

Дослідження процесів обробки

УДК 621.623

Ю. Д. Філатов

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

filatov2045@gmail.com

Нові закономірності полірування поверхонь деталей з неметалевих матеріалів

В результаті дослідження механізму полірування прецизійних поверхонь деталей з неметалевих матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікро- та наночастинок полірувальних порошків встановлено, що утворення частинок шламу оброблюваного матеріалу, частинок зносу полірувального порошку і матеріалу притира є наслідком ферстерівського резонансного перенесення енергії, яке відбувається в резонаторі, утвореному двома паралельними поверхнями оброблюваного матеріалу і притира. Показано, що за підвищення добротності резонатора продуктивність полірування неметалевих матеріалів нелінійно зростає, а шорсткість оброблених поверхонь погіршується. Встановлено зв'язок між добротністю і оптичною довжиною резонатора і показано, що максимальних значень швидкості зняття оброблюваного матеріалу, інтенсивності зносу полірувального порошку та зносу поверхні притира досягають, коли оптична довжина резонатора дорівнює цілому числу півхвиль, характерних для наночастинок шламу, полірувального порошку і матеріалу притира. Показано, що продуктивність полірування деталей з неметалевих матеріалів і шорсткість їхніх полірованих поверхонь екстремально залежать від розділення між оброблюваним матеріалом, полірувальним порошком і дисперсною системою за діелектричною проникністю.

Ключові слова: *резонансне перенесення енергії, швидкість зняття матеріалу, шорсткість.*

ВСТУП

Традиційно полірування прецизійних поверхонь деталей оптико-електронної техніки та оптичних систем з неметалевих матеріалів здійснюються за допомогою полірувальних дисперсійних систем з неабразивних мікро- та нанопорошків. Швидкість зняття оброблюваного матеріалу і шорсткість полірованих поверхонь залежать від реологічних властивостей дисперсної системи, структури оброблюваного матеріалу, а також їхніх діелектричних та спектроскопічних характеристик [1–9]. Підвищення швидкості поліру-

вання та поліпшення якості прецизійних деталей з неметалевих матеріалів можливі лише за удосконалення технології їхнього полірування та розробки нових полірувальних дисперсійних систем, які б забезпечували достатню швидкість зняття оброблюваного матеріалу і формування необхідного нанопрофілю полірованої поверхні за повної відсутності дефектів. Саме тому дослідження закономірностей полірування прецизійних поверхонь деталей з неметалевих матеріалів за допомогою дисперсійних систем з мікро- та нанопорошків, вивчення механізму взаємодії наночастинок шламу та зносу полірувального порошку і матеріалу притира в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира та дослідження закономірностей утворення нанорельєфу полірованої поверхні та локалізації нальоту з частинок шламу й частинок зносу [10–14] є актуальними.

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей зняття оброблюваного матеріалу та формування нанопрофілю полірованої поверхні під час полірування прецизійних поверхонь деталей з неметалевих матеріалів за допомогою полірувальних дисперсійних систем з мікро- та нанопорошків.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження закономірностей полірування прецизійних поверхонь деталей оптико-електронних пристроїв з оптичного скла марки К8 ($\epsilon_1 = 6,5$), радіотехнічного ситалу марки СТ-50-1 ($\epsilon_1 = 8,5$), астроситалу марки СО115М (Zerodur) ($\epsilon_1 = 8,0$), оптичних і напівпровідникових кристалів сапфіру (Al_2O_3 , площина $(11\bar{2}0)$, $\epsilon_1 = 9,3$) і карбіду кремнію (SiC , площина (0001) , $\epsilon_1 = 6,5$), алюмонітридної кераміки (AlN , $\epsilon_1 = 8,5$) [6–8, 15–17] та полімерних матеріалів – полістиролу (ПС) ($\epsilon_1 = 2,5$), поліметилметакрилату (ПММА) ($\epsilon_1 = 3,9$) і поліалілдігліколькарбонату марки CR-39 ($\epsilon_1 = 10,0$) [8, 18–22] здійснювали на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притира з пінополіуретану ($\epsilon_4 = 1,1$) [1, 23] за зусилля притискання деталі до притира 50 Н, частоти обертання притира 90 об/хв, зміщенні 30 мм та довжині штриха 80 мм, середньої температури в зоні контакту оброблюваної деталі та притира 298 К. Полірування здійснювали за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків (ДС1) ($\epsilon_2 = 6,1$) [6, 24] та водяної суспензії двооксиду церію (ДС2) ($\epsilon_2 = 21,2$) [1], 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), складали: 597, 733, 777, 850, 870, 943, 984, 1085 см^{-1} , а дисперсної системи ДС2 – 465, 521, 848 см^{-1} [25]. Частоти власних коливань молекулярних фрагментів ситалу марки СТ-50-1 та астроситалу марки СО115М складали відповідно: 560,0, 640,96, 719,40, 848,86, 892,17, 1001,89, 1037,99 та 750,48, 948,29, 1055,66 см^{-1} . Досліджувані неметалеві матеріали характеризувались частотами власних коливань молекулярних фрагментів, які визначались за відповідними ІЧ спектрами: К8 – 443, 568, 811, 1061 і 1165 см^{-1} [8]; сапфіру – 577, 601, 638, 669 і 751 см^{-1} [3, 5, 16, 26, 27]; карбіду кремнію – 610, 738, 751 см^{-1} [28–31]; кераміки на основі нітриду алюмінію – 610, 675, 891 і 917 см^{-1} [15, 32]; ПС – 537, 696, 753, 905, 1027 см^{-1} [33–36]; ПММА – 481, 750, 840, 960, 1065 см^{-1} [37–39]; CR-39 – 495, 621, 792, 839 см^{-1} [8, 40–42]. Частоти власних коливань молекулярних фрагментів поверхні поліуретану складали: 500, 765, 820, 922, 993, 1060 см^{-1} [43–49].

