

Дослідження процесів обробки

УДК 621.623

Ю. Д. Філатов¹, В. І. Сідорко¹, А. Ю. Бояринцев²,
С. В. Ковальов¹, В. А. Ковальов¹

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

²Інститут скінтіляційних матеріалів НАН України,

м. Харків, Україна

*filatov@ism.kiev.ua

Енергія перенесення під час взаємодії оптичної поверхні з полірувальною дисперсною системою

В результаті дослідження механізму взаємодії оптичної поверхні з полірувальною дисперсною системою під час полірування встановлено, що перенесення енергії між ними відбувається за ферстерівським механізмом. Показано, що за резонансного перенесення енергії від частинок дисперсної фази полірувальної системи до оброблюваної поверхні та від оброблюваного матеріалу до частинок полірувального порошку при зменшенні спектрального розділення між ними енергія частинок шламу і частинок зносу зменшується, а ефективність передачі енергії зростає. Спектральне розділення характеризували розстроюванням енергії, що склало 2,8–4,0 меВ для частинок шламу і 2,8–12,2 меВ для частинок зносу. Просторове розділення між оброблюваною поверхнею і частинками полірувального порошку оцінювали як середнє арифметичне відхилення профілю полірованої поверхні, що дорівнювало 5,6–8,0 нм. Встановлено, що зменшення просторового та спектрального розділення між обробленим матеріалом і частинками полірувального порошку зумовлює збільшення розмірів частинок шламу і частинок зносу, що призводить до погіршення шорсткості оптичних поверхонь. Показано, що результати теоретичного розрахунку продуктивності полірування оптичних матеріалів збігаються з результатами експериментів за відхилення 2–7 %.

Ключові слова: полірування, резонансне перенесення енергії, продуктивність полірування, шорсткість поверхні.

ВСТУП

У відповідності до сучасних уявлень про природу полірування оптичних поверхонь за допомогою полірувальних дисперсних систем видалення оброблюваного матеріалу відбувається внаслідок міжмолекулярної взаємодії між ними. Продуктивність полірування та шорсткість оброблених поверхонь залежать від реологічних властивостей дисперсної системи, струк-

Ю. Д. ФІЛАТОВ, В. І. СІДОРКО, А. Ю. БОЯРИНЦЕВ, С. В. КОВАЛЬОВ, В. А. КОВАЛЬОВ, 2022

тури оброблюваного матеріалу, а також діелектричних та спектроскопічних характеристик оброблюваного матеріалу і полірувального порошку [1–4].

Разом з тим, процеси взаємодії частинок полірувального порошку з оброблюваною поверхнею під час полірування за допомогою полірувальних дисперсних систем вивчені недостатньо, а механізм перенесення енергії між оброблюваною поверхнею та дисперсною системою остаточно не з'ясований.

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей перенесення енергії між поверхнею оброблюваної деталі та дисперсною фазою полірувальної системи та її впливу на показники полірування оптичних поверхонь.

МЕХАНІЗМ УТВОРЕННЯ ЧАСТИНОК ШЛАМУ ТА ЧАСТИНОК ЗНОСУ ПОЛІРУВАЛЬНОГО ПОРОШКУ ПІД ЧАС ПОЛІРУВАННЯ

Згідно з кластерною моделлю полірування неметалевих матеріалів [2, 4] та теорією Дерягіна-Ландау-Фервея-Овербека [5–7] взаємодія поверхонь оброблюваної деталі та частинок полірувального порошку під час полірування визначається силами міжмолекулярної взаємодії Ван-дер-Ваальса, які є наслідком виникнення локальних дипольних моментів на частотах, які 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, двовимірних нанопластин тощо) енергія збудженого стану донора переходить до акцептора в результаті диполь-дипольної взаємодії між ними і відбувається без проміжного випромінювання фотонів (Ферстерівське резонансне перенесення енергії, FRET) [8–14].

При взаємодії частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею під час полірування на останній збуджуються кластери за рахунок коливальної енергії збуджених кластерів на поверхні полірувальних частинок, тобто відбувається перенесення енергії від дисперсної системи (донор) до оброблюваної поверхні (акцептор). В той же час відбувається передача коливальної енергії від оброблюваної поверхні (донор) до частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи (акцептор).

