

Полірування прецизійних деталей з полімерних оптичних матеріалів

Ю.Д. Філатов¹, В.І. Сідорко¹, С.В. Ковальов¹, В.А. Ковальов², О.Я. Юрчишин²

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

2 – КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

***Анотація:** Проведені дослідження стосуються вивчення закономірностей впливу фізико-хімічних властивостей обробленого матеріалу та полірувальної дисперсної системи на продуктивність зняття обробленого матеріалу та шорсткість оброблених поверхонь під час полірування полімерних оптичних матеріалів. Дослідження проводили за спеціальною методикою, параметри шорсткості полірованих поверхонь визначали з використанням елементів комп'ютерного моделювання. У результаті дослідження встановлено, що під час полірування прецизійних деталей із полістиролу та поліметилметакрилату за допомогою дисперсної системи мікро- та наночастинок неабразивних органічних матеріалів знімальна продуктивність обробленого матеріалу та параметри досягається шорсткість оброблених поверхонь, яка відповідає вимогам, що поширюються на оптичні поверхні.*

Ключові слова: полірування, прецизійні деталі, полімерні оптичні матеріали, комп'ютерне моделювання.

Вступ

У відповідності до сучасних уявлень про механізм полірування оптичних поверхонь за допомогою полірувальних дисперсних систем видалення оброблюваного матеріалу відбувається внаслідок міжмолекулярної взаємодії між ними. Продуктивність полірування та шорсткість оброблених поверхонь залежать від реологічних властивостей дисперсної системи, структури оброблюваного матеріалу, діелектричних і спектроскопічних характеристик оброблюваного матеріалу та полірувального порошку [1–4]. Разом з тим, процеси взаємодії полірувального порошку з оброблюваною поверхнею під час полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою полірувальних дисперсних систем з мікро- і нанопорошків неабразивних органічних матеріалів вивчені недостатньо, а механізм перенесення енергії від дисперсної системи до оброблюваної поверхні не з'ясований остаточно. Метою даного дослідження є вивчення закономірностей впливу фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу та полірувальної дисперсної системи на продуктивність зняття оброблюваного матеріалу і шорсткість оброблених поверхонь під час полірування полімерних оптичних матеріалів.

Методика досліджень

Дослідження закономірностей полірування полімерних оптичних деталей діаметром 60 мм здійснювалось на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притира з пінополіуретану діаметром 100 мм за тиску притискання деталі до притира $p_a = 17,7$ кПа, частоти обертання притира 90 об/хв., зміщення 30 мм та довжини штриха 80 мм, середньої температури в зоні контакту оброблюваної деталі та притира $T = 298$ К. Оброблювались полімерні матеріали: полістирол (ПС, густина $1,06$ г/см³, діелектрична проникність 2,5, коефіцієнт теплопровідності $0,15$ Вт/(м·К)), поліметилметакрилат (ПММА, густина $1,18$ г/см³, діелектрична проникність 3,9, коефіцієнт теплопровідності $0,19$ Вт/(м·К)) та поліаллідігліколькарбонат (CR-39, густина $1,32$ г/см³, діелектрична проникність 10,0, коефіцієнт теплопровідності $0,20$ Вт/(м·К)). Полірування здійснювалось за допомогою полірувальної дисперсної системи з мікро- та нанопорошків (густина $3,86$ г/см³, діелектрична проникність 6,05, коефіцієнт теплопровідності $1,0$ Вт/(м·К)) [2]. Частоти власних коливань молекулярних фрагментів частинок полірувального порошку дисперсної системи, визначені за спектрами ІЧ-поглинання за допомогою Фур'є-спектрометра "Nicolet 6700", склали 597, 733, 777, 850, 873, 943, 984, 1085 см⁻¹. Досліджувані полімерні оптичні матеріали характеризувались частотами власних коливань молекулярних фрагментів, які визначались за відповідними ІЧ-спектрами: ПС – 537, 696, 753, 905, 1027 (см⁻¹), ПММА – 481, 750, 840, 960, 1065 (см⁻¹), CR-39 – 495, 621, 792, 839 (см⁻¹). Середні розміри частинок полірувального порошку визначались за зображеннями, отрима-

ними за допомогою растрового електронного мікроскопу Zeiss-EVO50 з системою мікроаналізу AZtec. Зняття оброблюваного матеріалу визначалось ваговим методом за допомогою аналітичних терезів мод. АВД-200. Параметри шорсткості полірованих поверхонь визначали за допомогою методу комп'ютерного моделювання та контролювали за допомогою безконтактного інтерференційного 3D профілографа Micron-alpha.

