

**Ю. Д. Філатов\*, В. І. Сідорко, С. В. Ковальов,  
В. А. Ковальов**

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля  
НАН України, м. Київ, Україна  
\*filatov@ism.kiev.ua

## **Вплив міжмолекулярної взаємодії частинок полірувального порошку з оброблюваним матеріалом на показники полірування оптичних поверхонь**

*В результаті дослідження закономірностей впливу міжмолекулярної взаємодії між частинками полірувального порошку та оброблюваним матеріалом на продуктивність полірування і шорсткість полірованих поверхонь оптичних деталей та елементів зі скла, ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів встановлено, що продуктивність зняття оброблюваного матеріалу лінійно зменшуються при збільшенні сталої Ліфшиця і потенціалу міжмолекулярної взаємодії частинки дисперсної фази з оброблюваною поверхнею. Показано, що продуктивність полірування і параметри шорсткості оброблених поверхонь зменшуються при збільшенні енергії перенесення. Встановлено, що відношення  $\eta/Ra$  лінійно збільшується при зменшенні сталої Ліфшиця. Показано, що за умови використання дисперсної полірувальної системи з мікро- і нанопорошків можна досягнути необхідного рівня продуктивності полірування і шорсткості оброблених поверхонь.*

**Ключові слова:** полірування, дисперсна система, продуктивність полірування, шорсткість поверхні.

### **ВСТУП**

У відповідності до кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу під час полірування [1–3] продуктивність полірування і шорсткість оброблених поверхонь визначаються концентрацією частинок шламу, що видаляються з оброблюваної поверхні, та суттєво залежать від енергії міжмолекулярної взаємодії між частинками полірувального порошку і оброблюваною поверхнею, яка визначається діелектричною проникністю оброблюваного матеріалу, дисперсної фази і дисперсного середовища, а також частотами власних коливань молекулярних фрагментів (активних в ІЧ-спектрах поглинання) з яких складаються оброблюваний матеріал і полірувальний порошок.

Разом з тим, процеси взаємодії частинок полірувального порошку з оброблюваною поверхнею під час полірування деталей електронної техніки і оптичних систем із оптичного скла, ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів за допомогою полірувальних дисперсних систем вивчено недостатньо, а причини впливу міжмолекулярної взаємодії між частинками полірувального порошку і оброблюваним матеріалом на показники процесу полірування остаточно не з'ясовано.

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей впливу міжмолекулярної взаємодії між частинками полірувального порошку та оброблюва-

ним матеріалом на продуктивність полірування і шорсткість полірованих поверхонь оптичних деталей та елементів оптоелектроніки зі скла, ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів.

### **МІЖМОЛЕКУЛЯРНА ВЗАЄМОДІЯ МІЖ ЧАСТИНКАМИ ПОЛІРУВАЛЬНОГО ПОРОШКУ ТА ОБРОБЛЮваним МАТЕРІАЛОМ ПРИ ПОЛІРУванні ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ**

Під час полірування оптичних поверхонь за допомогою полірувальних дисперсних систем на кожну частинку полірувального порошку за умови відсутності її хімічної взаємодії з оброблюваним матеріалом діє результуюча сила молекулярного тяжіння, яка визначається найбільшою за абсолютною величиною ван-дер-ваальсовою силою, а також, силами електростатичної взаємодії, електричною силою подвійного шару, капілярною і гравітаційною силами, впливом яких можна знехтувати [2, 4–9]. У відповідності до кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу під час полірування [2, 10–13] частинки шламу 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 і оброблюваної поверхні. Енергія взаємодії частинок полірувального порошку і оброблюваної поверхні у відповідності до теорії Дерягіна-Ландау-Фервея-Овербека визначається формулою [14–22]

$$U(x) = -\frac{A_L}{8\pi} \left[ \frac{d}{2x} + \frac{d}{2(x+d)} + \ln \left( \frac{x}{x+d} \right) \right], \quad (1)$$

де  $A_L$  – стала Лівшиця;  $d$  – розмір частинки полірувального порошку;  $x$  – найменша відстань між частинкою і поверхнею.

