

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 реологічних властивостей дисперсної системи на показники полірування оптичного скла та ситалів

В результаті дослідження закономірностей полірування оптичного скла та ситалів встановлено, що коефіцієнт поверхневого натягу, коефіцієнт динамічної в'язкості полірувальної дисперсної системи і кути змочування поверхонь оброблюваної поверхні та притиру впливають на товщину проміжку між ними, а відповідно на продуктивність зняття оброблюваного матеріалу і параметри шорсткості оброблених поверхонь. Показано, що енергія перенесення безпосередньо зв'язана з коефіцієнтом об'ємного зносу, який визначає продуктивність полірування, та підтверджено справедливість співвідношення між коефіцієнтами об'ємного зносу і температуропровідності в залежності від питомої теплосмності, енергії перенесення і температури. Встановлено, що збільшення товщини проміжку між оброблюваною поверхнею і притиром приводить до зменшення найбільш ймовірного розміру частинок шламу та поліпшення шорсткості полірованих поверхонь.

Ключові слова: полірування, дисперсна система, швидкість видалення матеріалу, 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 із оброблюваної поверхні під час обробки, яка суттєво залежить від відстані між поверхнями оброблюваної деталі та притиру, тобто товщини проміжку між елементарними ділянками контактних поверхонь, в якому знаходиться дисперсна система (полірувальна суспензія). Ця товщина визначається реологічними властивостями і поверхневими явищами в дисперсній системі та залежить від динамічної в'язкості суспензії, коефіцієнта поверхневого натягу, кутів змочування нею поверхонь оброблюваної деталі й притиру.

© Ю. Д. ФІЛАТОВ, В. І. СІДОРКО, С. В. КОВАЛЬОВ, В. А. КОВАЛЬОВ, 2021

Разом з тим, процеси взаємодії зерен полірувального порошку з оброблюваною поверхнею під час полірування деталей електронної техніки і оптичних систем із оптичного скла, кераміки, ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів за допомогою полірувальної суспензії вивчені недостатньо, а причини впливу реологічних властивостей дисперсної системи на показники процесу полірування остаточно не з'ясовані.

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей впливу реологічних властивостей дисперсної системи на показники полірування плоских поверхонь підкладок із оптичного скла та ситалів.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДИСПЕРСНОЇ СИСТЕМИ НА ПОКАЗНИКИ ПОЛІРУВАННЯ СКЛА ТА СИТАЛІВ

Під час механічного полірування оптичних поверхонь за допомогою полірувальної суспензії на кожне зерно полірувального порошку за умови відсутності його хімічної взаємодії з оброблюваною деталлю діє результуюча сила молекулярного притягання, яка є сумою сили Ван-дер-Ваальса, сили електростатичної взаємодії, електричної сили подвійного шару, капілярної і гравітаційної сил. Кількісне порівняння сил, діючих на зерна полірувального порошку, розмір яких менше 1 мкм, показує, що капілярні сили, які пов'язані з поверхневим натягом суспензії, проявляються у макроскопічному масштабі і визначають сили притягання між оброблюваною деталлю та притиром, за абсолютною величиною є найбільшими. При взаємодії полірувального порошку з оброблюваною поверхнею найбільшими за абсолютною величиною є ван-дер-ваальсові сили. Сили подвійного шару, які виникають внаслідок зарядження зерен полірувального порошку і електризації оброблюваної поверхні, приблизно на порядок менші, а силами електростатичної взаємодії та тяжіння можна знехтувати [4–6]. У відповідності до кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу під час полірування [7–12] та теорії Дерягіна-Ландау-Фервея-Овербека [6, 13–16] середнє значення потенціалу взаємодії зерен полірувального порошку з оброблюваною поверхнею і концентрація частинок шлама в зоні контакту зерна полірувального порошку з оброблюваною поверхнею з урахуванням їх розподілу за площами поверхні суттєво залежать від товщини проміжку між елементарними ділянками контактних поверхонь оброблюваної деталі й притиру.

Розглядаючи гідродинамічну схему (рис. 1) контакту поверхонь притиру і оброблюваної деталі, можна визначити товщину проміжку l між елементарними ділянками контактних поверхонь, яка визначається формулою

$$l = \frac{1}{p_a} [\sigma(\cos \vartheta_1 + \cos \vartheta_2) - 2\eta U], \quad (1)$$

де p_a – номінальний тиск притискання оброблюваної деталі до притиру; σ – коефіцієнт поверхневого натягу; η – динамічна в'язкість дисперсної системи; U – відносна швидкість переміщення деталі й притиру; ϑ_1, ϑ_2 – кути змочування дисперсною системою відповідно поверхонь оброблюваної деталі й притиру.

