

# Дослідження процесів обробки

УДК 621.623

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

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

## Продуктивність полірування полімерних оптичних матеріалів

*В результаті дослідження механізму полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікро- та наночастинок полірувальних порошків встановлено, що за резонансного перенесення енергії від частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи до оброблюваної поверхні та в зворотному напрямку енергія частинок шламу та частинок зносу обернено пропорційна спектральному розділенню між ними. Показано, що під час полірування полімерних матеріалів за допомогою дисперсної системи з нанопорошків енергії частинок шламу та частинок зносу зменшуються в 5 разів у разі збільшення спектрального розділення від 27 до 78  $\text{см}^{-1}$  та від 17 до 24  $\text{см}^{-1}$  відповідно. При поліруванні за допомогою дисперсної системи з мікропорошків їхні енергії зменшуються в 2–5 разів у разі збільшення спектрального розділення від 8 до 95  $\text{см}^{-1}$  та від 16 до 57  $\text{см}^{-1}$ . В разі зменшення спектрального розділення між оброблюваним матеріалом і полірувальним порошком об'єми частинок шламу і частинок зносу, а відповідно продуктивність полірування та інтенсивність зношування частинок дисперсної фази дисперсної системи, зростають. Встановлено, що продуктивність полірування суттєво залежить від ефективності ферстерівського резонансного перенесення енергії і зростає у разі зменшення добутку співвідношень частот коливань молекулярних фрагментів на поверхні частинок полірувального порошку та на оброблюваній поверхні, а також збільшення відношення часу життя кластерів частинок полірувального порошку до часу життя кластерів оброблюваної поверхні у збудженому стані. Показано, що результати теоретичного розрахунку продуктивності полірування оптичних матеріалів збігаються з результатами експериментів за відхилення 1–8 %.*

**Ключові слова:** полімерні матеріали, резонансне перенесення енергії, продуктивність полірування.

## ВСТУП

На теперішній час полірування полімерних оптичних матеріалів, які використовують для виготовлення сцинтиляторів з полістиролу (ПС), контактних та інтраокулярних лінз з поліметилметакрилату (ПММА), лінз для окулярів з аллідігліколькарбонату (CR-39), здійснюється за допомогою полірувальних дисперсійних систем (полірувальних суспензій та колоїдних рідин) з неабразивних мікро- та нанопорошків. Продуктивність полірування та шорсткість оптичних поверхонь залежать від реологічних властивостей дисперсної системи, структури оброблюваного матеріалу, а також діелектричних та спектроскопічних характеристик оброблюваного матеріалу та дисперсної системи [1–3]. Незадовільна якість полірованих поверхонь оптичних деталей з полімерних оптичних матеріалів, їх невідповідність сучасному рівню розвитку науки і техніки пояснюються недосконалістю технології їх механічної обробки та відсутністю полірувальних дисперсійних систем, які б забезпечували високі продуктивність та якість обробки, відсутність дефектів на оброблених поверхнях. Саме тому дослідження впливу фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу та дисперсної системи на продуктивність зняття оброблюваного матеріалу під час полірування полімерних оптичних матеріалів, вивчення механізму взаємодії частинок дисперсної фази з оброблюваною поверхнею та дослідження закономірностей утворення та локалізації нальоту з частинок шламу і частинок зносу, є актуальними [4, 5].

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей впливу фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу та дисперсної системи на продуктивність полірування полімерних оптичних матеріалів.