Середнє значення потенціалу взаємодії частинок полірувального порошку з оброблюваною поверхнею визначають з урахуванням різкого спадання енергії їх взаємодії при зменшенні  $x$  в межах  $[0; d]$  у відповідності до формули

$$W = \frac{1}{d} \int_0^d U(x) dx.$$

Під час взаємодії частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею на їхніх поверхнях збуджуються кластери, які складаються з молекулярних фрагментів, що здійснюють коливання з характерними власними частотами  $\omega_2$  і  $\omega_1$ . Водночас коливальна енергія кластерів полірувальних частинок  $\hbar\omega_2$  ( $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – стала Планка) повинна перевищувати енергію кластерів оброблюваної поверхні  $\hbar\omega_1$ , що зумовлює передачу енергії від частинки полірувального порошку до оброблюваної поверхні.

Така передача енергії може відбуватись тільки за умови, коли їх характерні власні частоти задовольняють нерівності  $\omega_1 < \omega_2$ , яка відповідає закону збереження енергії і є аналогом правила Стокса для люмінесценції. Сталу Лівшиця визначали за припущенням одномодового характеру взаємодії через статичні діелектричні проникності матеріалів оброблюваної деталі ( $\epsilon_1$ ), полірувального порошку ( $\epsilon_2$ ) і дисперсного середовища ( $\epsilon_3$ ) за формулою  $A_L = \hbar E (\omega_2 - \omega_1)$ , де  $E = \frac{[\epsilon_1 - \epsilon_3][\epsilon_2 - \epsilon_3]}{[\epsilon_1 + \epsilon_3][\epsilon_2 + \epsilon_3]}$  – функція діелектричної проникності).

При використанні полірувальної дисперсної системи з мікро- та наночастинок можна вважати, що дисперсна фаза складається з мікроскопічних зерен полірувального порошку, а дисперсним середовищем є колоїдний “розчин” з

наночастинок. Це означає, що для визначення діелектричної проникності дисперсного середовища необхідно скористатися формулою Вінера-Вагнера [23], яку можна надати у вигляді

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_0 \left[ \frac{2\varepsilon_0 + \varepsilon_2 - 2\varphi(\varepsilon_0 - \varepsilon_2)}{2(\varepsilon_0 + \varepsilon_2) + 2\varphi(\varepsilon_0 - \varepsilon_2)} \right]. \quad (2)$$

де  $\varepsilon_0$  – діелектрична проникність розчинника;  $\varphi$  – об’ємна доля мікро- і наночастинок в дисперсній системі.

### **ВПЛИВ МІЖМОЛЕКУЛЯРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЧАСТИНОК ПОЛІРУВАЛЬНОГО ПОРОШКУ З ОБРОБЛЮВАНИМ МАТЕРІАЛОМ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ПОЛІРУВАННЯ ТА ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХНІ**

Дослідження закономірностей впливу властивостей дисперсного середовища на показники полірування здійснювали при поліруванні плоских поверхонь деталей з оптичного скла марки К8, ситалу марки СТ-50-1, астроситалу марки СО-115М, оптичних (сапфір) та напівпровідникових (антимонід індію, карбід кремнію) кристалів на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притиру з пінополіуретану діаметром 100 мм при зусиллі притискання деталі до притиру 50 Н, частоті обертання притиру 90 об/хв, довжині штриху 80 мм, середній температурі в зоні контакту інструмента та оброблюваної деталі 298 К. Дисперсна система складена з дисперсної фази (неабразивних мікро- і наночастинок полірувального порошку) та дисперсного середовища (водяного розчину  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) [3, 12]. Коефіцієнт поверхневого натягу дисперсної системи дорівнював 52–56 мН/м, коефіцієнт динамічної в’язкості змінювався в діапазоні  $(0,96\text{--}1,19) \cdot 10^{-3}$  Па·с, кути змочування оброблюваної поверхні змінювались від  $21,5^\circ$  до  $72,0^\circ$ , кут змочування поверхні притиру з пінополіуретану складав  $38,8^\circ$ , концентрація дисперсної фази в дисперсній системі була 6,7–18,7 % (за масою) або 1,9–6,0 % (за об’ємом).

Підготовку плоских поверхонь зразків з оптичного скла марки К8, радіотехнічного ситалу марки СТ-50-1, астроситалу марки СО-115М, сапфіру ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), антимоніду індію (InSb) і карбіду кремнію (SiC) під полірування здійснювали за допомогою традиційних методів тонкого і надтонкого шліфування [1, 10].

