

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 сцинтиляційних матеріалів
НАН України, м. Харків, Україна

*filatov2045@gmail.com

Вплив діелектричних сталей оброблюваного матеріалу, полірувального порошку та дисперсної системи на енергію їх взаємодії під час полірування оптичних поверхонь

В результаті дослідження закономірностей впливу діелектричних сталей матеріалу, полірувального порошку та дисперсної системи на енергію їх взаємодії встановлено, що сталі Ліфшиця і потенціал взаємодії частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею лінійно спадають за зменшення функції діелектричних проникностей, що зумовлює підвищення продуктивності полірування та погіршення шорсткості полірованих поверхонь. Показано, що на ефективність резонансного перенесення енергії від частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи до оброблюваної поверхні суттєво впливає розділення між оброблюваним матеріалом, полірувальним порошком і дисперсною системою за їх діелектричними проникностями. Встановлено, що функції діелектричних проникностей, характерні для полірування оптичних поверхонь за допомогою дисперсних систем з мікро- та нанопоорошків, змінюються пропорційно розділенню за діелектричними проникностями, яке визначається співвідношеннями їх статичних значень для оброблюваного матеріалу, полірувального порошку та дисперсної системи.

Ключові слова: полірування, діелектрична проникність, продуктивність полірування, шорсткість поверхні.

ВСТУП

Продуктивність зняття оброблюваного матеріалу та шорсткість оптичних поверхонь під час полірування прецизійних деталей опто- та мікроелектроніки зі скла, ситалів і полімерних матеріалів за допомогою полі-

рувальних дисперсних систем з мікро- та нанопорошків залежать від реологічних властивостей дисперсної системи, структури оброблюваного матеріалу та розмірів частинок полірувального порошку, а також їх спектроскопічних та діелектричних характеристик [1–3]. Разом з тим, механізм міжмолекулярної взаємодії частинок полірувального порошку з оброблюваною поверхнею та полірувальною дисперсною системою під час полірування вивчено недостатньо, а закономірності впливу діелектричних сталих оброблюваного матеріалу, дисперсної фази дисперсної системи та дисперсного середовища на енергію їх взаємодії остаточно не з'ясовано.

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей впливу діелектричних сталих оброблюваного матеріалу, полірувального порошку і дисперсної системи на енергію їх взаємодії та показники полірування оптичних поверхонь.

ПОТЕНЦІАЛ ВЗАЄМОДІЇ ПОЛІРУВАЛЬНОГО ПОРОШКУ З ОБРОБЛЮВАНИМ МАТЕРІАЛОМ ПІД ЧАС ПОЛІРУВАННЯ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

У відповідності до сучасних уявлень про механізм зняття оброблюваного матеріалу під час полірування [1, 4–10] частинки шламу оброблюваного матеріалу та частинки зносу полірувального порошку утворюються в результаті збудження нормальних коливань молекул в оброблюваному матеріалі та частинках полірувального порошку, які взаємодіють внаслідок дії ван-дер-ваальсових сил всередині дисперсної системи при відносному переміщенні частинок дисперсної фази та оброблюваної поверхні та ферстеровського резонансного перенесення енергії між ними. Потенціал взаємодії частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею у відповідності до теорії Дерягіна-Ландау-Фервея-Овербека [1, 3, 11–19] визначається за формулою

$$U(x) = -\frac{\hbar E(\omega_2 - \omega_1)}{8\pi} \left[\frac{d_c}{2x} + \frac{d_c}{2(x + d_c)} + \ln \left(\frac{x}{x + d_c} \right) \right], \quad (1)$$

де $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка; d_c – розмір частинки полірувального порошку; x – найменша відстань між частинкою і поверхнею; ω_2, ω_1 – частоти коливань молекулярних фрагментів на поверхні частинок полірувального порошку та на оброблюваній поверхні; $E(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3) = \frac{[\epsilon_1 - \epsilon_3][\epsilon_2 - \epsilon_3]}{[\epsilon_1 + \epsilon_3][\epsilon_2 + \epsilon_3]}$ – функ-

ція діелектричних проникностей; $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ – статичні діелектричні проникності оброблюваного матеріалу, полірувального порошку та дисперсної системи.