### ШВИДКІСТЬ ЗНЯТТЯ ОБРОБЛЮВАНОВОГО МАТЕРІАЛУ ТА ІНТЕНСИВНІСТЬ ЗНОШЕННЯ ЧАСТИНОК ПОЛІРУВАЛЬНОГО ПОРОШКУ

У відповідності до сучасних уявлень про механізм взаємодії складових частин гібридних наносистем, зокрема оброблюваної поверхні та частинки дисперсної фази полірувальної дисперсної системи, видалення оброблюваного матеріалу та зношення частинок полірувального порошку відбувається внаслідок міжмолекулярної взаємодії між ними і визначається силами Ван-дер-Ваальса, які є наслідком виникнення локальних дипольних моментів на характерних частотах [6–12]. Перенос енергії між частинками дисперсної фази та оброблюваною поверхнею відбувається за ферстерівським механізмом, а перехід енергії збудженого стану донора до акцептора відбувається без проміжного випромінювання фотонів (ферстерівське резонансне перенесення енергії, FRET) [13–24]. Особливість резонансного переносу енергії в дисперсійній системі, що розташована в проміжку між оброблюваною поверхнею і поверхнею полірувального інструменту (притиру) під час полірування полягає в тому, що на відміну від звичайного FRET [25, 26] і так званого “ефекту карнавалу”, який полягає в реверсуванні переносу енергії в системах FRET, коли донор і акцептор міняються місцями [27–29], молекулярні фрагменти частинок дисперсної фази та оброблюваної поверхні є і донорами, і акцепторами одночасно [30]. Енергія частинок шламу  $\Delta E_m$ , що утворюються в результаті FRET від дисперсної системи до оброблюваного матеріалу (індекс  $m$ ), та енергія частинок зносу  $\Delta E_p$ , які відділяються від частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи внаслідок FRET від оброблюваного матеріалу до частинки полірувального порошку (індекс  $p$ ), суттєво залежать від спектрального розділення  $\delta\nu_m$  і  $\delta\nu_p$  та коефіцієнтів ефективності передачі енергії  $\psi_m$

і  $\psi_p$ , які визначаються співвідношеннями частот коливань молекулярних фрагментів на поверхні частинок полірувального порошку та на оброблюваній поверхні  $\omega_2^m/\omega_1^m$  і  $\omega_1^p/\omega_2^p$  та часом життя кластерів оброблюваної поверхні  $\tau_m$  і частинок полірувального порошку  $\tau_p$  у збудженому стані. Крім того, ефективність FRET, яке відбувається у відкритому мікрорезонаторі, що утворюється двома паралельними поверхнями оброблюваного матеріалу і полірувального інструменту, розділеними шаром дисперсної системи товщиною 4–7 мкм, залежить від добротності резонатора на відповідних частотах. При генеруванні частинок шламу і частинок зносу полірувального порошку добротність резонатора визначається як  $q_m = \omega_1^m/(\omega_2^m - \omega_1^m)$  і  $q_p = \omega_2^p/(\omega_1^p - \omega_2^p)$  відповідно.

Швидкість зняття оброблюваного матеріалу  $Q$  та інтенсивність зношування  $I_t$  полірувального порошку визначаються у відповідності до формули [30]

$$\left(\frac{Q}{I_t}\right) = \left(\frac{q_m}{q_p}\right) \left(\frac{\lambda_1 V_1}{\lambda_2 V_2}\right) \left(\frac{\Delta E_m \psi_1}{\Delta E_p \psi_2}\right)^{-1} \frac{L_t T}{t_c} \tau_m \tau_p, \quad (1)$$

де  $\lambda_1, \lambda_2$  – коефіцієнти теплопровідності оброблюваного матеріалу та полірувального порошку;  $V_1, V_2$  – об'єми частинок шламу і частинок зносу;  $L_t$  – довжина шляху тертя частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні;  $t_c = d/u$  – час контакту частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею,  $d$  – розмір частинок полірувального порошку;  $u$  – швидкість відносного переміщення деталі та притира;  $T$  – температура в контактній зоні.

## ПРОДУКТИВНІСТЬ ПОЛІРУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ОПТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Дослідження закономірностей зняття оброблюваного матеріалу здійснювали під час полірування плоских поверхонь деталей з оптичних полімерних матеріалів діаметром 60 мм на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притира з пінополіуретану діаметром 100 мм за зусилля притискання деталі до притиру 50 Н, частоти обертання притира 90 об/хв, зміщення 30 мм та довжини штриха 80 мм, середньої температури в зоні контакту оброблюваної деталі та притиру  $T = 298$  К. Оброблювали полімерні матеріали, які використовують для виготовлення сцинтиляторів з полістиролу ПС (густина  $\rho_1 = 1,06$  г/см<sup>3</sup>, діелектрична проникність  $\varepsilon_1 = 2,5$ ,  $\lambda_1 = 0,15$  Вт/(м·К)), контактних та інтраокулярних лінз з поліметилметакрилату ПММА ( $\rho_1 = 1,18$  г/см<sup>3</sup>,  $\varepsilon_1 = 3,9$ ,  $\lambda_1 = 0,19$  Вт/(м·К)), лінз для окулярів з поліаллідігліколькарбонату CR-39 ( $\rho_1 = 1,32$  г/см<sup>3</sup>,  $\varepsilon_1 = 10,0$ ,  $\lambda_1 = 0,20$  Вт/(м·К)) [31–37]. Полірування здійснювали за допомогою дисперсної системи з мікро- та нонопорошків (ДС1) ( $\rho_2 = 3,86$  г/см<sup>3</sup>,  $\varepsilon_2 = 6,1$ ,  $\lambda_2 = 1,0$  Вт/(м·К)) [38, 39] та водяної суспензії двооксиду церію (ДС2) ( $\rho_2 = 6,62$  г/см<sup>3</sup>,  $\varepsilon_2 = 21,2$ ,  $\lambda_2 = 3,0$  Вт/(м·К)) [1], яку традиційно застосовують для полірування оптичних матеріалів. Підготовку плоских поверхонь оптичних деталей під полірування здійснювали за допомогою традиційних методів тонкого та надтонкого шліфування [40–43]. 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 [44]. Досліджувані полімерні оптичні матеріали характеризувались частотами власних коливань молекулярних фрагментів, які визначали за відповідними ІЧ-спектрами: ПС – 537, 696,

