

# Дослідження процесів обробки

---

УДК 621.623

**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 структури оброблюваного матеріалу на показники полірування оптичних поверхонь**

*В результаті дослідження закономірностей впливу структури оброблюваного матеріалу на продуктивність полірування і шорсткість полірованих поверхонь оптичних деталей і елементів зі скла, ситалів, оптичних та напівпровідникових кристалів встановлено, що продуктивність зняття оброблюваного матеріалу лінійно зростає у разі збільшення розміру частинок шламу. Показано, що коефіцієнт об'ємного зносу у разі збільшення енергії перенесення суттєво зменшується під час полірування оптичних та напівпровідникових кристалів і незначно спадає під час полірування оптичного скла і ситалів. Показано, що параметри шорсткості полірованих поверхонь лінійно зростають у разі збільшення відстані між шарами молекулярних фрагментів або міжплощинних відстаней в оброблюваному матеріалі. Встановлено, що відношення  $\eta/Ra$  не залежить від відстані між шарами молекулярних фрагментів в аморфних матеріалах і лінійно зростає у разі збільшення міжплощинної відстані в кристалах.*

**Ключові слова:** полірування, структура, продуктивність полірування, шорсткість поверхні.

### **ВСТУП**

У відповідності до кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу під час полірування [1–3] продуктивність полірування і шорсткість оброблених поверхонь залежать від розмірів частинок шламу, що видаляються із оброблюваної поверхні, на які найбільше впливають фізико-хімічні властивості та структура оброблюваного матеріалу. Разом із тим, закономірності утворення частинок шламу під час полірування деталей електронної техніки та оптичних систем із оптичного скла, ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів за допомогою дисперсних систем з мікро- та наночастинок полірувальних порошоків вивчено недостатньо, а причинно-наслідкові зв'язки

між показниками процесу полірування та геометричними параметрами частинок шламу і структурними параметрами оброблюваного матеріалу остаточно не з'ясовано.

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей впливу структури оброблюваного матеріалу на продуктивність полірування і шорсткість полірованих поверхонь оптичних деталей і елементів мікро- та оптоелектроніки зі скла, ситалів, оптичних та напівпровідникових кристалів.

### СТРУКТУРА ОБРОБЛЮВАНОВОГО МАТЕРІАЛУ ТА РОЗМІРИ ЧАСТИНОК ШЛАМУ, ЩО УТВОРЮЮТЬСЯ ПІД ЧАС ПОЛІРУВАННЯ

Під час полірування оптичних поверхонь елементарний акт видалення частинки шламу з оброблюваної поверхні є результатом переходу збудженого кластеру із зв'язаного стану у вільний. Площа поверхні  $n$ -ої частинки шламу може набувати тільки визначені дискретні значення  $S_n = S_0(n+1)$  [2, 4–8], а її мінімальна площа  $S_0$  залежить від структури оброблюваного матеріалу та кількості молекулярних фрагментів в кластері. Під час взаємодії частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею, які складаються з молекулярних фрагментів, що коливаються з характерними власними частотами  $\omega_2$  і  $\omega_1$ , передача енергії збудження відбувається за умови  $\omega_1 < \omega_2$ , яка відповідає закону збереження енергії, а кількість фрагментів в кластері оброблюваної поверхні визначається як ціла частина співвідношення

$$\xi = \left[ \left( \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \right)^2 \right],$$

якщо  $[\omega_2 - \omega_1]$  є мінімальним. Найбільш ймовірне значення площі поверхні частинки шламу визначається, виходячи із розподілу Пуассона

$P(n, \nu) = \frac{e^{-\nu} \nu^n}{n!}$  за площами їх поверхні ( $\nu$  – параметр розподілу), у відповідності до формули

$$S = \sum_n S_n P(n, \nu).$$

Найбільш ймовірне значення розміру частинки шламу  $a_\nu = \sum_n d(n) P(n, \nu)$

визначається як діаметр сфери, площа поверхні якої дорівнює площі поверхні частинки шламу, за формулою  $d(n) = [S_n/\pi]^{1/2}$ , а найбільш ймовірне значення

об'єму частинки шламу визначається як  $V_{ps} = \frac{\pi}{6} \sum_n d^3(n) P(n, \nu)$ . Оскільки

нанорозмірний рельєф полірованої поверхні є терасно-східчастою структурою, можна вважати, що вона утворюється внаслідок видалення з оброблюваної площини частинок шламу, що мають форму паралелепіпеду, довжина сторін якого визначається кількістю молекулярних фрагментів  $\xi = k_1 k_2 k_3$  ( $k_1, k_2, k_3$  – цілі числа), з яких він складається.

