

Ю.Д. Філатов, д.т.н., проф.¹,
В.І. Сідорко, д.т.н., доц.¹,
В.А. Ковальов, к.т.н., доц.²,
С.В. Ковальов, к.т.н.¹,

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України¹,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»²*

ПОЛІРУВАННЯ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ЗІ СКЛА ТА СИТАЛІВ

У відповідності до кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу під час полірування продуктивність полірування та 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 та поверхневими явищами в дисперсній системі та залежить від динамічної в'язкості суспензії, коефіцієнту поверхневого натягу, кутів змочування нею поверхонь оброблюваної деталі та притиру. Разом з тим, процеси взаємодії зерен полірувального порошку з оброблюваною поверхнею під час полірування деталей електронної техніки та оптичних систем із оптичного скла, кераміки, ситалів, оптичних та 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.

В'язкість суспензії при різних концентраціях дисперсної фази визначалась за допомогою віскозиметра мод. ВЗ-246, густина – за допомогою «Density Meter DMA 35N», коефіцієнт поверхневого натягу – крапельним методом та за висотою підняття рідини к капілярі, кути змочування дисперсним середовищем поверхонь оброблюваної деталі та притиру – за допомогою мікроскопу «Мир-12».

В результаті вивчення закономірностей полірування оптичних поверхонь встановлено наступне. Залежність густини дисперсної системи від концентрації дисперсної фази є лінійною функцією, що має вигляд $\rho = \rho_0(\alpha_1 k + \beta_1)$ (де $\rho_0 = 1,028$ г/см³ – густина дисперсного середовища; $\alpha_1 = 1,582 \cdot 10^{-3}$, $\beta_1 = 1,017 \approx 1$ – коефіцієнти).

Залежність кінематичної в'язкості дисперсної системи від концентрації дисперсної фази можна апроксимувати лінійною функцією вигляду $\nu = \nu_0(\alpha_2 k + \beta_2)$ (де $\nu_0 = 0,93 \cdot 10^{-6}$ м²/с – коефіцієнт кінематичної в'язкості дисперсного середовища; $\alpha_2 = 0,018$, $\beta_2 = 0,857$ – коефіцієнти). Залежність динамічної в'язкості дисперсної системи $\eta(k) = \nu(k) \cdot \rho(k)$ від концентрації дисперсної фази можна апроксимувати лінійною функцією вигляду $\eta = \eta_0(\alpha_3 k + \beta_3)$ (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).

Залежність динамічної в'язкості дисперсної системи від об'ємної долі 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). Це рівняння значно відхиляється 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 співпадає з $\alpha_4 = 7,28$ (відхилення не перевищує 5%).

Залежність коефіцієнту поверхневого натягу дисперсної системи від концентрації дисперсної фази незначно зменшується у відповідності до залежності $\sigma = \gamma k + \delta$ (де $\gamma = -0,384$ мН/м, $\delta = 59$ мН/м – коефіцієнти). Середнє значення коефіцієнту поверхневого натягу дисперсної системи складає $\sigma_m = 53 \pm 2$ мН/м (відхилення від середньої величини не перевищує 4%).

Величина проміжку l між поверхнями оброблюваної деталі та притиру, в якому знаходиться полірувальна дисперсна система, визначається з врахуванням концентраційних залежностей коефіцієнтів динамічної в'язкості та поверхневого натягу. При збільшенні концентрації дисперсної фази в'язкість дисперсної системи підвищується, що призводить до незначного зменшення величини проміжку між елементарними ділянками контактуючих поверхонь. 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 підвищення 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 60x48x0,6 мм) та ситалу марки СО115М (зразки діаметром 30 мм – 3 шт.) 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 дисперсній системі 21 мас.%. Коефіцієнт динамічної в'язкості – $1,23 \cdot 10^{-3}$ Па·с, коефіцієнт поверхневого натягу – 0,051 Н/м, кут

змочування поверхні притиру – 38,8°, кути змочування оброблюваної поверхні скла марки К8, ситалу СТ-50-1 та ситалу СО115М (град.) – 25,5; 51,0 і 21,5 відповідно.

Аналіз впливу реологічних характеристик полірувальної дисперсної системи на продуктивність полірування оптичного скла та ситалів показав, що при збільшенні товщини проміжку між оброблюваною поверхнею та притиром сумарний об'єм частинок шламу, який визначається як добуток концентрації частинок шламу на їхній об'єм, лінійно зменшується, що призводить до зменшення коефіцієнту об'ємного зносу та відповідно продуктивності полірування (табл. 1).

Таблиця 1. Результати визначення продуктивності полірування та шорсткості оброблених поверхонь деталей зі скла та ситалів

Параметри	Оброблюваний матеріал		
	К8	СТ-50-1	СО-115М
Продуктивність полірування $10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	6,9	7,3	13,3
Експеримент: $10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	6,6	8,0	13,6
мкм/год.	0,8	1,0	2,3
Похибка розрахунку, %	5	8	2
Шорсткість поверхні:			
R_a , нм	$6,7 \pm 0,1$	$6,8 \pm 0,1$	$7,4 \pm 0,2$
R_q , нм	$7,2 \pm 0,1$	$7,2 \pm 0,2$	$7,9 \pm 0,4$
R_{max} , нм	$12,8 \pm 0,4$	$13,6 \pm 0,9$	$13,8 \pm 1,1$

Дослідження впливу реологічних характеристик полірувальної дисперсної системи на шорсткість полірованих поверхонь деталей із оптичного скла та ситалів здійснювалось також на основі кластерної моделі за допомогою методу комп'ютерного моделювання нанопрофілю оброблюваної поверхні.

Аналіз показав, що при збільшенні товщини проміжку між оброблюваною поверхнею та притиром найбільш ймовірний розмір частинок шламу зменшується по гіперболічному закону, що призводить до зменшення параметрів шорсткості полірованих поверхонь (табл. 1).

При експериментальній оцінці шорсткості полірованих поверхонь деталей із оптичного скла та ситалів за допомогою безконтактного інтерференційного 3D профілографу «Micron-alpha» було показано, що результати теоретичних розрахунків з достатнім ступенем точності підтверджуються дослідними даними (середня величина відхилення результатів розрахунку параметрів шорсткості від експериментальних даних менше 10 %). Наприклад, параметри шорсткості полірованої за даних умов поверхні підкладки з ситалу марки СТ-50-1 за даними вимірів склали: $R_a = 6,6 \pm 1,0$ нм, $R_q = 8,8 \pm 1,7$ нм, що відрізняються від розрахункових значень відповідно на 3% та 20%.

Таким чином, в результаті аналізу впливу реологічних властивостей дисперсної системи на показники полірування оптичного скла та ситалів встановлено, що коефіцієнти поверхневого натягу та динамічної в'язкості полірувальної дисперсної системи, а також кути змочування нею поверхонь оброблюваної поверхні та притиру впливають на товщину проміжку між ними, а відповідно на ефективність взаємодії частинок дисперсної фази з оброблюваною поверхнею та процес утворення та видалення із неї частинок шламу, розміри яких суттєво впливають як на продуктивність зняття оброблюваного матеріалу, так і на параметри шорсткості оброблених поверхонь. При аналізі нанорельєфу обробленої поверхні встановлено, що збільшення товщини проміжку між оброблюваною поверхнею та притиром приводить до зменшення розміру частинок шламу та поліпшення шорсткості полірованих поверхонь.