753, 905, 1027  $\text{cm}^{-1}$  [45–49], ПММА – 481, 750, 840, 960, 1065  $\text{cm}^{-1}$  [49–52], CR-39 – 495, 621, 792, 839  $\text{cm}^{-1}$  [53–56].

Довжина шляху тертя частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні і швидкість відносного переміщення деталі та притира, усереднені за кінематичними параметрами налагодження верстату (зміщення та довжини штриха), склали відповідно  $L_t = 188$  мм і  $u = 0,47$  м/с. Середні розміри частинок полірувального порошку визначали за зображеннями, отриманими за допомогою растрового електронного мікроскопу Zeiss-EVO50 з системою мікроаналізу AZtec, і склали 409 нм – для ДС1 і 910 нм – для ДС2. Час контакту частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею складав 0,88 мкс для ДС1 і 1,95 мкс для ДС2. Зняття оброблюваного матеріалу визначали ваговим методом за допомогою аналітичних терезів в мг/30 хв.

Результати розрахунку співвідношень частот коливань молекулярних фрагментів на поверхні частинок полірувального порошку та на оброблюваній поверхні  $\omega_2^m/\omega_1^m$  і  $\omega_1^p/\omega_2^p$ , спектрального розділення  $\delta\nu_m$  і  $\delta\nu_p$ , енергії частинок шламу  $\Delta E_m$  та зносу  $\Delta E_p$ , часу життя кластерів оброблюваної поверхні  $\tau_m$  і частинок полірувального порошку  $\tau_p$  у збудженому стані та коефіцієнтів ефективності передачі енергії  $\psi_m$  і  $\psi_p$ , які визначають продуктивність полірування та інтенсивність зношування полірувального порошку [30, 57], наведено в табл. 1.

**Таблиця 1. Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою під час полірування полімерних оптичних матеріалів (частота  $\omega_1^m$ ,  $\omega_2^m$ ,  $\omega_1^p$ ,  $\omega_2^p$ , спектральне розділення  $\delta\nu_m$ ,  $\delta\nu_p$ , енергія частинок шламу  $\Delta E_m$  і частинок зносу  $\Delta E_p$ , час життя  $\tau_m$ ,  $\tau_p$ , коефіцієнти ефективності  $\psi_m$ ,  $\psi_p$ )**

Параметри взаємодії поверхні з дисперсною системою	Оброблюваний матеріал					
	ПС	ПММА	CR-39	ПС	ПММА	CR-39
	Полірувальна дисперсна система					
	ДС1			ДС2		
$\omega_1^m, 10^{13} \text{ c}^{-1}$	13,12	14,14	14,93	14,19	15,83	14,93
( $\text{cm}^{-1}$ )	(696)	(750)	(792)	(753)	(840)	(792)
$\omega_2^m, 10^{13} \text{ c}^{-1}$	13,82	14,65	16,40	15,98	15,98	15,98
( $\text{cm}^{-1}$ )	(733)	(777)	(870)	(848)	(848)	(848)
$\omega_2^m/\omega_1^m$	1,053	1,036	1,098	1,126	1,009	1,070
$\omega_1^p, 10^{13} \text{ c}^{-1}$	14,19	14,14	11,71	17,06	9,067	9,331
( $\text{cm}^{-1}$ )	(753)	(750)	(621)	(905)	(481)	(495)
$\omega_2^p, 10^{13} \text{ c}^{-1}$	13,82	13,82	11,25	15,98	8,765	8,765
( $\text{cm}^{-1}$ )	(733)	(733)	(597)	(848)	(465)	(465)
$\omega_1^p/\omega_2^p$	1,027	1,023	1,041	1,068	1,034	1,065
$\delta\nu_m, \text{cm}^{-1}$	37	27	78	95	8	56
$\delta\nu_p, \text{cm}^{-1}$	20	17	24	57	16	30
$\Delta E_m, \text{eV}$	9,3	22,4	4,4	1,1	5,3	4,6
$\Delta E_p, \text{eV}$	31,7	44,7	9,4	6,1	12,5	2,1
$\tau_m, \text{мкс}$	1,50	1,90	0,64	0,15	0,29	0,29
$\tau_p, \text{мкс}$	0,33	0,49	0,10	0,07	0,64	0,25
$\psi_m$	0,95	0,97	0,91	0,89	0,99	0,93
$\psi_p$	0,97	0,98	0,96	0,94	0,97	0,94