В'язкість суспензії при різних концентраціях дисперсної фази визначали за допомогою віскозиметра мод. ВЗ-246, густину – за допомогою Density Meter DMA 35N, коефіцієнт поверхневого натягу – крапельним методом та за висотою підняття рідини к капілярі, кути змочування дисперсним середови-

шем поверхонь оброблюваної деталі та притиру – за допомогою мікроскопу Мир-12.

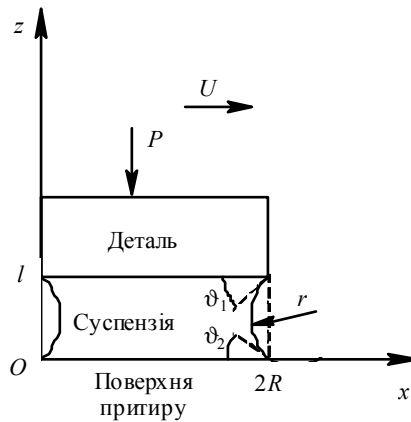


Рис. 1. Схема контакту поверхонь оброблюваної деталі й притиру.

Залежність густини дисперсної системи від концентрації дисперсної фази (рис. 2) є лінійною функцією, що має вигляд

$$\rho = \rho_0(\alpha_1 k + \beta_1),$$

де $\rho_0 = 1,028 \text{ г/см}^3$ – густина дисперсного середовища; $\alpha_1 = 1,582 \cdot 10^{-3}$, $\beta_1 = 1,017 \approx 1$ – коефіцієнти, які визначено методом найменших квадратів, похибка апроксимації – 0,5 %. Залежність кінематичної в'язкості дисперсної системи від концентрації дисперсної фази (рис. 3) можна апроксимувати лінійною функцією вигляду

$$\nu = \nu_0(\alpha_2 k + \beta_2),$$

де $\nu_0 = 0,93 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – коефіцієнт кінематичної в'язкості дисперсного середовища; $\alpha_2 = 0,018$, $\beta_2 = 0,857$ – коефіцієнти, які визначено методом найменших квадратів, похибка апроксимації менше 1 %.

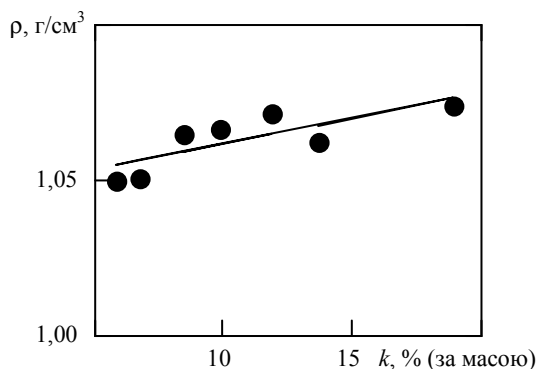


Рис. 2. Залежність густини дисперсної системи від концентрації дисперсної фази.

Залежність динамічної в'язкості дисперсної системи $\eta(k) = \nu(k) \cdot \rho(k)$ від концентрації дисперсної фази (рис. 4) можна апроксимувати лінійною функцією

$$\eta = \eta_0(\alpha_3 k + \beta_3), \quad (2)$$

де $\eta_0 = 0,956 \cdot 10^{-3}$ Па·с – коефіцієнт динамічної в'язкості дисперсної системи; $\alpha_3 = 0,02$, $\beta_3 = 0,87$ – коефіцієнти, які визначено методом найменших квадратів, похибка апроксимації менше 1 %.

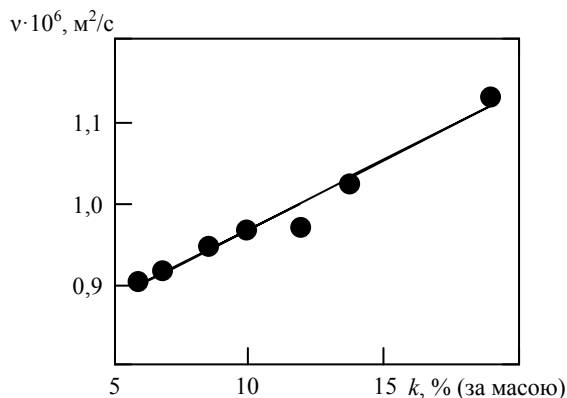


Рис. 3. Залежність кінематичної в'язкості дисперсної системи від концентрації дисперсної фази.