Просторове розділення між частинкою полірувального порошку і поверхнею оброблюваного матеріалу (відстань x), яке визначає ефективність ферстеровського резонансного перенесення енергії, не перевищує 10 нм і оцінюється як середнє арифметичне відхилення профілю полірованої поверхні. Спектральне розділення між ними (різниця частот коливань молекулярних фрагментів на поверхні частинок полірувального порошку та на оброблюваній поверхні ($\omega_2 - \omega_1$)) характеризується значеннями розстроювання енергії, яке складає одиниці меВ [20–26].

В загальному випадку, енергія взаємодії частинки полірувального порошку та оброблюваної поверхні залежить не тільки від найменшої відстані x між частинкою і поверхнею, а і розмірів d_c частинки полірувального порошку (рис. 1). Кластери на поверхні частинки полірувального порошку і на оброблюваній поверхні, які знаходяться на відстані x , взаємодіють між собою в

межах одного шару полірувальних частинок так, що усереднене за координатою значення потенціалу їх взаємодії визначається формулою

$$W = \lim_{x \rightarrow 0} \left[\frac{1}{(d_c + x + Ra)} \int_0^{d_c + x + Ra} U(x) dx \right] = \frac{1}{d_c} \int_0^{d_c} U(x) dx, \quad (2)$$

де $Ra \ll d_c$ – середнє арифметичне відхилення профілю поверхні.

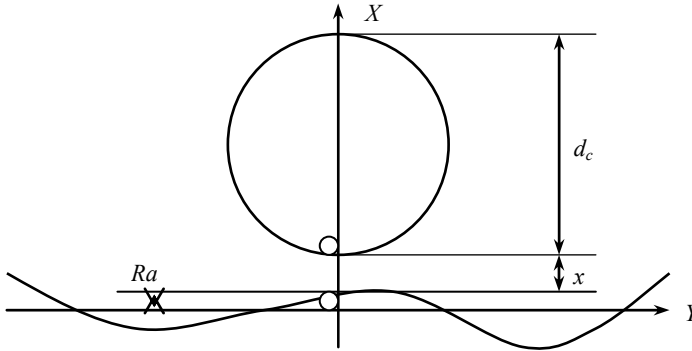


Рис. 1. Схема розташування частинки полірувального порошку відносно оброблюваної поверхні.

Залежності потенціалу взаємодії частинок полірувального порошку з поверхнею, що оброблюється, від відстані x між частинкою і поверхнею (за $d_c = 100$ нм = const) та розміру d_c частинки полірувального порошку (за $x = 100$ нм = const) наведено на рис. 2. Їх аналіз показує, що за $x < 100$ нм відстань x між частинкою і поверхнею більш суттєво впливає на енергію їхньої взаємодії, а за $x > 100$ нм стає більш суттєвим вплив розміру d_c частинки полірувального порошку. Це означає, що під час полірування оптичних поверхонь за допомогою дисперсних систем з наночастинок дисперсної фази потенціал їх взаємодії з оброблюваною поверхнею несуттєво зменшується у разі зменшення їхніх розмірів до 100 нм та різко спадає за $x < 100$ нм (рис. 2), що зумовлює практично сталу інтенсивність зняття оброблюваного матеріалу під час полірування оптичних поверхонь за допомогою мікронних та субмікронних полірувальних порошоків, що спостерігається в багаточисленних експериментах та підтверджується практичним досвідом.

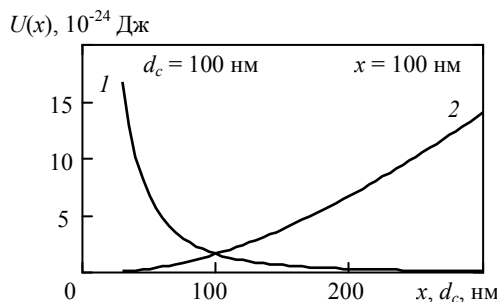


Рис. 2. Залежності потенціалу взаємодії частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею від розміру d_c частинки (1) та відстані x між частинкою і поверхнею (2).

Залежність потенціалу взаємодії частинок полірувального порошку з оброблюваною поверхнею від діелектричних сталей оброблюваного матеріалу,

полірувального порошку та дисперсної системи визначається функцією діелектричних проникностей $E(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$, в якій статична діелектрична проникність дисперсної системи ϵ_3 залежить від об'ємної концентрації мікро- та наночастинок та діелектричної проникності розчинника (води з $\epsilon_0 = 81$) у відповідності до формули Вінера-Вагнера [3, 27].