Результати розрахунку параметрів взаємодії оброблюваної поверхні з полірувальною дисперсною системою під час полірування оптичних поверхонь деталей зі скла, ситалів і оптичних і напівпровідникових кристалів за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків та визначення показників полірування наведено в таблиці.

В результаті досліджень встановлено, що продуктивність зняття оброблюваного матеріалу під час полірування деталей зі скла і ситалів та елементів з оптичних і напівпровідникових кристалів лінійно спадає при підвищенні константи Ліфшиця  $A_L$  (рис. 1). Залежність продуктивності полірування від сталої Ліфшиця при поліруванні оптичного скла і ситалів (пряма 1) та кристалічних матеріалів (пряма 2) є лінійною функцією і характеризується двома окремими ділянками з різним кутом нахилу по відношенню до вісі абсцис, які показують, що продуктивність полірування оптичного скла і ситалів більш суттєво залежить від сталої Ліфшиця, ніж продуктивність полірування оптичних і напівпровідникових кристалів.

Аналогічна картина спостерігається для продуктивності зняття оброблюваного матеріалу в залежності від середнього значення потенціалу взаємодії частинки дисперсної фази з оброблюваною поверхнею  $W$  (рис. 2). Взаємне розташування прямих 1 (для оптичного скла і ситалів) і 2 (для оптичних та

напівпровідникових кристалів) показує, що продуктивність полірування лінійно зменшуються при збільшенні енергії взаємодії частинки дисперсної фази з оброблюваною поверхнею, причому пряма 1 має більший кут нахилу відносно вісі абсцис, ніж пряма 2.

**Результати розрахунку параметрів взаємодії оброблюваної поверхні з полірувальною дисперсною системою та визначення показників полірування оптичного скла, ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів**

Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з полірувальною дисперсною системою	Оброблюваний матеріал					
	K8	СТ-50-1	CO115M	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (площина a [11 2̄ 1])	InSb	SiC (площина c [0001])
Константа Ліфшиця $A_L$ , зДж	0,42	0,51	0,37	0,85	0,28	1,15
Потенціал взаємодії частинки дисперсної фази з оброблюваною поверхнею $W$ , зДж (меВ)	0,052 (0,32)	0,064 (0,40)	0,046 (0,29)	0,106 (0,66)	0,035 (0,22)	0,145 (0,9)
Продуктивність полірування, $10^{-13}$ м <sup>3</sup> /с	6,4	5,7	12,9	3,7	12,7	2,0
Експеримент: $10^{-13}$ м <sup>3</sup> /с	6,2	5,7	13,0	3,8	13	2,1
мкм/год	0,8	0,7	2,2	0,9	5,8	0,7
Похибка розрахунку, %	3	1	1	2	2	3
Шорсткість поверхні						
$R_a$ , нм	6,4±0,2	5,6±0,2	7,6±0,3	5,1±0,2	6,9±0,3	3,6±0,1
$R_q$ , нм	6,9±0,2	6,0±0,2	8,1±0,3	5,4±0,2	7,4±0,3	3,9±0,2
$R_{max}$ , нм	12,0±0,6	10,3±0,7	13,4±0,6	9,6±0,8	13,1±1,1	7,0±0,5

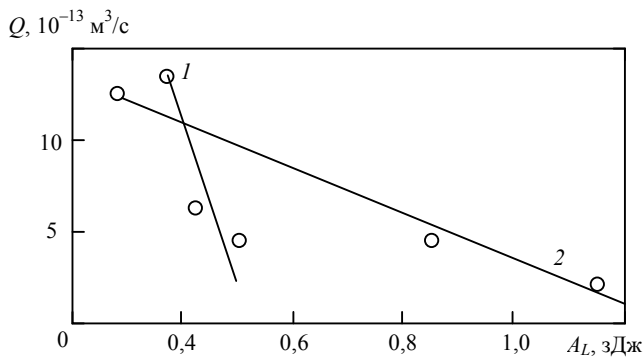


Рис. 1. Залежність продуктивності зняття оброблюваного матеріалу від константи Ліфшиця при поліруванні оптичного скла і ситалів (1) та кристалічних матеріалів (2).