Резонансне перенесення енергії від дисперсної системи до оброблюваного матеріалу і утворення частинок шlamу оброблюваного матеріалу відбуваються за умов: $\omega_2^m > \omega_1^m$; $[\omega_2^m - \omega_1^m]$ є мінімальним (ω_2^m , ω_1^m – частоти коливань молекулярних фрагментів кластерів на поверхні частинок полірувального порошку та на оброблюваній поверхні). В той же час відбувається перенесення коливальної енергії від оброблюваної поверхні до частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи та утворення частинок зносу полірувального порошку, що можливо за виконання умов: $\omega_1^p > \omega_2^p$; $[\omega_1^p - \omega_2^p]$ є мінімальним (ω_1^p , ω_2^p – частоти коливань молекулярних фрагментів кластерів на оброблюваній поверхні та на частинці полірувального порошку). Співвідношення цих частот визначають кількість молекулярних фрагментів в кластерах оброблюваної поверхні ξ_1^m і ξ_1^p та частинки полірувального порошку ξ_2^m і ξ_2^p :

$$\xi_{(1)}^m = \frac{\left(\omega_{(1)}^m\right)^4}{\left[\left(\omega_{(1)}^m\right)^2 - \left(\omega_{(2)}^m\right)^2\right]^2} \quad \text{і} \quad \xi_{(1)}^p = \frac{\left(\omega_{(1)}^p\right)^4}{\left[\left(\omega_{(1)}^p\right)^2 - \left(\omega_{(2)}^p\right)^2\right]^2} \quad (1)$$

Енергія кластерів оброблюваної поверхні та частинки полірувального порошку може набувати дискретних значень і визначається формулами

$$E_{\binom{1}{2}}^m(k_1) = E_{k_0\binom{1}{2}}^m(k_1 + \frac{1}{2}),$$

$$E_{\binom{1}{2}}^p(k_2) = E_{k_0\binom{1}{2}}^p(k_2 + \frac{1}{2}),$$

де $E_{k_0\binom{1}{2}}^m = \hbar\omega_{\binom{1}{2}}^m \xi_{\binom{1}{2}}^m$, $E_{k_0\binom{1}{2}}^p = \hbar\omega_{\binom{1}{2}}^p \xi_{\binom{1}{2}}^p$ – енергія кластерів оброблюваної поверхні та частинки полірувального порошку в основному стані; $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка; $k_{1,2} = \overline{0, K_{1,2}}$ – номер енергетичного рівня; $K_{1,2}$ – кількість рівнів.

Перенесення енергії від кластера частинки полірувального порошку $E_{k_02}^m$ до кластера оброблюваної поверхні $E_{k_01}^m$ та від кластера оброблюваного матеріалу $E_{k_01}^p$ до кластера на поверхні частинки полірувального порошку $E_{k_02}^p$ відбувається за схемою ферстерівського резонансного перенесення енергії в донорно-акцепторній системі [15, 16] (рис. 1).

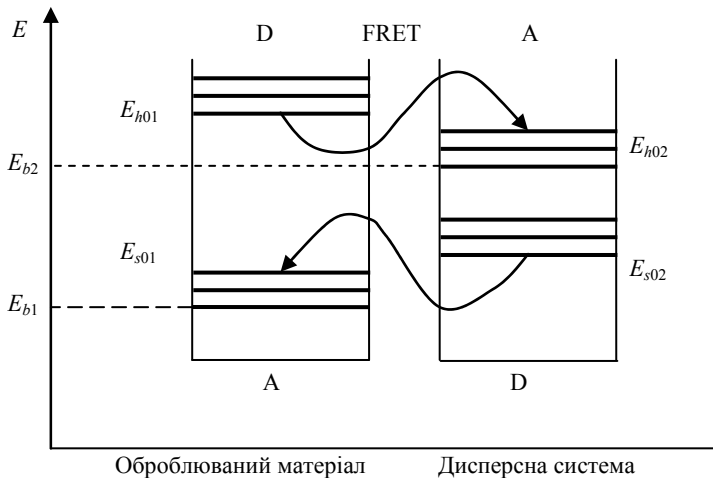


Рис. 1. Перенесення енергії між оброблюваним матеріалом і частинкою полірувального порошку за ферстерівським механізмом.

Частинки шламу оброблюваного матеріалу та частинки зносу полірувального порошку утворюються тільки тоді, коли енергія відповідних кластерів перевищує значення їх енергій зв'язку E_{b1} і E_{b2} . При перенесенні енергії від кластерів частинок полірувального порошку до кластерів оброблюваної поверхні, енергія останніх може набувати дискретних значень

$$Em_1(n_1) = E_{s01}(n_1 + \frac{1}{2}) \quad \text{і} \quad Em_2(n_1) = E_{s02}(n_1 + \frac{1}{2}), \quad \text{де} \quad E_{s01} = 2\mu_1 E_{k_01}^m,$$

$$E_{s02} = 2\mu_1 E_{k_02}^m, \quad \mu_1 = \frac{E_{b1}}{E_1^m(0)} - \text{нормований коефіцієнт, } n_1 = \overline{0, N_1} \quad \text{і} \quad N_1 - \text{номери}$$

та кількість квантових рівнів. При перенесенні енергії від кластерів оброблюваної поверхні до кластерів частинок полірувального порошку їх енергія може набувати дискретних значень $Ep_1(n_2) = E_{h01}(n_2 + \frac{1}{2})$ і $Ep_2(n_2) = E_{h02}(n_2 + \frac{1}{2})$,

де $E_{h01} = 2\mu_2 E_{k01}^p$, $E_{h02} = 2\mu_2 E_{k02}^p$, $\mu_2 = \frac{E_{b2}}{E_2^p(0)}$ – нормований коефіцієнт, $n_2 =$

$\overline{0, N_2}$ і N_2 – номери та кількість квантових рівнів.