Розміри частинок шламу, що утворюються під час полірування аморфних неметалевих матеріалів (оптичного скла марки К8, ситалу марки СТ-50-1 та астроситалу марки СО115М) залежать від їх хімічного складу [1, 3, 9–13] та структури. Згідно з кластерною моделлю будівлі поверхні кремнезему і його квазітетраедричною структурою поверхня оптичного скла марки К8 склада-

ється з фрагментів  $O=Si=O$  з довжиною зв'язку  $Si-O$   $l_1 = 0,1606$  нм, з'єднаних більш слабкими зв'язками з довжиною  $l_2 = 0,1612$  нм. Кут  $\angle OSiO - 144-152^\circ$ , відстань між поверхневими молекулярними фрагментами  $SiO_2$   $L_x = 0,62$  нм, відстань між шарами фрагментів  $L_y = L_z = 0,396$  нм. З геометричних уявлень випливає, що під час знімання оброблюваного матеріалу шляхом відриву одиничних фрагментів  $SiO_2$ , можна було б досягти значення шорсткості, що складає  $0,5-1,0$  від довжини зв'язку кремній-окисен:  $R_{max,a} \cong (L_x/2) \operatorname{tg}[(180^\circ - \angle OSiO)/2] \cong 0,09$  нм, тобто атомно-гладенька поверхня характеризується шорсткістю  $\sim 0,1$  нм. Стосовно ситалу СТ-50-1, можна вважати, що його поверхня складається з молекулярних фрагментів  $Si-O$ ,  $Al-O$ ,  $Ti-O$  з довжинами зв'язку  $l_1 = 0,162$  нм,  $l_2 = 0,175$  нм,  $l_3 = 0,23$  нм, відстань між якими дорівнює  $L_x = 0,639$  нм, а відстань між шарами фрагментів складає  $L_y = L_z = 0,411$  нм. Поверхня астроситалу СО115М складається з молекулярних фрагментів  $Si-O$ ,  $Al-O$ ,  $Ti-O$  з довжинами зв'язку  $l_1 = 0,162$  нм,  $l_2 = 0,175$  нм,  $l_3 = 0,23$  нм, відстань між якими дорівнює  $L_x = 0,634$  нм, а відстань між шарами фрагментів складає  $L_y = L_z = 0,408$  нм. Виходячи з цього визначали мінімальну площу поверхні частинок шламу  $S_0 = 2[L_x L_y k_1 k_2 + L_x L_z k_1 k_3 + L_z L_y k_2 k_3]$  і

$$\text{числа } k_2 = \left( \xi \frac{L_y^2}{L_x^2} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ та } k_1 = k_3 = \left( \xi \frac{L_y}{L_x} \right) \frac{1}{k_2}.$$

Розміри частинок шламу, що утворюються під час полірування кристалічних матеріалів, суттєво залежать від кристалографічної орієнтації оброблюваної площини кристалу [5, 6, 14, 15]. Для кристалів сапфіру з гексагональною структурою можна визначити яким чином із окремих молекулярних фрагментів складуються кластери, які, відриваючись від оброблюваної поверхні, перетворюються на частинки шламу. Під час полірування площини  $a$   $[1\bar{1}20]$  число молекулярних фрагментів визначається міжплощинними відстанями  $\Delta x = a\sqrt{3}$ ,  $\Delta y = a/2$  і  $\Delta z = c$ , відстань між сусідніми площинами  $a$  складає  $l_a = 0,2379$  нм [1, 2, 5, 6], а мінімальна площа поверхні частинок визначається за формулою

$$S_0 = a\xi \left( \frac{a\sqrt{3}}{k_3} + \frac{2\sqrt{3}c}{k_2} + \frac{c}{k_1} \right),$$

де  $a = 0,4758$  нм і  $c = 1,2991$  нм – сталі градки).

