

# Дослідження процесів обробки

---

УДК 621.923.7

**Ю. Д. Філатов**

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

*filatov2045@gmail.com*

## **Швидкість знімання матеріалу у разі полірування деталей з поліметилметакрилату**

*В результаті дослідження механізму полірування поліметилметакрилату за допомогою дисперсних систем з мікро- та наночастинок полірувальних порошків встановлено, що утворення частинок шлама оброблюваного матеріалу відбувається внаслідок ферстерівського резонансного перенесення енергії між енергетичними рівнями частинок полірувального порошку і оброблюваного матеріалу, яке відбувається у відкритому мікрорезонаторі, утвореному поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку, в багатомодовому режимі. Показано, що швидкість знімання матеріалу під час полірування поліметилметакрилату визначається сумарними коефіцієнтами об'ємного зносу і сумарним часом життя збудженого стану кластерів оброблюваної поверхні та результуючою добротністю резонатора на всіх дозволених частотах дискретного спектру. Встановлено, що результати теоретичного розрахунку швидкості знімання матеріалу під час полірування поліметилметакрилату добре узгоджується з даними експериментального визначення продуктивності полірування за відхилення 1–3 %.*

***Ключові слова:** полірування, резонансне перенесення енергії, швидкість знімання матеріалу.*

### **ВСТУП**

Сучасний розвиток науки і техніки базується на розробці нових та удосконаленні традиційних технологій фінішної прецизійної обробки неметалевих матеріалів, які широко застосовують в різних галузях фізики, хімії, біології, медицини тощо, використовують в фундаментальних і прикладних дослідженнях та виробництві наукового обладнання, приладів і апаратури, завдяки яким забезпечується підвищення продуктивності праці й якості продукції, автоматизація виробництва і покращення економічних та соціальних умов. Полірування прецизійних поверхонь деталей електронної техніки та оптичних систем з оптичного скла, оптичного і радіотехнічного ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів, кремнезем вмісних і алюмосилікатних (природного, будівельного і виробного каміння) та полімерних (поліс-

тиролу і поліметилметакрилату) матеріалів здійснюють за допомогою інструментів зі зв'язаним абразивом типу Аквапол, алмазних мікро- і нанопорошків, порошків МАХ фази, паст, суспензій, колоїдів та полірувальних дисперсійних систем з неабразивних мікро- та нанопорошків [1–12]. Швидкість знімання оброблюваного матеріалу під час полірування неметалевих матеріалів залежить від реологічних властивостей полірувальної дисперсної системи, структури оброблюваного матеріалу, а також їхніх діелектричних та спектроскопічних характеристик. Підвищення продуктивності полірування можливе лише за удосконалення та розробки нових полірувальних дисперсійних систем, які б забезпечували достатню швидкість знімання оброблюваного матеріалу і формування необхідного нанопрофілю полірованої поверхні. Саме тому дослідження закономірностей полірування поверхонь деталей з поліметилметакрилату за допомогою дисперсійних систем з мікро- та нанопорошків є актуальними.

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей впливу фізичних властивостей оброблюваного матеріалу та дисперсної системи на швидкість знімання оброблюваного матеріалу під час полірування деталей з поліметилметакрилату.

