

УДК 621.371

А.Ю. Филатов, канд. техн. наук, Киев, Украина

## **ПОЛИРОВАНИЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ САПФИРА**

*В результаті дослідження закономірностей полірування плоских поверхонь елементів з монокристалічного сапфіру обґрунтовано можливість використання в якості критерію ефективності зняття оброблюваного матеріалу приведеної енергії переносу та показана доцільність застосування водних суспензій полірувальних та колоїдних систем з наночастинок.*

*В результате исследования закономерностей полирования плоских поверхностей элементов из монокристаллического сапфира обоснована возможность использования в качестве критерия эффективности съема обрабатываемого материала приведенной энергии переноса и показана целесообразность применения водных суспензий полировальных порошков и коллоидных систем из наночастиц.*

*As a result of studies of regularities polishing flat surfaces of elements of single crystal sapphire the possibility use as a criterion for the efficiency of removal of the processed material and the reduced energy transfer shows the appropriateness of the use of aqueous suspensions of polishing powders and colloidal systems of nanoparticles.*

### **Введение**

В процессе алмазно-абразивной обработки прецизионных поверхностей элементов оптико-электронной техники, в том числе из монокристаллического сапфира, с поверхности удаляется обрабатываемый материал в виде частиц шлама (ЧШ). Размеры частиц шлама, их концентрация в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали, характер взаимодействия с частицами износа инструментального материала и контактирующими поверхностями определяют как производительность съема обрабатываемого материала при полировании, так и состояние обработанных поверхностей [1-4].

Повышение производительности полирования прецизионных поверхностей элементов оптико-электронной техники из монокристаллического сапфира при обязательном удовлетворении требований к качеству обработанных поверхностей можно обеспечить только при использовании новых составов суспензий из полировальных порошков (ПС) и коллоидных систем (КС) из наночастиц, оптимизация характеристик которых является актуальной задачей.

Целью исследования являлось изучение влияния свойств обрабатываемого монокристаллического сапфира и полировальной суспензии или коллоидной системы на производительность полирования и шероховатость обработанных поверхностей.

### **Полирование элементов из монокристаллического сапфира**

Элементарным актом съема материала с обрабатываемой поверхности является образование и удаления из нее частиц шлама, площади поверхности которых, согласно обобщенной кластерной модели износа [5-7], могут принимать определенные дискретные значения  $S_i = S_0(i+1)$  (где  $S_0$  – минимальная площадь поверхности ЧШ, зависящая от структуры обрабатываемого материала). Частицу шлама можно представить в виде параллелепипеда, длину сторон которого определяют по количеству входящих в него молекулярных фрагментов  $\xi = k_1 k_2 k_3$  ( $k_1, k_2, k_3$  – целые числа). Рассматривая кристаллы сапфира с гексагональной структурой (постоянные решетки  $a = 0,4758$  нм,  $c = 1,2991$  нм,  $c/a = 2,73$  [8-10]), можно определить как из отдельных молекулярных фрагментов складываются кластеры, которые, отрываясь от обрабатываемой поверхности, превращаются в частицы шлама. При полировании плоскости  $A \{11\bar{2}0\}$  количество молекулярных фрагментов зависит от межплоскостных расстояний  $\Delta x = a\sqrt{3}$ ,  $\Delta y = a/2$  и  $\Delta z = c/6$ , а минимальная площадь

поверхности частиц определяется как  $S_0 = a\xi \left( \frac{a\sqrt{3}}{k_3} + \frac{c}{\sqrt{3}k_2} + \frac{c}{6k_1} \right)$ .

Плоские поверхности элементов из монокристаллического сапфира (диаметр 25 мм, плотность  $\rho = 3,98$  г/см<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности 30,3 Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость 9,3 [9]) полировали на шлифовально-полировальном станке мод. 2ШП-200М при помощи полировальника из пенополиуретана диаметром 100 мм при частоте вращения 90 об./мин, давлении прижима детали к инструменту 33,4 кПа и температуре в зоне контакта 300 К. Для полирования сапфира использовались специально приготовленные суспензии из алмазных и полировальных порошков (№ 1-3) и коллоидных систем из неабразивных наночастиц (№ 4) и наночастиц кремнезема (№ 5). Значения частот собственных колебаний молекулярных фрагментов сапфира, определенные по спектрам комбинационного рассеяния, составляли (в см<sup>-1</sup>): 573, 642 и 748 [10, 11].

Результаты расчета параметров обобщенной модели образования и удаления частиц шлама и съема обрабатываемого материала, а также экспериментальные данные о производительности съема монокристаллического сапфира приведены в табл.