Найбільш чутливою до продуктивності зняття оброблюваного матеріалу під час полірування неметалевих матеріалів є енергія перенесення [1–3, 24], яка показує енергетичні витрати на зняття одиниці маси оброблюваного матеріалу. У відповідності до розрахованих значень енергії перенесення, характерних для полірування деталей із оптичного скла марки K8, ситалів СТ-50-1 і CO-115M та елементів з оптичного кристала сапфіру та напівпровідникових

кристалів антимоніду індію і карбїду кремнію (див. таблицю) показана залежність продуктивності полірування вказаних матеріалів від енергії перенесення (рис. 3). Наведені в логарифмічному масштабі залежності продуктивності полірування деталей із оптичного скла і ситалів (1) та кристалічних матеріалів (2) від енергії перенесення можна апроксимувати функцією, яка має вигляд  $\lg Q = -\alpha_1 \lg(U^*) - \beta_1$ , де  $\alpha_1 = \begin{cases} 0,94 \\ 0,34 \end{cases}$ ,  $\beta_1 = \begin{cases} 2,27 \\ 8,24 \end{cases}$  – коефіцієнти про-

порційності, які визначено за методом найменших квадратів, похибка апроксимації – 1 %. Ці залежності є лінійно спадаючими функціями, які свідчать, що і для аморфних тіл, і для кристалічних матеріалів існує залежність між енергетичними витратами, необхідними для диспергування оброблюваної поверхні та утворення частинок шламу, і інтенсивністю видалення оброблюваного матеріалу під час полірування. Ці залежності показують, що продуктивність полірування тим менше, чим більше енергія перенесення, а також ілюструють відмінності процесу полірування аморфних і кристалічних неметалевих матеріалів.

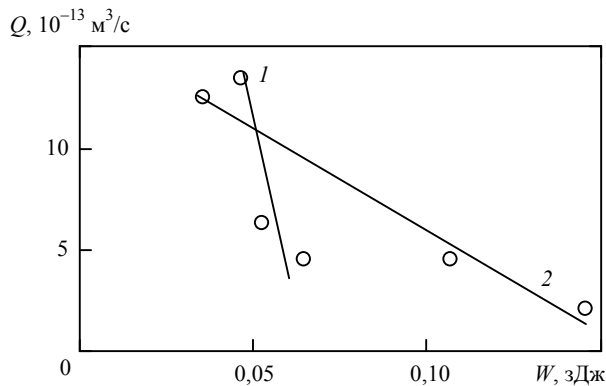


Рис. 2. Залежність продуктивності зняття оброблюваного матеріалу від потенціалу взаємодії частинки дисперсної фази з оброблюваною поверхнею при поліруванні оптичного скла і ситалів (1) та кристалічних матеріалів (2).

Виходячи з однакового характеру залежностей продуктивності зняття оброблюваного матеріалу від потенціалу взаємодії частинки дисперсної фази з оброблюваною поверхнею (див. рис. 2) та від енергії перенесення (див. рис. 3), можна встановити причинно-наслідковий зв'язок між енергією, яку потрібно витратити для видалення з поверхні одиниці маси оброблюваного матеріалу, та енергією міжмолекулярної взаємодії частинки полірувального порошку з поверхнею оброблюваного матеріалу, яка визначається сукупністю фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу, мікро- та наночастинок полірувального порошку та дисперсної системи. Наведені на рис. 4 залежності енергії перенесення від потенціалу взаємодії частинки дисперсної фази з оброблюваною поверхнею, характерні для полірування оптичного скла і ситалів (пряма 1) та кристалічних матеріалів (пряма 2), показують, що полірування оптичних і напівпровідникових кристалів більш енергоємне у порівнянні з поліруванням оптичного скла та ситалів.

Наведені на рис. 5 залежності параметрів шорсткості поверхонь деталей із оптичного скла марки К8, ситалів СТ-50-1 і СО-115М та елементів з оптичного кристала сапфіру і напівпровідникових кристалів антимоніду індію і карбїду кремнію від енергії перенесення [25–30] (див. таблицю), представлені в

напівлогіарифмічному масштабі  $\begin{pmatrix} Ra \\ Rq \\ R_{max} \end{pmatrix} = f(\lg U^*)$ , показують, що зменшення

шорсткості полірованих поверхонь відбувається при збільшенні енергетичних витрат, необхідних для диспергування з оброблюваної поверхні більш дрібних частинок шлама.

