

Дослідження процесів обробки

УДК 621.623

Ю. Д. Філатов^{1,*}, В. І. Сідорко¹, А. Ю. Бояринцев²,
С. В. Ковальов¹, В. В. Гаращенко¹, В. А. Ковальов¹

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля
НАН України, м. Київ, Україна

²Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України,
м. Харків, Україна

**filatov@ism.kiev.ua*

Вплив спектроскопічних параметрів оброблюваного матеріалу та полірувального порошку на показники полірування оптичних поверхонь

В результаті дослідження закономірностей впливу спектроскопічних параметрів оброблюваного матеріалу та полірувального порошку на продуктивність полірування і шорсткість полірованих поверхонь деталей з оптичного скла, ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів, кераміки і полістиролу встановлено, що інтенсивність зняття оброблюваного матеріалу лінійно зростає при збільшенні кількості молекулярних фрагментів в частинці шламу, що видаляється з оброблюваної поверхні, і спадає при зростанні співвідношення частот власних коливань молекулярних фрагментів в частинках полірувального порошку та оброблюваному матеріалі. Показано, що при збільшенні цього співвідношення параметри шорсткості полірованих поверхонь лінійно спадають. Встановлено, що інтенсивність зношування полірувального порошку лінійно зменшується при збільшенні співвідношення частот коливань молекулярних фрагментів в оброблюваному матеріалі та частинках полірувального порошку.

Ключові слова: полірування, спектроскопічні параметри, продуктивність полірування, шорсткість поверхні.

ВСТУП

У відповідності до кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу [1–3] продуктивність полірування та шорсткість оброблених поверхонь залежать від розмірів частинок шламу, що видаляються із оброблюваної поверхні, при переносі енергії частинок полірувального порошку, що відбувається внаслідок їх міжмолекулярної взаємодії.

Разом з тим, закономірності утворення частинок шламу під час полірування оптичних поверхонь деталей із оптичного скла, ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів, керамічних і полімерних матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікро- і наночастинок полірувальних порошків вивчено недостатньо, а зв'язки між показниками процесу полірування та енергетичними характеристиками коливань молекулярних фрагментів в кластерах оброблюваної поверхні та частинок полірувального порошку остаточно не з'ясовані.

Метою дослідження є вивчення закономірностей впливу спектроскопічних параметрів оброблюваного матеріалу та дисперсної фази полірувальної дисперсної системи на продуктивність полірування і шорсткість оброблених поверхонь деталей з оптичного скла, ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів, керамічних і полімерних матеріалів.

УТВОРЕННЯ ЧАСТИНОК ШЛАМУ ТА ЧАСТИНОК ЗНОСУ ПОЛІРУВАЛЬНОГО ПОРОШКУ І СПЕКТРОСКОПІЧНІ ПАРАМЕТРИ ОБРОБЛЮВАНОВОГО МАТЕРІАЛУ ТА ДИСПЕРСНОЇ ФАЗИ ПОЛІРУВАЛЬНОЇ СУСПЕНЗІЇ

При взаємодії частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею під час полірування на ній збуджуються кластери за рахунок коливальної енергії збуджених кластерів на поверхні полірувальних частинок, тобто відбувається передача енергії від інструментального до оброблюваного матеріалу. Передача коливальної енергії від дисперсної системи до оброблюваної поверхні можлива лише тоді, коли енергія (частота ω_2^m) коливань молекулярних фрагментів, з яких складаються кластери на поверхні частинок полірувального порошку, більша ніж енергія (частота ω_1^m) коливань молекулярних фрагментів в кластерах оброблюваної поверхні, тобто виконується умова $\omega_2^m > \omega_1^m$, яка відповідає закону збереження енергії. Ця нерівність є необхідною умовою для видалення з оброблюваної поверхні частинок шламу. Крім того, співвідношення цих частот визначає розміри збуджених об'ємів, які залежать від кількості молекулярних фрагментів в кластері частинки полірувального порошку ξ_2^m та в кластері оброблюваної поверхні ξ_1^m , який перетворюється в частинку шламу і видаляється із оброблюваної поверхні під час полірування. Площа поверхні частинки шламу визначається дискретними значеннями $S_n = S_0(n+1)$ (n – номер частинки), а її мінімальна площа S_0 залежить від структури оброблюваного матеріалу та кількості молекулярних фрагментів в кластері. За такої умови, у відповідності до закону збереження енергії, зношення частинок полірувального порошку є неможливим.