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что производительность съема монокристаллического сапфира зависит от наиболее вероятного размера частиц шлама, а также объемного  $\eta$  и массового  $\xi_w$  коэффициентов износа. Чем меньше приведенные коэффициенты, тем ниже производительность съема обрабатываемого материала. Основным параметром, который характеризует эффективность полирования, является энергия переноса, которая показывает количество

затраченной механической энергии, переносимой ЧШ единичной массы с обрабатываемой поверхности в контактную зону. Зависимость производительности полирования монокристаллического сапфира от энергии переноса в логарифмическом масштабе линейная:  $\ln Q = -k_1 \ln W + b$  (где  $k_1 = 1,05$ ;  $b = 0,34$  – коэффициенты, определенные методом наименьших квадратов, погрешность аппроксимации – менее 1%). Это означает, что зависимость производительности полирования монокристаллического сапфира от энергии переноса обратно пропорциональная и может быть описана функцией вида  $Q = k_2/\rho W$  ( $k_2 = 1,15$  кВт). В связи с тем, что энергия переноса  $W$  зависит от коэффициента теплопроводности обрабатываемого материала, необходимо воспользоваться приведенной энергией переноса  $W_0 = [\lambda_{K8}/\lambda]W$ , характеризующей участие частиц шлама в передаче тепловой энергии при полировании сапфира по отношению к полированию эталонного материала – оптического стекла марки К8, теплопроводность которого  $\lambda_{K8} = 0,95$  Вт/(м·К).

Таблица

Параметры	Значения для ПС и КС				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Наиболее вероятный размер ЧШ $a_v$ , нм	2,9	2,7	2,5	2,0	2,0
Коэффициент объемного износа, $\eta \cdot 10^{12}$ , м <sup>2</sup> /с	4,0	3,5	1,5	0,8	0,6
Коэффициент массового износа, $\xi_w \cdot 10^8$ , кг/(мс)	1,6	1,4	0,6	0,3	0,2
Энергия переноса $W \cdot 10^{-11}$ , Дж/кг	5,8	6,5	1,5	2,9	3,6
Производительность полирования, м <sup>3</sup> /с: расчет: $Q \cdot 10^{13}$ эксперимент: $Q_e \cdot 10^{13}$	5,4	4,8	2,1	1,1	0,9
	5,6	5,6	2,5	1,1	0,8
Погрешность расчета, %	4	15	20	6	2

На рис. в логарифмическом масштабе показаны значения приведенной энергии переноса, характерные для полирования монокристаллического сапфира с помощью полировальных суспензий № 1-3 и коллоидных систем из наночастиц № 4 и № 5. Здесь же приведены прямая  $lg W_0 = 10$ , соответствует классическому полированию поверхностей деталей из оптического стекла марки К8, и прямая  $lg W_0 = 11$ , соответствующая нанополированию.

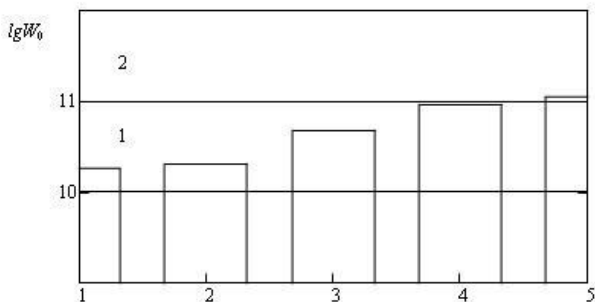


Рисунок – Приведенная энергия переноса при полировании монокристаллического сапфира

Анализ приведенных данных позволяет сделать вывод, что монокристаллический сапфир целесообразно полировать в несколько переходов: сначала с помощью полировальных порошков при максимальной производительности съема обрабатываемого материала, а затем осуществлять нанополирование (или химико-механическое полирование) с помощью коллоидных систем из наночастиц.

### Выводы

В результате теоретических и экспериментальных исследований закономерностей полирования плоских поверхностей оптико-электронных элементов из монокристаллического сапфира, а также использования в качестве критерия эффективности полирования приведенной энергии переноса показана целесообразность полирования в несколько переходов при последовательном применении специально приготовленных водных суспензий из полировальных порошков и коллоидных систем из наночастиц.