Ймовірності утворення частинок шламу та частинок зносу описуються функціями розподілу Пуассона за площами їхніх поверхонь

$$P(n_1, v_1) = \frac{e^{-v_1} v_1^{n_1}}{n_1!} = \frac{1}{en_1!} \quad \text{і} \quad P(n_2, v_2) = \frac{e^{-v_2} v_2^{n_2}}{n_2!} = \frac{1}{en_2!} \quad (v_1 = v_2 = 1 - \text{параметри}$$

розподілу), їх найбільш ймовірні розміри $a_{v1} = \sum_{n_1} d_1(n_1)P(n_1, v_1)$ і

$a_{v2} = \sum_{n_2} d_2(n_2)P(n_2, v_2)$ залежать від кількості молекулярних фрагментів ξ_1^m і

ξ_2^p , а енергія визначається у відповідності до формул

$$\Delta E_m = \sum_{n_1} E p_1(n_1) - \sum_{n_1} E m_1(n_1) - E_{b1}; \quad (2)$$

$$\Delta E_p = \sum_{n_2} E m_2(n_2) - \sum_{n_2} E p_2(n_2) - E_{b2}. \quad (3)$$

Ефективність резонансного перенесення енергії між донором і акцептором суттєво залежить від просторового і спектрального розділення між ними та часу життя їх збудженого стану і може наблизитись до одиниці при відстані між оброблюваною поверхнею і частинкою полірувального порошку не більшій 10 нм та розстроюванні енергії δE_m , δE_p , які складають одиниці міліелектронвольт [17, 18]. Ефективність передачі енергії $\Psi_{(p)}^{(m)}$ визначається як відно-

шення часу життя $\tau_{(p)}^{(m)}$ збудженого стану донора за наявності акцептора до

часу його життя $\tau_{D(p)}^{(m)}$ за відсутності акцептора у відповідності до формули

$$\Psi_{(p)}^{(m)} = \frac{\tau_{(p)}^{(m)}}{\tau_{D(p)}^{(m)}}. \quad \text{Час життя збудженого стану кластерів оброблюваної поверхні}$$

та частинок полірувального порошку визначається як величина, обернена ймовірності квантового переходу зі збудженого стану у всі стани з меншою енергією. З теорії квантових переходів відомо, що ймовірність дипольного переходу пропорційна частоті і визначається формулою $w_{mn} = 4\alpha^3 \omega_m / 3$, де

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137} \quad - \text{ стала тонкої структури; } e - \text{ заряд електрона; } c - \text{ швидкість}$$

світла [19, 20], що дозволяє визначити час життя кластерів оброблюваної поверхні та частинок полірувального порошку у збудженому стані у відповідності до формул

$$\tau_m = \frac{3N_m}{4\alpha^3 \omega_m^3}; \quad (4)$$

$$\tau_p = \frac{3N_p}{4\alpha^3 \omega_p^3}, \quad (5)$$

де N_m , N_p – 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 їх виродження і визначається у відповідності до формул $N_m = k_{dm} N_{0m}$ і $N_p = k_{dp} N_{0p}$,

де N_{0m} , N_{0p} – кількість енергетичних рівнів; $k_{dm} = \prod_{n_1=1}^{f_1} \frac{(n_1 + g_1 - 1)!}{n_1!(g_1 - 1)!}$,

$k_{dp} = \prod_{n_2=1}^{f_2} \frac{(n_2 + g_2 - 1)!}{n_2!(g_2 - 1)!}$ – кратність виродження рівнів; f_1, f_2 – кількість ступенів

вільності коливального руху кластерів оброблюваної поверхні та частинки полірувального порошку відповідно; g_1, g_2 – кількість нормальних коливань кластерів оброблюваної поверхні та частинки полірувального порошку.

Енергія перенесення, яка показує енергетичні витрати, необхідні для видалення з оброблюваної поверхні або з частинок полірувального порошку одиниці маси матеріалу у відповідності до фізико-статистичної моделі утворення та видалення частинок шламу оброблюваного матеріалу під час полірування [1, 2, 4, 21–23], залежить від енергії частинок шламу ΔE_m та частинок зносу ΔE_p (формули (2), (3)), коефіцієнта ефективності передачі енергії $\Psi_{(p)}^{(m)}$,

часу життя кластерів оброблюваної поверхні τ_m і частинок полірувального порошку τ_p у збудженому стані та визначається у відповідності до формул

$$U_m^* = \frac{\Delta E_m \Psi_m}{\rho_1 V_1 \tau_m}; \quad U_p^* = \frac{\Delta E_p \Psi_p}{\rho_2 V_2 \tau_p}, \quad (6)$$

де ρ_1, ρ_2 – густина оброблюваного матеріалу та полірувального порошку; V_1, V_2 – об'єми частинок шламу і частинок зносу полірувального порошку.