З урахуванням кристалографічної орієнтації оброблюваної поверхні кристалу сапфіру та наведених в [2, 16, 17] значень поверхневої енергії  $\sigma_c$ ,  $\sigma_a$ ,  $\sigma_m$  і  $\sigma_r$  для граней  $c$ ,  $a$ ,  $m$  і  $r$ , розраховано значення чисел  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ , які визначають розміри частинок шламу, що утворюються під час полірування площини  $a$  сапфіру:

$$k_1 = \sqrt[3]{\frac{\xi}{6} \left( \frac{\sigma_m^2}{\sigma_a \sigma_c} \right) \left( \frac{c}{a} \right)}, \quad k_2 = \sqrt[3]{\frac{12\xi}{\sqrt{3}} \left( \frac{\sigma_a^2}{\sigma_c \sigma_m} \right) \left( \frac{c}{a} \right)}, \quad k_3 = \sqrt[3]{\frac{\sqrt{3}}{2} \xi \left( \frac{\sigma_c^2}{\sigma_a \sigma_m} \right) \left( \frac{a}{c} \right)^2}.$$

Для кристалів карбїду кремнію з гексагональною структурою можна визначити розміри частинок шламу, які утворюються під час полірування площини  $c$   $[0001]$ . Число молекулярних фрагментів визначається міжплощинними відстанями  $\Delta x = 1,5a$ ,  $\Delta y = a\sqrt{3}$  і  $\Delta z = c/6$ , відстань між сусідніми площинами  $c$  складає  $l_c = 0,2165$  нм [5-7], а мінімальна площа поверхні частинок визначається формулою

$$S_0 = a\xi \left( \frac{3a\sqrt{3}}{k_3} + \frac{c}{2k_2} + \frac{2c}{\sqrt{3}k_1} \right),$$

де  $a = 0,3073$  нм,  $c = 1,511$  нм – сталі градки). Розміри частинок шламу, які утворюються під час полірування площини  $c$  карбіду кремнію, визначаються

$$\text{числами } k_1 = \frac{2}{3} \sqrt[3]{\sqrt{3}\xi \left( \frac{c}{a} \right)}, \quad k_2 = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{\xi}{3} \left( \frac{c}{a} \right)}, \quad k_3 = 3 \sqrt[3]{\sqrt{3}\xi \left( \frac{a}{c} \right)^2}.$$

Для кристалів антимоніду індію (кубічна сингонія), для яких об'єм елементарної комірки визначається сталою градки  $a = 0,6479$  нм [18, 19], можна визначити мінімальну площу поверхні частинок шламу, які утворюються під час полірування:  $S_0 = 2a^2(k_1k_2 + k_1k_3 + k_2k_3)$ . Розміри частинок шламу, які утворюються під час полірування оброблюваної поверхні, визначаються числами  $k_1 = k_2 = k_3 = \xi^{1/3}$ .

### ВПЛИВ СТРУКТУРИ ОБРОБЛЮВАНОВОГО МАТЕРІАЛУ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ПОЛІРУВАННЯ ТА ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХОНЬ

Дослідження закономірностей впливу параметрів структури оброблюваного матеріалу на показники полірування здійснювали під час полірування плоских поверхонь деталей з оптичного скла марки К8 діаметром 60 мм, ситалу марки СТ-50-1 розмірами 60×48×0,6 мм, астроситалу марки СО115М діаметром 30 мм (три зразки на блоці діаметром 60 мм), оптичного кристалу сапфіру ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , площина  $a$  [11  $\bar{2}$  0]) діаметром 25 мм (три елементи на блоці діаметром 60 мм), напівпровідникових кристалів антимоніду індію (InSb) розмірами 18×7,5×2,5 мм (шість елементів на блоці діаметром 60 мм) та карбіду кремнію (SiC, площина  $c$  [0001], 17 елементів на блоці діаметром 60 мм) на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притиру з пінополіуретану діаметром 100 мм за зусилля притискання деталі до притиру – 50 Н, за частоти обертання притиру 90 об./хв, довжини штриху 80 мм і середньої температури в зоні контакту інструмента та оброблюваної деталі 298 К. Коефіцієнт поверхневого натягу дисперсної системи складав 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° до 72°, кут змочування поверхні притиру з пінополіуретану складав 38,8° [3, 20, 21].

