

УДК 621.371

Полірування прецизійних деталей оптико-електронної та лазерної техніки

Філатов¹ Ю.Д., Сідорко¹ В.І., Ковальов² В.А., Юрчишин² О.Я.¹ Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ, Україна² КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Анотація. Досліджено механізм взаємодії оптичної поверхні з полірувальною дисперсною системою під час полірування. Встановлено, що перенесення енергії між ними є наслідком диполь-дипольної взаємодії в донорно-акцепторній системі і відбувається за ферстеровським механізмом. Встановлено, що зменшення спектрального розділення між оброблюваним матеріалом і частинками полірувального порошку зумовлює збільшення розмірів частинок шламу і частинок зносу, що призводить до зростання параметрів шорсткості R_a , R_q , R_{max} оптичних поверхонь під час полірування за допомогою полірувальних дисперсних систем. Показано, що продуктивність полірування оптичних поверхонь та інтенсивність зношування частинок полірувального порошку зменшуються при зростанні відповідних енергій перенесення, що підтверджує основні положення кластерної теорії полірування неметалевих матеріалів та правочинність квантово-механічного опису механізму резонансного перенесення енергії між дисперсною системою та оброблюваним матеріалом.

Ключові слова: полірування, оптична поверхня, шорсткість, кластерна теорія

У відповідності до сучасних уявлень про природу 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 і спектроскопічних характеристик оброблюваного матеріалу та полірувального порошку [1–3]. Разом з тим, процеси взаємодії полірувального порошку з оброблюваною поверхнею при поліруванні за допомогою полірувальних дисперсних систем вивчені недостатньо, а механізм перенесення енергії між оброблюваною поверхнею та дисперсною системою не з'ясований остаточно.

Дослідження закономірностей перенесення енергії між поверхнею оброблюваної деталі та дисперсною фазою полірувальної системи здійснювалось при поліруванні плоских поверхонь оптичних деталей на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притиру з пінополіуретану діаметром 100 мм при зусиллі притискання деталі до притиру 50 Н, частоті обертання притиру 90 об/хв., середній температурі в зоні контакту оброблюваної деталі та притиру 298 К. Оброблювались деталі з оптичного скла марки К8, оптичного ситалу СО115М (Zerodur) та пластмасові сцинтилятори з полістиролу ПС [2, 3]. Полірування здійснювалось за допомогою дисперсної системи з мікро- та нано-порошків (ДС) [2] та водяної суспензії FR-Remillox на основі двооксиду церію (ПС) [1]. Підготовка плоских поверхонь оптичних деталей під полірування здійснювалась за допомогою традиційних методів тонкого та надтонкого шліфування. Частоти власних коливань досліджуваних матеріалів визначались за спектрами ІЧ-поглинання за допомогою Фур'є-спектрометра Nicolet 6700. Вони склали для оптичного ситалу СО115М та частинок полірувального порошку дисперсної системи відповідно 750,48, 948,29, 1055,66 (cm^{-1}) та 597, 733, 777, 850, 870, 943, 984, 1085 (cm^{-1}). Частоти власних коливань молекулярних фрагментів оптичного скла марки К8 (cm^{-1}) – 443, 568, 811, 1061, 1165, полістиролу (cm^{-1}) – 537, 694, 753, 905, 1027 та частинок двооксиду церію (cm^{-1}) – 465, 521, 848.

Результати розрахунку енергії частинок шламу ΔE_m і частинок зносу ΔE_p та коефіцієнтів ефективності передачі енергії ψ_m і ψ_p , а також визначення енергій перенесення U_m^* і U_p^* , які характеризують енергетичні витрати, необхідні для видалення частинок шламу з

оброблюваної поверхні та частинок зносу дисперсної фази дисперсної системи, і визначають продуктивність полірування та інтенсивність зношування полірувального порошку [1], наведено в таблиці 1. Показники полірування плоских поверхонь деталей з оптичного скла марки К8 і оптичного ситалу Zerodur та пластмасових сцинтиляторів з полістиролу ПС за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків (ДС) та водяної суспензії двооксиду церію (ПС) наведено в таблиці 2.