Коефіцієнти об'ємного зносу при видаленні частинок шламу з оброблюваної поверхні та частинок зносу з частинок полірувального порошку, згідно кластерній моделі полірування неметалевих матеріалів [1, 2] обернено пропорційні енергії перенесення у відповідності до формул $\eta_m = \frac{\lambda_1 T}{\rho_1 U_m^*}$ і

$\eta_p = \frac{\lambda_2 T}{\rho_2 U_p^*}$, де λ_1, λ_2 – коефіцієнти теплопровідності оброблюваного матеріалу та полірувального порошку; T – температура з зоні контакту оброблюваної поверхні та притиру.

Швидкість видалення оброблюваного матеріалу (продуктивність полірування) та інтенсивність зношування полірувального порошку визначаються добутком коефіцієнта об'ємного зносу на ефективну довжину шляху тертя частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні [1, 2], яка змінюються пропорційно відношенню часу життя $\tau_{(p)}^{(m)}$ збудженого

стану донора до часу контакту зерна полірувального порошку з оброблюваною поверхнею. Тобто, продуктивність полірування та інтенсивність зношування полірувального порошку можна визначити за формулами

$$Q = \eta_m L_t \frac{\tau_p}{t_c}; \quad I = \eta_p L_t \frac{\tau_m}{t_c}, \quad (7)$$

де L_t – довжина шляху тертя частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні; $t_c = d/u$ – час контакту частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею; d – середній розмір частинок полірувального порошку; u – швидкість відносного переміщення деталі та полірувального інструменту.

ВПЛИВ ЕНЕРГІЇ ПЕРЕНЕСЕННЯ ОБРОБЛЮВАНОВОГО МАТЕРІАЛУ ТА ПОЛІРУВАЛЬНОГО ПОРОШКУ НА ПОКАЗНИКИ ПОЛІРУВАННЯ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

Дослідження закономірностей перенесення енергії між поверхнею оброблюваної деталі та дисперсною фазою полірувальної системи здійснювали при поліруванні плоских поверхонь оптичних деталей на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою полірувального інструменту з пінополіуретану діаметром 100 мм при зусиллі притискання 50 Н, частоті обертання 90 об/хв, середній температурі в зоні контакту оброблюваної деталі та притиру $T = 298 \text{ K}$. Оброблювали деталі з оптичного скла марки К8 ($\rho_1 = 2,52 \text{ г/см}^3$, $\lambda_1 = 1,114 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$), оптичного ситалу марки СО115М (Zerodur) ($\rho_1 = 2,46 \text{ г/см}^3$, $\lambda_1 = 1,19 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) та пластмасові сцинтилятори з полістиролу ПС ($\rho_1 = 1,06 \text{ г/см}^3$, $\lambda_1 = 0,12 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) [4, 24–27]. Полірування здійснювали за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків (ДС1) ($\rho_2 = 3,86 \text{ г/см}^3$, $\lambda_2 = 1,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) [3] та водяної суспензії двооксиду церію (ДС2) ($\rho_2 = 6,62 \text{ г/см}^3$, $\lambda_2 = 3,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) [4]. Підготовка плоских поверхонь оптичних деталей під полірування здійснювалась за допомогою традиційних методів тонкого та надтонкого шліфування [4, 28–31]. Частоту власних коливань досліджуваних матеріалів визначали за спектрами ІЧ-поглинання (Фур'є-спектрометр Nicolet 6700). Частоти власних коливань молекулярних фрагментів оптичного ситалу СО115М та частинок полірувального порошку дисперсної системи складали відповідно 750,48, 948,29, 1055,66 см^{-1} та 597, 733, 777, 850, 870, 943, 984, 1085 см^{-1} ; частоти власних коливань молекулярних фрагментів оптичного скла марки К8 – 443, 568, 811, 1061, 1165 см^{-1} [4], полістиролу – 537, 694, 753, 905, 1027 см^{-1} [32], частинок двооксиду церію – 465, 521, 848 см^{-1} [33].

Розрахунок кількості молекулярних фрагментів в кластерах ξ_1^m ; ξ_2^m ; ξ_1^p ; ξ_2^p (формули (1)), енергії частинок шламу ΔE_m та частинок зносу ΔE_p (формули (2) і (3)), часу життя кластерів оброблюваної поверхні τ_m і частинок полірувального порошку τ_p у збудженому стані (формули (4), (5)), коефіцієнтів ефективності передачі енергії ψ_m і ψ_p , енергій перенесення U_m^* і U_p^* (формули (6)), які характеризують енергетичні витрати, необхідні для видалення частинок шламу з оброблюваної поверхні та частинок зносу з частинок полірувального порошку, а також продуктивність полірування та інтенсивність зношування полірувального порошку [34, 35] (формули (7)), здійснювався за спектроскопічних параметрів оброблюваного матеріалу та полірувального порошку, наведених в табл. 1.

