

УДК 621.623

Ю. Д. Філатов

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

filatov@ism.kiev.ua

Зв'язок коефіцієнтів перенесення з енергією перенесення під час полірування неметалевих матеріалів

В результаті дослідження механізму полірування неметалевих матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікро- та наночастинок узагальнено закон про зміни відношення коефіцієнта об'ємного зносу до коефіцієнта температуропровідності оброблюваного матеріалу чи частинок полірувального порошку в залежності від їх енергії перенесення та питомої теплоємності.

***Ключові слова:** перенесення енергії, коефіцієнти перенесення, полірування.*

Під час полірування поверхні твердого тіла за допомогою дисперсних систем з мікро- та наночастинок полірувальних порошоків видалення оброблюваного матеріалу відбувається в результаті утворення і відриву з неї частинок шламу, які мають кінцеві розміри й масу, а їх потік через границю розділу фаз є явищем перенесення, таким саме як дифузія, теплопровідність, в'язкість й електропровідність. Швидкість видалення оброблюваного матеріалу характеризується коефіцієнтом об'ємного зносу η [1, 2], який визначається в рамках фізико-статистичної моделі утворення та видалення частинок шламу під час полірування [3], і залежить від енергії перенесення U^* , яка характеризує енергію, що витрачається на видалення з поверхні одиниці маси оброблюваного матеріалу, температури T в зоні контакту деталі і притиру, коефіцієнта λ теплопровідності та густини ρ у відповідності до рівняння $\eta = \lambda T / U^* \rho$. Це рівняння поєднує закони збереження маси й енергії для явищ перенесення, зокрема для процесів полірування і теплообміну, та визначає відношення коефіцієнта об'ємного зносу η до коефіцієнта температуропровідності χ оброблюваного матеріалу, яке залежить від питомої теплоємності c_p , енергії перенесення та температури. Його правочинність підтверджена стосовно процесів полірування оптичного скла марки К8 полірувальною суспензією на основі двооксиду церію та алмазного полірування кристалічних матері-

алів нітриду галію, нітриду алюмінію, сапфіру та карбіду кремнію [4, 5] за відхилення розрахункових та дослідних даних менше 6 %. Крім того, для процесу полірування оптичного скла марки К8, ситалів СТ-50-1 і СО-115М, сапфіру і напівпровідникових кристалів антимоніду індію та карбіду кремнію встановлено, що співвідношення між коефіцієнтами об'ємного зносу і температури провідності у відповідності до рівняння [6]

$$\frac{\eta}{\chi} = \frac{c_p}{U^*} T \quad (1)$$

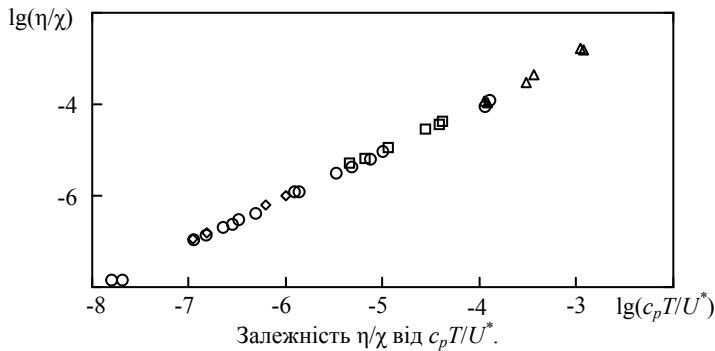
добре узгоджується з результатами експерименту: розраховане значення функції $\Theta = \left(\frac{\eta/\chi}{c_p/U^*} \right) T^{-1}$ складає $0,963 \pm 0,047$, що практично не відрізняється від одиниці [6].