**Список использованных источников:** 1. *Filatov O.Yu., Poperenko L.V.*, In situ ellipsometry of surface layer of nonmetallic transparent materials during its finish processing // *Applied Surface Sci.* – 2006. – V. 253. – Is. 1. – P. 163–166. 2. *Yu.D. Filatov, O.Yu. Filatov, U. Heisel et al.* In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method // *Optical Micro- and Nanometrology, Proc. SPIE.* – 2010. – V. 7718. – P. 77181J–9. 3. *Yu.D. Filatov, O.Yu. Filatov, G. Monteil et al.* Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials // *Opt. Eng.* – 2011. – V. 50. – Is. 6. – P. 063401–063401-7. 4. *Филатов А.Ю., Сидорко В.И.* Локализация фрагментов налета на обрабатываемой поверхности при полировании неметаллических материалов // *Сверхтвердые матер.* – 2011. – № 5. – С. 73–87. 5. Полирование оптоэлектронных деталей из сапфира при помощи алмазных микропорошков / *Филатов Ю.Д., Ковалев С.В., Филатов А.Ю. и др.* // *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*: Зб. наук. пр. – Житомир: ЖДТУ, 2012. – Вип. 13. – С. 204–210. 6. *Filatov O.Yu.* Quality of the polished sapphire substrates surfaces // 15<sup>th</sup> International Young Scientists Conference “Optics and High Technology Material Science, SPO 2014”, Kyiv, Ukraine, October 23–26,

2014, Part 1, AP 51. – pp. 113–115. **7.** Філатов О.Ю., Пащенко Є.О. Полірування прецизійних поверхонь підкладок монокристалічного сапфіру різної кристалграфічної орієнтації // Авіакосмічне приладобудування: 36. тез. наук.-техн. конф. – Київ: КП СПБ «Арсенал», 2014. – С. 108–110. **8.** Бахолдин С.И., Маслов В.Н. Моделирование поверхностных энергий кристаллов сапфира // ФТТ. – 2015. – Т. 57. – вып. 6. – С. 1213–1219. **9.** Добровинская Е.Р., Литвинов Л.А., Пищик В.В. Энциклопедия сапфира. – Харьков: Ин-т монокристаллов, 2004. – 508 с. **10.** The effect of anisotropy on the deformation and fracture of sapphire wafers subjected to thermal shocks / T. Vodenitcharova, L.C. Zhang, I. Zarudi et al. // J. of Mater. Proc. Techn. – 2007. – V. 194. – P. 52–62. **11.** Kadleikova M., Breza J., Vesely M. Raman spectra of synthetic sapphire // Microelectronics Journal. – 2001. – N 32. – P. 955–958.

**Bibliography (transliterated):** 1. Filatov O.Yu., Poperenko L.V., In situ ellipsometry of surface layer of nonmetallic transparent materials during its finish processing // Applied Surface Sci. – 2006. – V. 253. – Is. 1. – P. 163–166. 2. Yu.D. Filatov, O.Yu. Filatov, U. Heisel et al. In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method // Optical Micro- and Nanometrology, Proc. SPIE. – 2010. – V. 7718. – P. 77181J–9. 3. Yu.D. Filatov, O.Yu. Filatov, G. Monteil et al. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials // Opt. Eng. – 2011. – V. 50. – Is. 6. – P. 063401–063401–7. 4. Filatov A.Ju., Sidorko V.I. Lokalizacija fragmentov naleta na obrabatyvaemoj poverhnosti pri polirovanii nemetallicheskih materialov // Sverhtverdye mater. – 2011. – № 5. – S. 73–87. 5. Polirovanie optoelektronnyh detalej iz salfira pri pomoshhi almaznyh mikroporoshkov / Filatov Ju.D., Kovalev S.V., Filatov A.Ju. i dr. // Prosesi mehanichnoi obrobki v mashinobuduvanni: Zb. nauk. pr. – Zhitomir: ZhDTU, 2012. – Vip. 13. – S. 204–210. 6. Filatov O.Yu. Quality of the polished sapphire substrates surfaces // 15th International Young Scientists Conference “Optics and High Technology Material Science, SPO 2014”, Kyiv, Ukraine, October 23–26, 2014, Part 1, AP 51. – pp. 113–115. 7. Filatov O.Ju., Pashhenko Є.О. Poliruvannya precizijnih poverhon' pidkladok monokristalichnogo salfiru riznoi kristalografichnoi orijentacii // Aviakosmichne priladobuduvannya: Zb. tez. nauk.-tehn. konf. – Київ: KP SPB «Арсенал», 2014. – С. 108–110. 8. Baholdin S.I., Maslov V.N. Modelirovanie poverhnostnyh jenergij kristallov salfira // FTT. – 2015. – Т. 57. – вып. 6. – С. 1213–1219. 9. Dobrovinskaja E.R., Litvinov L.A., Pishhik V.V. Jenciklopedija salfira. – Har'kov: In-t monokristallov, 2004. – 508 s. 10. The effect of anisotropy on the deformation and fracture of sapphire wafers subjected to thermal shocks / T. Vodenitcharova, L.C. Zhang, I. Zarudi et al. // J. of Mater. Proc. Techn. – 2007. – V. 194. – P. 52–62. 11. Kadleikova M., Breza J., Vesely M. Raman spectra of synthetic sapphire // Microelectronics Journal. – 2001. – N 32. – P. 955–958.

*Поступила в редколлегию 30.07.2015*