

# Дослідження процесів обробки

УДК 621.623

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

<sup>1</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

<sup>2</sup>Інститут сцинтиляційних матеріалів

НАН України, м. Харків, Україна

<sup>3</sup>Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”

м. Київ, Україна

\*[filatov2045@gmail.com](mailto:filatov2045@gmail.com)

## Шорсткість полірованих поверхонь оптико-електронних елементів із полімерних оптичних матеріалів

*В результаті дослідження механізму утворення нанорельєфу обробленої поверхні під час полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікро- та наночастинок полірувальних порошків встановлено, що параметри шорсткості  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_{max}$  лінійно зростають за збільшення розміру частинок шламу і зменшуються за збільшення енергії перенесення. Показано, що вони суттєво збільшуються за зменшення спектрального розділення між оброблюваним матеріалом і частинкою полірувального порошку та екстремально залежать від розділення за діелектричною проникністю між оброблюваним матеріалом, полірувальним порошком і дисперсною системою. Встановлено, що параметри шорсткості обробленої поверхні експоненціально зменшуються за збільшення частотного показника ефективності ферстерівського резонансного перенесення енергії (FRET) і лінійно збільшуються за збільшення часового показника ефективності FRET. В разі збільшення добротності резонатора, що утворюється поверхнями оброблюваного матеріалу і полірувального інструменту, параметри шорсткості полірованих поверхонь деталей з полімерних оптичних матеріалів лінійно зростають.*

**Ключові слова:** полімерні матеріали, резонансне перенесення енергії, шорсткість.

### ВСТУП

Зазвичай полірування полімерних оптичних матеріалів, які використовують для виготовлення оптико-електронних елементів (сцинтиля-

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

торів з полістиролу ПС, контактних та інтраокулярних лінз з поліметилметакрилату ПММА, лінз для окулярів з аллідігліколькарбонату CR-39 тощо), здійснюють за допомогою полірувальних дисперсійних систем з неабразивних мікро- та нанопорошків. Шорсткість оптичних поверхонь елементів з неметалевих матеріалів залежить від реологічних властивостей дисперсної системи, структури оброблюваного матеріалу, а також їхніх діелектричних та спектроскопічних характеристик [1–3].

Підвищення якості оптико-електронних елементів з полімерних оптичних матеріалів можливе лише за удосконалення технології їх полірування та розробки нових полірувальних дисперсійних систем, які б забезпечували високу якість обробки та повну відсутність дефектів на оброблених поверхнях за достатньої швидкості зняття оброблюваного матеріалу. Саме тому дослідження впливу фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу та дисперсної системи на шорсткість полірованих поверхонь оптико-електронних елементів з полімерних оптичних матеріалів [4–8], вивчення механізму взаємодії частинок дисперсної фази з оброблюваною поверхнею [9–12], дослідження закономірностей утворення її нанорельєфу та локалізації нальоту з частинок шламу і частинок зносу [13–16], є актуальними.

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей впливу фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу та дисперсної системи на шорсткість полірованих поверхонь оптико-електронних елементів з полімерних оптичних матеріалів.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

У відповідності до сучасних уявлень про механізм утворення нанорельєфу обробленої поверхні під час полірування неметалевих матеріалів шорсткість поверхні є наслідком видалення з неї частинок шламу, яке відбувається при взаємодії оброблюваної поверхні та частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи. Видалення оброблюваного матеріалу у вигляді наночастинок шламу, розміри та концентрація яких визначаються Ван-дер-Ваальсовими силами міжмолекулярної взаємодії [4, 10–12, 17–19], відбувається в результаті ферстерівського резонансного перенесення енергії (FRET) [20–32] між частинками дисперсної фази та оброблюваною поверхнею в резонаторі, що утворюється двома паралельними поверхнями оброблюваного матеріалу і притиру, між якими розташована дисперсна система, завдяки чому уможливується реверсування FRET, коли донор і акцептор міняються місцями (ефект карнавала) [33–35] або є і донорами, і акцепторами одночасно [29–31]. В результаті FRET за  $\omega_2^m > \omega_1^m$  ( $\omega_2^m, \omega_1^m$  – частоти коливань молекулярних фрагментів кластерів на поверхні частинок полірувального порошку та на оброблюваній поверхні) утворюються частинки шламу оброблюваного матеріалу, а за  $\omega_1^p > \omega_2^p$  ( $\omega_1^p, \omega_2^p$  – частоти коливань молекулярних фрагментів кластерів на оброблюваній поверхні та на частинці полірувального порошку) утворюються частинки зносу полірувального порошку. Ефективність FRET залежить від часу життя кластерів оброблюваної поверхні  $\tau_m$  і частинок полірувального порошку  $\tau_p$  у збудженому стані та характеризується частотним ( $K_v = \frac{\omega_2^m \omega_1^p}{\omega_1^m \omega_2^p}$ ) і часовим ( $K_\tau = \frac{\tau_p}{\tau_m}$ ) показниками [29, 31, 65].