Згідно з останніми дослідженнями механізму взаємодії складових частин гібридних наносистем, зокрема оброблюваної поверхні та частинки дисперсної фази полірувальної дисперсної системи, і видалення оброблюваного матеріалу, і зношення частинок полірувального порошку відбувається внаслідок міжмолекулярної взаємодії між ними, визначається силами Ван-дер-Ваальса, які є наслідком виникнення локальних дипольних моментів на характерних частотах, а обмін енергією між частинками дисперсної фази та оброблюваною поверхнею відбувається як ферстерівське резонансне перенесення енергії (FRET) без проміжного випромінювання фотонів. На відміну від звичайного FRET та “ефекту карнавала”, що полягає в реверсуванні переносу енергії в системах FRET [7–8], під час полірування молекулярні фрагменти частинок дисперсної фази та оброблюваної поверхні є і донорами, і акцепторами одночасно [9]. Енергія перенесення залежить від енергії та розмірів частинок шламу (частинок зносу полірувального порошку), коефіцієнта ефективності передачі енергії, часу життя кластерів оброблюваної поверхні (частинок полірувального порошку) у збудженому стані та кількості їх внутрішньомолекулярних ступенів вільності, які проявляються в спектрах ІЧ поглинання і визначають питому теплоємність. Це означає, що швидкість зняття оброблюваного матеріалу та інтенсивність зношення частинок полірувального порошку підпорядковані загальним закономірностям, а рівняння (1) справедливе стосовно як оброблюваного матеріалу, так і полірувального порошку дисперсної системи.

На рисунку наведено залежність співвідношення коефіцієнтів об'ємного зносу і температуропровідності η/χ від $c_p T/U^*$ для оброблюваних матеріалів: оптичного скла марки К8, ситалів СО-115М і СТ-50-1, оптичних кристалів сапфіру і кварцу, напівпровідникових кристалів карбіду кремнію і антимоніду індію, нітридних кристалів GaN і AlN, оптичних полімерних матеріалів (полістиролу ПС, поліметилметакрилату ПММА і поліалілідігліколькарбонату CR-39), а також для полірувальних порошоків дисперсних систем з мікрота нонопорошків [6] і суспензії двооксиду церію, яка традиційно застосовується для полірування оптичних матеріалів за середньої температури в зоні контакту оброблюваної деталі та притиру $T = 298$ К.

Для 32 комбінацій оброблюваних неметалевих матеріалів, дисперсних систем та полірувальних порошоків, які характеризуються значними змінами енергії перенесення ($U^* \in [10^8 - 10^{13}]$ Дж/кг) і коефіцієнта об'ємного зносу ($\eta \in [10^{-14} - 10^{-9}]$ м²/с), представлена в логарифмічному масштабі залежність η/χ від $c_p T/U^*$ (рисунок) описується рівнянням (1) за відхилення 5 %. Це до-

зволяє стверджувати, що рівняння (1), яке за формою аналогічне відомому закону Відемана-Франца про температурну залежність відношення коефіцієнта теплопровідності до питомої електричної провідності, з достатнім рівнем точності визначає зміни відношення коефіцієнта об'ємного зносу до коефіцієнта температуропровідності оброблюваного матеріалу чи частинок полірувального порошку в залежності від їх енергії перенесення та питомої теплоємності.



Yu. D. Filatov

Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Relationship of transfer coefficients with transfer energy during polishing of non-metallic materials

The study of the mechanism of polishing non-metallic materials using dispersed systems of micro- and nanoparticles generalized the law of changes in the ratio of bulk wear coefficient to the coefficient of thermal diffusivity of the processed material or particles of polishing powder depending on their transfer energy and specific heat.

Keywords: energy transfer, transfer coefficients, polishing.

1. Filatov Y.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.
2. Filatov O.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V., 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.
3. Filatov Yu.D., Sidorko V.I. Statistical approach to wear of nonmetallic workpiece surfaces in polishing. *J. Superhard Mater.* 2005. Vol. 27, no. 1. P. 58–66.
4. Filatov Yu.D. Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing. *Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining, Springer Tracts in Mechanical Engineering* / eds. J. Zhang, B. Guo, J. Zhang. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. P. 129–165.
5. Filatov Yu.D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 6. P. 427–433.
6. 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.
7. Dovzhenko D., Lednev M., Mochalov K., Vaskan I., Rakovich Yu., Nabiev I. Polariton-assisted manipulation of energy relaxation pathways: donor–acceptor role reversal in a tuneable microcavity. *Chem. Sci.* 2021. Vol. 12. P. 12794–12805.

8. Nabiev I., Strong light-matter coupling for optical switching through the fluorescence and FRET control. *PhysBioSymp 2019. J. Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2058 (012001). P. 1–7.
9. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Бояринцев А.Ю., Ковальов С.В., Ковальов В.А. Енергія перенесення під час взаємодії оптичної поверхні з полірувальною дисперсною системою. *Надтверді матеріали*. 2022. № 2. Р. 58–59.

Надійшла до редакції 30.12.21

Після доопрацювання 30.12.21

Прийнята до опублікування 10.01.22