Показники полірування плоских поверхонь деталей з полістиролу (ПС), поліметилметакрилату (ПММА) та аллідігліколькарбонату (CR-39) за допомогою дисперсної системи з мікро- та нонопоросків (ДС1) та суспензії двооксиду церію (ДС2) наведено в табл. 2.

**Таблиця 2. Продуктивність полірування полімерних оптичних матеріалів**

Оброблюваний матеріал	ПС	ПММА	CR-39	ПС	ПММА	CR-39
Дисперсна система		ДС1			ДС2	
Розрахунок $Q$ , $10^{-13}$ м <sup>3</sup> /с	35,8	138,1	3,2	0,2	717,7	2,4
Експеримент $Q$ , $10^{-13}$ м <sup>3</sup> /с	39,3	150,7	3,4	–	725,0	2,5
(мкм/год)	(5,0)	(19,2)	(0,4)	–	(92,0)	(0,3)

В результаті досліджень встановлено, що під час полірування оптичних поверхонь деталей з полістиролу (ПС), поліметилметакрилату (ПММА) та аллідігліколькарбонату (CR-39) енергія частинок шламу  $\Delta E_m$  (рис. 1) та енергія частинок зносу  $\Delta E_p$  (рис. 2) зменшуються при зменшенні спектрального розділення  $\delta v_m$  і  $\delta v_p$  відповідно. Це означає, що при зменшенні спектрального розділення між донором і акцептором ефективність резонансного перенесення енергії між ними зростає, а енергії частинок шламу оброблюваного матеріалу  $\Delta E_m$  та частинок зносу полірувального порошку  $\Delta E_p$  зменшуються.

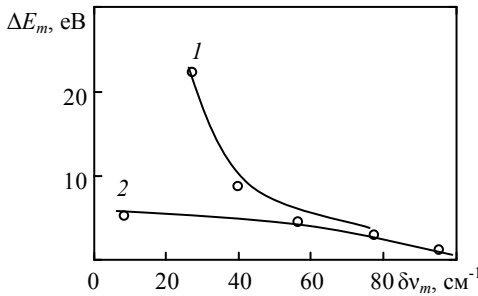


Рис. 1. Залежність енергії частинок шламу  $\Delta E_m$  від спектрального розділення  $\delta v_m$  під час полірування оптичних поверхонь за допомогою ДС1 (1) та ДС2 (2).

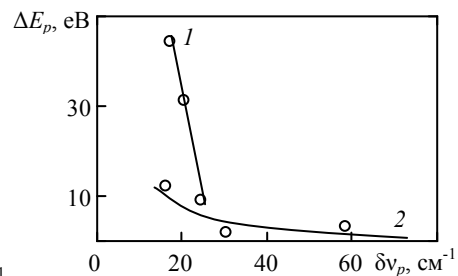


Рис. 2. Залежність енергії частинок зносу  $\Delta E_p$  від спектрального розділення  $\delta v_p$  під час полірування оптичних поверхонь за допомогою ДС1 (1) та ДС2 (2).

Під час полірування полімерних матеріалів за допомогою дисперсної системи ДС1 за зміни спектрального розділення в межах  $\delta v_m = 27\text{--}78$  см<sup>-1</sup> і  $\delta v_p = 17\text{--}24$  см<sup>-1</sup> енергії частинок шламу  $\Delta E_m$  та частинок зносу  $\Delta E_p$  змінюються приблизно в 5 разів. Під час полірування полімерних оптичних матеріалів у разі використання традиційної технології за допомогою дисперсної системи ДС2 за зміни спектрального розділення в більш широких межах ( $\delta v_m = 8\text{--}95$  см<sup>-1</sup> і  $\delta v_p = 16\text{--}57$  см<sup>-1</sup>), значення енергії частинок шламу  $\Delta E_m$  та частинок зносу  $\Delta E_p$  зменшуються в 2–4 рази. Аналогічні залежності об'ємів частинок шламу і частинок зносу в напівлогарифмічному масштабі  $\lg V_1 = f(\delta v_m)$  (рис. 3) і  $\lg V_2 = f(\delta v_p)$  (рис. 4) показують, що за зменшення спектрального розділення між оброблюваним матеріалом і полірувальним порошком спостерігається збільшення розмірів частинок шламу і частинок зносу, що свідчить про резонансний перенос енергії між частинками дисперсної фази та оброблюваною поверхнею за ферстерівським механізмом.