Система оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира є квантовим генератором наночастинок, в якому енергія збудження кластерів на поверхнях оброблюваного матеріалу і частинок полірувального порошку переноситься за ферстерівським механізмом подібно до FRET лазерів, в яких

використовуються органічні барвники [36–40], наночастинки [41, 42] і квантові точки [43, 44], а потужність генерації залежить від розмірів [36, 37] і добротності резонатора [45]. Формування нанорельєфу поверхні є наслідком видалення з неї наночастинок шламу оброблюваного матеріалу, а параметри шорсткості повністю визначаються параметрами взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою з урахуванням FRET і характеристик резонатора. Довжина резонатора  $l$  визначається як товщина проміжку між поверхнями оброблюваного матеріалу і притиру, який заповнений полірувальною дисперсною системою, що залежить від режимних параметрів процесу полірування та реологічних властивостей дисперсної системи [51]. Добротність резонатора визначається як  $q_m = \omega_1^m / (\omega_2^m - \omega_1^m)$  [31].

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 притиру з пінополіуретану діаметром 100 мм за зусилля притискання деталі до притиру 50 Н, частоті обертання притиру 90 об/хв., зміщенні 30 мм та довжині штриха 80 мм, середній температурі в зоні контакту оброблюваної деталі та притиру 298 К. Оброблювали полімерні матеріали, які використовують для виготовлення сцинтиляторів з полістиролу ПС (густина  $\rho_1 = 1,06$  г/см<sup>3</sup>, діелектрична проникність  $\epsilon_1 = 2,5$ ), контактних та інтраокулярних лінз з поліметилметакрилату ПММА ( $\rho_1 = 1,18$  г/см<sup>3</sup>,  $\epsilon_1 = 3,9$ ), лінз для окулярів з поліаллідігліколькарбонату CR-39 ( $\rho_1 = 1,32$  г/см<sup>3</sup>,  $\epsilon_1 = 10,0$ ) [46–50]. Полірування здійснювали за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків (ДС1) ( $\rho_2 = 3,86$  г/см<sup>3</sup>,  $\epsilon_2 = 6,1$  [51, 52] та водяної суспензії двооксиду церію (ДС2) ( $\rho_2 = 6,62$  г/см<sup>3</sup>,  $\epsilon_2 = 21,2$ , [1], яку традиційно застосовують для полірування оптичних матеріалів. Підготовку плоских поверхонь оптичних деталей під полірування здійснювали за допомогою традиційних методів тонкого та надтонкого шліфування [5–7, 15]. Частоти власних коливань молекулярних фрагментів частинок полірувального порошку дисперсної системи ДС1, визначені за спектрами ІЧ-поглинання (Фур'є-спектрометр Nicolet 6700), складала (см<sup>-1</sup>): 597, 733, 777, 850, 870, 943, 984, 1085, а дисперсної системи ДС2 – 465, 521, 848 [53]. Досліджувані полімерні оптичні матеріали характеризувались частотами власних коливань молекулярних фрагментів, які визначали за відповідними ІЧ спектрами (см<sup>-1</sup>): ПС – 537, 696, 753, 905, 1027 [54–57], ПММА – 481, 750, 840, 960, 1065 [58–60], CR-39 – 495, 621, 792, 839 [61–64]. Середні розміри частинок полірувального порошку визначали за зображеннями, отриманими за допомогою растрового електронного мікроскопу 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, 29, 65] та контролювали за допомогою безконтактного інтерференційного 3D профілографа Micron-alpha [6, 7, 53–55].

Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою, а також результати розрахунку частотного і часового показників ефективності, довжини та добротності резонатора, які визначають продуктивність полірування і шорсткість полірованих поверхонь деталей з полімерних оптичних матеріалів [29–31], наведено в табл. 1. Параметри шорсткості полірованих поверхонь деталей з полістиролу (ПС), поліметилметакрилату (ПММА) та аллідігліколькарбонату (CR-39) за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків (ДС1) та суспензії двооксиду церію (ДС2) наведено в табл. 2.