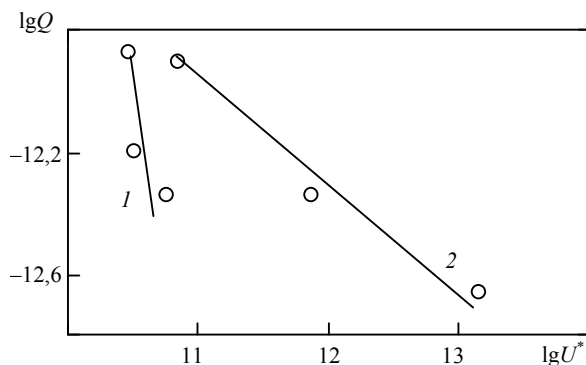


Рис. 3. Залежність продуктивності зняття оброблюваного матеріалу від енергії перенесення при поліруванні оптичного скла і ситалів (1) та кристалічних матеріалів (2).

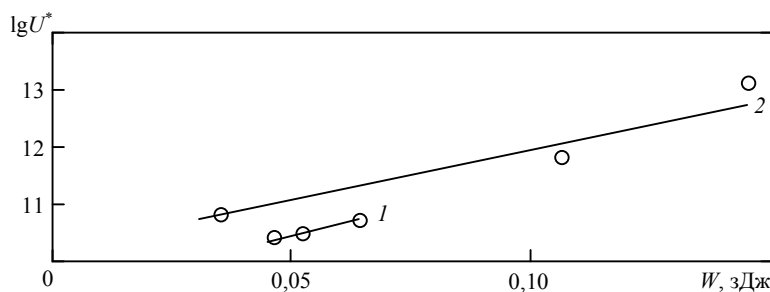


Рис. 4. Залежність енергії перенесення від потенціалу взаємодії частинки дисперсної фази з оброблюваною поверхнею при поліруванні оптичного скла і ситалів (1) та кристалічних матеріалів (2).

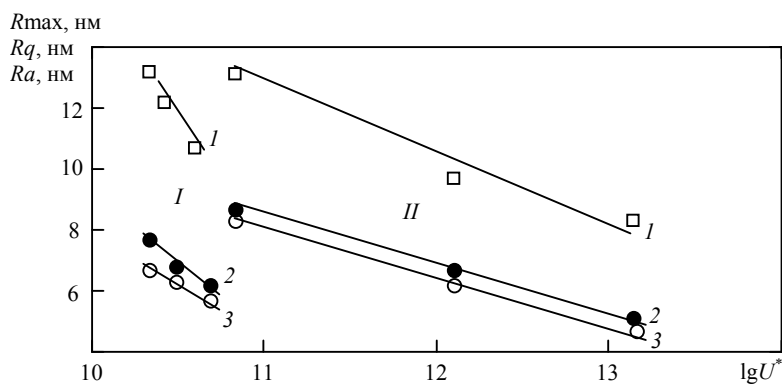


Рис. 5. Залежність параметрів шорсткості ( $R_{max}$  (1),  $Rq$  (2),  $Ra$  (3)) поверхонь від енергії перенесення при поліруванні оптичних деталей і елементів зі скла і ситалів (I) та кристалічних матеріалів (II).

При поліруванні неметалевих матеріалів одночасно відбуваються процеси переносу маси, що характеризується коефіцієнтом об'ємного зносу  $\eta$  (зняття оброблюваного матеріалу) та формування нанорельєфу поверхні (видалення частинок шламу із оброблюваної поверхні), що характеризується лінійною залежністю параметрів шорсткості  $Ra$ ,  $Rq$ ,  $Rmax$  від константи Ліфшиця. Відношення параметрів  $\eta$  і  $Ra$ , яке характеризує показники процесу полірування, визначається залежністю  $(\eta/Ra) = f(A_L)$ , яка наведена на рис. 6.