ВПЛИВ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ СТАЛИХ ОБРОБЛЮВАНОВОГО МАТЕРІАЛУ, ПОЛІРУВАЛЬНОГО ПОРОШКУ ТА ДИСПЕРСНОЇ СИСТЕМИ НА ЕНЕРГІЮ ЇХНЬОЇ ВЗАЄМОДІЇ ПІД ЧАС ПОЛІРУВАННЯ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

Дослідження закономірностей впливу діелектричних сталих оброблюваного матеріалу, полірувального порошку та дисперсної системи на енергію їхньої взаємодії здійснювали під час полірування плоских поверхонь оптичних деталей на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притиру з пінополіуретану діаметром 100 мм за зусилля притискання деталі до притиру 50 Н, частоти обертання притиру 90 об/хв, середній температури в зоні контакту оброблюваної деталі та притиру 298 К. Оброблювали деталі з оптичного скла марки К8 ($\epsilon_1 = 6,5$), оптичного ситалу марки СО115М (Zerodur) ($\epsilon_1 = 8,0$) та пластмасові сцинтилятори з полістиролу ПС ($\epsilon_1 = 2,5$) [28–34]. Полірування здійснювали за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопошків (ДС1) ($\epsilon_2 = 6,1$) та суспензії двооксиду церію (ДС2) ($\epsilon_2 = 21,2$) [2, 3, 28, 35–38]. Підготовку плоских поверхонь оптичних деталей під полірування здійснювали за допомогою традиційних методів тонкого і надтонкого шліфування [28, 39–41]. Зняття оброблюваного матеріалу вимірювали ваговим методом, а параметри шорсткості полірованих поверхонь визначали методом комп'ютерного моделювання та контролювали за допомогою безконтактного інтерференційного 3D профілографа Micron-alpha [42–46].

Результати розрахунку функцій діелектричних проникностей, сталих Ліфшиця та потенціалу міжмолекулярної взаємодії частинок полірувального порошку з оброблюваною поверхнею, які характеризують енергетичні витрати, необхідні для видалення частинок шламу, і визначають продуктивність полірування та шорсткість обробленої поверхні [34, 35], наведено в таблиці.

Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою та показники процесу полірування оптичних поверхонь

| Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою | Оброблюваний матеріал | | | | | |
|---|--------------------------------|---------|------|------|---------|------|
| | К8 | СО-115М | ПС | К8 | СО-115М | ПС |
| | Полірувальна дисперсна система | | | | | |
| | ДС1 | | | ДС2 | | |
| Діелектрична проникність: | | | | | | |
| оброблюваного матеріалу ϵ_1 | 6,5 | 8,0 | 2,5 | 6,5 | 8,0 | 2,5 |
| полірувального порошку ϵ_2 | 6,1 | | | 21,2 | | |
| дисперсної системи ϵ_3 | 78,9 | 74,0 | 76,4 | 72,0 | | |
| Функція діелектричних проникностей | 0,73 | 0,68 | 0,80 | 0,46 | 0,44 | 0,51 |
| Розділення за діелектричними проникностями | 12,5 | 10,6 | 19,6 | 6,1 | 5,5 | 9,9 |
| $H = \frac{\epsilon_3}{\sqrt{\epsilon_1 \epsilon_2}}$ | | | | | | |

(Продовження)

| | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
| Константа Ліфшиця | 0,42 | 0,37 | 0,49 | 0,33 | 0,27 | 0,96 |
| $A_L = \hbar E(\omega_1 - \omega_2)$, зДж | | | | | | |
| Потенціал взаємодії W , зДж | 0,052 | 0,046 | 0,062 | 0,042 | 0,034 | 0,121 |
| Продуктивність полірування | | | | | | |
| Q , 10^{-13} м ³ /с | 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 |
| Шорсткість поверхні | | | | | | |
| Ra , нм | 6,6±0,3 | 8,0±0,4 | 7,1±0,2 | 6,8±0,2 | 6,5±0,1 | 3,5±0,1 |
| Rq , нм | 7,1±0,3 | 8,6±0,4 | 7,5±0,2 | 7,2±0,2 | 7,0±0,2 | 3,7±0,2 |
| $Rmax$, нм | 12,7±1,0 | 14,5±0,6 | 12,5±1,0 | 12,2±1,2 | 12,2±0,6 | 6,5±0,8 |

Показники полірування плоских поверхонь деталей з оптичного скла марки К8 і оптичного ситалу марки СО115М та пластмасових скінтіляторів з полістиролу ПС за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопошків (ДС1) і водяної суспензії двооксиду церію (ДС2) наведено в таблиці.