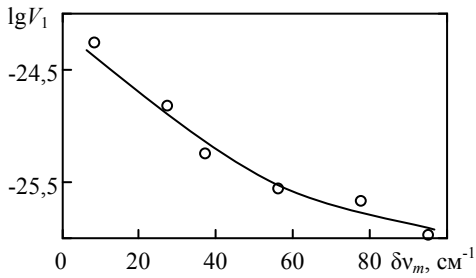


Рис. 3. Залежність об'єму частинок шламу оброблюваного матеріалу від спектрального розділення  $\delta\nu_m$  під час полірування полімерних оптичних матеріалів.

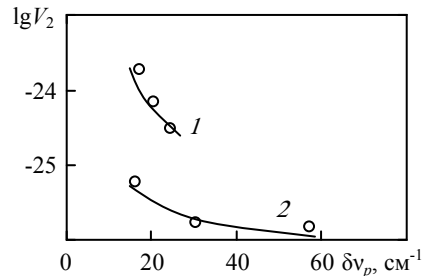


Рис. 4. Залежність об'єму частинок зносу полірувального порошку від спектрального розділення  $\delta\nu_p$  під час полірування оптичних поверхонь: 1 – ДС1; 2 – ДС2.

У відповідності до формули (1) з урахуванням коефіцієнтів ефективності передачі енергії  $\psi_m$  і  $\psi_p$  та часу життя кластерів оброблюваної поверхні  $\tau_m$  і частинок полірувального порошку  $\tau_p$  у збудженому стані (табл. 1) було досліджено залежності швидкості зняття оброблюваного матеріалу  $Q$  (рис. 5) та інтенсивності зношування  $I_i$  полірувального порошку (рис. 6) від спектрального розділення  $\delta\nu_m$  і  $\delta\nu_p$ . Ці залежності, наведені в напівлогарифмічному масштабі, є лінійними спадаючими функціями, що свідчить про експоненціальну залежність продуктивності полірування та інтенсивності зношування полірувального порошку від спектрального розділення.

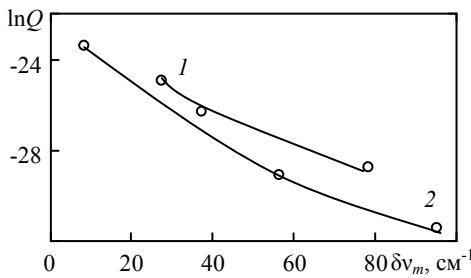


Рис. 5. Залежність продуктивності полірування полімерних оптичних матеріалів від спектрального розділення  $\delta\nu_m$ : 1 – ДС1; 2 – ДС2.

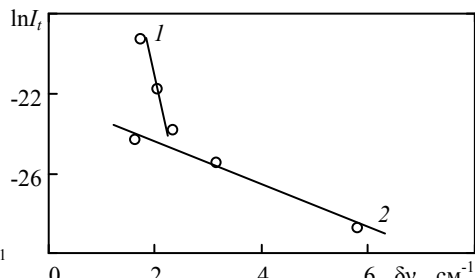


Рис. 6. Залежність інтенсивності зношування  $I_i$  полірувального порошку від спектрального розділення  $\delta\nu_p$  під час полірування оптичних поверхонь за допомогою ДС1 (1) та ДС2 (2).

В зв'язку з тим, що утворення частинок шламу внаслідок FRET від дисперсної системи до оброблюваного матеріалу і утворення частинок зносу, які відділяються від частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи внаслідок FRET від оброблюваного матеріалу до частинки полірувального порошку, відбуваються одночасно, для характеристики впливу спектрального розділення  $\delta\nu_m$  і  $\delta\nu_p$  та часу життя кластерів оброблюваної поверхні  $\tau_m$  і частинок полірувального порошку  $\tau_p$  у збудженому стані на продуктивність полірування полімерних матеріалів доцільно застосувати узагальнені показники ефективності передачі енергії: “частотний” –  $K_v = \frac{\omega_2^m \omega_1^p}{\omega_1^m \omega_2^p}$  і “часовий” –