**Таблиця 1. Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою під час полірування полімерних оптичних матеріалів**

Параметри взаємодії поверхні з дисперсною системою	Оброблюваний матеріал					
	ПС	ПММА	CR-39	ПС	ПММА	CR-39
	Полірувальна дисперсна система					
	ДС1			ДС2		
Частота $\omega_1^m, 10^{13} \text{ c}^{-1}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	13,12 (696)	14,14 (750)	14,93 (792)	14,19 (753)	15,83 (840)	14,93 (792)
Частота $\omega_2^m, 10^{13} \text{ c}^{-1}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	13,82 (733)	14,65 (777)	16,40 (870)	15,98 (848)	15,98 (848)	15,98 (848)
Частота $\omega_1^p, 10^{13} \text{ c}^{-1}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	14,19 (753)	14,14 (750)	11,71 (621)	17,06 (905)	9,067 (481)	9,331 (495)
Частота $\omega_2^p, 10^{13} \text{ c}^{-1}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	13,82 (733)	13,82 (733)	11,25 (597)	15,98 (848)	8,765 (465)	8,765 (465)
Спектральне розділення $\delta\nu_m, \text{cm}^{-1}$	37	27	78	95	8	56
Показник $K_v$	1,08	1,06	1,14	1,20	1,04	1,14
Час життя $\tau_m, \text{мкс}$	1,50	1,90	0,64	0,15	0,29	0,29
$i \tau_p, \text{мкс}$	0,33	0,49	0,10	0,07	0,64	0,25
Показник $K_t$	0,22	0,26	0,16	0,47	2,20	0,86
Розділення за діелектричною проникністю $H$	20,8	16,7	10,4	11,1	8,9	5,6
Енергія перенесення $U_1 \cdot 10^{-10}, \text{Дж/кг}$	1,5	1,0	3,1	9,4	0,4	3,0
Розмір частинок шламу $a_v, \text{нм}$	5,2	7,1	3,9	3,0	14,3	5,3
Довжина резонатора $l, \text{мкм}$	4,46	4,26	4,56	6,84	6,04	5,42
Добротність резонатора $q_m$	18,7	27,7	10,2	7,9	105,5	14,2

**Таблиця 2. Шорсткість полірованих поверхонь елементів з полімерних матеріалів**

Оброблюваний матеріал	ПС	ПММА	CR-39	ПС	ПММА	CR-39
Дисперсна система	ДС1			ДС2		
Параметри шорсткості поверхні						
$Ra, \text{нм}$	8,9±0,4	11,8±0,8	7,3±0,2	5,2±0,2	29,1±2,1	7,6±0,3
$Rq, \text{нм}$	9,6±0,4	12,6±0,9	7,7±0,3	5,5±0,2	31,3±2,8	7,9±0,4
$R_{\text{max}}, \text{нм}$	17,1±1,7	20,7±2,2	13,0±1,4	9,6±0,9	51,1±8,6	13,1±1,9

В результаті дослідження закономірностей формування нанопрофілю оброблених поверхонь показано, що залежності параметрів шорсткості  $Ra$ ,  $Rq$ ,  $R_{\text{max}}$  від розміру частинок шламу (рис. 1) є лінійно зростаючими функціями, які можна апроксимувати формулою

$$\begin{pmatrix} Ra \\ Rq \\ R_{\text{max}} \end{pmatrix} = \alpha_1 a_v - \beta_1,$$

де  $\alpha_1 = \begin{pmatrix} 2,1 \\ 2,3 \\ 3,7 \end{pmatrix}$ ,  $\beta_1 = \begin{pmatrix} 1,5 \\ 1,8 \\ 2,1 \end{pmatrix}$  нм – коефіцієнти, визначені методом найменших

квадратів, похибка апроксимації – 5–7 %, а параметри шорсткості  $Ra$ ,  $Rq$ ,  $Rmax$  зменшуються за збільшення енергії перенесення  $U^*$  (рис. 2) у разі використання полірувальних дисперсних систем ДС1 і ДС2, що відповідає відомим закономірностям для полірування оптичного скла, ситалів, оптичних та напівпровідникових кристалів [1–3, 52].

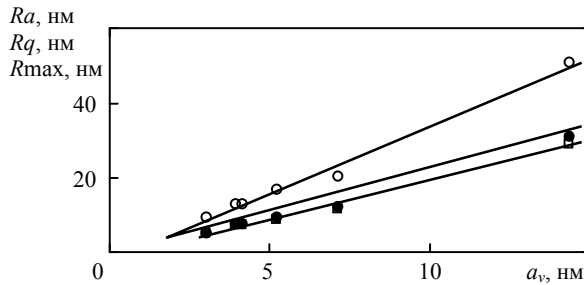


Рис. 1. Залежність параметрів шорсткості  $Ra$  ( $\square$ ),  $Rq$  ( $\bullet$ ),  $Rmax$  ( $\circ$ ) полірованих поверхонь від розміру частинок шламу.