### **МЕХАНІЗМ УТВОРЕННЯ НАНОЧАСТИНОК ШЛАМУ ПІД ЧАС ПОЛІРУВАННЯ**

Сучасна теорія полірування неметалевих матеріалів базується на кластерній моделі видалення оброблюваного матеріалу [1, 5, 6] і формування мікрорельєфу полірованої поверхні [4, 7, 8], фізико-статистичній моделі утворення та видалення частинок шламу оброблюваного матеріалу як процесу масо-перенесення [1, 13] та теорії DLVO Дерягіна-Ландау-Фервея-Овербека (Derjaguin–Landau–Verwey–Overbeek) [2, 3, 14–17], згідно з якими взаємодія поверхонь оброблюваної деталі та частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи під час полірування визначається силами міжмолекулярної взаємодії Ван-дер-Ваальса, які є наслідком виникнення локальних дипольних моментів на частотах, що характерні для спектрів інфрачервоного поглинання зазначених середовищ. У відповідності до сучасних уявлень про механізм взаємодії між складовими частинами гібридних наносистем (кластерів, квантових точок, нитковидних нанокристалів тощо) результатом диполь-дипольної взаємодії між ними є перехід енергії збудженого стану донора до акцептора, який відбувається без проміжного випромінювання фотонів (Ферстерівське резонансне перенесення енергії, FRET) [18–21]. Знімання оброблюваного матеріалу є наслідком FRET [22–24] від частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи до оброблюваної поверхні, яке відбувається у відкритому мікрорезонаторі, що утворюється поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку. Водночас відбувається реверсування FRET, коли донор і акцептор міняються місцями [25–27], або одночасне перебування молекулярних фрагментів частинок дисперсної фази та оброблюваної поверхні в стані донора і акцептора [28–30]. Резонансне перенесення енергії від дисперсної системи до оброблюваного матеріалу приводить до утворення наночастинок шламу оброблюваного матеріалу, яке відбувається за умови  $\nu_2 > \nu_1$  ( $\nu_2, \nu_1$  – частоти коливань молекулярних фрагментів кластерів на поверхні частинок полірувального порошку та на оброблюваній поверхні) і суттєво залежить від спектрального розділення  $\delta\nu = \nu_2 - \nu_1$ . В системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира на відміну від FRET лазерів [31–35], які генерують фотони, відбувається генерація кван-

тових частинок – наночастинок шламу, зносу полірувального порошку і зносу притира, які характеризуються відповідними частотами. Потужність генерації наночастинок шламу, яка залежить від добротності резонатора  $Q = v_1/(v_2-v_1)$  [32, 36, 37], визначає швидкість знімання оброблюваного матеріалу у відповідності до формули [21, 28]

$$V = \eta L_t \frac{\tau}{t_c} Q, \quad (1)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт об'ємного зносу [1, 13, 21];  $L_t$  – довжина шляху тертя частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні;  $\tau$  – час життя кластерів оброблюваної поверхні у збудженому стані;  $t_c = d/u$  – час контакту частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею;  $d$  – розмір частинки полірувального порошку;  $u$  – швидкість відносного переміщення деталі та притира.

Час життя збудженого стану кластерів оброблюваної поверхні визначається як величина, обернена ймовірності квантових переходів зі збудженого стану кластерів частинок полірувального порошку у всі стани з меншою енергією, яка пропорційна частоті  $v_2$  і визначається формулою  $w_{mn} = 8\pi c \alpha^3 v_2 / 3$ , де  $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$  – стала тонкої структури;  $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – стала Планка;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд електрону;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла [21]. Це дозволяє визначити час життя кластерів оброблюваної поверхні у збудженому стані у відповідності до формули

$$\tau = \frac{3N_m}{8\pi c \alpha^3 v_2}, \quad (2)$$

де  $N_m$  – кількість можливих переходів.

Кількість можливих переходів між квантовими рівнями енергії кластерів оброблюваної поверхні та частинки полірувального порошку у відповідності до теорії молекулярних коливань залежить від кількості рівнів та їхнього виродження і визначається у відповідності до формули  $N_m = k_m N_0$ , де  $N_0$  –

кількість енергетичних рівнів;  $k_m = \prod_{n=1}^f \frac{(n+g-1)!}{n!(g-1)!} = 6$  – кратність вироджен-

ня рівнів;  $f = 2$  – кількість ступенів вільності коливального руху кластерів оброблюваної поверхні;  $g = 2$  – кількість нормальних коливань кластерів оброблюваної поверхні.

Енергія перенесення, яка показує енергетичні витрати, необхідні для видалення з оброблюваної поверхні одиниці маси матеріалу, може бути визначена, з врахуванням відомого співвідношення між коефіцієнтами об'ємного

зносу  $\eta$  і температуропровідності  $\chi$  [1, 2, 13, 21], за формулою  $U_t = \frac{c_p \chi}{\eta} T$ , де

$c_p$  – теплоємність оброблюваного матеріалу;  $T$  – температура в зоні контакту оброблюваної поверхні та притира.

### МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Полірування оптичних поверхонь деталей з поліметилметакрилату (ПММА) діаметром 60 мм здійснювали 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 штриха 30 мм та довжини штриха 80 мм, середньої температури в зоні контакту

оброблюваної деталі та притира  $T = 298 \text{ K}$ . Полірування деталей з ПММА (густина –  $1,18 \text{ г/см}^3$ , коефіцієнт теплопровідності –  $0,18 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ,  $c_p = 1270 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ,  $\chi = 0,12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  [38–41]) здійснювали за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопошків (ДС1) (густина –  $3,86 \text{ г/см}^3$ , коефіцієнт теплопровідності –  $1,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) [21, 28] та водяної суспензії двооксиду церію (ДС2) (густина –  $6,26 \text{ г/см}^3$ , коефіцієнт теплопровідності –  $3,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) [1, 28], яку традиційно застосовують для полірування оптичних матеріалів. Частоти власних коливань молекулярних фрагментів частинок полірувального порошку дисперсної системи ДС1, визначені за спектрами ІЧ-поглинання (Фур'є-спектрометр “Nicolet 6700”), склали 550, 597, 604, 638, 670, 733, 777, 850, 873, 943, 984, 996, 1084, 1119  $\text{см}^{-1}$ . Частоти власних коливань молекулярних фрагментів частинок полірувального порошку дисперсної системи ДС2 склали 465, 521, 650, 848, 935, 1021  $\text{см}^{-1}$  [42–44]. Для ПММА характерними є частоти 481, 754, 840, 843, 913, 987, 1062  $\text{см}^{-1}$  [45–48].

Визначення розмірів та аналіз поверхні частинок дисперсної фази полірувальних дисперсних систем ДС1 і ДС2 здійснювали за зображеннями, отриманими за допомогою растрового електронного мікроскопу “Zeiss-EVO50” з системою мікроаналізу AZtec та сканувального мікроскопу-аналізатора Camscan-4DV. Розміри частинок полірувальних порошків дисперсних систем дорівнювали 409 нм для ДС1 (рис. 1) і 910 нм для ДС2 (рис. 2). Довжина шляху тертя частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні й швидкість відносного переміщення деталі та притира, усереднені за кінематичними параметрами налагодження верстату (зміщення та довжини штриха), склали відповідно  $L_t = 188 \text{ мм}$  і  $u = 0,47 \text{ м/с}$ . Час контакту частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею складав 0,88 мкс для ДС1 і 1,95 мкс для ДС2. Знімання оброблюваного матеріалу визначали ваговим методом за допомогою аналітичних терезів мод. ВЛР-200 в мг/30 хв. Параметри шорсткості полірованих поверхонь деталей з ПММА визначали за допомогою методів комп'ютерного моделювання, рефлектометрії, інтерферометрії та профілометрії [6, 7, 29]. Підготовку плоских поверхонь оптичних деталей під полірування здійснювали за допомогою традиційних методів алмазного шліфування [10, 11, 28].

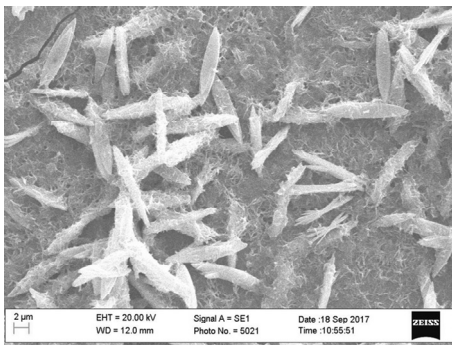


Рис. 1. Мікро- і наночастинки полірувального порошку дисперсної системи ДС1.

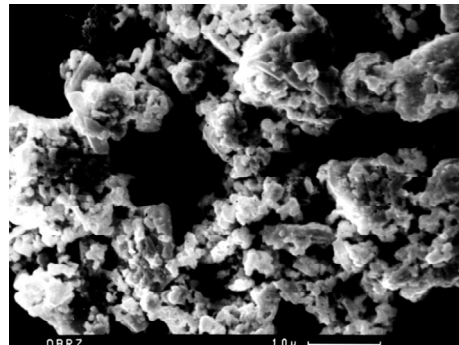


Рис. 2. Мікрочастинки полірувального порошку дисперсної системи ДС2.

## РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження механізму утворення наночастинок шламу під час полірування ПММА за допомогою дисперсних систем ДС1 і ДС2 здійснювали за умов, коли резонансне перенесення енергії від дисперсної системи до оброб-

люваного матеріалу відбувається між всіма можливими рівнями енергії на відміну від одномодового режиму, за якого враховували лише ті переходи, для яких спектральне розділення набувало мінімальних значень [21, 28]. Перенесення енергії між частинкою полірувального порошку і оброблюваним матеріалом під час полірування РММА за допомогою дисперсної системи ДС1 відбувається в багатомодовому режимі під час квантових переходів між енергетичними рівнями, які характеризуються частотами:  $\nu_{26} = 1084 \text{ cm}^{-1} \rightarrow \nu_{14} = 1062 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu_{24} = 943 \text{ cm}^{-1} \rightarrow \nu_{13} = 913 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu_{23} = 873 \text{ cm}^{-1} \rightarrow \nu_{12} = 843 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu_{22} = 777 \text{ cm}^{-1} \rightarrow \nu_{11} = 754 \text{ cm}^{-1}$  і  $\nu_{20} = 550 \text{ cm}^{-1} \rightarrow \nu_{10} = 481 \text{ cm}^{-1}$  (рис. 3). Під час полірування ПММА дисперсною системою ДС2 квантові переходи відбуваються між енергетичними рівнями, які характеризуються частотами:  $\nu_{25} = 1021 \text{ cm}^{-1} \rightarrow \nu_{15} = 987 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu_{24} = 935 \text{ cm}^{-1} \rightarrow \nu_{14} = 913 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu_{23} = 848 \text{ cm}^{-1} \rightarrow \nu_{13} = 840 \text{ cm}^{-1}$  і  $\nu_{21} = 521 \text{ cm}^{-1} \rightarrow \nu_{11} = 481 \text{ cm}^{-1}$  (рис. 4).

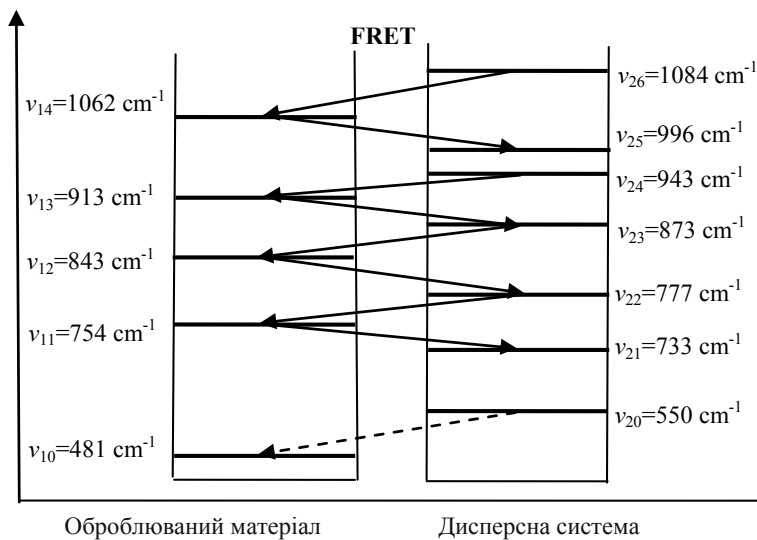


Рис. 3. Перенесення енергії між частинкою полірувального порошку і оброблюваним матеріалом під час полірування РММА за допомогою дисперсної системи ДС1.