Під час полірування конкретного матеріалу, статична діелектрична проникність якого ϵ_1 , за допомогою полірувальної дисперсної системи функція діелектричних проникностей є функцією двох змінних – статичних діелектричних проникностей дисперсної фази (полірувального порошку) ϵ_2 та дисперсної системи ϵ_3 . На рис. 3. наведено залежності функції діелектричних проникностей від діелектричної проникності дисперсної системи, характерні для полірування деталей з оптичного скла марки К8 і оптичного ситалу СО-115М та пластмасового скінтілятора з полістиролу ПС за допомогою дисперсних систем ДС1 і ДС2.

В загальному випадку значення функції діелектричних проникностей

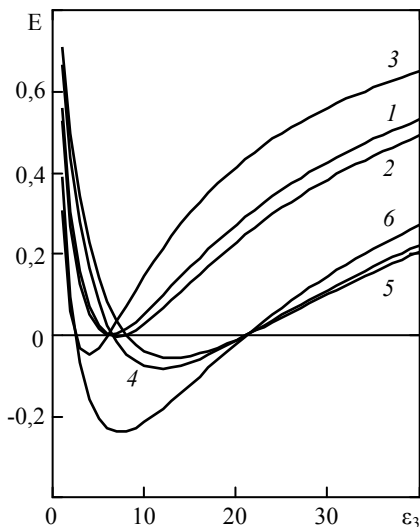


Рис. 3. Залежності функції діелектричних проникностей від діелектричної проникності дисперсної системи: $\epsilon_1 = 6,5$, $\epsilon_2 = 6,1$ (1); $\epsilon_1 = 8,0$, $\epsilon_2 = 6,1$ (2); $\epsilon_1 = 2,5$, $\epsilon_2 = 6,1$ (3); $\epsilon_1 = 6,5$, $\epsilon_2 = 21,2$ (4); $\epsilon_1 = 8,0$, $\epsilon_2 = 21,2$ (5); $\epsilon_1 = 2,5$, $\epsilon_2 = 21,2$ (6).

$E(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$ можуть бути як додатними, так і від'ємними, а точки її перетину з віссю абсцис $\epsilon_3 = \epsilon_1$ та $\epsilon_3 = \epsilon_2$ дозволяють визначити діапазони значень діелектричної проникності дисперсної системи, за яких на частинки полірувального порошку діють сили притягання до оброблюваної поверхні. Діелектрична проникність дисперсної системи ϵ_3 має задовольняти нерівностям: $\epsilon_3 < \epsilon_1 < \epsilon_2$ або $\epsilon_3 > \epsilon_2 > \epsilon_1$ для $\epsilon_1 < \epsilon_2$ і нерівностям: $\epsilon_3 < \epsilon_2 < \epsilon_1$ або $\epsilon_3 > \epsilon_1 > \epsilon_2$ для $\epsilon_1 > \epsilon_2$. Для водяних дисперсних систем діють другі нерівності, у відповідності до яких діелектрична проникність дисперсної системи ϵ_3 більша за діелектричні проникності оброблюваного матеріалу ϵ_1 і полірувального порошку ϵ_2 . Перші нерівності показують принципову можливість застосування для полірування оптичних поверхонь деталей із зазначених матеріалів дисперсних систем на основі гасу, олій і т. п.,

діелектрична проникність яких ϵ_3 менша за діелектричні проникності оброблюваного матеріалу ϵ_1 і полірувального порошку ϵ_2 . Залежності функції діелектричних проникностей від діелектричної проникності дисперсної системи, характерні для випадку, коли $\epsilon_1 > \epsilon_2$ (криві 1–3), принципово не відрізняються від кривих 3–6, характерних для випадку, коли $\epsilon_1 < \epsilon_2$ (див. рис. 3).

На рис. 4 наведено залежності сталої Ліфшиця A_L від функції діелектричних проникностей E , характерні для процесів полірування деталей із оптичного скла марки К8 і ситалу СО-115М, та сцинтиляторів з полістиролу ПС за допомогою полірувальних дисперсних систем ДС1 і ДС2, які показують що стала Ліфшиця лінійно зростає у разі підвищення значення функції діелектричних проникностей. Залежності потенціалу взаємодії частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею від функції діелектричних проникностей мають аналогічний характер (рис. 5). Враховуючи, що швидкість видалення оброблюваного матеріалу під час полірування зростає за зменшення сталої Ліфшиця A_L і потенціалу взаємодії частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею W [3], можна показати, що підвищення продуктивності полірування Q можна досягти у разі зменшення функції діелектричних проникностей (див. таблицю). Водночас шорсткість полірованих поверхонь погіршується (рис. 6), що спостерігається під час полірування оптичних деталей за допомогою дисперсних систем ДС1 (1) і ДС2 (2).