Водночас відбувається передача коливальної енергії від оброблюваної поверхні до частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи, що можливо лише тоді, коли енергія (частота ω_1^p) коливань молекулярних фрагментів кластерів на поверхні оброблюваної деталі, більша, ніж енергія (частота ω_2^p) коливань молекулярних фрагментів в кластерах частинок полірувального порошку, тобто за виконання умови $\omega_1^p > \omega_2^p$. Співвідношення цих частот визначають розміри збуджених об'ємів, які залежать від кількості молекулярних фрагментів в кластері на оброблюваної поверхні ξ_1^p і кластері частинки полірувального порошку ξ_2^p , який перетворюється в частинку зносу і видаляється з поверхні частинки полірувального порошку.

У відповідності до кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу під час полірування та теорії Дерягіна-Ландау-Фервея-Овербека [4–10] взаємодія поверхонь оброблюваної деталі та частинок полірувального порошку під час полірування визначається силами міжмолекулярної взаємодії Ван-дер-

Ваальса [2, 3, 11–18], які є наслідком виникнення локальних дипольних моментів на частотах, характерних для спектрів інфрачервоного поглинання зазначених середовищ. Найбільш ефективний (резонансний) перенос енергії від дисперсної системи до оброблюваного матеріалу та від оброблюваної поверхні до частинок полірувального порошку відбувається за умов: $[\omega_2^m - \omega_1^m] - \min$ та $[\omega_1^p - \omega_2^p] - \min$, які дозволяють в спектрах ІЧ-поглинання оброблюваного матеріалу та полірувального порошку визначити характерні частоти (ω_1^m, ω_1^p) та (ω_2^m, ω_2^p).

ВПЛИВ СПЕКТРОСКОПІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБРОБЛЮВАНОВОГО МАТЕРІАЛУ ТА ПОЛІРУВАЛЬНОГО ПОРОШКУ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ПОЛІРУВАННЯ І ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХОНЬ

Дослідження закономірностей впливу спектроскопічних параметрів оброблюваного матеріалу та полірувального порошку на показники полірування здійснювалось при поліруванні плоских поверхонь зразків діаметром 60 мм, або інших розмірів, які закріплювали на блоці діаметром 60 мм, на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притиру з пінополіуретану діаметром 100 мм за умови: зусилля притискання деталі до притиру – 50 Н, частота обертання притиру – 90 об/хв, довжина штриху – 80 мм, середня температура в зоні контакту інструмента та оброблюваної деталі – 298 К. Оброблювали деталі 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 (3 зразки), оптичного кристалу сапфіру (Al_2O_3 , площина а ($11\bar{2}00$)) діаметром 25 мм, 3 зразки), напівпровідникових кристалів антимоніду індію (InSb) розмірами 18×7,5×2,5 мм (6 елементів) та карбїду кремнію (SiC, площина с (0001), 17 елементів), а також підкладки з алюмонітридної кераміки розмірами 60×30×1,2 мм (2 зразки) та пластмасові сцинтилятори з полістиролу діаметром 60 мм.

Частоту власних коливань молекулярних фрагментів досліджуваних матеріалів визначали за спектрами ІЧ-поглинання, які вимірювали за допомогою Фур'є-спектрометра Nicolet 6700. Частоти власних коливань молекулярних фрагментів частинок полірувального порошку дисперсної системи складали (см^{-1}): 597, 733, 777, 850, 870, 943, 984, 1085. Частоти власних коливань молекулярних фрагментів ситалу марки СТ-50-1 та астроситалу марки СО115М складали відповідно (см^{-1}): 560,0, 640,96, 719,40, 848,86, 892,17, 1001,89, 1037,99 та 750,48, 948,29, 1055,66. Частоти власних коливань молекулярних фрагментів були наступними (см^{-1}): оптичного скла марки К8 – 443, 568, 811, 1061, 1165 [3]; сапфіру – 577, 601, 638, 669, 751 [19–23]; антимоніду індію – 273, 305, 355,5, 362,7 [24, 25]; карбїду кремнію – 610, 738, 751, 769 [26–29]; кераміки на основі нітриду алюмінію – 610, 675, 891 і 917 [30–31]; полістиролу – 537, 694, 753, 905, 1027 [32].