$$K_\tau = \frac{\tau_p}{\tau_m}.$$

На рис. 7 наведено залежність продуктивності полірування полімерних оптичних матеріалів 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  $(\omega_2^m/\omega_1^m)$  і  $(\omega_1^p/\omega_2^p)$  швидкість зняття оброблюваного матеріалу зменшується за експоненціальним законом. Цю залежність можна апроксимувати функцією, яка має вигляд

$$Q = Q_0 \exp[-\alpha(K_v - 1)],$$

де  $\alpha = \begin{cases} 60,1 \\ 45,7 \end{cases}$ ,  $Q_0 = \begin{cases} 5,6 \cdot 10^{-10} \\ 3,1 \cdot 10^{-10} \end{cases}$ , м<sup>3</sup>/с – коефіцієнти, які визначено за методом

найменших квадратів; похибка апроксимації – менша 1 %). Швидкість зняття оброблюваного матеріалу  $Q_0$  за умови абсолютного резонансу, коли  $K_v \rightarrow 1$ , під час полірування оптичних поверхонь полімерних матеріалів за допомогою дисперсної системи ДС1 майже втричі менша, ніж у разі використання дисперсної системи ДС2.

В зв'язку з тим, що і швидкість зняття оброблюваного матеріалу, і інтенсивність зношування полірувального порошку пропорційні добутку  $\tau_m \tau_p$  – часу життя кластерів оброблюваної поверхні і частинок полірувального порошку в збудженому стані (формула (1)), їхній вплив саме на продуктивність полірування характеризується відношенням  $\tau_p/\tau_m$ . Наведена на рис. 8 залежність продуктивності полірування полімерних оптичних матеріалів від показника  $K_\tau$  показує, що в логарифмічному масштабі вона є лінійно зростаючою функцією.

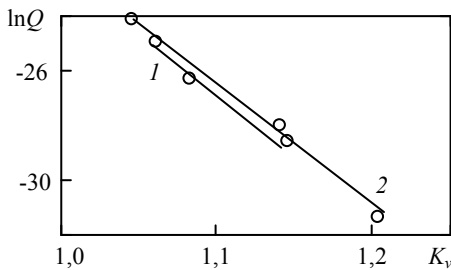


Рис. 7. Залежність продуктивності полірування полімерних оптичних матеріалів від показника  $K_v$ : 1 – ДС1; 2 – ДС2.

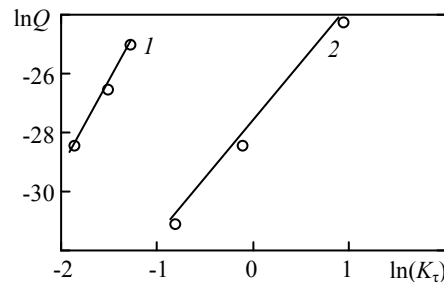


Рис. 8. Залежність продуктивності полірування полімерних оптичних матеріалів від показника  $K_\tau$ : 1 – ДС1; 2 – ДС2.

Залежності продуктивності полірування полімерних оптичних матеріалів від узагальнених показників ефективності передачі енергії  $K_v$  і  $K_\tau$  показують, що саме співвідношення частот коливань молекулярних фрагментів на поверхні частинок полірувального порошку та на оброблюваній поверхні і час життя кластерів частинок полірувального порошку та оброблюваної поверхні у збудженому стані визначають ефективність ферстерівського резонансного перенесення енергії і, відповідно, процесу видалення оброблюваного матеріалу.

Експериментальна перевірка отриманих результатів, яку здійснювали за результатами вимірювань величини зняття оброблюваного матеріалу, показала, що результати теоретичного розрахунку продуктивності полірування полімерних оптичних матеріалів майже збігаються з результатами експериментів, їх відхилення складає від 1 до 8 %.

## ВИСНОВКИ

В результаті дослідження механізму полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікро- та наночастинок полірувальних порошків встановлено, що за резонансного перенесення енергії від частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи до оброблюваної поверхні й від оброблюваного матеріалу до частинок полірувального порошку енергія частинок шламу та частинок зносу обернено пропорційна спектральному розділенню між ними.