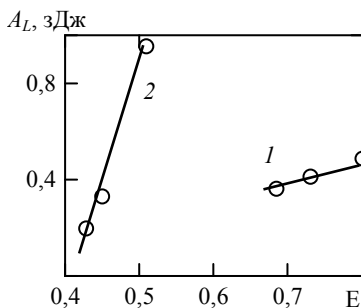


Рис. 4. Залежність сталої Ліфшиця A_L від функції діелектричних проникностей: ДС1 (1), ДС2 (2).

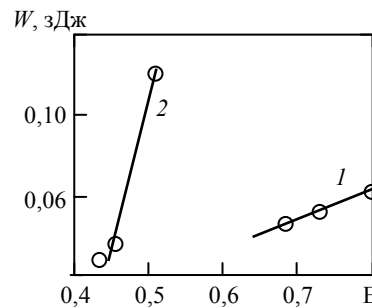


Рис. 5. Залежність потенціалу взаємодії полірувального порошку з оброблюваною поверхнею від функції діелектричних проникностей: ДС1 (1), ДС2 (2).

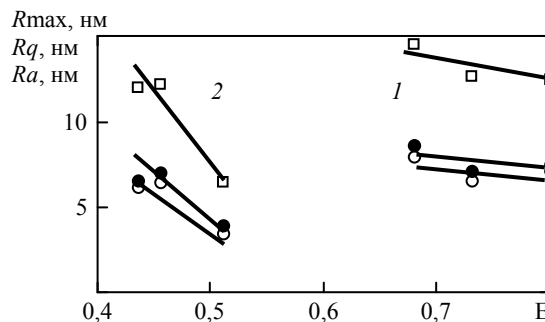


Рис. 6. Залежність параметрів шорсткості Ra (\circ), Rq (\bullet), R_{max} (\square) полірованих поверхонь від функції діелектричних проникностей під час полірування дисперсними системами ДС1 (1) і ДС2 (2).

За аналогією з просторовим і спектральним розділенням між частинкою полірувального порошку і поверхнею оброблюваного матеріалу функцію діелектричних проникностей можна представити у вигляді

$$E(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) = \delta\varepsilon_1\delta\varepsilon_2/4,$$

де $\delta\varepsilon_1 = 2 \frac{|\varepsilon_1 - \varepsilon_3|}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)}$ – розділення між оброблюваним матеріалом і дисперсною

системою; $\delta\varepsilon_2 = 2 \frac{|\varepsilon_2 - \varepsilon_3|}{(\varepsilon_2 + \varepsilon_3)}$ – розділення між полірувальним порошком і дис-

персною системою за діелектричною проникністю.

Оскільки взаємодія між частинкою полірувального порошку та оброблюваною поверхнею відбувається всередині дисперсної системи, то її можна умовно розкласти на дві складові: перша з яких відповідає за дію дисперсного середовища на оброблювану поверхню і залежить від розділення $\delta\varepsilon_1$, а друга – за дію дисперсного середовища на частинки дисперсної фази (полірувального порошку) і залежить від розділення $\delta\varepsilon_2$. Однак розділення $\delta\varepsilon_1$ і $\delta\varepsilon_2$ є взаємозалежними і кожне з них окремо не може характеризувати взаємодію полірувального порошку з оброблюваною поверхнею всередині дисперсної системи. Враховуючи, що мінімальне значення функції діелектричних проникностей ($\frac{\partial E[\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3]}{\partial \varepsilon_3} = 0$) досягається за умови $\varepsilon_3 = \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2}$, можна ввести

узагальнену величину розділення між оброблюваним матеріалом, полірувальним порошком і дисперсною системою за їх діелектричними проникностями

$$H = \frac{\varepsilon_3}{\sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2}}.$$

На рис. 7. наведено залежності функції діелектричних проникностей від розділення за діелектричними проникностями H , характерні для полірування

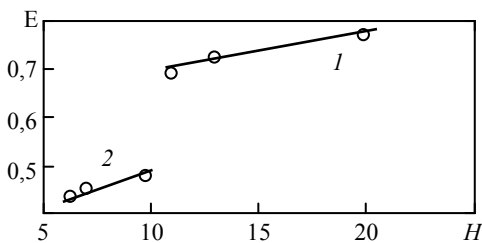


Рис. 7. Залежності функції діелектричних проникностей від розділення за діелектричними проникностями H : ДС1 (1), ДС2 (2).