Частоти власних коливань молекулярних фрагментів оптичного скла марки К8, що визначали за інфрачервоними спектрами поглинання, склали 443 см<sup>-1</sup>, 568 см<sup>-1</sup>, 811 см<sup>-1</sup>, 1061 см<sup>-1</sup>, 1165 см<sup>-1</sup>) [3]. Частоти власних коливань молекулярних фрагментів ситалів марки СТ-50-1 і марки СО115М, що визначали за спектрами ІЧ-поглинання (Фур'є-спектрометр Nicolet 6700), склали 560, 640,96, 719,40, 848,86, 892,17, 1001,89, 1037,99 см<sup>-1</sup> і 750,48, 948,29 і 1055,66 см<sup>-1</sup> відповідно. Частоти власних коливань молекулярних фрагментів сапфіру, антимоніду індію та карбіду кремнію відповідно склали 577, 601, 638, 669 і 751 см<sup>-1</sup> [22–24], 273, 305, 355,5, 362,7 см<sup>-1</sup> [25] і 610, 738, 751, 769 см<sup>-1</sup> [26–28].

Підготовка 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 та надтонкого шліфування [3, 14, 29].

Результати розрахунку параметрів структури оброблюваного матеріалу під час полірування оптичних поверхонь деталей зі скла і ситалів та елементів з оптичних і напівпровідникових кристалів за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків і визначення показників полірування наведено в таблиці.

### Результати розрахунку показників полірування оптичного скла, ситалів та оптичних і напівпровідникових кристалів

Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з полірувальною дисперсною системою	Оброблюваний матеріал					
	K8	CT-50-1	CO115M	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (площина a [11 $\bar{2}$ 1])	InSb	SiC (площина c [0001])
Частота $\omega_1$ , $10^{14}$ с <sup>-1</sup>	1,07	1,06	1,42	1,26	0,68	1,45
Частота $\omega_2$ , $10^{14}$ с <sup>-1</sup>	1,13	1,12	1,47	1,38	0,74	1,60
Кількість молекулярних фрагментів $\xi$	91	54	193	25	41	20
Числа $k_1$ ,	5–6	4	7	3–4	3–4	2–3
$k_2$ ,	3	3	4	7	3–4	8–9
$k_3$	5–6	4–5	7	1	3–4	1
Відстань між шарами молекулярних фрагментів (міжплощинна відстань), $h_0$ , нм	0,396	0,411	0,408	0,2379	0,6479	0,2165
Продуктивність полірування, $10^{-13}$ м <sup>3</sup> /с						
розрахункова	6,1	5,7	13,9	3,4	14,9	2,0
експериментальна	6,2	5,9	14,3	3,4	15,1	2,1
експериментальна в мкм/год	0,8	0,7	2,4	0,8	6,7	0,7
Шорсткість поверхні						
$Ra$ , нм	6,4	5,6	7,4	5,1	6,9	3,6
$Rq$ , нм	6,9	6,0	7,9	5,4	7,4	3,9
$Rmax$ , нм	12,0	10,3	13,5	9,6	13,1	7,0

В результаті досліджень встановлено, що продуктивність полірування зростає у разі підвищення площі поверхні, найбільш ймовірного розміру та об'єму частинок шламу, що видаляються з оброблюваної поверхні (рис. 1–3).

Залежності продуктивності зняття оброблюваного матеріалу від розмірів частинок шламу, що утворюються під час полірування оптичного скла і ситалів (прямі 1) та кристалічних матеріалів (прямі 2) є лінійними функціями, які характеризуються прямими з різним кутом нахилу по відношенню до вісі абсцис. Залежність продуктивності зняття оброблюваного матеріалу від найбільш ймовірного розміру частинок шламу (рис. 2) за допомогою методу найменших квадратів можна апроксимувати лінійною функцією

$$Q = \begin{pmatrix} 4,6 \\ 10,1 \end{pmatrix} \cdot 10^{-4} a_v - \begin{pmatrix} 1,1 \\ 3,0 \end{pmatrix} \cdot 10^{-12},$$

яка показує, що продуктивність полірування оптичних та напівпровідникових кристалів більш суттєво залежить від розміру частинок шламу, ніж продуктивність полірування оптичного скла і ситалів:  $\left(\frac{\partial Q}{\partial a_v}\right)_2 / \left(\frac{\partial Q}{\partial a_v}\right)_1 = 2,2$ .