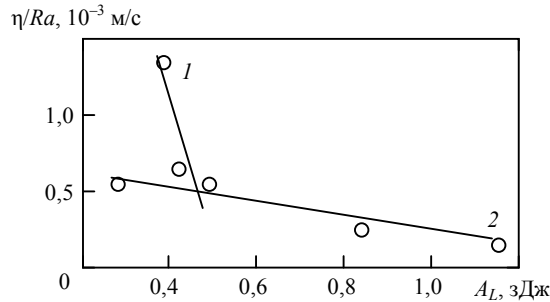


Рис. 6. Залежність відношення  $\eta/Ra$  від константи Ліфшиця  $A_L$  при поліруванні оптичного скла і ситалів (1) та кристалічних матеріалів (2).

При зменшенні енергії взаємодії полірувального порошку з оброблюваним матеріалом, яка характеризується константою Ліфшиця, відношення  $\eta/Ra$  лінійно збільшується (див. рис. 6) як для деталей із оптичного скла і ситалів (пряма 1), так і для елементів з оптичних та напівпровідникових кристалів (пряма 2). Відношення  $\eta/Ra$ , яке одночасно характеризує і швидкість видалення оброблюваного матеріалу, і зменшення шорсткості обробленої поверхні під час полірування, можна використати в якості критерію придатності полірувальної дисперсної системи для полірування конкретного матеріалу. За константою Ліфшиця можна екстраполювати відношення  $\eta/Ra$ , і якщо його значення знаходиться у діапазоні  $[0,4-1,3] \cdot 10^{-3}$  м/с, можна зробити висновок про доцільність застосування даної полірувальної дисперсної системи.

Аналіз показників процесу полірування оптичних деталей та елементів з оптичного скла, ситалів та оптичних і напівпровідникових кристалів показав, що продуктивність полірування оптичного скла, ситалів та оптичних і напівпровідникових кристалів складає  $(2-13) \cdot 10^{-13}$  м<sup>3</sup>/с (0,7–5,8 мкм/год), а шорсткість їх полірованих поверхонь  $Ra = 3,6-7,6$  нм, що відповідає вимогам до оптичних поверхонь (за параметром  $Rz < 0,05$  мкм).

## ВИСНОВКИ

В результаті дослідження закономірностей впливу міжмолекулярної взаємодії між частинками полірувального порошку та оброблюваним матеріалом на продуктивність полірування і шорсткість полірованих поверхонь оптичних деталей і елементів оптоелектроніки з оптичного скла, ситалів, оптичних та напівпровідникових кристалів встановлено, що продуктивність зняття оброблюваного матеріалу лінійно зменшуються при збільшенні сталої Ліфшиця і середнього значення потенціалу міжмолекулярної взаємодії частинки дисперсної фази з оброблюваною поверхнею.

Показано, що продуктивність полірування і параметри шорсткості оброблених поверхонь зменшуються при збільшенні енергії перенесення оброблюваного матеріалу, яка є пропорційною середньому значенню потенціалу між-

молекулярної взаємодії частинок полірувального порошку з поверхнею, що полірується.

Встановлено, що відношення  $\eta/Ra$ , що характеризує показники полірування, а саме: продуктивність зняття оброблюваного матеріалу і шорсткість полірованих поверхонь, лінійно збільшується при зменшенні сталої Ліфшица під час полірування оптичних деталей і елементів оптоелектроніки.

При аналізі показників полірування оптичних деталей і елементів з оптичного скла, ситалів і оптичних і напівпровідникових кристалів показано, що за умови використання дисперсної полірувальної системи з мікро- і нанопорошків досягається необхідний рівень продуктивності полірування і шорсткості оброблених поверхонь, яка відповідає вимогам до оптичних поверхонь.

Yu. D. Filatov, V. I. Sidorko, S. V. Kovalev, V. A. Kovalev

Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Influence of intermolecular interaction of particles of polishing powder with the processed material on indicators of polishing of optical surfaces

*As a result of studying the regularities of the influence of intermolecular interaction parameters between polishing powder particles and the processed material on polishing productivity and roughness of polished surfaces of optical parts and elements made of glass, glassceramics, optical and semiconductor crystals, it is found that intermolecular interaction of the dispersed phase particle with the treated surface. It is shown that the polishing productivity and the roughness parameters of the treated surfaces decrease with increasing transfer energy. It was found that the value of the ratio ( $\eta/Ra$ ) increases linearly with decreasing Lifshitz constant, and it is shown that when using a dispersed polishing system of micro- and nanopowders, the required level of polishing productivity and roughness of treated surfaces is achieved.*