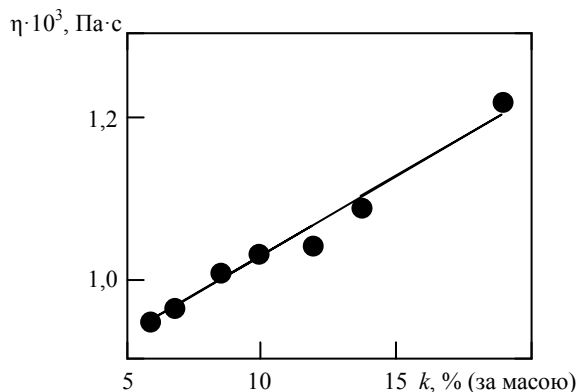


Рис. 4. Залежність динамічної в'язкості дисперсної системи від концентрації дисперсної фази.

Залежність динамічної в'язкості дисперсної системи від об'ємної доли частинок дисперсної фази може бути представлена у відповідності до рівняння

$$\eta = \eta_0(\beta_4 + \alpha_4\varphi),$$

де $\alpha_4 = 7,28$, $\beta_4 = 0,87$ – коефіцієнти, що визначені методом найменших квадратів, похибка апроксимації – 1 %. Це рівняння значно відрізняється від рівняння Ейнштейна для колоїдних систем ($\beta \neq 1$), яке дає завищенні приблизно на 10 % результати розрахунку по відношенню до даних експерименту, а коефіцієнт форми $\alpha_4 > 2,5$ свідчить про значне відхилення форми порошку від сферичної. За формулою Куна коефіцієнт форми для частинок полірувального порошку, що мають вигляд еліпсоїдів обертання з осями $a = 556$ нм та $b = 262$ нм, складає $\alpha_k = 2,5 + (a/b)^2/16 = 7,68$, що практично співпадає з $\alpha_4 = 7,28$ (відхилення не перевищує 5 %) [17–23].

Залежність коефіцієнта поверхневого натягу дисперсної системи від концентрації дисперсної фази, яку наведено на рис. 5 (крива 1), показує, що при підвищенні концентрації дисперсної фази коефіцієнт поверхневого натягу дисперсної системи зменшується за експоненціальним законом.

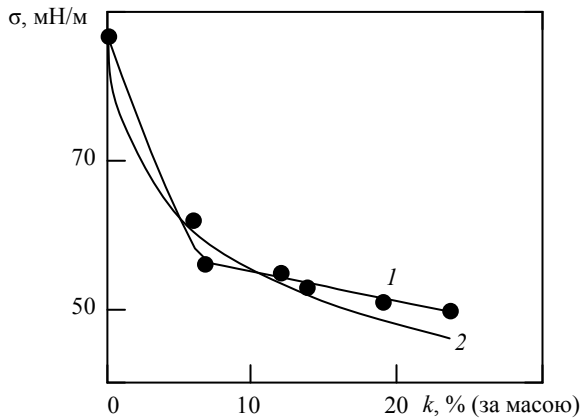


Рис. 5. Залежність коефіцієнта поверхневого натягу дисперсної системи від концентрації дисперсної фази.

Цю залежність можна апроксимувати функцією вигляду

$$\sigma = \sigma_0 \alpha(k) \exp[-\beta(k)k],$$

де $\sigma_0 = 87$ мН/м – коефіцієнт поверхневого натягу дисперсного середовища;

$$\alpha(k) = \begin{cases} 1, & k < 6,7 \\ 0,678, & k \geq 6,7 \end{cases}, \quad \beta(k) = \begin{cases} 67 \cdot 10^{-3}, & k < 6,7 \\ 7,26 \cdot 10^{-3}, & k \geq 6,7 \end{cases} - \text{коефіцієнти, які визна-}$$

чено методом найменших квадратів; похибка апроксимації – 1 %. Ця функція показує, що залежність поверхневого натягу дисперсної системи від концентрації дисперсної фази можна представити експоненціальними функціями, характерними для двох інтервалів концентрацій, що розділені критичною концентрацією $k^* = 6,7$ % (за масою). Слід зауважити, що при концентраціях дисперсної фази більших за k^* коефіцієнт поверхневого натягу дисперсної системи незначно зменшується у відповідності до залежності

$$\sigma = \gamma k + \delta, \quad (3)$$

де $\gamma = -0,384$ мН/м, $\delta = 59$ мН/м – коефіцієнти.