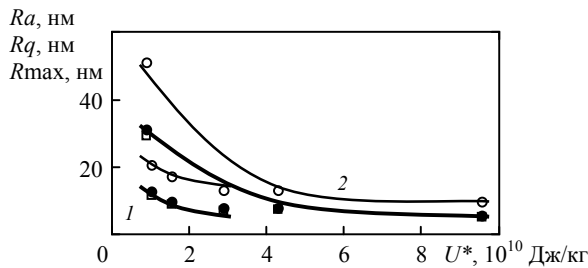


Рис. 2. Залежність параметрів шорсткості  $Ra$  ( $\square$ ),  $Rq$  ( $\bullet$ ),  $Rmax$  ( $\circ$ ) полірованих поверхонь від енергії перенесення  $U^*$ : 1 – ДС1; 2 – ДС2.

Встановлено, що під час полірування деталей з полістиролу, поліметилметакрилату та аллідігліколькарбонату параметри шорсткості оброблених поверхонь  $Ra$ ,  $Rq$ ,  $Rmax$  суттєво збільшуються за зменшення спектрального розділення (різниці частот коливань молекулярних фрагментів кластерів на поверхні частинок полірувального порошку та на оброблюваній поверхні)  $\delta\nu_m$  (рис. 3).

На рис. 4 наведено залежність шорсткості (параметра  $Ra$ ) від частотного показника  $K_v$  в напівлогарифмічному масштабі, яка показує, що за збільшення спектрального розділення між частинками дисперсної фази полірувальної дисперсної системи і оброблюваним матеріалом параметр шорсткості  $Ra$  оброблюваної поверхні зменшується відповідно до експоненціальної функції, яка має вигляд

$$Ra = Ra_0[-a_2(K_v - 1)],$$

де  $a_2 = \begin{cases} 8,2 \\ 11,1 \end{cases}$ ,  $Ra_0 = \begin{cases} 18,5 \\ 43,9 \end{cases}$  нм – коефіцієнти, які визначено за методом най-

менших квадратів, похибка апроксимації – 1 %). Параметр шорсткості  $Ra_0$  за умови резонансу, коли  $K_v \rightarrow 1$ , під час полірування оптичних поверхонь по-

лімерних матеріалів за допомогою дисперсної системи ДС2 більш ніж удвічі більший, ніж у разі використання дисперсної системи ДС1. Слід зауважити, що ця залежність знаходиться у повній відповідності до залежності продуктивності полірування від частотного показника  $K_v$  [31], що є природним, оскільки зняття оброблюваного матеріалу і формування нанопрофілю обробленої поверхні відбуваються одночасно в процесі полірування.

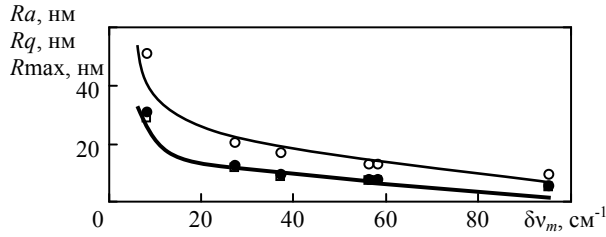


Рис. 3. Залежність параметрів шорсткості  $Ra$  ( $\square$ ),  $Rq$  ( $\bullet$ ),  $Rmax$  ( $\circ$ ) полірованих поверхонь від спектрального розділення  $\delta\nu_m$ .

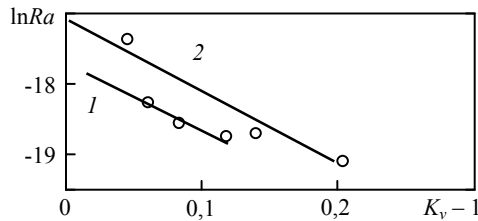


Рис. 4. Залежність параметра шорсткості  $Ra$  полірованих поверхонь від показника  $K_v$ : 1 – ДС1; 2 – ДС2.

На рис. 5 наведено залежності параметрів шорсткості полірованих поверхонь деталей з полімерних оптичних матеріалів від часового показника  $K_\tau$ , які показують, що параметри шорсткості  $Ra$ ,  $Rq$ ,  $Rmax$  лінійно зростають за підвищення  $K_\tau$ . Їх можна апроксимувати формулою

$$\begin{pmatrix} Ra \\ Rq \\ Rmax \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{pmatrix} K_\tau,$$

де  $\alpha_3 = \begin{pmatrix} 44,7 \\ 47,8 \\ 78,5 \end{pmatrix}$  нм,  $\alpha_4 = \begin{pmatrix} 13,4 \\ 14,4 \\ 23,5 \end{pmatrix}$  нм – коефіцієнти, визначені методом най-

менших квадратів, характерні для дисперсних систем ДС1 і ДС2; похибки апроксимації – 3–6 і 8–10 % відповідно.