оптичних поверхонь за допомогою дисперсних систем ДС1 (пряма 1) і ДС2 (пряма 2).

Ці залежності можна апроксимувати лінійною функцією $E = \alpha H + \beta$ (де $\alpha = \begin{cases} 0,012 \\ 0,016 \end{cases}$, $\beta = \begin{cases} 0,56 \\ 0,35 \end{cases}$ – коефі-

цієнти, визначені за допомогою методу найменших квадратів, похибка апроксимації – 1 %), яка показує, що функції діелектричних проникностей змінюються пропорційно пара-

метру H . Це означає, що значення функції діелектричних проникностей, характерні для полірування оптичних поверхонь за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопоорошків (ДС1) та суспензії двооксиду церію (ДС2), зростають пропорційно розділенню за діелектричними проникностями H , яке змінюється в межах [10,6–19,6] і [5,5–9,9] відповідно.

Розділення за діелектричними проникностями можна представити у вигляді добутку $H = h_{13} \cdot h_{23}$, де $h_{13} = \sqrt{\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1}}$ і $h_{23} = \sqrt{\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_2}}$ – параметри. Значення

параметрів h_{13} і h_{23} , характерних для полірування оптичних поверхонь за допомогою дисперсних систем ДС1 і ДС2, наведено на діаграмі (рис. 8). Вони показують, що максимальної швидкості видалення оброблюваного матеріалу

під час полірування можна досягти, якщо задовольняються умови: $3,0 < h_{13} < 5,5$, $h_{23} \approx 3,5$ – для ДС1 та $h_{23} = 1,8$ – для ДС2.

Аналіз показників процесу полірування оптичних деталей з оптичного скла і ситалу та пластмасових сцинтиляторів з полістиролу показав, що продуктивність їх полірування змінюється в широких межах: $(4,0-98,1) \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ ($0,5-12,5 \text{ мкм/год}$), а параметри шорсткості полірованих поверхонь складають $Ra = 3,5-8,0 \text{ нм}$, $Rq = 3,7-8,6 \text{ нм}$, $Rmax = 6,5-14,5 \text{ нм}$, що відповідає сучасним вимогам до оптичних поверхонь.

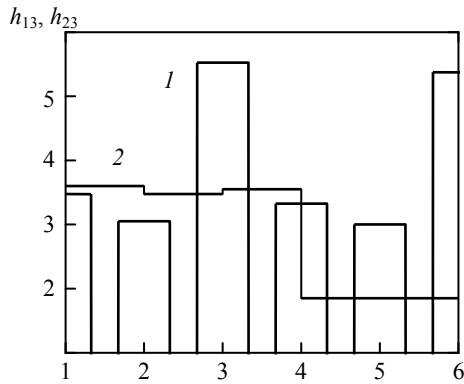


Рис. 8. Значення параметрів h_{13} (1) і h_{23} (2), характерні для полірування оптичних поверхонь: ДС1 (1, 2, 3); ДС2 (4, 5, 6).

ВИСНОВКИ

В результаті дослідження механізму резонансної міжмолекулярної взаємодії оброблюваного матеріалу, полірувального порошку та дисперсної системи встановлено, що сталі Ліфшиця і потенціал взаємодії частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею лінійно спадають за зменшення функції діелектричних проникностей, що зумовлює підвищення продуктивності полірування та погіршення шорсткості полірованих поверхонь.

Показано, що на ефективність резонансного перенесення енергії від частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи до оброблюваної поверхні, яка залежить від просторового і спектрального розділення між частинкою полірувального порошку і поверхнею оброблюваного матеріалу, суттєво впливає розділення між оброблюваним матеріалом, полірувальним порошком і дисперсною системою за їх діелектричними проникностями.

Встановлено, що функції діелектричних проникностей, характерні для полірування оптичних поверхонь за допомогою дисперсних систем з мікро- та нанопорошків, змінюються пропорційно розділенню за діелектричними проникностями, яке визначається співвідношеннями їх статичних значень для оброблюваного матеріалу, полірувального порошку та дисперсної системи. Визначено границі зміни параметрів їх розділення за діелектричними проникностями, за яких досягається максимальна продуктивність полірування оптичних поверхонь.