Показано, що під час полірування полімерних матеріалів за допомогою дисперсної системи з нанопорошків енергії частинок шламу та частинок зносу зменшується в  $\sim 5$  разів у разі збільшення спектрального розділення в межах  $\delta\nu_m = 27\text{--}78\text{ см}^{-1}$  і  $\delta\nu_p = 17\text{--}24\text{ см}^{-1}$ . Під час полірування за допомогою дисперсної системи з мікропорошків їх енергії зменшуються в 2–5 разів у разі збільшення спектрального розділення в межах  $\delta\nu_m = 8\text{--}95\text{ см}^{-1}$  і  $\delta\nu_p = 16\text{--}57\text{ см}^{-1}$ . В разі зменшення спектрального розділення між оброблюваним матеріалом і полірувальним порошком об'єми частинок шламу і частинок зносу, а відповідно і продуктивність полірування полімерних оптичних матеріалів та інтенсивність зношування частинок дисперсної фази дисперсної системи, зростають.

Встановлено, що продуктивність полірування полімерних оптичних матеріалів суттєво залежить від ефективності ферстерівського резонансного перенесення енергії і зростає у разі зменшення добутку співвідношень частот коливань молекулярних фрагментів на поверхні частинок полірувального порошку й на оброблюваній поверхні та збільшення відношення часу життя кластерів частинок полірувального порошку до часу життя кластерів оброблюваної поверхні у збудженому стані.

Показано, що результати теоретичного розрахунку продуктивності полірування оптичних матеріалів збігаються з результатами експериментів за відхилення 1–8 %.

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

Material removal rate in polishing of polymer optical materials

*As a result of studying the mechanism of polishing of polymer optical materials using disperse systems of micro- and nanoparticles of polishing powders, it was found that during resonant energy transfer from particles of the dispersed phase of the polishing dispersed system to the treated surface and in the opposite direction, the energy of sludge particles and wear particles is inversely proportional to spectral separation between them. It is shown that when polishing polymeric materials using a dispersed system of nanopowders, the energy of sludge particles and wear particles decreases 5 times with an increase in spectral separation from 27 to 78  $\text{cm}^{-1}$  and from 17 to 24  $\text{cm}^{-1}$ , respectively. When polishing with a dispersed system of micropowders, their energies decrease by a factor of 2–5 with an increase in spectral separation from 8 to 95  $\text{cm}^{-1}$  and from 16 to 57  $\text{cm}^{-1}$ . With a decrease in the spectral separation between the material being processed and the polishing powder, the volumes of sludge particles and wear particles, and, accordingly, material removal rate and the wear rate of the particles of the dispersed phase of the dispersed system increase. It was found that the material removal rate significantly depends on the efficiency of the Forster resonant energy*



transfer and increases with a decrease in the product of the ratio of the vibrational frequencies of molecular fragments on the surface of the polishing powder particles and on the processed surface, as well as an increase in the ratio of the lifetimes of clusters of particles of the polishing powder and the processed material in an excited state. It is shown that the results of theoretical calculation of the material removal rate of optical materials coincide with the results of experiments with a deviation of 1–8 %.

**Keywords:** polymer materials, resonant energy transfer, material removal rate.

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 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.
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., 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.
5. 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.
6. Suratwala T.I. *Materials Science and Technology of Optical Fabrication.* USA, Hoboken: Wiley, 2018. 416 p.
7. 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.
8. Lin G., Guo D., Xie G., Jia Q., Pan G., In situ observation of colloidal particle behavior between two planar surfaces. *Coll. Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects.* 2015. Vol. 482. P. 656–661.
9. Filatov Yu.D. Mechanism of surface microrelief formation during glass treatment. *Sov. J. Superhard Mater. (Sverkhverdye Materialy).* 1991. Vol. 13, no 5. P. 63–67.
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, iss. 6. P. 063401–7.
13. Cardullo R.A., Principles of Non-Radiative FRET: The Spectroscopic Ruler. *Microscopy Analysis.* 2002. Vol. 88. P. 19–21.
14. Wang Yu., Wang Lihong V. Forster resonance energy transfer photoacoustic microscopy. *J. Biomedical Optics.* 2012. Vol. 17(8), art. 086007.
15. 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 Су5. *Вісник ОНУ. Хімія.* 2015. Т. 20, вип. 3(55). С. 47–55.
16. Liu F., Rodina A.V., Yakovlev D.R., Golovatenko A.A., Greilich A., Vakhtin E.D., Susa 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.
17. 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.
18. Заболотский А.А. Резонансный перенос энергии между сферической наночастицей и J-агрегатом. *Автоматрия.* 2017. Т. 53, № 3. С. 81–88.
19. Михайлов Т.Н., Европейцев Е.А., Беляев К.Г., Торопов А.А., Родина А.В., Головатенко А.А., Иванов С.В., Позина Г., Шубина Т.В. Ферстеровский резонансный перенос