Показники полірування плоских поверхонь деталей з оптичного скла марки К8 і оптичного ситалу Zerodur та пластмасових сцинтиляторів з полістиролу ПС за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків (ДС1) та водяної суспензії двооксиду церію (ДС2) наведено в табл. 2.

В результаті досліджень встановлено, що під час полірування оптичних поверхонь деталей з оптичного скла і ситалу та пластмасових сцинтиляторів з полістиролу за допомогою полірувальних дисперсних систем ДС1 та ДС2 енергія частинок шламу ΔE_m (рис. 2) та енергія частинок зносу ΔE_p (рис. 3) зменшуються при зменшенні розстроювання енергії δE_m та δE_p відповідно. При цьому коефіцієнти ефективності передачі енергії ψ_m від дисперсної фази полірувальної системи до оброблюваної поверхні та ψ_p від оброблюваного матеріалу до частинок полірувального порошку зростають (рис. 4, 5). Це означає, що при зменшенні спектрального розділення між донором і акцептором ефективність резонансного перенесення енергії між ними зростає, а енергія, що витрачається на утворення частинок шламу оброблюваного матеріалу

ΔE_m та частинок зносу полірувального порошку ΔE_p , зменшується. При цьому розстроювання енергії змінюється в межах: $\delta E_m = 2,8-11,9$ меВ і $\delta E_p = 2,0-12,2$ меВ. Крім того, зменшення спектрального розділення між оброблюваним матеріалом і частинками полірувального порошку зумовлює збільшення кількості молекулярних фрагментів в кластерах ξ_1^m та ξ_2^p і розмірів частинок шламу та зносу, що утворюються при поліруванні.

Таблиця 1. Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою при поліруванні оптичних поверхонь

Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою	Оброблюваний матеріал					
	К8	СО-115М	ПС	К8	СО-115М	ПС
	Полірувальна дисперсна система					
	ДС1			ДС2		
Частота ω_1^m , $10^{14} \text{ c}^{-1} (\text{cm}^{-1})$	1,07 (568)	1,42 (750)	1,32 (702)	0,84 (443)	0,92 (490)	1,42 (753)
Частота ω_2^m , $10^{14} \text{ c}^{-1} (\text{cm}^{-1})$	1,13 (597)	1,47 (777)	1,38 (733)	0,88 (465)	0,98 (521)	1,60 (848)
ω_2^m/ω_1^m	1,056	1,032	1,042	1,050	1,065	1,126
Частота ω_1^p , $10^{14} \text{ c}^{-1} (\text{cm}^{-1})$	1,53 (811)	1,79 (948)	1,31 (694)	1,07 (568)	0,92 (490)	1,01 (537)
Частота ω_2^p , $10^{14} \text{ c}^{-1} (\text{cm}^{-1})$	1,38 (733)	1,64 (870)	1,14 (597)	0,98 (521)	0,88 (465)	0,98 (521)
ω_1^p/ω_p^m	1,109	1,091	1,164	1,092	1,049	1,031
Розстроювання енергії δE_m , меВ	4,0	3,0	3,6	2,8	4,0	11,9
δE_p , меВ	9,9	9,9	12,2	5,9	2,8	2,0
Коефіцієнт ефективності передачі енергії ψ_m і ψ_p	0,95	0,97	0,96	0,95	0,94	0,89
	0,90	0,92	0,86	0,92	0,95	0,97

Таблиця 2. Показники процесу полірування оптичних поверхонь

Оброблюваний матеріал	К8	СО-115М	ПС	К8	СО-115М	ПС
Дисперсна система	ДС1			ДС2		
Продуктивність полірування Q , $10^{-13} \text{ m}^3/\text{c}$	6,1	26,4	37,1	102,9	50,8	4,2
Експеримент: $10^{-13} \text{ m}^3/\text{c}$	6,2	27,6	39,3	98,1	47,4	4,0
мкм/год	0,8	4,7	5,0	12,5	8,1	0,5
Інтенсивність зношення полірувального порошку I_t , $10^{-13} \text{ m}^3/\text{c}$	2,8	4,6	13,3	58,9	430,0	2925,0
Шорсткість поверхні						
Ra , нм	6,6±0,3	8,0±0,4	7,1±0,2	6,2±0,2	6,5±0,1	3,5±0,1
Rq , нм	7,1±0,3	8,6±0,4	7,5±0,2	6,6±0,3	7,0±0,2	3,7±0,2
$Rmax$, нм	12,7±1,0	14,5±0,6	12,5±1,0	12,0±0,9	12,2±0,6	6,5±0,8

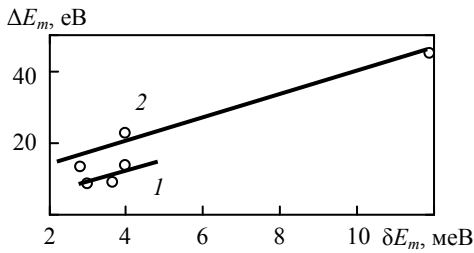


Рис. 2. Залежність енергії частинок шламу ΔE_m від розстроювання енергії δE_m під час полірування оптичних поверхонь за допомогою дисперсних систем ДС1 (1) і ДС2 (2).