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

Influence of dielectric characteristics of the processed material,
polishing powder and dispersed system on the energy of their
interaction during polishing of optical surfaces

As a result of studying the regularities of the influence of dielectric constants of the processed material, polishing powder and dispersed system on the energy of their

interaction, it was found that Lifshitz constants and the interaction potential of polishing powder particles with the treated surface decrease linearly with decreasing dielectric permeability surfaces. It is shown that the efficiency of resonant energy transfer from particles of the dispersed phase of the polishing dispersed system to the treated surface, is significantly affected by the separation between the treated material, polishing powder permeability. It is established that the dielectric permeability functions characteristic of polishing optical surfaces by means of dispersed systems of micro- and nonopowders change in proportion to the separation by dielectric permeability, which is determined by the ratios of their static values for the processed material, polishing powder and dispersed system.

Keywords: polishing, dielectric constants, polishing productivity, surface roughness.

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., 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.
3. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Influence of intermolecular interaction of particles of polishing powder with the processed material on indicators of polishing of optical surfaces. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no 4. P. 296–302.
4. Suratwala T.I. *Materials Science and Technology of Optical Fabrication*, USA, Hoboken: Wiley, 2018. 416 p.
5. Хребтов А.И., Резник Р.Р., Убийвовк Е.В., Литвин А.П., Скурлов И.Д., Парфёнов П.С., Кулагина А.С., Данилов В.В., Цылин Г.Э. Безызлучательный перенос энергии в гибридных наноструктурах с различной размерностью. *Физика и техника полупроводников*, 2019, Т. 53, вып. 9. С. 1289–1292.
6. Заболотский А.А. Резонансный перенос энергии между сферической наночастицей и J-агрегатом. *Автометрия*. 2017. Т. 53, № 3. С. 81–88.
7. Егорова А. В., Леоненко И. И., Александрова Д. И., Скрипинец Ю. В., Антонович В. П. Безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения от комплекса Sm(III) на цианиновый краситель Су5. *Вісник ОНУ. Хімія*. 2015. Т. 20, вип. 3(55). С. 47–55.
8. Jones, G.A., Bradshaw D.S. Resonance Energy Transfer: From fundamental theory to receipt applications. *Front. Phys.* 2019. Vol. 7, Art. 100, P. 1–19.
9. Filatov Yu.D., Rogov V.V. A cluster model of the fatigue wear mechanism of silica-containing materials in polishing. Part 1. *J. Superhard Mater.* 1994. Vol. 16, no 3. P. 40–43.
10. Filatov Yu.D. Polishing of aluminosilicate materials with bound abrasive tools. *J. Superhard Mater.* 2001. Vol. 23, no 3. P. 32–42.
11. Takenaga M., Jo S., Graupe M., Lee T.R. Effective van der Waals surface energy of self-assembled monolayer films having systematically varying degrees of molecular fluorination. *J. Colloid and Interface Science*. 2008. Vol. 320, P. 264–267.
12. Кац Е.И. Силы Ван-дер-Ваальса, Казимира и Лифшица в мягкой материи. *Успіхи фізических наук*. 2015. Т. 185, № 9. С. 964–969.
13. Дерягин Б.В., Абрикосова И.И., Лифшиц Е.М. Молекулярное притяжение конденсированных тел. *Успіхи фізических наук*. 2015. Т. 185, № 9. С. 981–1001.
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. Reports*. 2017. Vol. 7, no. 6099. P. 1–10.
15. Krajina B.A., Kocherlakota L.S., Overney R.M. Direct determination of the local Hamaker constant of inorganic surfaces based on scanning force microscopy. *J. Chem. Phys.* 2014. Vol. 141, P. 164707.
16. Bergstrom L., Meurk A., Arwin H., Rowcliffe D.J. Estimation of Hamaker constants of ceramic materials from optical data using Lifshitz theory. *J. Am. Ceram. Soc.* 2005. Vol. 79, no. 2. P. 339–348.
17. Kenta Hongo K., Maezono R. A computational scheme to evaluate Hamaker constants of molecules with practical size and anisotropy. *J. Chem. Theory Comp.* 2017. Vol. 13, no. 11. P. 5217–5230.