Результати досліджень

В результаті досліджень показано, що передача енергії від частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи до оброблюваної поверхні відбувається внаслідок ферстерівського резонансного перенесення енергії (FRET) [5, 6], а ефективність FRET, яке відбувається у відкритому резонаторі, що утворений двома паралельними поверхнями оброблюваного матеріалу і притира, розділеними шаром дисперсної системи, залежить від добротності резонатора на відповідних частотах. При цьому продуктивність полірування визначається у відповідності до формули [7]

$$Q = \eta L_t \frac{\tau}{t_c} q \quad (1)$$

де η – коефіцієнт об'ємного зносу; L_t – довжина шляху тертя частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні; $t_c = d/u$ – час контакту частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею, d – розмір частинок полірувального порошку; u – швидкість відносного переміщення деталі та притира, τ – час життя кластерів оброблюваної поверхні у збудженому стані; $q = v_1/(v_2 - v_1)$ – добротність резонатора; v_2, v_1 – частоти коливань молекулярних фрагментів кластерів на поверхні частинок полірувального порошку та на оброблюваній поверхні.

Коефіцієнт об'ємного зносу залежить від розміру $d(i)$ частинок шламу та часу t_c їх контакту з поверхнею притира у відповідності до формули $\eta = \sum_i \frac{d(i)^2}{4\beta(i)t_c}$, в якій величини $\beta(i)$ являють собою розв'язки системи трансцендентних рівнянь [1]

$$\frac{\exp(-\beta(i)^2)}{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\beta(i))} = \frac{1}{N(i) S_i} \sqrt{L_t d S_c} \vartheta \quad (2)$$

де $N(i)$ – концентрація i -х частинок шламу на оброблюваній поверхні; S_i – площа поверхні i -ої частинки шламу; S_c – площа контакту поверхонь деталі і притира; $\vartheta = \frac{\lambda T L_t}{p_a u S_c}$ – безрозмірний параметр, λ – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу.

Встановлено, що зняття оброблюваного матеріалу відбувається внаслідок багатомодового FRET між енергетичними рівнями частинок полірувального порошку і оброблюваного матеріалу, для яких спектральне розділення між ними є мінімальним, і показано, що продуктивність полірування у відповідності до формули (1) лінійно зростає за збільшення добутку результуючої добротності резонатора, яка для багатомодової системи з дискретним спектром власних частот визначається за формулою $q = [\sum (q_i^{-1})]^{-1}$ (де m – кількість мод, q_i – добротність резонатора на частоті i -ої моди), сумарного часу життя $\tau = \sum \tau_i$ збудженого стану кластерів оброблюваної поверхні і сумарного коефіцієнта об'ємного зносу $\eta = \sum \eta_i$, розрахованого за формулою (2). Показано, що параметри нанопрофілю полірованих поверхонь, які залежать від розмірів $d(i)$ частинок шламу, характерних для i -ої моди власних коливань молекулярних фрагментів кластерів оброблюваного матеріалу, та розподілу Пуассона за площами їх поверхні, визначають шорсткість оброблених поверхонь деталей з полімерних оптичних матеріалів [8]. Результати визначення продуктивності зняття оброблюваного матеріалу ш параметрів шорсткості оброблених поверхонь під час полірування полімерних оптичних матеріалів наведено в таблиці.

Висновки

В результаті дослідження механізму взаємодії поверхні деталі з полімерного оптичного матеріалу з полірувальною дисперсною системою під час полірування встановлено, що зняття оброблюваного матеріалу і формування нанопрофілю полірованої поверхні відбуваються внаслідок резонансного перенесення енергії між енергетичними рівнями частинок полірувального порошку і оброблюваного матеріалу в багатомодовому режимі за мінімального спектрального розділення між ними. Показано, що розраховані у відповідності до формули (1) значення продуктивності полірування полімерних оптичних матеріалів, добре узгоджуються з експериментальними даними за відхилення до 5 %, що свідчить про правочинність урахування багатомодового режиму FRET під час утворення частинок шламу і їх видалення з оброблюваної поверхні.