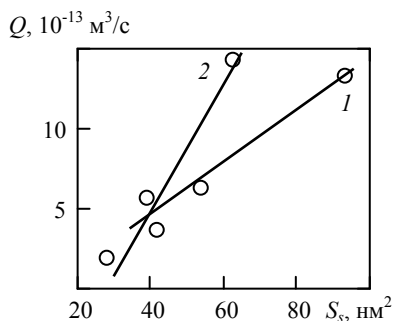


Рис. 1. Залежність продуктивності зняття оброблюваного матеріалу від площі поверхні частинок шламу: 1 – оптичне скло і ситали; 2 – кристалічні матеріали.

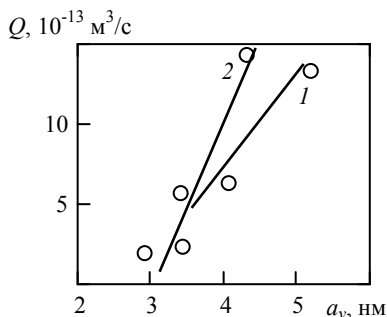


Рис. 2. Залежність продуктивності зняття оброблюваного матеріалу від найбільш ймовірного розміру частинок шламу: 1 – оптичне скло і ситали; 2 – кристалічні матеріали.

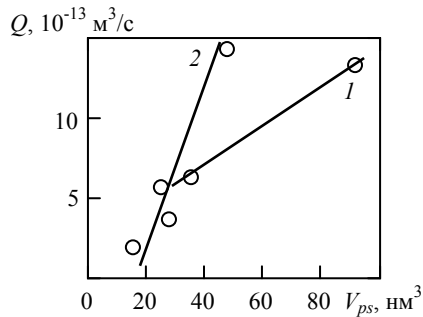


Рис. 3. Залежність продуктивності зняття оброблюваного матеріалу від об'єму частинок шламу: 1 – оптичне скло і ситали; 2 – кристалічні матеріали.

Крім того, показано, що зняття оброблюваного матеріалу під час полірування ( $Q \geq 0$ ) може відбуватись лише за умови утворення частинок шламу, мінімальний розмір яких складає 2,4 нм (у разі полірування оптичного скла і ситалів), або 3,0 нм (у разі полірування оптичних та напівпровідникових кристалів).

Продуктивність полірування неметалевих матеріалів залежить від енергії перенесення [1–3, 5, 7], яка показує енергетичні витрати на зняття одиниці маси оброблюваного матеріалу. У відповідності до розрахованих значень коефіцієнта об'ємного зносу  $\eta$  та енергії перенесення  $U^*$ , характерних для полірування деталей із оптичного скла і ситалів та елементів з оптичних і напівпровідникових кристалів показана залежність коефіцієнта об'ємного зносу від енергії перенесення (рис. 4), яку можна в логарифмічному масштабі апроксимувати лінійними функціями, що мають вигляд  $\lg \eta = -\alpha_1 \cdot \lg(U^*) + \beta_1$ ,

де  $\alpha_1 = \begin{cases} 1,17 \\ 0,03 \end{cases}$ ,  $\beta_1 = \begin{cases} +0,85 \\ -11,00 \end{cases}$  – коефіцієнти, визначені за методом найменших

квадратів, похибка апроксимації – 1 %. Ці залежності показують, що коефіцієнт об'ємного зносу тим менше, чим більше енергія перенесення, а також свідчать, що і для аморфних тіл, і для кристалічних матеріалів існує фундаментальна залежність між енергетичними витратами, необхідними для диспергування оброблюваної поверхні в частинки шламу, та інтенсивністю видалення оброблюваного матеріалу під час полірування.

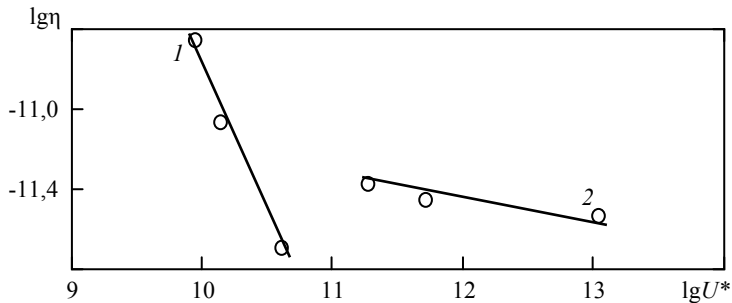


Рис. 4. Залежність коефіцієнта об'ємного зносу від енергії перенесення під час полірування оптичного скла і ситалів (1) та кристалічних матеріалів (2).