**Keywords:** *polishing, disperse system, material removal rate, surface roughness.*

1. 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.
2. Filatov Yu.D. Polishing of precision surfaces of optoelectronic device elements made of glass, sital, and optical and semiconductor crystals: A review. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 1. P. 30–48.
3. Filatov Yu.D. Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing. *Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining. Springer Tracts in Mechanical Engineering* / eds. J. Zhang, B. Guo, J. Zhang. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. P. 129–165.
4. Suratwala T.I., *Materials Science and Technology of Optical Fabrication, USA*, Hoboken: Wiley, 2018. 416 p.
5. Pinchuk P., Jiang K. Size-dependent Hamaker constants for silver and gold nanoparticles. *Proc. SPIE. Physical Chemistry of Interfaces and Nanomaterials XIV*. 2015. Vol. 95491J.
6. Valmacco V., Elzbieciak-Wodka M., Besnard C., Maroni P., Trefalt G., Borkovec M., Dispersion Forces Acting between Silica Particles across Water: Influence of Nanoscale Roughness. *Nanoscale Horizons*. 2016. Vol. 1. P. 325–330.
7. Bozkaya D., Müftü S., Effects of surface forces on material removal rate in chemical mechanical planarization. *J. Electrochem. Soc.* 2010. Vol. 157, no. 3. H287–H296.
8. Yao J., Han H., Hou Y., Gong E., Yin W. A method of calculating the interaction energy between particles in minerals flotation. *Math. Probl. Eng.* 2016. Vol. 2016, no. 8430745. 13 p.
9. Sokolov I., Ong Q.K., Hodiev H.S., Chechik N., James D., Oliver M. AFM study of forces between silica, silicon nitride and polyurethane pads. *J. Colloid Interface Sci.* 2006. Vol. 300. P. 475–481.



10. Filatov Yu.D. Polishing of aluminosilicate materials with bound-abrasive tools. *J. Superhard Mater.* 2001. Vol. 23, no. 3. P. 32–42.
11. 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 micro-profile formation in polishing quartz. *J. Superhard Mater.* 2010. Vol. 32, no. 6. P. 415–422.
12. 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.
13. 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.
14. Кац Е.И. Силы Ван-дер-Ваальса, Казимира и Лифшица в мягкой материи. *Успехи физ. наук.* 2015. Т. 185, № 9. С. 964–969.
15. Дерягин Б.В., Абрикосова И.И., Лифшиц Е.М. Молекулярное притяжение конденсированных тел. *Успехи физ. наук.* 2015. Т. 185, № 9. С. 981–1001.
16. 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 Interface Sci.* 2008. Vol. 320. P. 264–267.
17. Sato N., Aoyama Y., Yamanaka J., Toyotama A., Okuzono T., Particle Adsorption on Hydrogel Surfaces in Aqueous Media due to van der Waals Attraction. *Scientific Reports.* 2017. Vol. 7, no. 6099. P. 1–10.
18. 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. Chemical Physics.* 2014. Vol. 141. P. 164707.
19. 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.
20. Kenta Hongo K., Maezono R. A computational scheme to evaluate Hamaker constants of molecules with practical size and anisotropy. *J. Chem. Theory Comput.* 2017. Vol. 13, no.11. P. 5217–5230.
21. 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.
22. Lin G., Guo D., Xie G., Jia Q., Pan G. In situ observation of colloidal particle behavior between two planar surfaces. *Colloids Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.* 2015. Vol. 482, P. 656–661.
23. Сушко М.Я., Крисків С.К. Метод компактних груп в теорії діелектричної проникності гетерогенних систем. *Журнал технічної фізики.* 2009. Т. 79, вип. 3. С. 97–101.
24. Filatov Yu. D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 6. P. 427–433.
25. 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.
26. 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 Engineering+Applicfion.* 2010. Vol. 7786. P. 77861–77869.
27. 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.* 2009. *Proc. SPIE.* Vol. 7389, art. 73892O-9.
28. 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.
29. 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.
30. 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.

Надійшла до редакції 11.11.20  
Після доопрацювання 05.03.21  
Прийнята до опублікування 11.03.21