Підготовка плоских поверхонь зразків з оптичного скла марки К8, ситалу марки СТ-50-1, астроситалу марки СО115М, сапфіру (Al_2O_3), антимоніду індію (InSb), карбїду кремнію (SiC), кераміки на основі нітриду алюмінію і полістиролу під полірування здійснювали за допомогою традиційних методів тонкого та надтонкого шліфування [3, 26, 31, 33–35].

Результати розрахунку параметрів взаємодії оброблюваної поверхні з полірувальною дисперсною системою під час полірування оптичних поверхонь деталей зі скла і ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів, кераміки і полістиролу та визначення показників полірування наведено в таблиці.

Результати розрахунку показників полірування оптичного скла і ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів, кераміки і полістиролу

Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою	Оброблюваний матеріал							
	K8	CT-50-1	CO115M	Al ₂ O ₃ (площина <i>a</i> (11 $\bar{2}$ 0))	InSb	SiC (площина <i>c</i> (001))	Кераміка AlN	Полістирол ПС
Частота ω_1^m ,								
10^{14} с^{-1}	1,07	1,06	1,42	1,26	0,68	1,45	1,27	1,31
см^{-1}	568	560	750	669	363	769	675	694
Частота ω_2^m ,								
10^{14} с^{-1}	1,13	1,13	1,47	1,38	0,74	1,60	1,38	1,38
см^{-1}	597	597	777	733	390	850	733	733
ω_2^m/ω_1^m	1,06	1,07	1,03	1,10	1,08	1,10	1,09	1,05
Частота ω_1^p ,								
10^{14} с^{-1}	1,53	1,21	1,79	1,26	0,68	1,45	1,68	1,31
см^{-1}	811	641	948	669	363	769	891	694
Частота ω_2^p ,								
10^{14} с^{-1}	1,38	1,13	1,64	1,13	0,63	1,38	1,60	1,14
см^{-1}	733	597	870	597	332	733	850	604
ω_1^p/ω_p^m	1,11	1,07	1,09	1,12	1,09	1,05	1,05	1,15
Продуктивність полірування Q								
Розрахунок,								
$10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	6,1	5,7	13,9	3,4	14,9	2,0	7,3	39,9
Експеримент,								
$10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	6,2	5,9	14,3	3,4	15,1	2,1	7,7	39,3
мкм/год	0,8	0,7	2,4	0,8	6,7	0,7	1,0	5,0
Шорсткість поверхні								
Ra , нм	6,4	5,6	7,6	5,1	6,9	3,6	4,3	9,7
Rq , нм	6,9	6,0	8,1	5,4	7,4	3,9	4,6	10,3
$Rmax$, нм	12,0	10,3	13,4	9,6	13,1	7,0	8,5	17,0

У результаті досліджень встановлено, що продуктивність полірування тим більше, чим більше розмір частинок шламу, що видаляються із оброблюваної поверхні, та лінійно зростає в разі збільшення кількості молекулярних фрагментів в частинці шламу (кластері оброблюваного матеріалу) ξ_1^m (рис. 1). Ця залежність для оптичного скла і ситалів (див. рис. 1, 1), оптичних і напівпровідникових кристалів (див. рис. 1, 2), кераміки і полістиролу (див. рис. 1, 3) може бути апроксимована лінійною функцією, що має вигляд

$$Q = \alpha_1 \xi_1^m + \beta_1,$$

$$\text{де } \alpha_1 = \begin{cases} 6,3 \cdot 10^{-15} \\ 6,4 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с} \\ 7,4 \cdot 10^{-14} \end{cases}, \beta_1 = \begin{cases} 1,5 \cdot 10^{-13} \\ -11,6 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с} \\ -15,7 \cdot 10^{-13} \end{cases} \text{ – коефіцієнти і характеризується}$$

трьома прямими, які показують, що продуктивність полірування оптичного

скла і ситалів менш суттєво залежить від кількості молекулярних фрагментів в частинці шламу, ніж продуктивність полірування оптичних і напівпровідникових кристалів, кераміки на основі нітриду алюмінію і полістиролу.