В результаті досліджень встановлено, що під час полірування оптичних поверхонь деталей з оптичного скла і ситалу та пластмасових сцинтиляторів з полістиролу за допомогою полірувальних дисперсних систем ДС та ПС енергія частинок шламу ΔE_m та енергія частинок зносу ΔE_p зменшуються при зменшенні розстроювання енергії δE_m та δE_p відповідно. При цьому коефіцієнти ефективності передачі енергії ψ_m від дисперсної фази полірувальної системи до оброблюваної поверхні та ψ_p від оброблюваного матеріалу до частинок полірувального порошку зростають [4]. Це означає, що при зменшенні спектрального розділення між донором і акцептором ефективність резонансного перенесення енергії між ними зростає, а енергія, що витрачається на утворення частинок шламу оброблюваного матеріалу ΔE_m та частинок зносу полірувального порошку ΔE_p , зменшується. При цьому розстроювання енергії змінюється в межах: $\delta E_m = 2,8\text{--}11,9\text{ меВ}$ і $\delta E_p = 2,0\text{--}12,2\text{ меВ}$.

Таблиця 1. Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою при поліруванні оптичних поверхонь

Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою	Оброблюваний матеріал					
	К8	СО-115М	ПС	К8	СО-115М	ПС
	Полірувальна дисперсна система					
	ДС			ПС		
Енергія частинок шламу ΔE_m , еВ	14,1	9,1	9,4	13,6	23,2	45,3
Енергія частинок зносу ΔE_p , еВ	65,5	47,6	101,4	26,0	13,0	5,7
Розстроювання енергії						
δE_m , меВ	4,0	3,0	3,6	2,8	4,0	11,9
δE_p , меВ	9,9	9,9	12,2	5,9	2,8	2,0
Коефіцієнт ефективності передачі енергії ψ_m і ψ_p	0,95 0,90	0,97 0,92	0,96 0,86	0,95 0,92	0,94 0,95	0,89 0,97
Енергія перенесення U_m^* , 10^{10} Дж/кг	3,44	2,13	0,97	3,88	5,43	6,65
U_p^* , 10^{10} Дж/кг	1,80	0,81	1,34	0,06	0,02	0,03

За параметрами шорсткості оцінено величину просторового розділення між оброблюваною поверхнею та частинками полірувального порошку, яка дорівнює середньому арифметичному відхиленню профілю $Ra = 5,6\text{--}8,0\text{ нм}$ (табл. 2). Продуктивність полірування Q оптичних поверхонь та інтенсивність зношування I_t полірувального порошку спадають при підвищенні відповідних енергій перенесення U_m^* і U_p^* , які суттєво залежать від ефективності переносу енергії між оброблюваним матеріалом та полірувальною дисперсною системою [4]. Залежності продуктивності полірування оптичних поверхонь та інтенсивності зношування частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи від відповідних енергій перенесення, які

підтверджують основні положення кластерної теорії полірування неметалевих матеріалів, вивчено на основі результатів квантово-механічного опису механізму резонансного перенесення енергії між дисперсною системою та оброблюваним матеріалом.

Таблиця 2. Показники процесу полірування оптичних поверхонь

Оброблюваний матеріал	К8	СО-115М	ПС	К8	СО-115М	ПС
Дисперсна система	ДС			ПС		
Продуктивність полірування Q , 10^{-13} м ³ /с	6,1	26,4	37,1	102,9	50,8	4,2
Експеримент: 10^{-13} м ³ /с	6,2	27,6	39,3	98,1	47,4	4,0
мкм/год	0,8	4,7	5,0	12,5	8,1	0,5
Інтенсивність зношення полірувального порошку I , 10^{-13} м ³ /с	2,8	4,6	13,3	58,9	430,0	2925,0
Шорсткість:						
Ra , нм	6,6±0,3	8,0±0,4	7,1±0,2	6,4±0,3	5,6±0,3	3,5±0,1
Rq , нм	7,1±0,3	8,6±0,4	7,5±0,2	6,9±0,2	5,9±0,4	3,7±0,2
$Rmax$, нм	12,7±1,0	14,5±0,6	12,5±1,0	11,7±1,2	10,4±1,4	6,5±0,8

