.
22. Eissa M.F. Effect of transferred electronic energy density on optical, electrical and structural properties of polyallyl-diglycol carbonate (CR-39) polymer. *J. Macromolecular Sci. Part B.* 2014. Vol. 53, no. 3. P. 529–540.
23. 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. Radiat. Res. Appl. Sci.* 2014. Vol. 7, no. 3. P. 286–291.
24. Zhang H.Q, Jin Y., Qiu Y. The optical and electrical characteristics of PMMA film prepared by spin coating method. *Global Conference on Polymer and Composite Materials (PCM 2015), IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.* 2015. Vol. 87. P. 1–5.
25. 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.
26. Filatov Yu.D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 6. P. 427–433.
27. Filatov Yu.D., Kurilovich V.D., Kovalyov V.A. Improving efficiency of finishing natural stone using diamond-polymer fiber tools. *J. Superhard Mater.* 2014. Vol. 36, no 1. P. 35–42.
28. Filatov Yu.D. Polishing of aluminosilicate materials with bound-abrasive tools. *Sverkhchtyverdye Materialy.* 2001. no 3. P. 36–49.
29. Babitha K.K., Sreedevi A., Priyanka K.P., Sabu B., Varghese Th. 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.
30. 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. Rad. Res. Appl. Sci.* 2016. Vol. 9, no. 3. P. 321–331.
31. 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.
32. 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.
33. Tommasini F.J., da Cunha Ferreira L., Tienne L.G.P., de Oliveira Aguiar V., da Silva M.H.P., da Mota Rocha L.F., de Fatima Vieira Marques M. Poly (methyl methacrylate)-SiC nanocomposites prepared through in situ polymerization. *Mater. Res.* 2018. Vol. 21, no. 6, art. e20180086.

34. 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.
35. Al-Jobouri H.A., Jber N.R., Al-Shukrawi A.H., Hamid M.K. Physicochemical 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.
36. 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. P. 1–8. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncx040>.
37. 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.
38. 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. *Rad. Meas.* 2003. Vol. 36, no. 1–6. P. 99–103.
39. Filatov Yu. D., Sidorko V.I., Boyarintsev A.Y., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Performance efficiency of the polishing of polymer optical materials. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no 5. P. 358–367.
40. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Sokhan' S.V., Kovalev S.V., Boyarintsev A.Y., Kovalev V.A., Yurchyshyn O.Y. Roughness of polished surfaces of optoelectronic components made of polymeric optical materials, *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 1. P. 54–64.
41. 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.
42. 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.
43. 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.
44. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Boyarintsev A.Y., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Effect of the dielectric characteristics of a treated material, a polishing powder, and a disperse system on the energy of their interaction in the polishing of optical surfaces. *J. Superhard Mater.* 2022, Vol. 44, no. 4. P. 276–284.
45. Filatov Yu.D., Sidorko V.I. Statistical approach to wear of nonmetallic workpiece surfaces in polishing. *Sverkhtverdye Materialy.* 2005, no 1, P. 58–66.
46. 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.
47. Filatov Yu.D. Relationship between the transfer coefficients and transfer energy during the polishing of nonmetallic materials. *J. Superhard Mater.* 2022, Vol. 44, no. 3. P. 226–228.
48. 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.
49. Nabiev I., Strong light-matter coupling for optical switching through the fluorescence and FRET control. *PhysBioSymp* 2019. *J. Phys: Conf. Ser.* 2021. Vol. 2058, art. 012001.
50. 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.
51. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Boyarintsev A.Yu. Kovalev V.A., Yurchyshyn O.Ya. Scattering of sludge nanoparticles during the polishing of optical materials. *J. Superhard Mater.* 2023, Vol. 45, no 5. P. 370–378.
52. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Ковальов С.В., Бояринцев А.Ю., Юрчишин О.Я. Розсіювання наночастинок зносу полірувального порошку під час полірування полімерних оптичних матеріалів. *Надтверді матеріалу.* 2023. № 6. С. 58–68.

Надійшла до редакції 28.10.22

Після доопрацювання 12.01.23

Прийнята до опублікування 13.01.23