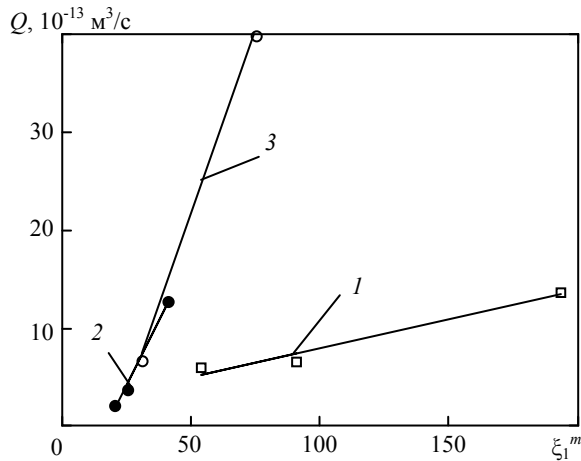


Рис. 1. Залежність продуктивності зняття оброблюваного матеріалу від кількості молекулярних фрагментів в частинці шламу ξ_1^m : 1 – оптичне скло і ситали; 2 – кристалічні матеріали; 3 – кераміка і полістирол.

Крім того, з'ясовано, що залежність інтенсивності зняття оброблюваного матеріалу під час полірування оптичних поверхонь деталей зі скла і ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів, кераміки на основі нітриду алюмінію та полістиролу від кількості молекулярних фрагментів в кластері частинки полірувального порошку теж має пропорційний характер. Це зумовлене тим, що коливальна енергія і об'єм збудженого кластера оброблюваної поверхні, які визначають кількість молекулярних фрагментів в частинці шламу, залежать від енергії та об'єму збудженого кластера в частинці полірувального порошку, які залежать зі свого боку від кількості збуджених молекулярних фрагментів. На рис. 2 наведено залежність кількості ξ_1^m молекулярних фрагментів в частинці шламу від кількості ξ_2^m молекулярних фрагментів в кластері частинки полірувального порошку. Ця залежність апроксимована лінійною функцією, що має вигляд

$$\xi_1^m = \alpha_2 \cdot \xi_2^m + \beta_2,$$

де $\alpha_2 = 0,9$, $\beta_2 = -8,1$ – коефіцієнти, що визначено методом найменших квадратів; похибка апроксимації – 2 %.

Екстраполяція цієї функції дозволяє визначити мінімальне значення кількості молекулярних фрагментів в кластері полірувального порошку $\xi_{20}^m = -\beta_2/\alpha_2 \approx 8,9$, за якої кількість молекулярних фрагментів в частинці шламу $\xi_1^m > 0$. Це означає, що енергія збудженого кластера в частинці полірувального порошку буде достатньою для збудження кластера на оброблюваній поверхні і, відповідно, для утворення частинки шламу лише тоді, коли в частинці полірувального порошку

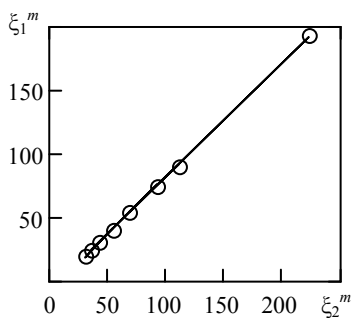


Рис. 2. Залежність кількості молекулярних фрагментів в частинці шламу ξ_1^m від кількості молекулярних фрагментів в кластері частинки полірувального порошку ξ_2^m .

буде збуджуватись об'єм, що складається не менше, ніж з 9 молекулярних фрагментів.

Співвідношення частот власних коливань молекулярних фрагментів в кластерах частинок полірувального порошку і частинок шламу визначає ефективність їх міжмолекулярної взаємодії та зумовлює інтенсивність зняття оброблюваного матеріалу і шорсткість обробленої поверхні [1–3, 5, 19, 20, 36, 37]. Залежність продуктивності зняття оброблюваного матеріалу від співвідношення частот власних коливань молекулярних фрагментів в кластерах частинок полірувального порошку та обробленої поверхні (ω_2^m/ω_1^m) наведено на рис. 3. Ця залежність описується гіперболічною функцією с асимптотою при $\omega_2^m/\omega_1^m = 1$, яка на окремих ділянках може бути апроксимована лінійною функцією

$$Q = -\alpha_3(\omega_2^m/\omega_1^m) + \beta_3,$$

де $\alpha_3 = \begin{cases} 2,8 \cdot 10^{-11} \\ 6,1 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{с} \\ 9,6 \cdot 10^{-11} \end{cases}$, $\beta_3 = \begin{cases} 3,0 \cdot 10^{-11} \\ 6,8 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{с} \\ 10,5 \cdot 10^{-11} \end{cases}$ – коефіцієнти. Ця функція харак-