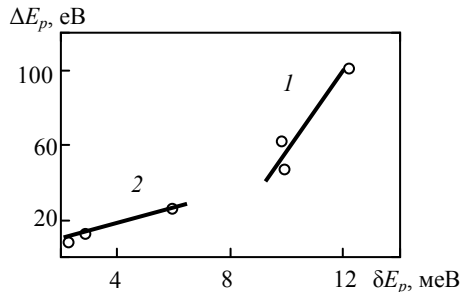


Рис. 3. Залежність енергії частинок зносу ΔE_p від розстроювання енергії δE_p під час полірування оптичних поверхонь за допомогою дисперсних систем ДС1 (1) і ДС2 (2).

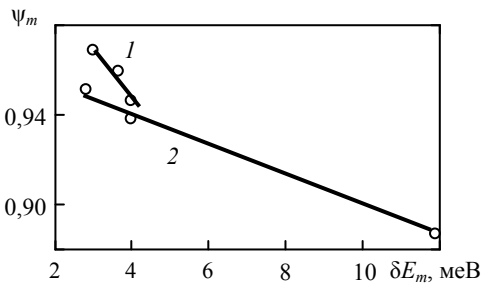


Рис. 4. Залежність коефіцієнта ефективності передачі енергії ψ_m від розстроювання енергії δE_m під час полірування дисперсними системами ДС1 (1) і ДС2 (2).

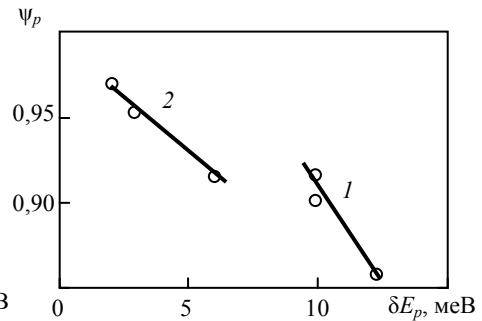


Рис. 5. Залежність коефіцієнта ефективності передачі енергії ψ_p від розстроювання енергії δE_p під час полірування дисперсними системами ДС1 (1) і ДС2 (2).

Залежності $\xi_1^m = f(\delta E_m)$, $\xi_2^p = f(\delta E_p)$ знаходяться у повній відповідності до залежностей коефіцієнтів ефективності передачі енергії ψ_m (див. рис. 4) і ψ_p (див. рис. 5) від розстроювання енергії δE_m і δE_p , а наведені на рис. 6 залежності параметрів шорсткості Ra , Rq , $Rmax$ полірованих оптичних поверхонь від розстроювання енергії δE_m під час полірування за допомогою дисперсних систем ДС1 і ДС2 свідчать, що за зменшення спектрального розділення між оброблюваним матеріалом та полірувальним порошком спостерігається збільшення розмірів частинок шламу і відповідно погіршення шорсткості оброблених поверхонь.

За параметрами шорсткості можна оцінити значення просторового розділення між оброблюваною поверхнею та частинками полірувального порошку, що визначається параметрами шорсткості Ra , Rq , які не перевищують 10 нм (див. табл. 2).

Залежності продуктивності полірування Q оптичних поверхонь від енергії перенесення U_m^* та інтенсивності зношування I_i полірувального порошку від енергії перенесення U_p^* , які суттєво залежать від ефективності переносу енергії між оброблюваним матеріалом та полірувальною дисперсною системою, наведено на рис. 7, 8.

Залежності продуктивності полірування оптичних поверхонь та інтенсивності зношування частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи від відповідних енергій перенесення, які підтверджують основні положення кластерної теорії полірування неметалевих матеріалів, вивчено на основі результатів квантово-механічного опису механізму резонансного пере-

несення енергії між дисперсною системою та оброблюваним матеріалом. Експериментальну перевірку отриманих результатів, яку неможливо здійснити під час експериментального спостереження наночастинок шламу та зносу в зоні контакту оброблюваної поверхні та притиру, здійснювали під час вимірювання зняття оброблюваного матеріалу.