Середнє значення коефіцієнта поверхневого натягу дисперсної системи складає $\sigma_m = 53 \pm 2$ мН/м (відхилення від середньої величини не перевищує 4 %). Залежність коефіцієнта поверхневого натягу дисперсної системи від концентрації дисперсної фази у відповідності до рівняння Шишковського для колоїдних систем з поверхнево-активними речовинами наведена на рис. 5 (крива 2) і описується функцією, що має вигляд

$$\sigma = \sigma_0 - A \ln(1 + Bk),$$

де $A = 12,5 \cdot 10^{-3}$ Н/м, $B = 1$ – сталі коефіцієнти. Ця функція не відповідає експериментальній залежності коефіцієнта поверхневого натягу дисперсної системи від концентрації дисперсної фази (відхилення розрахункових даних від даних експерименту перевищує 30 %) [20, 21, 23].

Товщина проміжку l між поверхнями оброблюваної деталі та притиру, в якому знаходиться полірувальна дисперсна система, визначається у відповідності до формули (1) з врахуванням концентраційних залежностей коефіцієнтів динамічної в'язкості (формула (2)) та поверхневого натягу (формула (3)). При збільшенні концентрації дисперсної фази в'язкість дисперсної системи підвищується, що призводить до незначного зменшення проміжку між еле-

ментарними ділянками контактуючих поверхонь. Із аналізу формули (1) видно, що за усіх можливих режимів полірування оптичних поверхонь завжди виконується нерівність $U < \sigma/\eta$, яка показує, що величину $2\eta U$ можна розглядати як поправку, вплив якої на величину проміжку між поверхнями притиру та оброблюваної деталі не перевищує 1 %.

При збільшенні концентрації дисперсної фази коефіцієнт поверхневого натягу дисперсної системи зменшується, що призводить до зменшення товщини її прошарку між поверхнями оброблюваної деталі та притиру, а значить і до збільшення продуктивності зняття оброблюваного матеріалу під час полірування.

Дослідження впливу реологічних характеристик полірувальної дисперсної системи на продуктивність полірування відбувалось при поліруванні деталей із оптичного скла марки К8 (зразки діаметром 60 мм), ситалу марки СТ-50-1 (підкладки розміром 60×48×0,6 мм) та астроситалу марки СО115М (зразки діаметром 30 мм (3 шт.) на блоці) на верстаті мод. 2ШП-200М при використанні притиру із пінополіуретану при зусиллі притискання 50,5 Н, частоті обертання притиру 90 об./хв, концентрації дисперсної фази в полірувальній дисперсній системі 21 % (за масою). Основні фізичні властивості оброблюваних матеріалів наведено в табл. 1 [1, 3, 24–27].

Таблиця 1. Фізичні властивості оброблюваних матеріалів

Параметр	Оброблюваний матеріал		
	К8	СТ-50-1	СО-115М
Хімічний склад, % (за масою)	SiO ₂ –69,1, B ₂ O ₃ –10,75 %, Na ₂ O – 10,4 %, K ₂ O – 6,3 %, BaO – 3,1	SiO ₂ –60,5, Al ₂ O ₃ – 13,5, CaO – 8,5, MgO – 7,5, TiO ₂ – 10	SiO ₂ –66,2 %, Al ₂ O ₃ – 21,9 %, Li ₂ O –3,04 %, Na ₂ O – 0,4 %, K ₂ O – 3,0 %, TiO ₂ – 4,25 %
Густина ρ , г/см ³	2,52	2,65	2,46
Енергія зв'язку, еВ	3,90	4,20	4,6
Статична діелектрична проникність	6,50	8,50	8,0
Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	0,95	1,20	1,99
Питома теплоємність c_p , Дж/(кг·К)	754	775	920
Коефіцієнт температуропровідності χ , 10 ⁻⁶ м ² /с	0,50	0,58	0,87

Визначення параметрів та характеристик полірування поверхонь деталей із оптичного скла та ситалів здійснювали на основі кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу під час полірування [1–3, 7, 10, 28]. Було розраховано потенціал взаємодії частинок дисперсної фази з оброблюваною поверхнею, концентрацію і об'єм частинок шламу, що видаляються із оброблюваної поверхні, а також коефіцієнт об'ємного зносу і продуктивність полірування (табл. 2). Енергію перенесення W_0 , яка характеризує енергетичні витрати на видалення із поверхні одиниці маси оброблюваного матеріалу, визначали безпосередньо як відношення енергії частинок шламу, що видаляються із оброблюваної поверхні за час контакту частинки полірувального порошку з нею, до їх маси із врахуванням розподілу частинок за площами поверхні [1, 2, 11, 28].