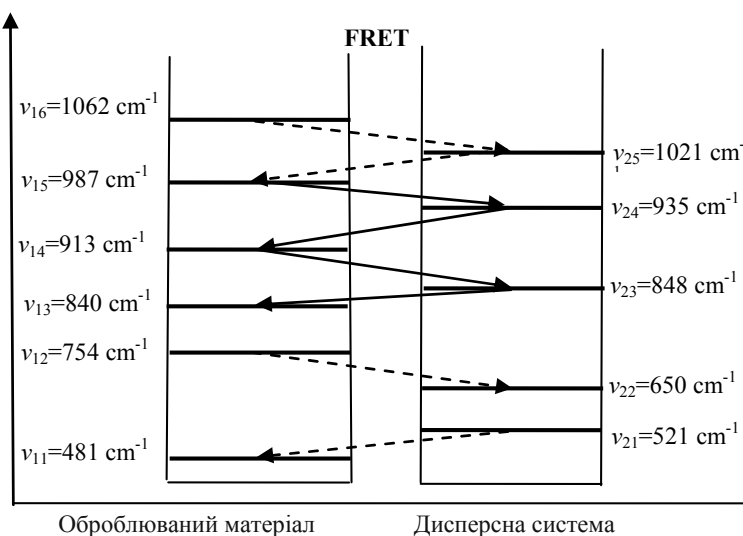


Рис. 4. Перенесення енергії між частинкою полірувального порошку і оброблюваним матеріалом під час полірування РММА за допомогою дисперсної системи ДС2.

Розраховані значення параметрів взаємодії оброблюваної поверхні з частинками полірувального порошку дисперсних систем ДС1 і ДС2 для всіх можливих мод, а саме: спектральне розділення  $\delta\nu$ , добротність резонатора  $Q$ , кількість можливих переходів  $N_m$ , час життя кластерів оброблюваної поверхні у збудженому стані  $\tau$  (формула 2), коефіцієнт об'ємного зносу  $\eta$  та енергія перенесення  $U_b$ , а також результати теоретичного розрахунку за формулою (1) і експериментального визначення швидкості знімання оброблюваного матеріалу наведено в табл. 1 і 2.

**Таблиця 1. Параметри полірування РММА за допомогою дисперсної системи ДС1**

Параметр	Переходи FRET				
	$V_{26} \rightarrow V_{14}$	$V_{24} \rightarrow V_{13}$	$V_{23} \rightarrow V_{12}$	$V_{22} \rightarrow V_{11}$	$V_{20} \rightarrow V_{10}$
Номер моди $i$	1	2	3	4	5
$\delta\nu, \text{см}^{-1}$	22	30	30	23	69
$Q$	48,3	30,4	28,1	32,8	7,0
$N_m$	25	17	16	18	4
$\tau, \text{нс}$	236	184	188	237	74
$\eta, 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$	3,5	2,0	1,8	2,3	0,3
$U_b, 10^{10} \text{ Дж/кг}$	1,3	2,3	2,5	1,9	15,0
Швидкість знімання оброблюваного матеріалу					
$V, 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	145,0				
Експеримент: мкм/год	19,2±0,1				
$10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	150,0±1,0				
Похибка розрахунку, %	3,0				

**Таблиця 2. Параметри полірування РММА за допомогою дисперсної системи ДС2**

Параметр	Переходи FRET			
	$V_{25} \rightarrow V_{15}$	$V_{24} \rightarrow V_{14}$	$V_{23} \rightarrow V_{13}$	$V_{21} \rightarrow V_{11}$
Номер моди $j$	1	2	3	4
$\delta\nu, \text{см}^{-1}$	34	22	8	40
$Q$	29,0	41,5	105,0	12,0
$N_m$	31	44	106	7
$\tau, \text{нс}$	311	481	1279	137
$\eta, 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$	0,95	1,52	5,0	0,36
$U_b, 10^{10} \text{ Дж/кг}$	4,8	3,0	0,9	12,5
Швидкість знімання оброблюваного матеріалу				
$V, 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	729,0			
Експеримент: мкм/год	92,6±0,9			
$10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	725,0±3,5			
Похибка розрахунку, %	1,0			

В результаті аналізу даних, наведених в табл. 1 і 2, встановлено, що загальні закономірності нелінійного зменшення енергії перенесення (рис. 5) і лінійного зростання коефіцієнта об'ємного зносу (рис. 6) за підвищення добротності мікрорезонатора, що утворений поверхнями оброблюваного матеріалу і части-

нки полірувального порошку [29, 30], є справедливими для кожної моди коливань кластерів оброблюваної поверхні під час полірування ПММА за допомогою дисперсних систем ДС1 та ДС2. Крім того, показано, що для мод  $i = 5, j = 1$  і 4 енергія перенесення (див. рис. 5) має максимальні значення, а коефіцієнт об'ємного зносу (див. рис. 6) характеризується мінімальними значеннями, що дозволяє знехтувати їхнім вкладом в процес знімання оброблюваного матеріалу.