В результаті дослідження закономірностей формування нанорельєфу обробленої поверхні [1, 2, 6, 7, 30–33] під час полірування оптичних поверхонь деталей зі скла, ситалів і оптичних та напівпровідникових кристалів за допомогою дисперсних полірувальних систем, встановлено, що нанопрофіль полірованої поверхні характеризується висотними параметрами шорсткості  $Ra$ ,  $Rq$ ,  $Rmax$ , які зростають у разі збільшення відстані між шарами молекулярних фрагментів (міжплощинних відстаней)  $h_0$  (рис. 5).

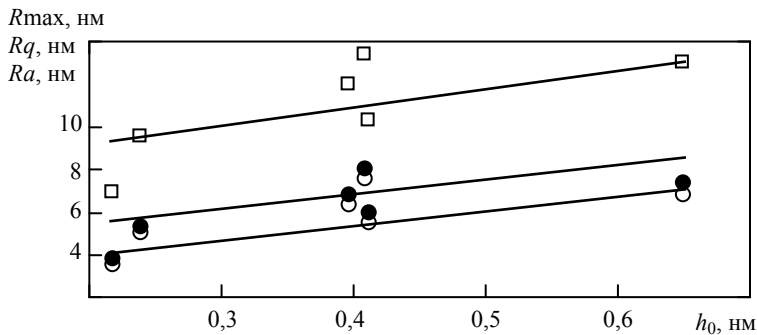


Рис. 5. Залежність параметрів шорсткості  $Ra$  (○),  $Rq$  (●),  $Rmax$  (□) полірованих поверхонь від відстані між шарами молекулярних фрагментів в частинках шламу.

Наведені залежності можна апроксимувати лінійними функціями, що мають вигляд  $\begin{pmatrix} Ra \\ Rq \\ Rmax \end{pmatrix} = \alpha_2 h_0 + \beta_2$ , де  $\alpha_2 = \begin{pmatrix} 6,6 \\ 7,2 \\ 12,3 \end{pmatrix}$ ,  $\beta_2 = \begin{pmatrix} 3,3 \\ 3,5 \\ 6,2 \end{pmatrix}$  нм – коефіцієнти,

що визначені методом найменших квадратів, похибка апроксимації складає 12–13 %. Аналіз вказаних функцій дозволяє зробити висновок, що під час полірування скла, ситалів і оптичних та напівпровідникових кристалів шорс-

ткість полірованої поверхні суттєво залежить від структури оброблюваного матеріалу і має обмеження, що визначають у відповідності до рівняння

$$\lim_{h_0 \rightarrow 0} \begin{pmatrix} Ra \\ Rq \\ Rmax \end{pmatrix} = \beta_2,$$

яке означає, що за допомогою даної дисперсної системи під час полірування будь-яких аморфних та кристалічних матеріалів неможливо досягти параметрів шорсткості обробленої поверхні, менших ніж  $Ra_0 = 3,3$  нм,  $Rq_0 = 3,5$  нм,  $Rmax_0 = 6,2$  нм.

Під час полірування оптичних 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 параметрами шорсткості  $Ra$ ,  $Rq$ ,  $Rmax$ . Відношення параметрів  $\eta$  і  $Ra$ , яке характеризує вплив структури оброблюваного матеріалу на показники процесу полірування, визначається залежністю  $\eta/Ra = f(h_0)$ , яка наведена на рис. 6.

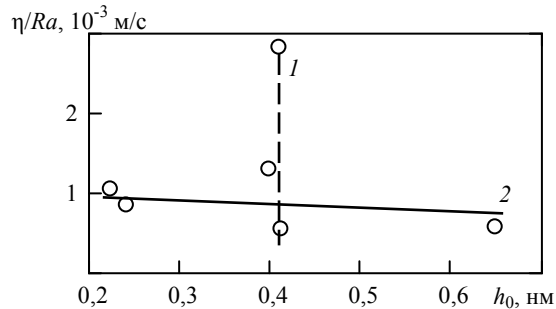


Рис. 6. Залежність співвідношення  $\eta/Ra$  від відстані між шарами молекулярних фрагментів в частинках шламу.