В зв'язку з тим, що ефективність FRET від частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи до обробленої поверхні залежить не тільки від просторового і спектрального розділення між частинкою полірувального порошку і поверхнею оброблюваного матеріалу, а і від розділення між оброблюваним матеріалом, полірувальним порошком і дисперсною системою за діелектричною проникністю

$$H = \frac{\epsilon_3}{\sqrt{\epsilon_1 \epsilon_2}},$$

де  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_3$  – статичні діелектричні проникності оброблюваного матеріалу, полірувального порошку та дисперсної системи відповідно [66], було дослі-

джено його вплив на параметри шорсткості оброблених поверхонь. Показано, що у разі полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою дисперсних систем ДС1 і ДС2 залежність параметрів шорсткості  $Ra$ ,  $Rq$ ,  $Rmax$  від  $H$  (рис. 6) має екстремальний характер, що пов'язано з тим, що оптичні властивості резонатора пов'язані зі значеннями показників заломлення оброблюваного матеріалу, полірувального порошку та дисперсної системи. Оскільки максимальне підсилення коливань в оптичному резонаторі відбувається у випадку утворення стоячих хвиль, коли довжина резонатора дорівнює цілому числу півхвиль:  $l = k\pi c/\omega_1^m$  ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла;  $k$  – ціле число), то резонанс спостерігали лише під час полірування ПММА за допомогою дисперсної системи ДС2, коли розрахункове значення  $k = 1,02$ , а добротність резонатора має максимальне значення  $q_m = 105,5$ .

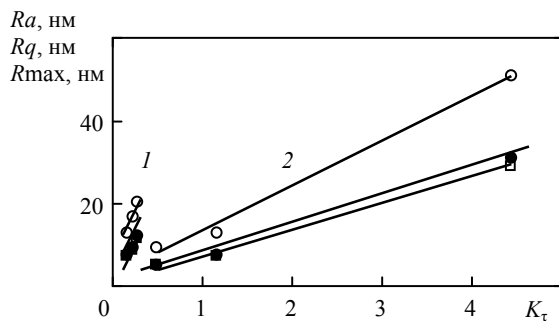


Рис. 5. Залежність параметрів шорсткості  $Ra$  ( $\square$ ),  $Rq$  ( $\bullet$ ),  $Rmax$  ( $\circ$ ) полірованих поверхонь від показника  $K_r$ : 1 – ДС1; 2 – ДС2.

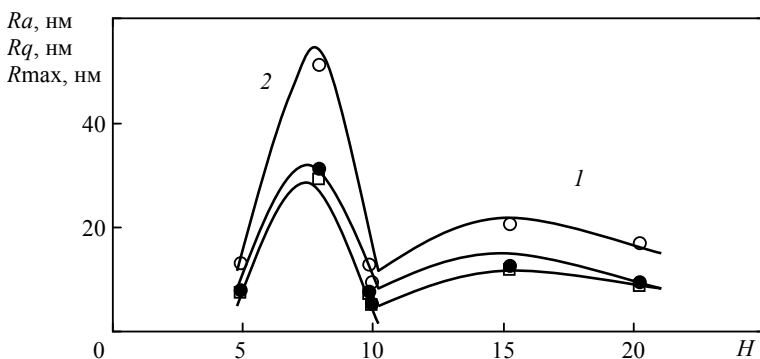


Рис. 6. Залежність параметрів шорсткості  $Ra$  ( $\square$ ),  $Rq$  ( $\bullet$ ),  $Rmax$  ( $\circ$ ) полірованих поверхонь від розділення за діелектричними проникненнями  $H$ : 1 – ДС1; 2 – ДС2.

На рис. 7 наведено залежності параметрів шорсткості  $Ra$ ,  $Rq$ ,  $Rmax$  полірованих поверхонь деталей з полімерних оптичних матеріалів від добротності резонатора  $q_m$ , які можна апроксимувати лінійно зростаючими функціями

$$\begin{pmatrix} Ra \\ Rq \\ Rmax \end{pmatrix} = \alpha_5 q_m + \beta_5,$$

де  $\alpha_5 = \begin{pmatrix} 23,6 \\ 25,5 \\ 41,0 \end{pmatrix}$  нм,  $\beta_5 = \begin{pmatrix} 4,4 \\ 4,6 \\ 8,1 \end{pmatrix}$  нм – коефіцієнти, визначені методом найменших квадратів, похибка апроксимації – 5–6 %.