Підготовку плоских поверхонь прецизійних деталей під полірування здійснювали за допомогою традиційних методів тонкого та надтонкого шліфування [15, 50–52]. Середні розміри частинок полірувального порошку визна-

чали за зображеннями, отриманими за допомогою растрового електронного мікроскопа Zeiss-EVO50 з системою мікроаналізу AZtec, і склали 409 нм для ДС1 і 910 нм для ДС2. Параметри шорсткості полірованих поверхонь визначали методом комп'ютерного моделювання [5, 8, 53] та контролювали за допомогою безконтактного інтерференційного 3D профілографа Micro-alpha [25, 33, 34, 51, 52]. Зняття оброблюваного матеріалу визначали ваговим методом за допомогою аналітичних терезів мод. АДД-200.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

У відповідності до сучасних уявлень про механізм полірування прецизійних поверхонь деталей з неметалевих матеріалів зняття оброблюваного матеріалу, зношування робочої поверхні полірувального інструменту (притира) та зношування частинок полірувального порошку відбувається внаслідок ферстерівського резонансного перенесення енергії (FRET) [54–60] між частинками дисперсної фази полірувальної дисперсної системи, оброблюваною поверхнею та поверхнею притира у відкритому резонаторі, що утворюється двома паралельними поверхнями оброблюваного матеріалу і притира, завдяки чому уможливується реверсування FRET, коли донор і акцептор міняються місцями [61–63] або є і донорами, і акцепторами одночасно [8, 53, 59]. В результаті FRET за мінімального спектрального і просторового розділення між ними на характерних частотах ω_2^m , ω_1^m (частоти коливань молекулярних фрагментів кластерів на поверхні частинок полірувального порошку та на оброблюваній поверхні) утворюються частинки шламу оброблюваного матеріалу (ЧШ); ω_1^p , ω_2^p (частоти коливань молекулярних фрагментів кластерів на оброблюваній поверхні та на частинці полірувального порошку) утворюються частинки зносу полірувального порошку (ЧП1); ω_5^m , ω_4^m (частоти коливань молекулярних фрагментів кластерів на поверхні частинок полірувального порошку та на робочій поверхні притира) утворюються частинки зносу матеріалу притира (ЧЗ); ω_4^p , ω_5^p (частоти коливань молекулярних фрагментів кластерів на поверхні притира та на частинці полірувального порошку) утворюються частинки зносу полірувального порошку (ЧП2) (рис. 1).

Під час полірування в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира на відміну від FRET лазерів [64–71], які генерують фотони, відбувається генерація наночастинок ЧШ, ЧП1, ЧЗ і ЧП2, які рухаються в резонаторі та характеризуються довжинами хвилі λ_1^m , λ_2^p , λ_4^m і λ_5^p відповідно. Потужність генерації цих наночастинок визначає швидкість зняття оброблюваного матеріалу, інтенсивність зношування полірувального порошку та притира і залежить від оптичної довжини [64, 72] та добротності резонатора [73], яку визначають у відповідності до формул: $q_{m1} = \omega_1^m / (\omega_2^m - \omega_1^m)$, $q_{p2} = \omega_2^p / (\omega_1^p - \omega_2^p)$, $q_{p5} = \omega_5^p / (\omega_4^p - \omega_5^p)$, $q_{m4} = \omega_4^m / (\omega_5^m - \omega_4^m)$ [74, 75].

Оптичну довжину резонатора $L_{\text{опт}}$ визначають добутком довжини резонатора l (яку визначають як товщину проміжку між поверхнями оброблюваного матеріалу і притира, заповненого дисперсною системою, залежить від режимних параметрів процесу полірування та реологічних властивостей дисперсної системи [6]) на показник заломлення $n = (\epsilon_3)^{1/2}$ (ϵ_3 – статична діелектрична проникність дисперсної системи). Узагальнена величина розділення між оброблюваним матеріалом, полірувальним порошком і дисперсною системою за

діелектричною проникністю $H = \frac{\epsilon_3}{\sqrt{\epsilon_1 \epsilon_2}}$ (ϵ_1 , ϵ_2 – статичні діелектричні про-

никності оброблюваного матеріалу і полірувального порошку) [9, 75] також характеризує швидкість зняття оброблюваного матеріалу під час полірування.