- энергии с участием светлых и темных экситонов в массивах эпитаксиальных квантовых точек CdSe/ZnSe. *Физика твердого тела*. 2018. Т. 60, вып. 8. С. 1575–1579.
20. Jones G.A., Bradshaw D.S. Resonance energy transfer: from fundamental theory to recent applications. *Front. Phys.* 2019. Vol. 7, art. 100.
  21. Хребтов А.И., Резник Р.Р., Убийвовк Е.В., Литвин А.П., Скурлов И.Д., Парфёнов П.С., Кулагина А.С., Данилов В.В., Цырлин Г.Э. Безызлучательный перенос энергии в гибридных наноструктурах с различной размерностью. *Физика и техника полупроводников*. 2019. Т. 53, вып. 9. С. 1289–1292.
  22. 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.
  23. 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.
  24. Cristian L. Cortes and Zubin Jacob. Fundamental figures of merit for engineering Förster resonance energy transfer. *Optics Express*. 2018. Vol. 26, no. 15. P. 19371–19387.
  25. Gordon F., Elcoroaristizabal S., Ryder A.G. Modelling Förster resonance energy transfer (FRET) using anisotropy resolved multi-dimensional emission spectroscopy (ARMES). *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*. 2021. Vol. 1865, no. 2. P. 129770.
  26. 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.
  27. Zhong X., Chervy T., Zhang L., Thomas A., George J., Genet C., Hutchison J.A. and Ebbesen T.W. Energy transfer between spatially separated entangled molecules. *Angew. Chem. Int.* 2017. Vol. 56, no. 31. P. 9034–9038.
  28. 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.
  29. Nabiev I., Strong light-matter coupling for optical switching through the fluorescence and FRET control. *PhysBioSymp.* 2019. *J. Physics: Conf. Ser.* 2021. Vol. 2058, art. 012001.
  30. Filatov Y.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.
  31. Серова В.Н. Полимерные оптические материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2011. 384 с.
  32. Vishal Mathur, Kananbala Sharma. Thermal response of polystyrene/poly methyl methacrylate (PS/PMMA) polymeric blends. *Heat Mass Transfer*. 2016. Vol. 52. P. 2901–2911.
  33. Проблема идентификации микропластика методами молекулярной спектроскопии. Guide to the identification of micropastics by FTIR and Raman spectroscopy / перевод: Кимстач Т.Б., Тихомиров С.В. *Пластические массы*. 2020. № 7–8. С. 23–27.
  34. 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.
  35. Abdul-Kader A.M., Zaki M.F., El-Badry Basma A. Modified the optical and electrical properties of CR-39 by gamma ray irradiation. *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* 2014. Vol. 7, no. 3. P. 286–291.
  36. Zhang H.Q., Jin Y., Qiul 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.* 87, 2015. Vol. 87, P. 1–5.
  37. 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.
  38. 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.
  39. 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.
  40. Filatov Yu.D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 6. P. 427–433.

41. 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.
42. 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.
43. 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.
44. 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.
45. J.F. Fang, Y.M. Xuan, Q. Li., Preparation of polystyrene spheres in different particle sizes and assembly of the PS colloidal crystals. *Sci. China Technol. Sci.* 2010. Vol. 53, no.11. P. 3088–3093.
46. 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.
47. 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.
48. 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. Iss. 63. P. 51371–51381.
49. Анализ полимерных композиционных материалов: сост. Романова Н.В., Шафигуллин Л.Н., Гумеров И.Ф., Гумеров М.И. Набережные Челны: НЧИ (ф) КФУ, 2017. 30 с.
50. 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. 11, art. 626.
51. Tommasini F.J., da Cunha Ferreira L., Tienne L.G.P., de Oliveira Aguiarb V., da Silva M.H.P., da Mota Rocha L.F., de Fátima Vieira Marquesb M. Poly (Methyl Methacrylate)–SiC nanocomposites prepared through in situ polymerization. *Mater. Res.* 2018. Vol. 21, no. 6, art. 20180086.
52. 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.
53. Hussain A. Al-Jobouri, Nasreen R. Jber, Abbas H. Al-Shukrawi, Mazin K. Hamid, 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.
54. Zaki M.F., Elshaer Y.H., Taha D.H., Studying the structural, optical, chemical and electrochemical etching changes of CR-39 for dosimetric applications. *Radiat. Protect. Dosimetry.* 2017. Vol. 177, no. 3. P. 272–279.
55. 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.
56. 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. Measurements.* 2003. Vol. 36, nos. 1–6. P. 99–103.
57. Filatov Y.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.

Надійшла до редакції 24.12.21

Після доопрацювання 30.04.22

Прийнята до опублікування 04.05.22