Таблиця 2. Результати визначення продуктивності полірування скла та ситалів

Параметр взаємодії оброблюваної поверхні із полірувальною дисперсною системою	Оброблюваний матеріал			
	K8	СТ-50-1	СО-115М	
Коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с		0,96·10 ⁻³		
Коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м		0,056		
Кут змочування поверхні притиру, град		38,8		
Кут змочування оброблюваної поверхні θ_1 , град	26,5	51,0	21,5	
Товщина проміжку між оброблюваною поверхнею та притиром l , мкм	5,3	3,2	4,0	
Потенціал взаємодії частинки дисперсної фази з оброблюваною поверхнею W , зДж	0,052	0,064	0,046	
Концентрація частинок шламу N , 10 ¹⁴ м ⁻² ·с ⁻¹	0,75	0,94	1,30	
Об'єм частинки шламу V , нм ³	36,5	31,5	59,8	
Коефіцієнт об'ємного зносу η , 10 ⁻¹² м ² /с	3,4	2,4	8,3	
Енергія перенесення W_0 , 10 ¹⁰ Дж/кг	3,1	5,5	2,8	
Продуктивність полірування, 10 ⁻¹³ м ³ /с	розрахункова	6,4	4,6	13,5
	експериментальна	6,2	4,7	14,2
Експериментальне значення продуктивності полірування, мкм/год	0,8	0,6	2,4	
Похибка розрахунку, %	2	3	5	

Аналіз впливу реологічних характеристик полірувальної дисперсної системи на продуктивність полірування оптичного скла і ситалів показав, що при збільшенні товщини проміжку між оброблюваною поверхнею та притиром сумарний об'єм V_s частинок шламу, який визначається як добуток концентрації частинок шламу N на їхній об'єм V , лінійно зменшується у відповідності до рівняння

$$V_s = \alpha_5 l + \beta_5,$$

де $\alpha_5 = -6,4 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$, $\beta_5 = 2,5 \cdot 10^{-11} \text{ м/с}$ – коефіцієнти, що визначені методом найменших квадратів, похибка апроксимації – 2 %, що призводить до зменшення коефіцієнта об'ємного зносу та відповідно продуктивності полірування (див. табл. 2).

Встановлено також, що спостерігається лінійна залежність потенціалу взаємодії частинок дисперсної фази з оброблюваною поверхнею від кута змочування оброблюваної поверхні дисперсною системою, яку можна виразити рівнянням

$$F = \alpha_6 \theta_1 + \beta_6,$$

де $\alpha_6 = 1,7 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/град}$, $\beta_6 = 6,1 \cdot 10^{-24} \text{ Дж}$ – коефіцієнти, що визначені методом найменших квадратів, похибка апроксимації менше 3 %.

Крім того, встановлено, що співвідношення між коефіцієнтами об'ємного зносу і температуропровідності у відповідності до рівняння [1, 2, 11, 28]

$$\frac{\eta}{\chi} = \frac{c_p \cdot T}{W_0} \quad (4)$$

добре узгоджується з результатами експерименту. При поліруванні скла і ситалів в описаних вище умовах при температурі $T = 298\text{ K}$ рівняння (4) підтверджується даними, згідно з якими значення функції $\psi = c_p T \cdot \chi / (\eta \cdot W_0)$ відрізняється від 1 не більше, ніж на 5 %.

Дослідження впливу реологічних характеристик полірувальної дисперсної системи на шорсткість полірованих поверхонь деталей із оптичного скла та ситалів здійснювали також на основі кластерної моделі за допомогою методу комп'ютерного моделювання нанопрофілю оброблюваної поверхні [2, 3, 29–35]. Було розраховано розміри, площу поверхні та об'єми частинок шламу, що видаляються із оброблюваної поверхні (див. табл. 2), а також значення найбільш ймовірного розміру частинок (табл. 3).