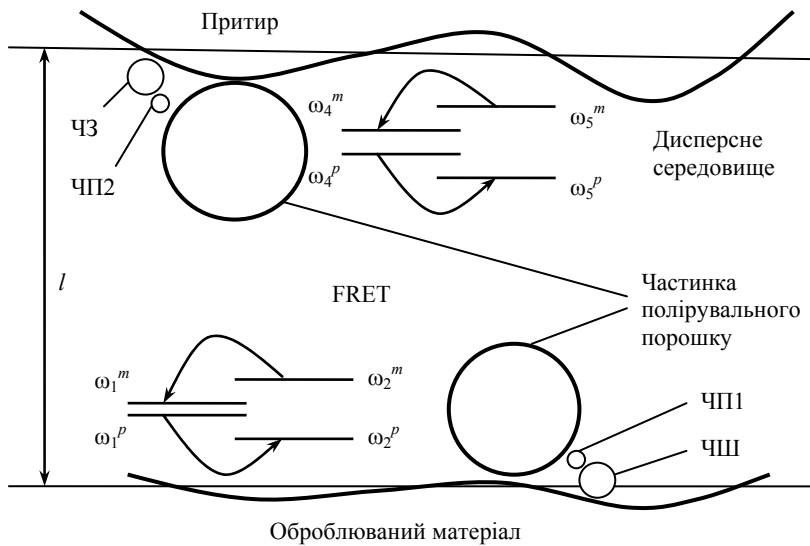


Рис. 1. Схема системи оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира.

Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з поверхнею притира та дисперсною системою, а також показники полірування прецизійних деталей з неметалевих матеріалів наведено в табл. 1, 2.

Таблиця 1. Показники полірування оптичного скла, ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів за допомогою дисперсної системи ДС1

Оброблюваний матеріал	K8	СТ-50-1	CO115	Сапфір	Карбід кремнію	Кераміка AlN
Довжина резонатора l , мкм	5,4	4,6	4,1	1,8	1,3	4,0
Добротність резонатора						
Q_{m1}	10,1	15,1	28,3	23,9	4,9	11,6
Q_{p2}	22,9	39,5	41,9	16,6	4,2	7,7
Q_{m4}				63,7		
Q_{p5}				24,0		
Розділення за діелектричною проникністю H	12,2	10,7	10,9	10,2	12,2	10,7
Продуктивність полірування Q :						
мкм/год	0,8	0,7	2,4	0,9	0,8	1,0
$10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	6,2	5,9	14,3	3,9	2,2	7,7
Параметр шорсткості поверхні Ra , нм	$6,3 \pm 0,3$	$5,4 \pm 0,2$	$7,7 \pm 0,3$	$5,4 \pm 0,3$	$3,9 \pm 0,2$	$5,5 \pm 0,2$

В результаті дослідження закономірностей впливу параметрів взаємодії оброблюваної поверхні з поверхнею притира та дисперсною системою на швидкість зняття оброблюваного матеріалу і шорсткість полірованих поверхонь встановлено, що в напівлогарифмічному масштабі залежності продук-

тивності полірування оптичного скла марки К8, ситалу марки СТ-50-1 і астроситалу марки СО115М (рис. 2, пряма 1), оптичних і напівпровідникових кристалів сапфіру і карбїду кремнію, а також алюмонїтридної кераміки (пряма 2) за допомогою дисперсної системи ДС1 від добротності резонатора є лінійно зростаючими функціями.

Таблиця 2. Показники полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою дисперсних систем ДС1 і ДС2

Оброблюваний матеріал	ПС	ПММА	CR-39	ПС	ПММА	CR-39
Дисперсна система	ДС1			ДС2		
Довжина резонатора l , мкм	4,5	4,2	4,6	6,9	6,0	5,4
Добротність резонатора						
q_{m1}	18,7	27,7	10,2	7,9	105,5	14,2
q_{p2}	37,4	43,2	24,5	32,8	29,0	15,5
q_{m4}		63,7			24,8	
q_{p5}		24,0			14,3	
Розділення за діелектричною проникністю H	19,6	15,7	9,8	9,9	7,9	5,0
Продуктивність полірування Q :						
мкм/год	5,0	19,2	0,3	1,0	92,3	0,8
$10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	39,3	150,7	2,5	0,1	725,0	6,3
Параметр шорсткості поверхні Ra , нм	$9,1 \pm 0,2$	$12,0 \pm 0,8$	$7,3 \pm 0,2$	$5,8 \pm 0,3$	$29,1 \pm 2,1$	$7,6 \pm 0,3$

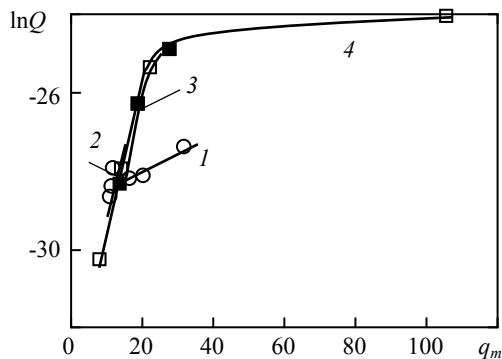


Рис. 2. Залежність продуктивності полірування прецизійних поверхонь від добротності резонатора q_m : оптичне скло марки К8, ситал марки СТ-50-1, астроситал марки СО115М (1), сапфір, карбїд кремнію, алюмонїтридна кераміка (2), ПС, ПММА і CR-39 (3, 4); дисперсна система ДС1 (1, 2, 3) і ДС2 (4).