Відношення  $\eta/Ra$  одночасно характеризує швидкість видалення оброблюваного матеріалу та зменшення шорсткості обробленої поверхні під час полірування, його значення змінюється у діапазоні  $(0,6-2,8) \cdot 10^{-3}$  м/с незалежно від відстані між шарами молекулярних фрагментів в частинках шламу оптичного скла і ситалів (пряма 1) та незначно спадає від 1,1 до 0,7 мм/с у разі збільшення міжплощинної відстані в кристалах карбіду кремнію, сапфіру та антимоніду індію (пряма 2).

Аналіз показників процесу полірування оптичних деталей та елементів з оптичного скла, ситалів і оптичних та напівпровідникових кристалів показав, що продуктивність полірування змінюється в межах  $(2,0-14,9) \cdot 10^{-13}$  м<sup>3</sup>/с (0,7-6,7 мкм/год), а параметри шорсткості їхніх полірованих поверхонь знаходяться в інтервалі:  $Ra = 3,6-7,4$  нм,  $Rq = 3,9-7,9$  нм,  $Rmax = 7,0-13,5$  нм, і залежать від розмірів частинок шламу, що видаляються з оброблюваної поверхні, та енергії перенесення, які визначаються хімічним складом і структурою оброблюваного матеріалу.

## ВИСНОВКИ

В результаті дослідження закономірностей впливу структури оброблюваного матеріалу на продуктивність полірування і шорсткість полірованих поверхонь оптичних деталей та елементів встановлено, що продуктивність



зняття оброблюваного матеріалу лінійно зростає у разі збільшення площі поверхні, найбільш ймовірного розміру та об'єму частинок шламу, які видаляються з оброблюваної поверхні, і показано, що розміри частинок шламу більш суттєво (в 2 рази) впливають на продуктивність полірування оптичних та напівпровідникових кристалів, ніж оптичного скла і ситалів.

Встановлено, що коефіцієнт об'ємного зносу у разі збільшення енергії перенесення суттєво зменшується під час полірування оптичного скла і ситалів і незначно спадає під час полірування кристалічних матеріалів. Показано, що параметри шорсткості  $Ra$ ,  $Rq$ ,  $Rmax$  полірованих поверхонь зростають у разі збільшення відстані між шарами молекулярних фрагментів (міжплощинних відстаней) в аморфних та кристалічних матеріалах.

Встановлено, що відношення  $\eta/Ra$ , яке характеризує швидкість видалення оброблюваного матеріалу і зменшення шорсткості обробленої поверхні під час полірування, не залежить від відстані між шарами молекулярних фрагментів в оптичному склі та ситалах і незначно спадає у разі збільшення міжплощинної відстані в кристалах карбїду кремнію, сапфіру та антимонїду індію.

Аналіз показників полірування оптичних деталей та елементів з оптичного скла, ситалів і оптичних та напівпровідникових кристалів показав, що за умови використання дисперсної полірувальної системи з мікро- і нанопорошків досягається необхідний рівень продуктивності полірування та шорсткості оброблених поверхонь, які відповідають 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 parameters of structure of the processed material  
on polishing indicators optical surfaces

*As a result of studying the regularities of the structure of 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 was found that the removal productivity of the processed material increases linearly with increasing sludge particle size. It is shown that the coefficient of volume wear with increasing transfer energy decreases significantly with the polishing of optical and semiconductor crystals and decreases slightly with the polishing of optical glass and glassceramics. It is shown that the roughness parameters of polished surfaces increase linearly with increasing distance between layers of molecular fragments or interplanar distances in the processed material. It is established that the value of the ratio ( $\eta / Ra$ ) does not depend on the distance between the layers of molecular fragments in amorphous materials and increases linearly with increasing interplanar distance in crystals.*

**Keywords:** polishing, structure, polishing productivity, surface roughness.

1. 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.
2. Filatov Yu.D. Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing / eds. J. Zhang et al. Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining, Springer Tracts in Mechanical Engineering. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. P. 129–165.
3. 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.
4. 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.