Таблиця 3. Результати визначення шорсткості полірованих поверхонь деталей зі скла і ситалів

Параметр	Оброблюваний матеріал		
	K8	СТ-50-1	СО-115М
Найбільш ймовірний розмір частинок шламу a_v , нм	3,1	3,1	4,6
Шорсткість поверхні:			
Ra , нм	6,3±0,1	5,9±0,2	6,8±0,1
Rq , нм	6,8±0,2	6,1±0,2	7,2±0,3
R_{max} , нм	10,9±1,0	10,1±0,9	11,7±0,6

Аналіз наведених даних показав, що при збільшенні товщини проміжку між оброблюваною поверхнею та притиром найбільш ймовірний розмір частинок шламу зменшується по гіперболічному закону у відповідності до рівняння

$$a_v = \alpha_7 l^{-1} + \beta_7,$$

де $\alpha_7 = 1,7 \cdot 10^{-14}\text{ м}^2$, $\beta_7 = -2,0 \cdot 10^{-9}\text{ м}$ – коефіцієнти, визначені методом найменших квадратів, похибка апроксимації не перевищує 5 %, що призводить до зменшення параметрів шорсткості полірованих поверхонь (див. табл. 3).

При експериментальній оцінці шорсткості полірованих поверхонь деталей із оптичного скла і ситалів за допомогою безконтактного інтерференційного 3D профілографу “Micron-alpha” було показано, що результати теоретичних розрахунків з достатнім ступенем точності підтверджуються дослідними даними (відхилення результатів розрахунку параметрів шорсткості від експериментальних даних – 10 %). Наприклад, параметри шорсткості полірованої за даних умов поверхні підкладки з ситалу марки СТ-50-1 усереднені за десятима вимірами склали: $Ra = 6,2\text{ нм}$, $Rq = 8,2\text{ нм}$, $Rz = 0,031\text{ мкм}$, що незначно відрізняються від розрахункових значень. Слід зауважити, що підкладки з ситалу СТ-50-1, які застосовуються в радіоелектронній техніці при виробництві плівкових інтегральних мікросхем, характеризуються підвищеними вимогами за шорсткістю робочої поверхні, що регламентуються за параметром шорсткості $Rz \leq 0,032\text{ мкм}$, які є більш жорсткі у порівнянні з оптичними поверхнями, для яких $Rz \leq 0,05\text{ мкм}$.

ВИСНОВКИ

В результаті аналізу впливу реологічних властивостей дисперсної системи на показники процесу полірування оптичного скла і ситалів встановлено, що коефіцієнти поверхневого натягу і динамічної в'язкості полірувальної дисперсної системи, а також кути змочування нею поверхонь оброблюваної повер-

хні та притиру впливають на товщину проміжку між ними, а відповідно, на ефективність взаємодії частинок дисперсної фази з оброблюваною поверхнею і на процес утворення та видалення із неї частинок шламу, розміри, площа поверхні й об'єми яких суттєво впливають як на продуктивність зняття оброблюваного матеріалу, так і на параметри шорсткості оброблених поверхонь.

Показано, що потенціал взаємодії частинок дисперсної фази з оброблюваною поверхнею лінійно залежить від кута змочування оброблюваної поверхні дисперсною системою. Енергія перенесення, що характеризує енергетичні витрати на видалення із поверхні одиниці маси оброблюваного матеріалу, безпосередньо пов'язана з коефіцієнтом об'ємного зносу, який фактично визначає швидкість видалення оброблюваного матеріалу, тобто продуктивність полірування.

Підтверджено справедливність співвідношення між коефіцієнтами об'ємного зносу та температуропровідності, яке отримане в рамках кластерної моделі і визначає його в залежності від питомої теплоємності оброблюваного матеріалу, енергії перенесення і температури. При аналізі формування нанорельєфу обробленої поверхні встановлено, що збільшення товщини проміжку між оброблюваною поверхнею та притиром приводить до зменшення найбільш ймовірного розміру частинок шламу і, відповідно, поліпшення шорсткості полірованих 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
Effect of rheological properties of dispersed system
on polishing indicators of optical glass and glassceramics

As a result of studying the patterns of polishing of optical glass and glassceramics, it was found that the surface tension coefficient, the dynamic viscosity coefficient of the polished dispersed system, and the wetting angles of the surfaces of the treated surface and tool affect the thickness of the gap between them, and, accordingly, the removal rate of the processed material and roughness parameters of the treated surfaces. It is shown that the transfer energy is directly related to the coefficient of volumetric wear, which determines the polishing performance, and the relation between the coefficients of volumetric wear and thermal diffusivity depending on the specific heat, transfer energy, and temperature is fair. It was established that an increase in the thickness of the gap between the machined surface and tool results in a decrease in the most probable size of the sludge particles and an improvement in the roughness of polished surfaces.

