

Вивчено кинетичні закономірності та структурні наслідки процесів отвердження епоксидних олігомерів, наповнених порошками міді та інтерметалідів Ni_3Al . Зокрема, розглянуто ступінь впорядкованості полімеру поблизу частинок наповнювача та вплив вільного об'єму і пористості полімерного композиту на його фізико-механічні характеристики. Визначено оптимальні режими отвердження.

Ключові слова: абразивний полімерний композит, пористість, металічний та інтерметалідний наповнювач.

Kinetic dependences and structural effects of epoxyc oligomers solidification, filled with copper and Ni_3Al were studied. Particular, order degree of polymers around filler particles and influence of polymer's free volume and polymeric composite porosity on physical and mechanical features were observed. Optimal solidification modes were defined.

Key words: abrasive polymeric composite, porosity, metallic and intermetallic fillers.

Литература

1. Об изменении распределения элементов свободного объема отвержденных эпоксидных связующих / Лажевская О.В., Черненко А.Н., Савченко Д.А., Царюк Д.В. // Сборник материалов Всероссийской молодежной научной школы «Химия и технология полимерных и композиционных материалов», Москва, 26-28 ноября 2012 г. - С. 192.
2. Межфазное Взаимодействие силоксановых олигомеров с наполнителями в абразивных композитах / А.Н. Черненко, О.В. Лажевская, к.т.н., Е.А. Пащенко, д.т.н, И.И. Нагирна // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції “Композиційні матеріали”, м. Київ, травень 2010 р. – Київ: НТУУ «КПІ», 2010. – С. 124–126.

Поступила 26.06.15 г.

УДК 621.371

Ю. Д. Филатов, В. И. Сидорко, доктора технических наук,
Т. А. Прихна, член-корр. НАН Украины, **А. Ю. Филатов, С. В. Ковалев,**
А. И. Боримский, А. Н. Панова, В. Г. Кулич, кандидаты технических наук,
А. Г. Ветров, Я. Л. Сильченко, М. А. Данильченко

Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

ПОЛИРОВАНИЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ САПФИРОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

В результате исследования закономерностей полирования монокристаллического сапфира обоснована целесообразность последовательного применения водных полировальных суспензий из порошков МАХ-фазы Ti_3AlC_2 и кубического нитрида бора, а также коллоидных систем из наночастиц полировальных порошков.

Ключевые слова: монокристаллический сапфир, энергия переноса, производительность полирования.

Введение

В последнее время в теории алмазно-абразивной обработки прецизионных поверхностей элементов оптико-электронной техники обычно используют модель съема обрабатываемого материала при полировании диэлектриков, основанную на кластерной модели износа взаимодействующих при трении поверхностей твердых тел [1; 2], и физико-статистическую модель

образования и удаления частиц шлама из обрабатываемой поверхности [3]. Площадь поверхности, объем и наиболее вероятный размер частиц шлама, их концентрация в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали, характер взаимодействия с частицами износа и контактирующими поверхностями определяют как производительность съема обрабатываемого материала при полировании, так и состояние обработанных поверхностей [4–7].

Повысить производительность полирования прецизионных поверхностей элементов оптико-электронной техники из монокристаллического сапфира при обязательном удовлетворении требований к качеству обработанных поверхностей можно только путем разработки и использования новых полировальных суспензий (ПС) и коллоидных систем (КС) из наночастиц, оптимизация характеристик которых является актуальной задачей.

Цель настоящего исследования – изучить влияние свойств обрабатываемого монокристаллического сапфира и полировальной суспензии или коллоидной системы на производительность полирования и шероховатость обработанных поверхностей.

Полирование элементов из монокристаллического сапфира

На основе кластерной модели износа [1; 2] процесс съема обрабатываемого материала при полировании сапфира можно рассматривать как накопление энергии в кластере и его переходы в дискретном энергетическом спектре. С учетом многочастотного режима взаимодействия поверхностей обрабатываемой детали и инструмента, когда собственные колебания фрагментов происходят на частотах ω_{01l} и ω_{02k} (l, k – порядковые номера частот, определяемых по ИК-спектрам поглощения), можно определить количество возбужденных фрагментов (элементарных групп Al_2O_3)

$\xi_{lk} = \frac{\omega_{01l}^4}{(\omega_{01l}^2 - \omega_{02k}^2)^2}$, молекулярных фрагментов в кластере $\xi = \left[\sum_{lk} \xi_{lk} \right]$, характерные частоты

$\omega_{lk} = \frac{3\omega_{01l}\omega_{02k}}{2(\omega_{01l} + \omega_{02k})}$ и энергию кластера $E_{cl} = \sum_{lk} [\omega_{01l} \hbar \xi_{lk}]$ (где $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с –

постоянная Планка). Обрабатываемый материал отделяется от поверхности в виде частицы шлама только тогда, когда энергия кластера E_{cl} превысит энергию связи сапфира ($E_b = 6,3$ эВ [8–10]). Распределение частиц шлама сапфира по размерам описывается распределением Пуассона

$P(i, \nu) = \frac{e^{-\nu} \nu^i}{i!}$ с параметром $\nu = E_b/E_{cl}$ [1; 2]. Диэлектрическую проницаемость обрабатываемого

ε_l и инструментального ε_k материалов определяют на характерных частотах ω_{lk} , а константу Лифшица $\hbar\omega_{123}$ рассчитывают в соответствии с формулой

$$\omega_{123} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{[\varepsilon_1(\omega_{lk}) - \varepsilon_3][\varepsilon_2(\omega_{lk}) - \varepsilon_3]}{[\varepsilon_1(\omega_{lk}) + \varepsilon_3][\varepsilon_2(\omega_{lk}) + \varepsilon_3]} d\Omega,$$

где $(\Omega \in [\omega_1; \omega_2])$, ω_1, ω_2 – частота в ИК-спектрах минимальная и максимальная.