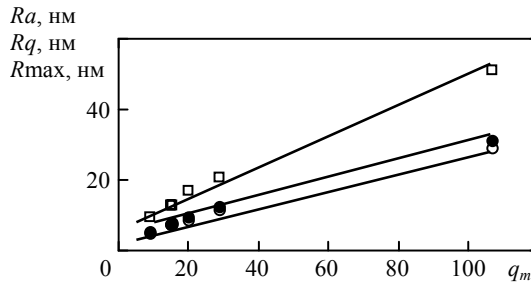


Рис. 7. Залежність параметрів шорсткості  $Ra$  ( $\circ$ ),  $Rq$  ( $\bullet$ ),  $R_{max}$  ( $\square$ ) полірованих поверхонь від добротності резонатора  $q_m$ .

Під час полірування неметалевих матеріалів, коли одночасно відбуваються зняття оброблюваного матеріалу, що характеризується коефіцієнтом об'ємного зносу  $\eta$ , та формування нанорельєфу поверхні, що характеризується параметрами шорсткості  $Ra$ ,  $Rq$ ,  $R_{max}$ , співвідношення  $\eta/Ra$  є індикатором ефективності процесу полірування оптичних поверхонь [52, 67, 68]. На рис. 8 наведено залежності співвідношення  $\eta/Ra$  від енергії перенесення  $U^*$ , характерні для полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою дисперсних систем ДС1 і ДС2, які показують, що значення співвідношення  $\eta/Ra$  збільшується за зменшення енергії перенесення, досягаючи максимального значення 0,4 мм/с, характерного для полірування ПММА.

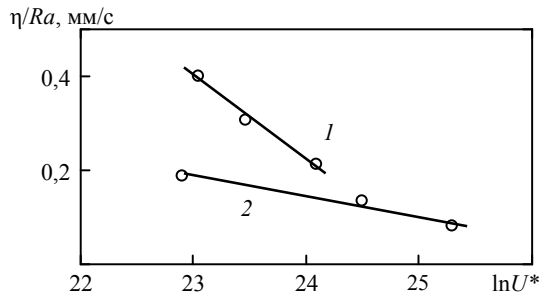


Рис. 8. Залежність співвідношення  $\eta/Ra$  від енергії перенесення  $U^*$ : 1 – ДС1; 2 – ДС2.

Слід зауважити, що під час полірування ПММА за допомогою дисперсних систем ДС1 і ДС2 утворюються частинки шламу великого розміру (7,1 і 14,3 нм) за мінімальних значень енергії перенесення ( $1,0 \cdot 10^{10}$  і  $0,4 \cdot 10^{10}$  Дж/кг), спектрального розділення між оброблюваним матеріалом і частинкою полірувального порошку (27 і  $8 \text{ см}^{-1}$ ), частотного показника  $K_v$  (1,06 і 1,04) та максимальних значень часового показника  $K_t$  (0,26 і 2,20) і добротності резонатора  $q_m$  (27,7 і 105,5). За такої умови поліровані поверхні деталей з ПММА характеризуються шорсткістю за параметром  $Rz$  (0,06 і 0,15 мкм), що не задовольняє вимогам до оптичних поверхонь ( $Rz = 0,05$  мкм).

## ВИСНОВКИ

В результаті дослідження механізму утворення нанорельєфу обробленої поверхні під час полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікро- та наночастинок полірувальних порошоків встановлено, що параметри шорсткості  $Ra$ ,  $Rq$ ,  $R_{max}$  лінійно зростають за збільшення розміру частинок шламу і зменшуються за збільшення енергії перенесення.



Показано, що параметри шорсткості суттєво збільшуються за зменшення спектрального розділення між оброблюваним матеріалом і частинкою полірувального порошку і екстремально залежать від розділення між оброблюваним матеріалом, полірувальним порошком і дисперсною системою за діелектричною проникністю.

Встановлено, що параметри шорсткості оброблюваної поверхні експоненціально зменшуються за збільшення частотного показника ефективності FRET і лінійно збільшуються за збільшення часового показника ефективності FRET. В разі збільшення добротності резонатора, що утворюється поверхнями оброблюваного матеріалу і притиру, параметри шорсткості полірованих поверхонь деталей з полімерних оптичних матеріалів лінійно зростають.