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. 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. 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.
4. Suratwala T.I. Materials Science and Technology of Optical Fabrication. USA, Hoboken: Wiley, 2018. 416 p.

5. Yao J., Han H., Hou Y., Gong E., Yin W. A method of calculating the interaction energy between particles in minerals flotation. *Mathemat. Probl. Eng.* 2016. Vol. 2016, no. 8430745. 13 p.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Filatov Yu.D. Polishing of aluminosilicate materials with bound-abrasive tools. *J. Superhard Mater.* 2001. Vol. 23, no. 3. P. 32–42.
10. 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.
11. Filatov Yu. D., Vetrov A. G., Sidorko V. I., Filatov O. Yu., Kovalev S. V., Kurilovich V. D., Danil'chenko M. A., Prikhna T. A., Borimskii A. I., Katsai A. M., Poltoratskii V. G. Polishing of optoelectronic components made of monocrystalline silicon carbide. *J. Superhard Mater.* 2015. Vol. 37, no. 1. P. 48–56.
12. 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.
13. Дерягин Б.В., Абрикосова И.И., Лифшиц Е.М. Молекулярное притяжение конденсированных тел. *Успехи физ. 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. 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.
16. 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.
17. Рудяк В.Я. Современное состояние исследований вязкости наножидкостей. *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика.* 2015. Т. 10. вып. 1. С. 5–22.
18. Серебрякова М.А. Теплопроводность и вязкость наножидкостей на основе 10 % раствора воды в этиленгликоле и наночастиц Al₂O₃. Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: Тез. докл. Всерос. школы-конф. с международ. участием. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН. 2014. С. 150–151.
19. Подденежный Е.Н., Бойко А.А., Паховчишин С.В. Реология композиционных кремнеземсодержащих коллоидных систем и моделирование процессов их дестабилизации. *Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого.* 2003. № 3. С. 20–27.
20. Егорова Е.В., Поленов Ю.В. Поверхностные явления и дисперсные системы: Учеб. пособие. Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново. 2008. 84 с.
21. Гродский А.С., Киенская К.И., Гаврилова Н.Н., Назаров В.В. Основные понятия и уравнения коллоидной химии. Москва: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2013. 40 с.
22. Немцева М.П., Филиппов Д.В. Реологические свойства коллоидных систем: Методические указания к лабораторному практикуму по курсам “Поверхностные явления и дисперсные системы” и “Коллоидная химия” / под. ред. М.В. Улитина. ГОУ ВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново, 2006. 32 с.
23. Клындюк А.И. Поверхностные явления и дисперсные системы: Учеб. пособие для студентов химико-технологических специальностей. Минск: БГТУ, 2011. 317 с.
24. Бацанов С.С. Структурная химия. Факты и зависимости. Москва: Диалог-МГУ. 2000. 292 с.
25. 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. *Appl. Sci.* 2019. Vol. 9, no. 2. art. 230.

26. Пузанова Е.Г., Мартюхова Д.А., Сигаев В.Н., Строганова Е.Е., Савинков В.И. Ионно-обменное упрочнение оптических ситаллов литийалюмосиликатной системы. *Успехи в химии и химической технологии*. 2016. Т. XXX, № 7. С. 93–95.
27. Бесоогонов И.И., Скворцова И.Н. Уменьшение шероховатости поверхности ситалловой ложки до наноразмерных значений. *Изв. вузов. Приборостроение*. 2009. Т. 52, № 9. С. 73–76.
28. Filatov Yu.D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 6. P. 427–433.
29. 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.
30. 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.
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 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.
34. Filatov Y.D., Filatov O.Y., Monteil G., Heisel U., Storchak M.G., Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials. *Optical Eng.* 2011. Vol. 50, iss. 6. P. 063401–7.
35. 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 09.09.19

Після доопрацювання 30.09.20

Прийнята до опублікування 05.10.20