теризується прямими (див. рис. 3), які показують, що продуктивність полірування оптичного скла марки К8, ситалу СТ-50-1 і астроситалу СО115М (див. рис. 3, 1), оптичних і напівпровідникових кристалів сапфіру, антимоніду індію і карбїду кремнію (див. рис. 3, 2) та кераміки і полістиролу (див. рис. 3, 3) суттєво збільшується при зменшенні співвідношення частот власних коливань молекулярних фрагментів в кластерах частинок полірувального порошку і обробленої поверхні (ω_2^m/ω_1^m).

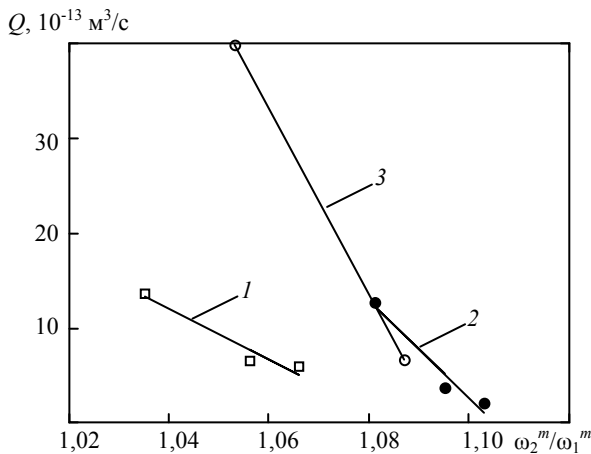


Рис. 3. Залежність продуктивності зняття оброблюваного матеріалу від співвідношення частот коливань молекулярних фрагментів в кластерах частинок полірувального порошку та обробленої поверхні (ω_2^m/ω_1^m): 1 – оптичне скло і ситали; 2 – кристалічні матеріали; 3 – кераміка і полістирол.

Використавши значення параметрів кристалічної ґратки частинок полірувального порошку ($a = 0,56 \text{ нм}$ і $b = 1,15 \text{ нм}$) можна оцінити розміри збудженого кластера на їх поверхні, які знаходяться в діапазоні від 5 до 10 нм. Це означає, що під час полірування на поверхні частинок полірувального порошку розмірами від десятків нанометрів до одиниць мікрометрів збуджуються кластери розмірами до 10 нм, завдяки яким збуджуються кластери на оброб-

люваній поверхні, що приводить до утворення та видалення з неї частинок шламу. Таким чином, можна вважати, що процес полірування відбувається на надмолекулярному рівні і супроводжується перенесенням частинок шламу з певними значеннями кінетичної енергії та швидкості.

Крім того, аналіз відношення кількості молекулярних фрагментів в кластері частинки полірувального порошку до кількості молекулярних фрагментів в частинці шламу показує, що її значення $\zeta_1 = \xi_2^m / \xi_1^m = 1,32 \pm 0,10$ можна вважати сталим (з точністю 7 %). Виходячи із визначення кількості молекулярних фрагментів в кластерах оброблюваної поверхні та частинок полірувального порошку, можна вважати, що відношення частот їх власних коливань визначається через ζ_1 як $(\omega_2^m / \omega_1^m) = \zeta_1^{1/4} = 1,07$. В таблиці наведено значення частот власних коливань молекулярних фрагментів в кластерах частинок шламу і частинок полірувального порошку, а також їх співвідношення, яке відповідає діапазону [1,03; 1,10].

В результаті дослідження закономірностей формування нанорельєфу обробленої поверхні [1–3, 5, 20, 38, 39] при поліруванні оптичних поверхонь деталей зі скла, ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів, кераміки і полістиролу встановлено, що нанопрофіль полірованої поверхні характеризується висотними параметрами шорсткості Ra , Rq , $Rmax$, які лінійно спадають при збільшенні співвідношення частот коливань молекулярних фрагментів в кластерах частинок полірувального порошку і оброблюваної поверхні $(\omega_2^m / \omega_1^m)$. Прямі 1 (для оптичного скла і ситалів), 2 (для кристалічних матеріалів) і 3 (для кераміки і полістиролу), які наведено на рис. 4, показують, що наближення до резонансу частот ω_2^m і ω_1^m призводить до погіршення шорсткості оброблених поверхонь.