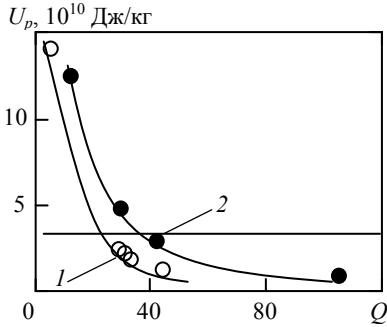


Рис. 5. Залежність енергії перенесення від добротності резонатора під час полірування ПММА за допомогою дисперсних систем ДС1 (1) та ДС2 (2).

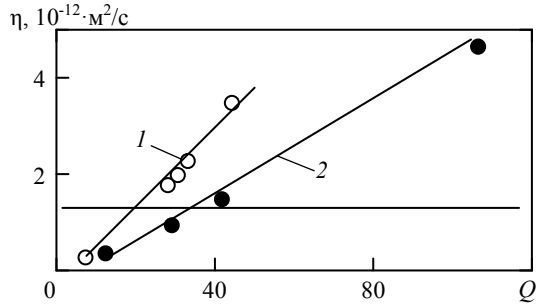


Рис. 6. Залежність коефіцієнта об'ємного зносу від добротності резонатора під час полірування ПММА за допомогою дисперсних систем ДС1 (1) та ДС2 (2).

Швидкість  $V$  знімання оброблюваного матеріалу під час полірування ПММА, що відбувається у відкритому мікрорезонаторі, для багатомодової системи з дискретним спектром власних частот розраховували за формулою (1) тільки для мод  $i = 1, 2, 3, 4$  (ДС1) і  $j = 2, 3$  (ДС2). В результаті розрахунку параметрів полірування ПММА за допомогою дисперсної системи ДС1 показано, що  $\eta = \sum_{i=1}^4 \eta_i = 9,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\tau = \sum_{i=1}^4 \tau_i = 845 \text{ нс}$ ,  $Q = \left[ \sum_{i=1}^4 Q_i^{-1} \right]^{-1} = 8,4$ , а

швидкість знімання оброблюваного матеріалу в чотирьохмодовому режимі складає  $V = 145 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ , що добре узгоджується з даними експериментального визначення продуктивності полірування –  $19,2 \pm 0,1 \text{ мкм/год}$  або  $(150,0 \pm 1,0) \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$  за відхилення до 3 %.

Під час полірування ПММА за допомогою дисперсної системи ДС2 сумарні коефіцієнти об'ємного зносу, сумарний час життя збудженого стану кластерів оброблюваної поверхні і результуюча добротність резонатора склали відпо-

відно  $\eta = \sum_{j=2}^3 \eta_j = 6,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\tau = \sum_{j=2}^3 \tau_j = 1760 \text{ нс}$  і  $Q = \left[ \sum_{j=2}^3 Q_j^{-1} \right]^{-1} = 29,7$ ,

а швидкість  $V$  знімання оброблюваного матеріалу в двохмодовому режимі дорівнювала  $729 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ . Розрахована величина добре узгоджується з даними експериментального визначення продуктивності полірування ПММА:  $(92,6 \pm 0,9) \text{ мкм/год}$  або  $(725,0 \pm 3,5) \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$  за відхилення до 1 %.

## ВИСНОВКИ

В результаті дослідження механізму полірування деталей з поліметилметакрилату за допомогою дисперсних систем з мікро- та наночастинок полірувальних порошків встановлено, що утворення частинок шламу оброблюваного матеріалу є наслідком FRET між енергетичними рівнями частинок полірувального порошку і оброблюваного матеріалу в багатомодовому режимі, що

відбувається у відкритому мікрорезонаторі, утвореному поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку.

Швидкість знімання матеріалу під час полірування поліметилметакрилату визначається сумарними за всіма модами коефіцієнтами об'ємного зносу, сумарними значеннями часу життя збудженого стану кластерів оброблюваної поверхні і результуючою добротністю резонатора на всіх дозволених частотах дискретного спектру.