Під час полірування полімерних оптичних матеріалів (ПС, ПММА і CR-39) спостерігали нелінійну залежність $\ln Q = f(q_m)$ у разі використання дисперсних систем ДС1 (див. рис. 2, крива 3) і ДС2 (крива 4), що пов'язано з суттєвим зростанням продуктивності полірування за мінімальних значень спектрального розділення між оброблюваним матеріалом і частинками полірувального порошку [74, 75].

На рис. 3 наведено залежності шорсткості (параметра Ra) полірованих поверхонь деталей з неметалевих матеріалів від добротності резонатора q_m , які

показують, що під час полірування оптичного скла і ситалів (пряма 1), сапфіру, карбіду кремнію та алюмонітридної кераміки (пряма 2), полімерних оптичних матеріалів ПС, ПММА і CR-39 (пряма 3) за допомогою дисперсної системи ДС1 та ПС, ПММА і CR-39 (пряма 4) за допомогою дисперсної системи ДС2 шорсткість обробленої поверхні погіршується у разі підвищення добротності резонатора.

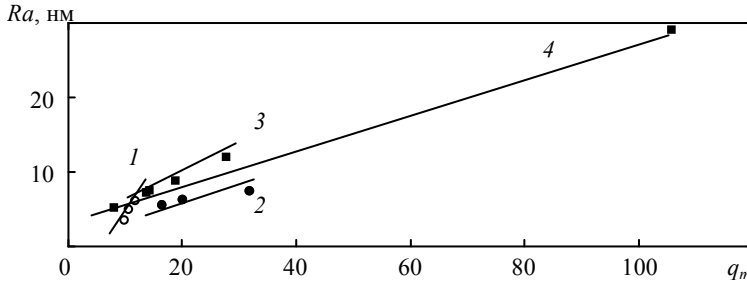


Рис. 3. Залежність параметра шорсткості Ra полірованих поверхонь від добротності резонатора q_m : оптичне скло, ситали (1), сапфір, карбід кремнію, алюмонітридна кераміка (2), ПС, ПММА, CR-39 (3, 4); ДС1 (1, 2, 3) ДС2 (4).

Найбільшу продуктивність полірування (швидкість зняття оброблюваного матеріалу) неметалевих матеріалів досягають у випадку максимального підсилення коливань в оптичному резонаторі й мінімального розсіювання енергії, які відбуваються за умови утворення стоячих хвиль, коли оптична довжина резонатора дорівнює цілому числу півхвиль: $L_{\text{опт}} = ln = k\lambda_l^m/2$ (l – довжина резонатора, n – показник заломлення, k – ціле число). Це означає, що відхилення розрахункового значення $k \geq 1$ від цілого числа визначає зв'язок між добротністю резонатора і його оптичною довжиною. На рис. 4 наведено залежності добротності резонатора від оптичної довжини, характерні для полірування оптичного скла і ситалів, сапфіру, карбіду кремнію та алюмонітридної кераміки (крива 1), ПС, ПММА і CR-39 (крива 2) за допомогою полірувальних дисперсних систем ДС1 і ДС2 відповідно.

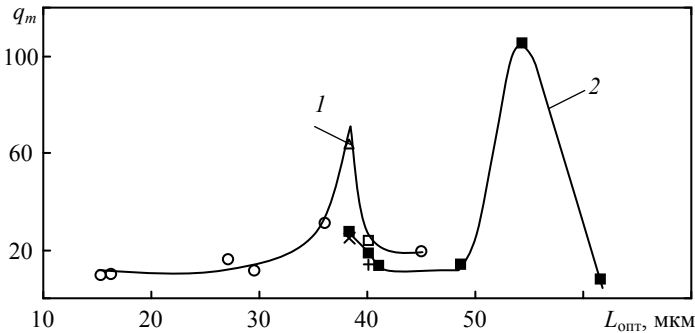


Рис. 4. Залежність добротності резонатора від оптичної довжини: К8, СТ-50-1, СО115М, сапфір, карбід кремнію та алюмонітридна кераміка (1), ПС, ПММА, CR-39 (2).

Максимальне значення добротності резонатора, характерне для кожної із груп оброблюваних матеріалів, відповідає такій оптичній довжині резонатора, для якої число k відрізняється від цілого числа якнайменше. Найбільшою ($q_m = 105,5$) добротністю характеризується оптичний резонатор, який утворюється під час полірування ПММА за допомогою ДС2, коли досягається

максимальна (92,3 мкм/год) продуктивність полірування за значення $k = 9,137$.