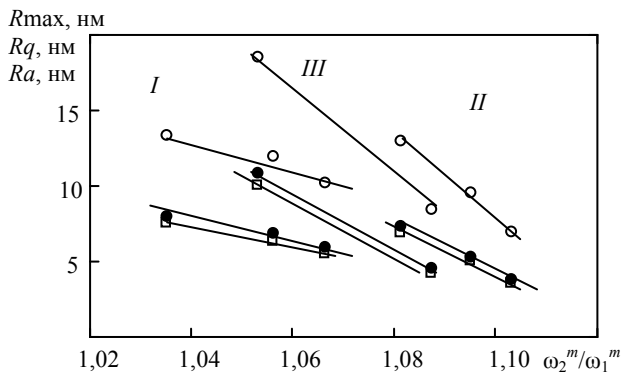


Рис. 4. Залежність параметрів шорсткості Ra (□), Rq (●), $Rmax$ (○) полірованих поверхонь від співвідношення частот коливань молекулярних фрагментів в кластерах частинок полірувального порошку та оброблюваної поверхні $(\omega_2^m / \omega_1^m)$: I – оптичне скло і ситали; II – кристалічні матеріали; III – кераміка і полістирол.

Під час аналізу інтенсивності зношування полірувального порошку показано, що коливальна енергія збудженого кластера на поверхні частинки полірувального порошку, яка визначає кількість молекулярних фрагментів в ній, залежить від енергії та об'єму збудженого кластера на оброблюваній поверхні, що залежать від кількості молекулярних фрагментів в кластері оброблюваного матеріалу. На рис. 5 наведено залежність кількості ξ_2^P молекулярних фрагментів в частинці полірувального порошку від кількості ξ_1^P молекулярних фрагментів в кластері оброблюваної поверхні. Ця залежність апроксимована лінійною функцією, яка має вигляд $\xi_2^P = \alpha_4 \xi_1^P + \beta_4$, де $\alpha_4 = 0,9$, $\beta_4 = -5,7$ – кое-

фіцієнти, що визначені методом найменших квадратів, похибка апроксимації – 3 %.

Аналіз відношення кількості молекулярних фрагментів в кластері оброблюваного матеріалу до кількості молекулярних фрагментів в частинці полірувального порошку показує, що її значення $\zeta_2 = \xi_1^P/\xi_2^P = 1,42 \pm 0,13$ можна вважати сталим (з точністю 9 %). Визначаючи кількості молекулярних фрагментів в кластерах оброблюваної поверхні та частинок полірувального порошку, можна оцінити співвідношення частот їх власних коливань: $(\omega_1^P/\omega_2^P) = \zeta_2^{1/4} = 1,09$. В таблиці наведено значення частот власних коливань молекулярних фрагментів в кластерах частинок шламу і частинок полірувального порошку, а також їх співвідношення, яке відповідає діапазону [1,05; 1,15].

Співвідношення частот коливань молекулярних фрагментів в кластерах оброблюваної поверхні та частинок полірувального порошку (ω_1^P/ω_2^P) визначає ефективність їх міжмолекулярної взаємодії та зумовлює інтенсивність зношування полірувального порошку під час полірування. Залежності інтенсивності зношування полірувального порошку під час полірування оптичних поверхонь деталей зі скла і ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів, кераміки та полістиролу від співвідношення частот коливань молекулярних фрагментів в кластерах оброблюваної поверхні та частинок полірувального порошку (ω_1^P/ω_2^P) наведено на рис. 6.

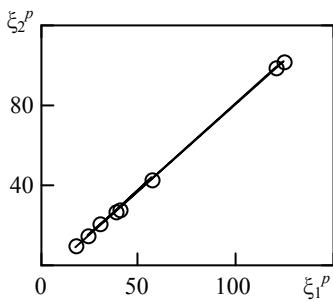


Рис. 5. Залежність кількості молекулярних фрагментів в кластері частинки полірувального порошку ξ_2^P від кількості молекулярних фрагментів в кластері оброблюваної поверхні ξ_1^P .