18. Lefèvre G., Jolivet A. Calculation of Hamaker constants applied to the deposition of metallic oxide particles at high temperature. *Proc. Int. Conf. on Heat Exchanger Fouling and Cleaning VIII*. Schlading, Austria. 2009. P. 120–124.
19. Lin G., Guo D., Xie G., Jia Q., Pan G. In situ observation of colloidal particle behavior between two planar surfaces. *Colloids Sur. A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2015. Vol. 482, P. 656–661.
20. Singldinger, A., Gramlich, M., Gruber, C., Lampe, C., and Urban, A.S. Nonradiative Energy Transfer between Thickness-Controlled Halide Perovskite Nanoplatelets. *ACS Energy Lett.*, 2020, Vol. 5, P. 1380–1385.
21. Wang Yu. and Wang Lihong V. Forster resonance energy transfer photoacoustic microscopy. *J. Biomed. Opt.* 2012. Vol. 17, no. 8, art. 086007.
22. Abeywickrama Ch., Premaratne M. and 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.
23. 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.
24. Liu F., Rodina A.V., Yakovlev D.R., Golovatenko A.A., Greulich A., Vakhtin E.D., Susha A., Rogach A.L., Kusraev Y.G., Bayer M., Förster energy transfer of dark excitons enhanced by a magnetic field in an ensemble of CdTe colloidal nanocrystals. *Phys. Rev. B*. 2015. Vol. 92, art. 125403.
25. Poddubny, A.N., Rodina A.V., Nonradiative and radiative Forster energy transfer between quantum dots. *J. Experiment. Theoretical Phys*. 2016. Vol. 122, no. 3. P. 531–538.
26. Cardullo R.A., Principles of non-radiative FRET: The spectroscopic ruler. *Microscopy Analysis*. 2002. Vol. 88. P. 19–21.
27. Сушко М.Я., Крисквн С.К. Метод компактных групп в теории диэлектрической проницаемости гетерогенных систем. *Журнал технической физики*. 2009. Т. 79, вып. 3. С. 97–101.
28. Filatov Y.D., Filatov O.Y., Monteil G., Heisel U., Storchak M.G. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials. *Opt. Eng.* 2011, Vol. 50, no. 6. P. 063401–7.
29. Kedia S., Deo M.N., Sinha S. Micro-modification in borosilicate glass using femtosecond laser. *Adv. Optoelectronic Mater. (AOM)*. 2015. Vol. 3. P. 1–6.
30. Berezhinsky L.I., Maslov V.P., Tetyorkin V.V., Yukhymchuk V.A. Investigation of Al-ZERODUR interface by Raman and secondary ion mass-spectroscopy. *Semiconductor Phys., Quantum Electron. Optoelectron*. 2005. Vol. 8, no 2. P. 37–40.
31. Balat-Pichelin M., De Sousa Meneses D., Annaloro J., Behavior and optical properties of Zerodur® at high temperatures. *Infrared Phys. Technol*. 2019. Vol. 101. P. 68–77.
32. 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. P. 1–12.
33. Серова В.Н. Полимерные оптические материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2011. 384 с.
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. Radiation Research Appl. Sciences*. 2016. Vol. 9, no. 3. P. 321–331.
35. Babitha K.K., Sreedevi A., Priyanka K.P., Bobby Sabu, Varghese Thomas. Structural characterization and optical studies of CeO₂ nanoparticles synthesized by chemical precipitation. *Indian J. Pure Appl. Phys*. 2015. Vol. 53. P. 596–603.
36. Zamiri R., Ahangar H.A., Kaushal A., Zakaria A., Zamiri G., Tobaldi D. Ferreira J.M.F. Dielectrical properties of CeO₂ nanoparticles at different temperatures. *PLoS ONE*. 2015. Vol. 10, no. 4. P. 1–11.
37. Prabaharana D.M.D.M., Sadaiyandib K., Mahendranc M., Sagadevand S. Structural, optical, morphological and dielectric properties of cerium oxide nanoparticles. *Mater. Research*. 2016. Vol. 19, no. 2. P. 478–482.
38. Borisov A.V., Korolevych L.N., Maksimchuk N.V. Al/nanocrystalline CeOx/Si/Al structures for heterojunction photodetectors. *Electron. Comm*. 2014. Vol. 19, no. 6(83). P. 9–13.
39. 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.

40. Filatov O.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Y.D. 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.
41. Filatov Yu. D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 6. P. 427–433.
42. Filatov Yu.D. Mechanism of formation of surface microrelief in machining glass. *J. Superhard Mater. (Sverkhtverdye Materialy)*. 1991. Vol. 13, no 5. P. 63–67.
43. 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.
44. 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.
45. 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.
46. 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.

Надійшла до редакції 09.08.21

Після доопрацювання 26.11.21

Прийнята до опублікування 02.12.21