Аналіз процесів зношення частинок дисперсної фази дисперсної системи і поверхні притира, коли утворюються частинки зносу полірувального порошку (ЧП1, ЧП2) і частинки зносу матеріалу притира (ЧЗ), які характеризуються довжинами хвилі λ_2^p , λ_5^p і λ_4^m і відповідають характерним оптичним довжинам резонатора $L_{\text{опт}}$, показав, що найбільшій інтенсивності зносу полірувального порошку досягали у разі поліруванні ПС за допомогою дисперсних систем ДС1 ($k = 6,146$, $q_{p2} = 24,0$) і ДС2 ($k = 6,162$, $q_{p2} = 14,3$), а максимальний знос притира спостерігали у разі поліруванні ПММА за допомогою дисперсних систем ДС1 ($k = 5,957$, $q_{m4} = 63,7$) і ДС2 ($k = 3,993$, $q_{m4} = 24,8$).

На рис. 5 в напівлогарифмічному масштабі наведено залежності продуктивності полірування оптичного скла марки К8, ситалів СТ-50-1 і СО115М (крива 1), сапфіру, карбіду кремнію та алюмонітридної кераміки (крива 2) за допомогою дисперсної системи ДС1 від розділення за діелектричною проникністю H , які вказують на суттєву залежність швидкості зняття оброблюваного матеріалу від оптичних сталей, зокрема показника заломлення оброблюваного матеріалу, полірувального порошку і дисперсного середовища. Аналогічні залежності отримано для продуктивності полірування полімерних оптичних матеріалів ПС, ПММА і CR-39 (рис. 6) за використання дисперсних систем ДС1 (крива 1) і ДС2 (крива 2).

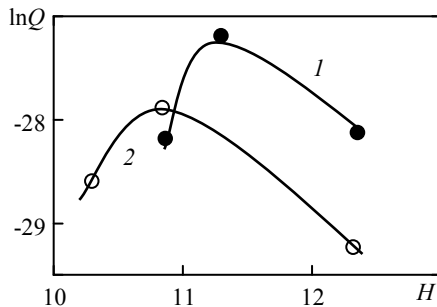


Рис. 5. Залежність продуктивності полірування оптичного скла, ситалів СТ-50-1 і СО115М (1), кристалів сапфіру, карбіду кремнію і алюмонітридної кераміки (2) від розділення за діелектричною проникністю H .

Залежності шорсткості (параметра Ra) полірованих поверхонь деталей з неметалевих матеріалів від розділення за діелектричною проникністю наведено на рис. 7. Вони показують, що під час полірування оптичного скла і ситалів (крива 1), сапфіру, карбіду кремнію та алюмонітридної кераміки (крива 2), ПС, ПММА і CR-39 (крива 3) за допомогою дисперсної системи ДС1 та полімерних прецизійних матеріалів ПС, ПММА і CR-39 (крива 4) за допомогою дисперсної системи ДС2 шорсткість обробленої поверхні змінюється одночасно зі зняттям оброблюваного матеріалу внаслідок утворення наночастинок шламу та їхнього видалення з оброблюваної поверхні.

Слід зауважити, що під час полірування ПММА за допомогою дисперсної системи ДС2, незважаючи на максимальну швидкість зняття оброблюваного матеріалу (92,3 мкм/год), утворюється поверхня з незадовільною шорсткістю ($Ra \approx 0,03$ мкм), яка не задовольняє вимогам до оптичних поверхонь. Крім того, у разі полірування ПС з використанням дисперсних систем ДС1 і ДС2 на поверхнях оброблюваної деталі і притира утворюються фрагменти нальоту з частинок зносу полірувального порошку й частинок зносу матеріалу притира.

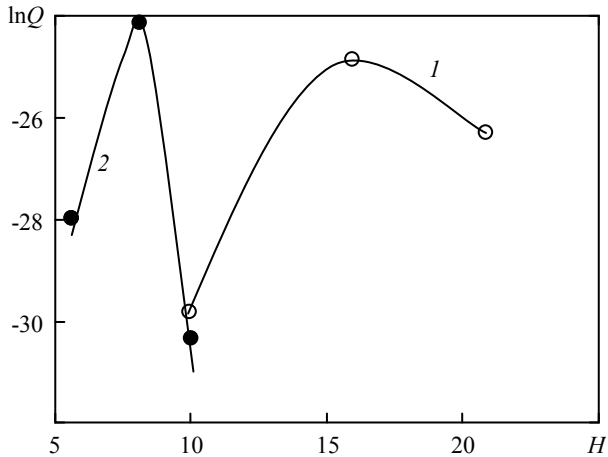


Рис. 6. Залежність продуктивності полірування полімерних оптичних матеріалів від розділення за діелектричною проникністю H : ДС1 (1), ДС2 (2).