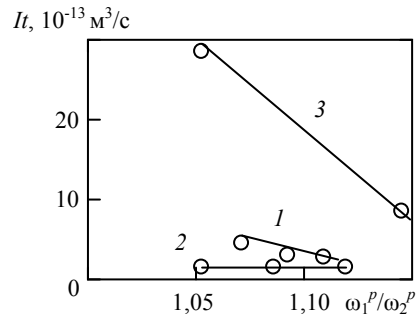


Рис. 6. Залежність інтенсивності зношування полірувального порошку від співвідношення частот коливань молекулярних фрагментів в кластерах оброблюваної поверхні та частинки полірувального порошку (ω_1^P/ω_2^P) : 1 – оптичне скло і ситали; 2 – кристалічні матеріали; 3 – кераміка і полістирол.

Аналіз наведених на рис. 6 функцій показує, що інтенсивність зношування полірувального порошку при збільшенні співвідношення частот (ω_1^P/ω_2^P) лінійно зменшується, значний знос частинок полірувального порошку відбувається під час полірування кераміки і полістиролу (див. рис. 6, 3) та оптичного скла і ситалів (див. рис. 6, 1). Під час полірування оптичних і напівпровідникових кристалів (див. рис. 6, 2) інтенсивність зношування частинок полірувального порошку на 1–2 порядки менша, практично не залежить від співвідношення частот (ω_1^P/ω_2^P) і має середнє значення $1,1 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$.

Аналіз показників процесу полірування оптичних деталей і елементів з оптичного скла, ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів, кераміки і полістиролу показав, що продуктивність їх полірування змінюється в широких межах $(2-40) \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ (0,7–6,7) мкм/год, а параметри шорсткості полірованих поверхонь знаходяться в інтервалах: $Ra = 3,6-9,7 \text{ нм}$, $Rq = 3,9-$

10,3 нм, $R_{\max} = 7,0\text{--}17,0$ нм, і залежать від частоти власних коливань молекулярних фрагментів в кластерах на поверхні оброблюваної деталі та частинок полірувального порошку.

ВИСНОВКИ

В результаті дослідження закономірностей впливу спектроскопічних параметрів оброблюваного матеріалу та полірувального порошку на продуктивність полірування та шорсткість полірованих оптичних поверхонь встановлено, що інтенсивність зняття оброблюваного матеріалу лінійно зростає при збільшенні кількості молекулярних фрагментів в частинці шламу, що видаляється з оброблюваної поверхні, та показано, що при поліруванні оптичного скла і ситалів вона менш суттєво залежить від кількості молекулярних фрагментів, ніж при поліруванні оптичних і напівпровідникових кристалів.

Продуктивність зняття оброблюваного матеріалу лінійно спадає при зростанні співвідношення частот власних коливань молекулярних фрагментів в кластерах частинки полірувального порошку та оброблюваної поверхні.

Необхідної продуктивності полірування оптичного скла, ситалів, кераміки і полістиролу досягають при менших значеннях цього співвідношення, ніж необхідної продуктивності полірування оптичних і напівпровідникових кристалів.

Параметри шорсткості R_a , R_q , R_{\max} лінійно зменшуються при збільшенні співвідношення частот і наближення їх до резонансу призводить до погіршення шорсткості оброблених поверхонь деталей з оптичного скла і ситалів, кристалічних матеріалів, кераміки і полістиролу;

На інтенсивність зношування полірувального порошку суттєво впливає співвідношення частот власних коливань молекулярних фрагментів в кластерах оброблюваного матеріалу та частинок полірувального порошку при поліруванні оптичного скла, ситалів, кераміки та полістиролу. При поліруванні оптичних і напівпровідникових кристалів інтенсивність зношування полірувального порошку значно менша і не залежить від цього співвідношення.

У результаті аналізу показників полірування деталей з оптичного скла і ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів, керамічних і полімерних матеріалів показано, що за умови узгодження спектроскопічних характеристик дисперсної полірувальної системи та оброблюваного матеріалу досягається необхідний рівень продуктивності полірування та шорсткості оброблених поверхонь, які відповідають вимогам до оптичних поверхонь.