Результати теоретичного розрахунку швидкості знімання матеріалу під час полірування деталей з поліметилметакрилату добре узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування за відхилення 1–3 %.

Під час полірування поліметилметакрилату за допомогою дисперсних систем з мікро- і наночастинок досягають необхідного рівня швидкості знімання оброблюваного матеріалу.

## ФІНАНСУВАННЯ

Ця робота була підтримана постійним інституційним фінансуванням. Жодних додаткових грантів на проведення чи керівництво цим дослідженням отримано не було.

## КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори цієї роботи заявляють, що не мають конфлікту інтересів.

Yu. D. Filatov

Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Material removal rate in polishing polymethylmethacrylate parts

*As a result of research into the mechanism of polymethylmethacrylate polishing with the help of dispersed systems of micro- and nanoparticles of polishing powders, it was established that the formation of sludge particles of the processed material occurs as a result of Förster resonance transfer of energy between the energy levels of the particles of the polishing powder and the processed material, which takes place in an open microresonator formed by the surfaces of the processed material and polishing powder particles, in a multimode mode. It is shown that the material removal rate during the polishing of polymethylmethacrylate is determined by the total volumetric wear coefficients and the total life time of the excited state of the clusters of the processed surface and the resulting Q factor of the resonator at all allowed frequencies of the discrete spectrum. It was established that the results of the theoretical calculation of material removal rate during the polishing of polymethylmethacrylate are in good agreement with the data of the experimental determination of the polishing productivity with deviations of up to 1–3%.*

**Keywords:** polishing, resonance transfer of energy, material removal rate.

1. Filatov Yu.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 Yu.D. Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing. Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining, Springer Tracts in Mechanical Engineering / eds. J. Zhang, B. Guo, J. Zhang. Singapore: Springer, 2019. P. 129–165.
3. Suratwala T.I. Materials Science and Technology of Optical Fabrication. USA, Hoboken: Wiley, 2018. 416 p.
4. Filatov Y.D. Mechanism of surface microrelief formation during glass treatment. *Sverkhtverdye Materialy.* 1991. No. 5. P. 61–65.
5. Filatov Yu.D., Rogov V.V. A cluster model of mechanism of silica-containing material fatigue wear in polishing. Part 1, 2. *Sverkhtverdye Materialy.* 1994. No. 3. P. 40–43; No. 4. P. 45–51.



6. Filatov Yu.D. Polishing of aluminosilicate materials with tools with bound polishing powder. *Sverkhтвердые Материалы*. 2001. No. 3. P. 36–49.
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. *Funct. Mater.* 2016. Vol. 23, no. 1. P. 104–110.
9. Filatov Y.D., Vetrov A.G., Sidorko V.I., Filatov O.Yu., Kovalev S.V., Kurilovich V.D., Danil'chenko M.A., Prikhna T.A., Borimsky A.I., Kutsai A.M., Poltorats'kyi V.G.. Polishing of optoelectronic components made of monocrystalline silicon carbide. *J. Superhard Mater.* 2015. Vol. 37, no. 1. P. 48–56.
10. Filatov Yu.D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 6. P. 427–433.
11. Prikhna T.A., Starostina A.V., Lizkendorf D., Petrusha I.A., Ivakhnenko S.A., Borimskii A.I., Filatov Yu.D., Loshak M.G., Serga M.A., Tkach V.N., Turkevich V.Z., Sverdun V.B., Klimenko S.A., Turkevich D.V., Dub S.N., Basyuk T.V., Karpets M.V., Moshchil V.E., Kozyrev A.V., Il'nitskaya G.D., 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.
12. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Effect of the rheological properties of a dispersed system on the polishing indicators of optical glass and glass ceramics. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no 1. P. 65–73.
13. Filatov Y.D., Sidorko V.I. Statistical approach to wear of nonmetallic workpiece surfaces in polishing. *Sverkhтвердые Материалы*. 2005. No. 1. 58–66.
14. 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. Rep.* 2017. Vol. 7, art. 6099.
15. Valmacco V., Elzbieciak-Wodka M., Besnard C., Maroni P., Trefalt G., Borkovec M. Dispersion forces acting between silica particles across water: influence of nanoscale roughness. *Nanoscale Horiz.* 2016. Vol. 1. P. 325–330.
16. Lin G., Guo D., Xie G., Jia Q., Pan G. In situ observation of colloidal particle behavior between two planar surfaces. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects.* 2015. Vol. 482. P. 656–661.
17. Rami M.-L., Meireles M., Cabane B., Guizard Ch. Colloidal Stability for Concentrated Zirconia AQUEOUS Suspensions. *J. Am. Ceram. Soc.* 2009. Vol. 92[S1]. P. S50–S56.
18. Wang Yu., Wang L.V. Forster resonance energy transfer photoacoustic microscopy. *J. Biomedical Optics.* 2012. Vol. 17, no. 8, art. 086007.
19. Jones, G.A., Bradshaw D.S. Resonance energy transfer: from fundamental theory to recent applications. *Front. Phys.* 2019. Vol. 7, no. 100. P. 1–19.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. Nabiev I. Strong light-matter coupling for optical switching through the fluorescence and FRET control. *PhysBioSymp* 2019. *J. Phys.: Conf. Series.* 2021. Vol. 2058, no. 1, art. 012001.