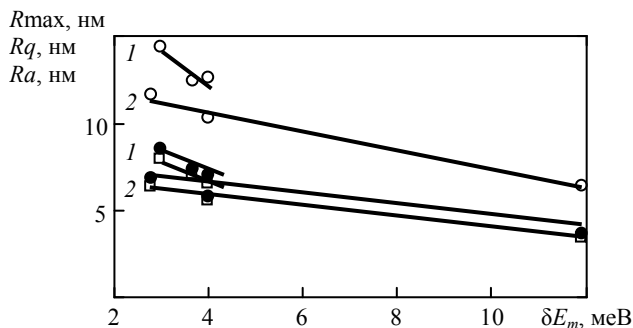


Рис. 6. Залежність параметрів шорсткості Ra (\square), Rq (\bullet), R_{max} (\circ) полірованих поверхонь від розстроювання енергії ΔE_m під час полірування дисперсними системами ДС1 (1) і ДС2 (2).

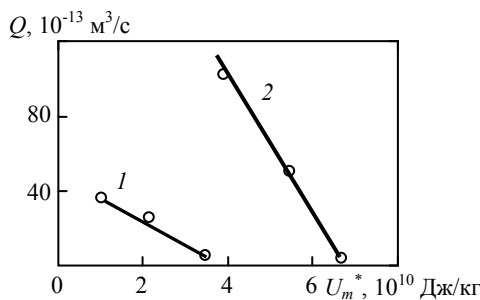


Рис. 7. Залежність продуктивності полірування оптичних поверхонь від енергії перенесення: 1 – ДС1; 2 – ДС2.

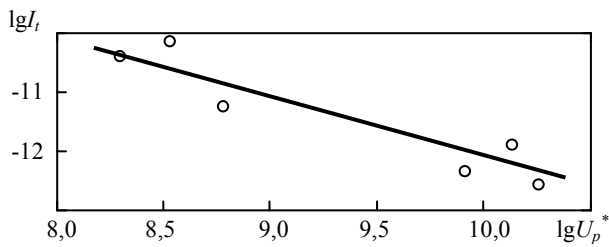


Рис. 8. Залежність інтенсивності зношування полірувального порошку від енергії перенесення.

Показано, що результати теоретичного розрахунку продуктивності полірування оптичних матеріалів збігаються з результатами експериментів, їх відхилення складає від 2 до 7 % (див. табл. 2).

ВИСНОВКИ

В результаті дослідження механізму взаємодії оптичної поверхні з полірувальною дисперсною системою під час полірування встановлено, що перенесення енергії між ними є наслідком диполь-дипольної взаємодії в донорно-акцепторній системі і відбувається за ферстерівським механізмом. Показано, що за резонансного перенесення енергії від частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи до оброблюваної поверхні та від оброблювано-

го матеріалу до частинок полірувального порошку утворюються частинки шламу та частинки зносу, енергія яких зменшується при зменшенні спектрального розділення між ними. При цьому ефективність передачі енергії від дисперсної фази полірувальної системи до оброблюваної поверхні та від оброблюваного матеріалу до полірувального порошку зростають, а спектральне розділення характеризується значеннями розстроювання енергії, яке складає 2,8–4,0 меВ при утворенні частинок шламу і 2,8–12,2 меВ при утворенні частинок зносу.

Встановлено, що зменшення спектрального розділення між оброблюваним матеріалом і частинками полірувального порошку зумовлює збільшення розмірів частинок шламу і частинок зносу, що призводить до зростання параметрів шорсткості Ra , Rq , $Rmax$ оптичних поверхонь під час полірування за допомогою полірувальних дисперсних систем. При цьому значення просторового розділення між оброблюваною поверхнею та частинками полірувального порошку оцінюється за значеннями висотних параметрів шорсткості полірованої поверхні. Показано, що продуктивність полірування оптичних поверхонь та інтенсивність зношування частинок полірувального порошку зменшуються при зростанні відповідних енергій перенесення, що підтверджує основні положення кластерної теорії полірування неметалевих матеріалів та правочинність квантово-механічного опису механізму резонансного перенесення енергії між дисперсною системою та оброблюваним матеріалом. Показано, що результати теоретичного розрахунку продуктивності полірування оптичних матеріалів збігаються з результатами експериментів за відхилення до 10 %.

Yu. D. Filatov¹, V. I. Sidorko¹, A. Y. Boyarintsev², S. V. Kovalev¹,
V. A. Kovalev¹

¹Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Institute for Scintillation Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine
Transfer energy during the interaction of the optical surface
with the polishing dispersion system

As a result of studying the mechanism of interaction of the optical surface with the polishing dispersed system during polishing, it was found that the energy transfer between them occurs by the Ferster mechanism. It is shown that with resonant energy transfer from particles of the dispersed phase of the polishing system to the treated surface and from the treated material to the particles of polishing powder with decreasing spectral separation between them, the energy of sludge particles and wear particles decreases and energy transfer efficiency increases. The spectral separation is characterized by a detuning of energy, which is 2.8–4.0 meV for sludge particles and 2.8–12.2 meV for wear particles. The spatial separation between the treated surface and the particles of polishing powder is estimated as the arithmetic mean deviation of the profile of the polished surface of 5.6–8.0 nm. It was found that the reduction of the spatial and spectral separation between the treated material and the particles of polishing powder causes an increase in the size of the sludge particles and wear particles, which leads to a deterioration of the roughness of the optical surfaces. It is shown that the results of the theoretical calculation of the polishing productivity of optical materials coincide with the results of experiments with a deviation of 10%.