Yu. D. Filatov¹, V. I. Sidorko¹, A. Y. Boyarintsev², S. V. Kovalev¹,
V. V. Garachenko¹, 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 spectroscopic parameters of the processed material and polishing powder for polishing of optical surfaces

As a result of studying the regularities of the influence of spectroscopic parameters of the processed material and polishing powder on polishing productivity and roughness of polished surfaces of parts made of optical glass, glassceramics, optical and semiconductor crystals, ceramics and polystyrene, it is established that the removal intensity of slime particles removed from the treated surface, and decreases with increasing ratio of the frequencies of natural oscillations of molecular fragments in the particles of polishing powder and the treated material. It is shown that with increasing this ratio, the roughness parameters of polished sur-

faces decrease linearly. It is established that the wear intensity of the polishing powder decreases linearly with increasing ratio of the oscillation time of molecular fragments in the processed material and particles of the polishing powder.

Keywords: polishing, spectroscopic parameters, polishing productivity, surface roughness.

1. 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.
2. Filatov Yu.D. Polishing of precision surfaces of optoelectronic device elements made of glass, siall, and optical and semiconductor crystals: A review. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 1. P. 30–48.
3. 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. Suratwala T.I. Materials Science and Technology of Optical Fabrication. USA, Hoboken: Wiley, 2018. 416 p.
5. 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.
6. Дерягин Б.В., Абрикосова И.И., Лифшиц Е.М. Молекулярное притяжение конденсированных тел. *Успехи физ. наук.* 2015. Т. 185, № 9. С. 981–1001.
7. 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.
8. Lin G., Guo D., Xie G., Jia Q., Pan G., In situ observation of colloidal particle behavior between two planar surfaces. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects.* 2015. Vol. 482. P. 656–661.
9. 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.
10. Chen G., Ni Z., Bai Y., Li Q., Zhao Y. The role of interactions between abrasive particles and the substrate surface in chemical-mechanical planarization of Si-face 6H-SiC. *RSC Adv.* 2017. Vol. 7. P. 16938–16952.
11. Pinchuk P., Jiang K. Size-dependent Hamaker constants for silver and gold nanoparticles. *Physical Chemistry of Interfaces and Nanomaterials XIV. Proc. SPIE.* 2015, art. 95491J.
12. Leong Y.K., Ong B.C. Critical zeta potential and the Hamaker constant of oxides in water. *Powder Technol.* 2003. Vol. 134, no. 3. P. 249–254.
13. 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 Interf. Sci.* 2008. Vol. 320. P. 264–267.
14. Nguyen A.V. Improved approximation of water dielectric permittivity for calculation of Hamaker constants. *J. Colloid Interf. Sci.* 2000. Vol. 229, no. 2. P. 648–651.
15. Lee S., Sigmund W.M. AFM study of repulsive van der Waals forces between Teflon AFTM thin film and silica or alumina. *Colloids Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.* 2002. Vol. 204. P. 43–50.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.

20. 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.
21. 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_2O_3). *J. Micro.-Elect. Pack.* 2008. Vol. 5. P. 101–106.
22. 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.
23. Telmer M.R., Hilario M.S., Hoff B.W., Lanagan M.T., Reeja-Jayan B. Anisotropy of W-band complex permittivity in Al_2O_3 . *J. Phys.: Condens. Matter.* 2019. Vol. 31, art. 225702 (1–10).
24. Dixon J.R., Furdyna J.K., Measurement of the static dielectric constant of the InSb lattice via gyrotropic sphere resonances. *Solid State Comm.* 1980. Vol. 35, P. 195–198.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. Грудинкин С.А., Кукушкин С.А., Осипов А.В., Феоктистов Н.А. ИК-спектры углерод-ваканстонных 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. Aljameel A.I., Hassan H.A., Ng S.S. Polarized infrared reflectance for wurtzite $In_{0.10}Ga_{0.90}N$ epilayer on sapphire grown by MBE. *J. Electrochem. Sci.* 2014. Vol. 9. P. 2756–2761.
31. Filatov Yu.D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 6. P. 427–433.
32. Mahasin F. Hadi Al-Kadhemy, Zahraa S. Rasheed, Sanaa R. Salim. Fourier transform infrared spectroscopy for irradiation coumarin doped polystyrene polymer films by alpha ray. *J. Rad. Res. Appl. Sci.* 2016. Vol. 9, no. 3. P. 321–331.
33. 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.
34. 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.
35. Filatov Yu.D., Polishing of Aluminosilicate Materials with Bound-Abrasive Tools. *J. Superhard Mater.* 2001. Vol. 23, no. 3. P. 32–42.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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 31.12.20

Після доопрацювання 05.05.21

Прийнята до опублікування 07.05.21