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

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

<sup>2</sup>Institute for Scintillation Materials,  
National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

<sup>3</sup>National Technical University of Ukraine  
“Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky”, Kyiv, Ukraine

**Roughness of polished surfaces of optoelectronic elements  
made of polymeric optical materials**

*As a result of studying the mechanism of nanorelief formation of the treated surface during polishing of polymer optical materials using dispersed systems of micro- and nanoparticles of polishing powders, it was found that the roughness parameters Ra, Rq, Rmax increase linearly with increasing sludge particle size and decrease for increasing the transfer energy. It is shown that they increase significantly with decreasing spectral separation between the treated material and the polishing powder particle and are extremely dependent on the dielectric constant separation between the treated material, polishing powder and the dispersed system. It was found that the roughness parameters of the treated surface exponentially decrease with increasing frequency efficiency of Ferster resonant energy transfer (FRET) and increase linearly with increasing time efficiency of FRET. In the case of increasing the quality factor of the resonator formed by the surfaces of the processed material and polishing tool, the roughness parameters of the polished surfaces of parts made of polymeric optical materials increase linearly.*

**Keywords:** polymeric materials, resonant energy transfer, roughness.

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. Mechanism of surface microrelief formation during glass treatment. *Sov. J. Superhard Mater. (Sverkhchtverdye Materialy).* 1991. Vol. 13, no 5. P. 63–67.
5. 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.
6. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Filatov O.Yu., Kovalev S.V., Heisel U., Storchak M. Surface roughness in diamond abrasive finishing. *J. Superhard Mater.* 2009. Vol. 31, no. 3. P. 191–195.

7. Filatov Yu.D., Yashchuk V.P., Filatov A.Yu., Heisel U., Storchak M., Monteil G. Assessment of surface roughness and reflectance of nonmetallic products upon diamond abrasive finishing. *J. Superhard Mater.* 2009. Vol. 31, no. 5. P. 338–346.
8. 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.
9. 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.
10. Filatov Yu.D., Rogov V.V. A cluster model of mechanism of silica-containing material fatigue wear in polishing. Part 1. *Sverkhverdye Materialy.* 1994. Vol. 16, no. 3. P. 40–43.
11. Filatov Yu.D. Polishing of aluminosilicate materials with tools with bound polishing powder. *Sverkhverdye Materialy.* 2001. Vol. 23, no. 3. P. 32–42.
12. 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, no. 6, art. 063401.
13. 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.
14. Filatov O.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Filatov Y.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.
15. Filatov Yu.D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 6. P. 427–433.
16. 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.
17. Suratwala T.I. *Materials Science and Technology of Optical Fabrication.* USA, Hoboken: Wiley, 2018. 416 p.
18. Sato N., Aoyama Y., Yamanaka J., Toyotama A., Okuzono T. Particle adsorption on hydrogel surfaces in aqueous media due to van der waals attraction. *Sci. Reports.* 2017. Vol. 7, art. 6099.
19. Lin G., Guo D., Xie G., Jia Q., Pan G. In situ observation of colloidal particle behavior between two planar surfaces. *Coll. Surf. A: Physicochemical Eng. Aspects.* 2015. Vol. 482. P. 656–661.
20. Cardullo R.A. Principles of Non-Radiative FRET: The Spectroscopic Ruler. *Microscopy Analysis.* 2002, Vol. 88. P. 19–21.
21. Wang Yu. and Wang Lihong V. Forster resonance energy transfer photoacoustic microscopy. *J. Biomedical Optics.* 2012. Vol. 17, no. 8, art. 086007.
22. Егорова А.В., Леоненко И.И., Александрова Д.И., Скрипинец Ю.В., Антонович В.П. Безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения от комплекса Sm(III) на цианиновый краситель Cy5. *Вісник ОНУ. Хімія.* 2015. Т. 20, вип. 3(55). С. 47–55.
23. Liu F., Rodina A.V., Yakovlev D.R., Golovatenko A.A., Greulich A., Vakhtin E.D., Susha A., Rogach A.L., Kusraev Y.G., Bayer M. Förster energy transfer of dark excitons enhanced by a magnetic field in an ensemble of CdTe colloidal nanocrystals. *Phys. Rev. B.* 2015. Vol. 92, art. 125403.
24. Poddubny, A.N., Rodina A.V., Nonradiative and radiative forster energy transfer between quantum dots. *J. Exp. Theor. Phys.* 2016, Vol. 122, no. 3. P. 531–538.
25. Jones G.A., Bradshaw D.S., Resonance energy transfer: from fundamental theory to receipt applications. *Front. Phys.* 2019. Vol. 7, art. 100.
26. 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.
27. 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.
28. Cortes C.L., Jacob Z. Fundamental figures of merit for engineering Förster resonance energy transfer. *Optics Express.* 2018. Vol. 26, no. 15. P. 19371–19387.
29. 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.