5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Filatov Yu.D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 6. P. 427–433.
9. Бацанов С.С. Структурная химия. Факты и зависимости. Москва: Диалог-МГУ, 2000. 292 с.
10. Kuvshinskii M.V., Oreshkin S.I., Popov S.M., Rudenko V.N., Yudin I.S., Azarova V.V., Blagov S.V. Tests of cryogenic Fabry–Perot cavity with mirrors on different substrates. *MDPI App. Sci.* 2019. Vol. 9, no. 2. art. 230. (1–12).
11. Пузанова Е.Г., Мартюхова Д.А., Сигаев В.Н., Строганова Е.Е., Савинков В.И. Ионнообменное упрочнение оптических ситаллов литийалюмосиликатной системы. *Успехи в химии и химической технологии.* 2016. Т. XXX, № 7. С. 93–95.
12. Бесогонов И.И., Скворцова И.Н. Уменьшение шероховатости поверхности ситалловой ложки до наноразмерных значений. *Изв. вузов. Приборостроение.* 2009. Т. 52, № 9. С. 73–76.
13. Belkhir N., Aliouane T., Bouzid D. Correlation between contact surface and friction during the optical glass polishing. *Appl. Surf. Sci.* 2014. Vol. 288. P. 208–214.
14. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Filatov A.Yu., Yashuk V.P., Heisel W., Storchak M. Surface quality control in diamond abrasive finishing. *Proc. SPIE. Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI.* 2009. Vol. 7389, art. 73892O.
15. 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.
16. Бахолдин С.И., Маслов В.Н. Моделирование поверхностных энергий кристаллов сапфира. *ФТТ.* 2015. Т. 57, № 6. С. 1213–1219.
17. Добровинская Е.Р., Литвинов Л.А., Пищик В.В. Энциклопедия сапфира. Харьков: Институт монокристаллов, 2004. 508 с.
18. Барыбин А.А., Томилин В.И., Шаповалов В.И. Физико-технологические основы макро-, микро- и наноэлектроники. Москва: Физматлит, 2011. 784 с.
19. Львова Т.В., Дунаевский М.С., Лебедев М.В., Шахмин А.Л., Седова И.В., Иванов С.В. Химическая пассивация подложек InSb (100) в водных растворах сульфида натрия. *Физика и техника полупроводников.* 2013. Т. 47. № 5. С. 710–716.
20. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Effect of rheological properties of dispersed system on polishing indicators of optical glass and glassceramics. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no. 1. P. 65–73.
21. 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.
22. 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 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). *J. Micro. Elect. Pack.* 2008. Vol. 5, no. 1. P. 101–106.
23. Aljameel A.I., Hassan H.A., Ng S.S. Polarized Infrared Reflectance for Wurtzite In<sub>0.10</sub>Ga<sub>0.90</sub>N Epilayer on Sapphire Grown by MBE. *J. Electrochem. Sci.* 2014. Vol. 9, P. 2756–2761.
24. Telmer M.R., Hilario M.S., Hoff B.W., Lanagan M.T., Reeja-Jayan B. Anisotropy of W-band complex permittivity in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *J. Phys.: Condens. Matter.* 2019. Vol. 31, art. 225702 (1–10).
25. Kiefer W., Richter W., Cardona M., Second-order Raman scattering in InSb. *Phys. Rev.* 1975. Vol. 12, no 6. P. 2346–2354.
26. 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.
27. Грудинкин С.А., Кукушкин С.А., Осипов А.В., Феоктистов Н.А. ИК-спектры углерод-вакансионных кластеров при топохимическом превращении кремния в карбид кремния. *ФТТ.* 2017. Т. 59, № 12. С. 2403–2408.

28. 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.
29. 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. Opt. Eng. + Appl.* 2010. Vol. 7786. P. 77861–77869.
30. Hoyo J.D., Kim D.W., Burge J.H. Super-smooth optical fabrication controlling high spatial frequency surface irregularity. *Proc. SPIE. Opt. Manufacturing and Testing X*. 2013. Vol. 8838, art. 88380T.
31. 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.
32. 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.
33. 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 18.12.20

Після доопрацювання 05.05.21

Прийнята до опублікування 07.05.21