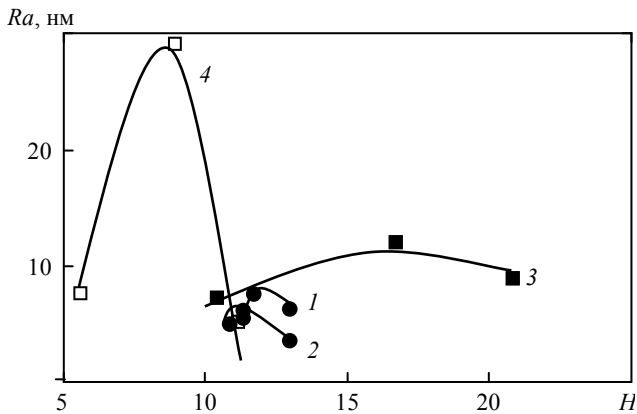


Рис. 7. Залежність параметра шорсткості Ra полірованих поверхонь деталей з полімерних матеріалів від розділення за діелектричною проникністю H : К8, СТ-50-1 і СО115М (1), сапфір, карбід кремнію та алюмонітридна кераміка (2), ПС, ПММА і CR-39 (3, 4); ДС1 (1, 2, 3), ДС2 (4).

ВИСНОВКИ

В результаті дослідження механізму полірування прецизійних поверхонь деталей з неметалевих матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікро- та наночастинок полірувальних порошків встановлено, що утворення частинок шламу оброблюваного матеріалу, частинок зносу полірувального порошку і матеріалу притира є наслідком FRET, яке відбувається у відкритому резонаторі, утвореному двома паралельними поверхнями оброблюваного матеріалу і притира.

Показано, що за підвищення добротності резонатора продуктивність полірування оптичного скла, ситалів, кристалічних, керамічних і полімерних матеріалів нелінійно зростає, а шорсткість оброблених поверхонь погіршується.

Встановлено зв'язок між добротністю і оптичною довжиною резонатора і показано, що під час полірування неметалевих матеріалів максимальні значення швидкості зняття оброблюваного матеріалу, інтенсивності зносу полірувального порошку та зносу поверхні притира досягали, коли оптична дов-

жина резонатора дорівнювала цілому числу півхвиль, характерних для наночастинок шламу, полірувального порошку і матеріалу притира.

Показано, що продуктивність полірування деталей з неметалевих матеріалів і шорсткість їхніх полірованих поверхонь екстремально залежать від розділення між оброблюваним матеріалом, полірувальним порошком і дисперсною системою за діелектричною проникністю, що вказує на суттєву залежність показників полірування від показників заломлення.

Yu. D. Filatov

Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
New regularities of polishing surfaces of parts made
of non-metallic materials

As a result of studying the mechanism of polishing precision surfaces of non-metallic parts using dispersed systems of micro- and nanoparticles of polishing powders, it was found that the formation of sludge particles, polishing powder and grinding particles is a consequence of Ferster resonant energy transfer (FRET). This occurs in the resonator formed by two parallel surfaces of the work piece and grinding. It is shown that with increasing the quality factor of the resonator, the polishing productivity of nonmetallic materials increases nonlinearly, and the roughness of the treated surfaces deteriorates. The relationship between the quality factor and the optical length of the resonator is established and it is shown that the maximum values of the removal rate of the treated material, the intensity of wear of polishing powder and wear of the grinding surface are achieved at a certain optical length of the resonator. It is equal to the number of half-waves characteristic of the nanoparticles of sludge, polishing powder and grinding material. It is shown that the polishing performance of parts made of non-metallic materials and the roughness of their polished surfaces are extremely dependent on the separation between the processed material, polishing powder and the dispersed system by dielectric constant.

Keywords: resonant energy transfer, material removal rate, roughness.

1. Filatov Y.D. Polishing of precision surfaces of optoelectronic device elements made of glass, sitall, and optical and semiconductor crystals: A review. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 1. P. 30–48.
2. Filatov Yu.D., Filatov O.Y., Monteil G, Heisel U., Storchak M.G. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials. *Proc. SPIE. Optical Eng.+Appl.* 2010. Vol. 7786. P. 77861–77869.
3. 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.
4. Filatov Yu.D., Filatov O.Y., Heisel U., Storchak M.G., Monteil G. *In situ* control of roughness of processed surfaces by reflectometric method. *Proc. SPIE. Opt. Micro-Nanometrol.* 2010. Vol. 7718, art. 77181J.
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. 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.
7. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Effect of the processed material structure on the polishing quality of optical surfaces. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no. 6. P. 435–443.
8. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Boyarintsev A.Y., Kovalev S. V., Garachenko V.V., Kovalev V.A. Effect of the spectroscopic parameters of the processed material and polishing powder on the parameters of polishing of optical surfaces. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 1. P. 37–45.

9. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Boyarintsev A.Y., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Effect of the dielectric characteristics of a treated material, a polishing powder, and a disperse system on the energy of their interaction in the polishing of optical surfaces. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 4. P. 276–284.
10. Filatov Yu.D., Rogov V.V. A cluster model of mechanism of silica-containing material fatigue wear in polishing. Part 1. *Sverkhтвердые Materialy.* 1994. Vol. 16. no. 3. P. 40–43.
11. Filatov Yu.D. Polishing of aluminosilicate materials with tools with bound polishing powder. *Sverkhтвердые 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. Filatov Yu.D., Filatov A.Yu., Syrota O.O., Yashchuk V. P., Monteil G., Heisel U., Storchak M. The influence of tool wear particles scattering in the contact zone on the workpiece surface microprofile formation in polishing quartz. *J. Superhard Mater.* 2010. Vol. 32, no. 6. P. 415–422.
14. Filatov Yu. D. Interaction between debris particles and polishing powder wear particles in polishing optoelectronic components. *J. Superhard Mater.* 2018. Vol. 40, no. 4. P. 282–289.
15. Filatov Yu.D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 6. P. 427–433.
16. 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.
17. 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.
18. Vishal Mathur, Kananbala Sharma, Thermal response of polystyrene/poly methyl methacrylate (PS/PMMA) polymeric blends. *Heat Mass Transfer.* 2016. Vol. 52. P. 2901–2911.
19. Eissa M.F. Effect of transferred electronic energy density on optical, electrical and structural properties of polyallyl-diglycol carbonate (CR-39) polymer. *J. Macromolecular Sci. Part B.* 2014. Vol. 53, no. 3. P. 529–540.
20. Abdul-Kader A.M., Zaki M.F., Basma A.El-Badry, Modified the optical and electrical properties of CR-39 by gamma ray irradiation. *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* 2014. Vol. 7, no. 3. P. 286–291.
21. Zhang H.Q, Jin Y., Qiu Y. The optical and electrical characteristics of PMMA film prepared by spin coating method. *Global Conference on Polymer and Composite Materials (PCM 2015), IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.* 2015. Vol. 87. P. 1–5.
22. 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. Medicine.* 2012. Vol. 4, no. 4. P. 341–344.
23. Meyer G.J. Polyurethane Foam: Dielectric Materials for Use in Radomes and Other Applications. *General Plastics Manufact. Company.* 2015. Nov. 3. P. 1–9.
24. 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.
25. Babitha K.K., Sreedevi A., Priyanka K.P., Sabu B., Varghese Th. Structural characterization and optical studies of CeO₂ nanoparticles synthesized by chemical precipitation. *Indian J. Pure Appl. Phys.* 2015. Vol. 53. P. 596–603.
26. Rajab K.Z., Naftaly M., Linfield E.H., Nino J.C., Arenas D., Tanner D., Mittra R., Lanagan M. Broadband dielectric characterization of aluminum oxide (Al₂O₃). *J. Micro. Elect. Pack.* 2008. Vol. 5, P. 101–106.
27. Telmer M.R., Hilario M.S., Hoff B.W., Lanagan M.T., Reeja-Jayan B. Anisotropy of W-band complex permittivity in Al₂O₃. *J. Phys.: Condens. Matter.* 2019. Vol. 31, art. 225702 (1–10).
28. Грудинкин С.А., Кукушкин С.А., Осипов А.В., Феоктистов Н.А. ИК-спектры углерод-вакансионных кластеров при топомхимическом превращении кремния в карбид кремния. *Физика твердого тела.* 2017. Т. 59. № 12. С. 2403–2408.
29. Kleinova A., Huran J., Sasinkova V., Perny M., Saly V., Packa J. FTIR spectroscopy of silicon carbide thin films prepared by PECVD technology for solar cell application. *Proc. SPIE.* 2015. Vol. 9563. art. 9563OU-8.