Keywords: *polishing, resonant energy transfer, polishing productivity, surface roughness.*

1. 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 et al. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. P. 129–165.
2. 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.
3. 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.
4. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Філатов О.Ю., Ковальов С.В. Фізичні засади формування прецизійних поверхонь під час механічної обробки неметалевих матеріалів. Монограф. Київ: Наук. думка, 2017. 248 с.
5. Suratwala T.I. *Materials Science and Technology of Optical Fabrication.* USA, Hoboken: Wiley, 2018. 416 p.
6. 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, no. 6099. P. 1–10.
7. 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.
8. 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.
9. Заболотский А.А. Резонансный перенос энергии между сферической наночастицей и J-агрегатом. *Автометрия.* 2017. Т. 53, № 3. С. 81–88.
10. 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.
11. Jones G.A., Bradshaw D.S. Resonance energy transfer: from fundamental theory to recept applications. *Front. Phys.* 2019. Vol. 7, art. 100. P. 1–19.
12. 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.
13. Wang Yu., Wang Lihong V. Forster resonance energy transfer photoacoustic microscopy. *J. Biomedical Optics.* 2012. Vol. 17, no. 8, art. 086007. P. 1–5.
14. Abeystickrama Ch., Premaratne M., Andrews D.L. Analysis of Förster resonance energy transfer (FRET) in the vicinity of a charged metallic nanosphere via nonlocal optical response method. *Proc. SPIE, Nanophotonics VIII.* 2020. Vol. 113451B.
15. 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.
16. Liu F., Rodina A.V., Yakovlev D.R., Golovatenko A.A., Greilich 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.
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. Cardullo R.A. Principles of non-radiative FRET: the spectroscopic ruler. *Microsc. Anal.* 2002. Vol. 88, P. 19–21.
19. Юхновський І.Р. Основи квантової механіки: Навч. посібник. Київ: Либідь, 2002. 392 с.
20. Trachenko K., Monserrat B., Pickard C.J., Brazhkin V.V. Speed of sound from fundamental physical constants. *Sci. Adv.* 2020. Vol. 6, no. 41, art. 8662.
21. 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.
22. 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 sur-

- face microprofile formation in polishing quartz. *J. Superhard Mater.* 2010. Vol. 32, no. 6. P. 415–422.
23. 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.
 24. Balat-Pichelin M., De Sousa Meneses D., Annaloro J. Behavior and optical properties of Zerodur® at high temperatures. *Infrared Phys. Techn.* 2019. Vol. 101. P. 68–77.
 25. Doret A., Pellerin N., Allix M., Pellerin S., Lena V., Perrigaud K., Massiot D. Influence of alteration solutions on the chemical durability of the Zerodur® glass-ceramic: structural investigation. *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* 2014. Vol. 12, iss. 4. P. 1–12.
 26. Серова В.Н. Полимерные оптические материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2011. 384 с.
 27. Kuvshinskii M.V., Oreshkin S.I., Popov S.M., Rudenko V.N., Yudin I.S., Azarova V.V., Blagov S.V. Tests of cryogenic FP-cavity with mirrors on different substrates. *Appl. Physics (physics.app-ph)*. – *MDPI Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, no. 230. P. 1–12.
 28. Filatov Yu.D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 6. P. 427–433.
 29. 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.
 30. 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.
 31. 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.
 32. Mahasin F. Hadi Al-Kadhemy, Zahraa S. Rasheed, Sanaa R. Salim. Fourier transform infrared spectroscopy for irradiation coumarin doped polystyrene polymer films by alpha ray. *J. Rad. Res. Appl. Sci.* 2016. Vol. 9, no. 3. P. 321–331.
 33. Babitha K.K., Sreedevi A., Priyanka K.P., Sabu Boby. Structural characterization and optical studies of CeO₂ nanoparticles synthesized by chemical precipitation. *Indian J. Pure Appl. Phys.* 2015. Vol. 53. P. 596–603.
 34. Filatov O.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Filatov Yu.D., Vetrov A.G. Material removal rate in polishing anisotropic monocrystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2016. Vol. 38, no. 2. P. 123–131.
 35. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Boyarintsev A.Y., Kovalev S.V., Garachenko V.V., Kovalev V.A. Influence of spectroscopic parameters of the processed material and polishing powder for polishing of optical surfaces *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no 1.

Надійшла до редакції 07.07.21

Після доопрацювання 27.10.21

Прийнята до опублікування 01.11.21