28. Filatov Y.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.
29. Filatov Y.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.
30. Filatov Y.D. New Patterns of polishing surfaces of parts made of nonmetallic materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 2. P. 140–149.
31. 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.
32. Zheng L., Zhi M., Chan Y., Khan S.A. Multi-color lasing in chemically open droplet cavities. *Sci. Rep.* 2018. Vol. 8, no. 1. P. 1–8.
33. 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 Chemistry.* 2022. Vol. 4, no. 1. P. 250–258.
34. Chen Q., Kiraz A., Fan X. An optofluidic FRET laser using quantum dots as donor. *Frontiers in Biological Detection: From Nanosensors to Systems VIII. Proc. SPIE.* 2016. Vol. 9725, art. 97250I-1.
35. 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.
36. Andrew P., Barnes W.L. Forster energy transfer in an optical microcavity. *Science.* 2000. Vol. 290, no. 5492. P. 785–788.
37. 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 Quantum Electron.* 2016. Vol. 22, no. 4, art. 7000215.
38. Mathur V., Sharma K. Thermal response of polystyrene/poly methyl methacrylate (PS/PMMA) polymeric blends. *Heat Mass Transfer.* 2016. Vol. 52. P. 2901–2911.
39. Vishal Mathur, Kananbala Sharma. Thermal response of polystyrene/poly methyl methacrylate (PS/PMMA) polymeric blends. *Heat Mass Transfer.* 2016. Vol. 52. P. 2901–2911.
40. Levytskyj V., Laruk Yu., Humenetsky T., Sikora J. The influence of polystyrene modifier and plasticizer nature on the properties of poly(vinyl chloride). *Chem. Chem. Technol.* 2015. Vol. 9, no. 2. P. 199–203.
41. Zhang H.Q., Jin Y., Qiu Y. The optical and electrical characteristics of PMMA film prepared by spin coating method. *Global Conf. Polymer Composite Mater. (PCM 2015), IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.* 2015. Vol. 87. P. 1–5.
42. Wang A.Q., Golden T.D. Electrochemical formation of cerium oxide/layered silicate nanocomposite films. *J. Nanotechnology, Hindawi Publ. Corp.* 2016. Vol. 2016, art. ID 8459374.
43. Habib I.Y., Kumara N.T.R.N., Lim Ch. M., Mahadi A.H. Dynamic light scattering and zeta potential studies of ceria nanoparticles. *Solid State Phenom. Submit.* 2018. Vol. 278. P. 112–120.
44. 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.
45. Duan G., Zhang C., Li A., Yang X., Lu L., Wang X. Preparation and characterization of mesoporous zirconia made by using a poly (methyl methacrylate) Template. *Nanoscale Res. Lett.* 2008. Vol. 3, no. 3. P. 118–122.
46. 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.
47. 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. 20180086.
48. 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.

Надійшла до редакції 14.06.23

Після доопрацювання 14.06.23

Прийнята до опублікування 09.10.23