Таблиця

Показники полірування полімерних оптичних матеріалів

| Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою | ПС | ПММА | CR-39 |
|---|-------------|---------------|------------|
| Кількість мод m | 3 | 4 | 1 |
| Добротність резонатора q | 7,9 | 7,6 | 24,7 |
| Час життя збудженого стану τ , нс | 370 | 1000 | 50 |
| Коефіцієнт об'ємного зносу, $10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$ | 6,0 | 8,4 | 1,4 |
| Продуктивність полірування, мкм/год. $10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ | 5,0 37,2 | 19,2 141,2 | 0,5 3,4 |
| Шорсткість обробленої поверхні: | | | |
| Ra , нм | 8,9±0,4 | 12,0±0,8 | 7,3±0,2 |
| Rq , нм | 9,6±0,4 | 12,8±0,9 | 7,7±0,3 |
| $Rmax$, нм | 17,1±1,7 | 20,3±2,2 | 13,0±1,4 |

Показано, що під час полірування прецизійних деталей з полістиролу і поліметил-метакрилату за допомогою дисперсної системи з мікро- і наночастинок неабразивних органічних матеріалів досягаються продуктивність зняття оброблюваного матеріалу і параметри шорсткості оброблених поверхонь, які задовольняють вимогам, що висуваються до оптичних поверхонь.

Список літератури

1. Філатов Ю.Д. Полірування прецизійних поверхонь елементів оптоелектронної техніки зі скла, ситалів та оптичних і напівпровідникових кристалів. Огляд / Ю.Д. Філатов // Надтверді матеріали. 2020, № 1. С. 73–98.
2. Філатов Ю.Д. Вплив реологічних властивостей дисперсної системи на показники полірування оптичного скла та ситалів / Ю.Д. Філатов, В.І. Сідорко, С.В. Ковальов, В.А. Ковальов // Надтверді матеріали. 2021. № 1. С. 83–93.
3. Філатов Ю.Д. Вплив міжмолекулярної взаємодії частинок полірувального порошку з оброблюваним матеріалом на показники полірування оптичних поверхонь / Ю.Д. Філатов, В.І. Сідорко, С.В. Ковальов, В.А. Ковальов // Надтверді матеріали. – 2021. – № 4. – С. 84–92.
4. Філатов Ю.Д. Вплив діелектричних сталей оброблюваного матеріалу, полірувального порошку та дисперсної системи на енергію їх взаємодії під час полірування оптичних поверхонь / Ю.Д. Філатов, В.І. Сідорко, А.Ю. Бояринцев, С.В. Ковальов, В.А. Ковальов // Надтверді матеріали. – 2022. – № 4. – С. 62–72.
5. Філатов Ю.Д. Енергія перенесення під час взаємодії оптичної поверхні з полірувальною дисперсною системою / Ю.Д. Філатов, В.І. Сідорко, А.Ю. Бояринцев, С.В. Ковальов, В.А. Ковальов // Надтверді матеріали, 2022, № 2. С. 58–69.
6. Філатов Ю.Д. Перенесення енергії між оброблюваною оптичною поверхнею та дисперсною системою при поліруванні / Ю.Д. Філатов, В.І. Сідорко, А.Ю. Бояринцев, С.В. Ковальов, В.Г. Кулич, В.А. Ковальов, О.Я. Юрчишин, В.В. Гаращенко // Збірник наукових праць «Інструментальне матеріалознавство». Вып. 24. – Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля, 2021 С. 417–424.
7. Філатов Ю.Д. Нові закономірності полірування поверхонь деталей з неметалевих матеріалів / Ю.Д. Філатов // Надтверді матеріали. – 2023. – № 2. – С. 70–82.
8. Філатов Ю.Д. Шорсткість полірованих поверхонь оптико-електронних елементів із полімерних оптичних матеріалів / Ю.Д. Філатов, В.І. Сідорко, С.В. Сохань, С.В. Ковальов, А.Ю. Бояринцев, В.А. Ковальов, О.Я. Юрчишин // Надтверді матеріали. – 2023. – № 1. – С. 69–80.

Polishing of precision parts from polymer optical materials

Yu. Filatov, V. Sidorko, S. Kovalev, V. Kovalev, O. Yurchishin

Abstract: The conducted research concerns the study of the laws influence of the physicochemical properties the processed material and the polishing dispersion system on the productivity of removing the processed material and the roughness the processed surfaces during the polishing of polymeric optical materials. The research was carried out according to a special methodology, the parameters of the roughness of the polished surfaces were determined using elements of computer modeling. As a result of the study, it was determined that during the polishing precision parts made of polystyrene and polymethyl methacrylate with the help of a dispersed system of micro- and nanoparticles non-abrasive organic materials, the removal performance of the processed material and the parameters the roughness of the treated surfaces are achieved, which meet the requirements extending to the optical surfaces.

Keywords: polishing, precessional parts, polymer optical materials, computer modeling.