Експериментально показано, що результати теоретичного розрахунку продуктивності полірування оптичних матеріалів збігаються з результатами експериментів за відхилення до 7 %.

Висновки. В результаті дослідження механізму взаємодії оптичної поверхні з полірувальною дисперсною системою під час полірування встановлено, що перенесення енергії між ними є наслідком диполь-дипольної взаємодії в донорно-акцепторній системі і відбувається за ферстеровским механізмом. Показано, що за резонансного перенесення енергії від частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи до оброблюваної поверхні та від оброблюваного матеріалу до частинок полірувального порошку утворюються частинки шламу та частинки зносу, енергія яких зменшується при зменшенні спектрального розділення між ними. При цьому ефективність передачі енергії від дисперсної фази полірувальної системи до оброблюваної поверхні та від оброблюваного матеріалу до полірувального порошку зростають, а спектральне розділення характеризується значеннями розстроювання енергії, яке може складати від 2,0 меВ до 12,2 меВ. Встановлено, що зменшення спектрального розділення між оброблюваним матеріалом і частинками полірувального порошку зумовлює збільшення розмірів частинок шламу і частинок зносу, що призводить до зростання параметрів шорсткості Ra , Rq , $Rmax$ оптичних поверхонь під час полірування за допомогою полірувальних дисперсних систем. При цьому величина просторового розділення між оброблюваною поверхнею та частинками полірувального порошку оцінюється, як середнє арифметичне відхилення профілю полірованої поверхні 3,5–8,0 нм. Показано, що продуктивність полірування оптичних поверхонь та інтенсивність зношування частинок полірувального порошку зменшуються при зростанні відповідних енергій перенесення, що підтверджує основні положення кластерної теорії полірування неметалевих матеріалів та правочинність квантово-механічного опису механізму резонансного перенесення енергії між дисперсною системою та оброблюваним матеріалом.

Список літератури

1. Філатов Ю.Д. Полірування прецизійних поверхонь елементів оптоелектронної техніки зі скла, ситалів та оптичних і напівпровідникових кристалів. Огляд / Ю.Д. Філатов // Сверхтв. материалы. – 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 // Сверхтв. материалы. – 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 // Сверхтв. материалы. – 2021. – № 4. – С. 84–92.
4. Jones, G.A., Bradshaw D.S., Resonance Energy Transfer: From Fundamental Theory to Recept Applications. Front. Phys. – 2019. – Vol. 7(100). – P. 1–19.

Polishing of precision parts of optical-electronic and laser equipment

Filatov Yu., Sidorko V., Kovalov V., Yurchyshyn O.

The mechanism of interaction of the optical surface with the polishing dispersed system during polishing is investigated. It is established that the energy transfer between them is a consequence of the dipole-dipole interaction in the donor-acceptor system and occurs by the Ferster mechanism. It was found that the decrease in the spectral separation between the treated material and the particles of polishing powder causes an increase in the size of sludge particles and wear particles, which leads to an increase in the roughness parameters Ra, Rq, Rmax of optical surfaces during polishing by polishing dispersed systems. It is shown that the polishing productivity of optical surfaces and the wear intensity of polishing powder particles decrease with increasing corresponding transfer energies, which confirms the main provisions of the cluster theory of polishing of nonmetallic materials and the validity of quantum mechanical description of resonant energy transfer mechanism between dispersed material and dispersed system.

Keywords: polishing, optical surface, roughness, cluster theory