30. 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.
31. 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.
32. Gordon F., Elcoroaristizabal S., Ryder A.G. Modelling Förster resonance energy transfer (FRET) using anisotropy resolved multi-dimensional emission spectroscopy (ARMES). *Biochim. Biophys. Acta (BBA)-General Subjects.* 2021. Vol. 1865, no. 2, art. 129770.
33. 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.
34. 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.
35. Nabiev I. Strong light-matter coupling for optical switching through the fluorescence and FRET control. *J. Phys.: Conf. Series, 4th Int. Symp. and School for Young Scientists on “Physics, Engineering and Technologies for Bio-Medicine” (PhysBioSymp 2019).* 2021. Vol. 2058, art. 012001.
36. Andrew P., Barnes W.L. Förster energy transfer in an optical microcavity. *Science.* 2000. Vol. 290, no. 5492. P. 785–788.
37. 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.
38. Sun Y., Shopova S.I., Wu C.-S., Arnold S., Fan X. Bioinspired optofluidic FRET lasers via DNA scaffolds. *Proc. National Acad. Sci.* 2010. Vol. 107, no. 37. P. 16039–16042.
39. Qiao C., Zhang C., Zhou Z., Yao J., Zhao Y.S. An optically reconfigurable Förster resonance energy transfer process for broadband switchable organic single-mode microlasers. *CCS Chem.* 2022. Vol. 4, no. 1. P. 250–258.
40. Saha J., Dey D., Roy A. D., Bhattacharjee D., Hussain S.A. Multi step FRET among three laser dyes Pyrene, Acriflavine and Rhodamine B. *J. Luminescence.* 2016. Vol. 172. P. 168–174.
41. 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, art. 125033.
42. 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.
43. Chen Q., Kiraz A., Fan X. Optofluidic FRET laser using quantum dots as donor. *Frontiers in Biological Detection: From Nanosensors to Systems VIII. Proc. SPIE.* 2016. Vol. 9725, art. 972501-1.
44. Adarsh K.S., Singh M.K., Shivkumar M.A., Rabinal M.K., Jagatap B.N., Mulimani B.G., Savadatti M.I., Inamdar S.R. FRET from core and core–shell quantum dots to laser dye: A comparative investigation. *J. Luminescence.* 2015. Vol. 160. P. 216–222.
45. 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. Select. Topics Quant. Electron.* 2016. Vol. 22, no. 4, art. 7000215.
46. Mathur V., Sharma K. Thermal response of polystyrene/poly methyl methacrylate (PS/PMMA) polymeric blends. *Heat Mass Transfer.* 2016. Vol. 52. P. 2901–2911.
47. 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.
48. 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.
49. 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.* 87. 2015. Vol. 87. P. 1–5.
50. 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.

51. 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.
52. 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.
53. Babitha K.K., Sreedevi A., Priyanka K.P., Boby Sabu. 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.
54. Fang J.F., Xuan Y.M., Li Q. Preparation of polystyrene spheres in different particle sizes and assembly of the PS colloidal crystals. *Science China Technol. Sci.* 2010. Vol. 53, no. 11. P. 3088–3093.
55. 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.
56. 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.
57. Herman V., Takacs H., Duclairoir F., Renault O., Tortai J.H., Viala B., Core double-shell cobalt/graphene/polystyrene magnetic nanocomposites synthesized by *in situ* sonochemical polymerization. *RSC Adv. J. Name.* 2015. Vol. 5. P. 51371–51381.
58. 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.
59. Tommasini F.J., Ferreira L. C., Tienne L.G.P., Aguiar V. O., Silva M.H.P., Rocha L.F.M., Marques M.F.V. Poly (methyl methacrylate)–SiC nanocomposites prepared through in situ polymerization. *Mater. Res.* 2018. Vol. 21, no. 6, art. e20180086.
60. 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.
61. 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.
62. 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.
63. 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.
64. 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. *Radia. Meas.* 2003. Vol. 36, iss. 1–6. P. 99–103.
65. 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.
66. 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.
67. 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.
68. Filatov Yu.D., Sidorko V.I. Statistical approach to wear of nonmetallic workpiece surfaces in polishing. *J. Superhard Mater.* 2005. Vol. 27, no. 1. P. 58–66.

Надійшла до редакції 17.05.22

Після доопрацювання 23.05.22

Прийнята до опублікування 25.05.22