30. Filatov Yu.D., Vetrov A.G., Sidorko V.I., Filatov A.Yu., Kovalev S.V. A mechanism of diamond-abrasive finishing of monocrystalline silicon carbide. *J. Superhard Mater.* 2013. Vol. 35, no. 5. P. 303–308.
31. Chen C.Q., Helbig R., Engelbrecht F., Zeman J. Infrared absorption spectra of 4H silicon carbide. *Appl. Phys. A* 2001. Vol. 72. P. 717–720.
32. Aljameel A.I., Hassan H.A., Ng S.S. Polarized infrared reflectance for wurtzite $\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{N}$ epilayer on sapphire grown by MBE. *J. Electrochem. Sci.* 2014. Vol. 9. P. 2756–2761.
33. Fang J.F., Xuan Y.M., Li Q. 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.
34. 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.
35. 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, no. 31. P. 17151–17158.
36. 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.
37. 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.
38. Tommasinia F.J., da Cunha Ferreirab L., Tienneb L.G.P., de Oliveira Aguiarb V., da Silvae M.H.P., da Mota Rochab L.F., de Fatima Vieira Marquesb M. Poly (methyl methacrylate)-SiC nanocomposites prepared through *in situ* polymerization. *Mater. Res.* 2018. Vol. 21, no. 6, art. 20180086.
39. 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 γ -radiolysis. *Appl. Polym. Sci.* 2003, Vol. 91. no. 3. P. 1937–1950.
40. Hussain A. Al-Jobouri, Nasreen R. Jber, Abbas H. Al-Shukrawi, Mazin K. Hamid. Physicochemical properties of crystalline etch products for CR-39 track detector after α -particles irradiation. *Adv. Appl. Sci. Res.* 2013. Vol. 4. no. 4. P. 501–507.
41. 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. P. 1–8.
42. 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.
43. Graziella Trovati, Edgar Ap Sanches, Salvador Claro Neto, Yvonne P. Mascarenhas, Gilberto O. Chierice. Characterization of polyurethane resins by FTIR, TGA, and XRD. *J. Appl. Polymer Sci.* 2010. Vol. 115. P. 263–268.
44. Defeyt C., Langenbacher J., Rivenc R. Polyurethane coatings used in twentieth century outdoor painted sculptures. Part I: comparative study of various systems by means of ATR-FTIR spectroscopy. *Heritage Sci.* 2017. Vol. 5. P. 1–11.
45. Smith B.C. Organic nitrogen compounds IX: Urethanes and diisocyanates. *Spectroscopy.* 2020. Vol. 35, no. 5. P. 17–21.
46. Emrani J., Benrashid R., Mohtarami Sh., Fini E., Abu-Lebdeh T. Synthesis and Characterization of bio-based polyurethane polymers. *Am. J. Eng. Appl. Sci.* 2018. Vol. 11. no. 4. P. 1298–1309.
47. Kowalczyk D., Pitucha M. Application of FTIR method for the assessment of immobilization of active substances in the matrix of biomedical materials. *Materials.* 2019. Vol. 12, no. 18. P. 1–13.
48. Zaltariov M.-F., Filip D., Macocinschi D., Spiridon I. Hydroxypropyl cellulose/polyurethane blends the behavior after accelerated ageing. A FTIR study. *Cellulose Chem. Technol.* 2020. Vol. 54. no. 9–10. P. 903–914.
49. Chee Sien Wong, Khairiah Haji Badri. Chemical analyses of palm kernel oil-based polyurethane prepolymer. *Mater. Sci. Appl.* 2012. Vol. 3. P. 78–86.
50. 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 Industrial Inspection VI. Proc. SPIE.* 2009. Vol. 7389, art. 73892O.

51. 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.
52. 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.
53. 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.
54. 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.
55. Jones G.A., Bradshaw D.S. Resonance energy transfer: from fundamental theory to recent applications. *Front. Phys.* 2019. Vol. 7, art. 100. P. 1–19.
56. 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.
57. 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.
58. Cristian L. Cortes, Zubin Jacob. Fundamental figures of merit for engineering Förster resonance energy transfer. *Optics Express.* 2018. Vol. 26, no. 15. P. 19371–19387.
59. 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.
60. 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, art. 129770.
61. 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.
62. 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.
63. Nabiev I. Strong light-matter coupling for optical switching through the fluorescence and FRET control. *PhysBioSymp 2019. J. Phys.: Conf. Series.* 2021. Vol. 2058, art. 012001.
64. Zheng L., Zhi M., Chan Y., Khan S.A. Multi-color lasing in chemically open droplet cavities. *Sci. Reports.* 2018. Vol. 8, no. 1. P. 1–8.
65. Sun Y., Shopova S.I., Wu C.-S., Arnold S., Fan X. Bioinspired optofluidic FRET lasers via DNA scaffolds. *Proc. National Academy Sci.* 2010. Vol. 107, no. 37. P. 16039–16042.
66. Chan Qiao, Chunhuan Zhang, Zhonghao Zhou, Jiannian Yao, Yong Sheng Zhao. An optically reconfigurable forster resonance energy transfer process for broadband switchable organic single-mode microlasers. *CCS. Chemistry.* 2022. Vol. 4, no. 1. P. 250–258.
67. 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.
68. 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 Advances.* 2021. Vol. 11. P. 125033.
69. Cerdán L., Enciso E., Martín V., Bañuelos J., López-Arbeloa I., Costela A., García-Moreno I. FRET-assisted laser emission in colloidal suspensions of dye-doped latex nanoparticles. *Nature Photonics.* 2012. Vol. 6, no. 9. P. 621–626.
70. 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. 972501-1.
71. Adarsh K.S., Singh M.K., Shivkumar M.A., Rabinal M.K., Jagatap B.N., Mulimani B.G., Savadatti M.I., Inamdar S.R. FRET from core and core–shell quantum dots to laser dye: A comparative investigation. *J. Luminescence,* 2015. 160. P. 216–222.
72. Andrew P., Barnes W.L. Forster energy transfer in an optical microcavity. *Science.* 2000. Vol. 290, no. 5492. P. 785–788.
73. 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.

74. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Boyarintsev A.Y., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Performance efficiency of the polishing of polymer optical materials. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 5. P. 358–367.
75. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Сохань С.В., Ковальов С.В., Бояринцев А.Ю., Ковальов В.А., Юрчишин О.Я. Шорсткість полірованих поверхонь оптико-електронних елементів з полімерних прецизійних матеріалів. *Надтверді матеріали.* 2023. № 1. С. 69–80.

Надійшла до редакції 01.06.22

Після доопрацювання 22.06.22

Прийнята до опублікування 24.06.22