Поскольку элементарный акт износа поверхности представляется как переход кластера из связанного состояния в свободное, а результатом переходов между эквидистантно расположенными энергетическими уровнями является образование частиц шлама, площади поверхности частиц могут принимать определенные дискретные значения $S_i = S_0(i+1)$ [1; 3] (где $i = \overline{1, N}$; N – количество выборок; S_0 – минимальная площадь поверхности кластера, зависящая от структуры обрабатываемого материала и количества молекулярных фрагментов ξ). Наиболее вероятное значение площади поверхности частицы шлама определяют, исходя из распределения Пуассона в соответствии с формулой $S = \sum_i S_i P(i, \nu)$, а по размерам частиц $d(i) = [S_i/\pi]^{1/2}$ рассчитывают наиболее вероятный

размер частицы шлама $a_\nu = \sum_i d(i) P(i, \nu)$. Частица шлама может иметь вид 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). Наиболее вероятный объем частицы шлама $V = \sum_i [d(i)]^3 P(i, v)$.

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 $A \{1\bar{1}20\}$ количество молекулярных фрагментов зависит от межплоскостного расстояния $\Delta x = a\sqrt{3}$, $\Delta y = a/2$ и $\Delta z = c/6$; минимальная площадь поверхности частиц – $S_0 = a\xi \left(\frac{a\sqrt{3}}{k_3} + \frac{c}{\sqrt{3}k_2} + \frac{c}{6k_1} \right)$; расстояние между соседними плоскостями $A l_a = a/2 = 0,2379$ нм.

Плоские поверхности заблокированных на блоке диаметром 60 мм трех элементов из сапфира диаметром 25 мм (плотность $\rho = 3,98$ г/см³, коэффициент теплопроводности $\lambda = 30,3$ Вт/(м·К), для плоскости A статическая диэлектрическая проницаемость составляет 9,3 [9]) полировали на шлифовально-полировальном станке мод. 2ПП-200М на полировальнике из пенополиуретана диаметром 100 мм при частоте вращения 90 об./мин, давлении прижима детали к инструменту 33,4 кПа, смещении 25 мм, длине 50 мм и несимметрии 35 мм штриха при температуре в зоне контакта 300 К. Определенные по спектрам комбинационного рассеяния значения частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов Al_2O_3 $\omega_{01} = 10,8 \cdot 10^{13}$ с⁻¹ (573 см⁻¹), $12,1 \cdot 10^{13}$ с⁻¹ (642 см⁻¹) и $14,1 \cdot 10^{13}$ с⁻¹ (748 см⁻¹) [10; 11].

Закономерности полирования монокристаллического сапфира исследовали с использованием специально приготовленных суспензий из порошков МАХ-фазы Ti_3AlC_2 (№ 1), кубического нитрида бора (№ 2), алмазных микропорошков (№ 3) и коллоидных систем из наночастиц полировальных порошков (№ 4 и 5).

Частота собственных колебаний молекулярных фрагментов полировальных порошков ω_{02} составляла: МАХ-фазы Ti_3AlC_2 – 260, 420, 605, 1320 и 1590 см⁻¹ [12], кубического нитрида бора (сBN) – 1056, 1100 и 1304 см⁻¹ [13; 14], алмаза – 1135 и 1332 см⁻¹ [16]. Статическая диэлектрическая проницаемость полировальных порошков составляла: алмаза – 5,7, сBN – 2,5, Ti_3AlC_2 – 3,5 [16; 17].

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 таблице.

Результаты расчета и экспериментальные данные о производительности полирования монокристаллического сапфира с помощью суспензий из алмазных и полировальных порошков

Параметр контактного взаимодействия сапфира с полировальным агентом	Значения для ПС и КС				
	Ti_3AlC_2 (№ 1)	сBN (№ 2)	АСМ (№ 3)	ПС (№ 4)	ПС (№ 5)
Наиболее вероятный размер частиц шлама a_v , нм	2,9	2,7	2,5	2,0	2,0
Коэффициент объемного износа η , м ² /с	$4,0 \cdot 10^{-12}$	$3,5 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$0,8 \cdot 10^{-12}$	$0,6 \cdot 10^{-12}$
Коэффициент массового износа ξ_w , кг/(мс)	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$0,6 \cdot 10^{-8}$	$0,3 \cdot 10^{-8}$	$0,2 \cdot 10^{-8}$
Энергия переноса W , Дж/кг	$5,8 \cdot 10^{11}$	$6,5 \cdot 10^{11}$	$1,5 \cdot 10^{12}$	$2,9 \cdot 10^{12}$	$3,6 \cdot 10^{12}$
Производительность обработки, м ³ /с:					
	расчетная Q	$5,4 \cdot 10^{-13}$	$4,8 \cdot 10^{-13}$	$2,1 \cdot 10^{-13}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$
экспериментальная Q_e	$5,6 \cdot 10^{-13}$	$5,6 \cdot 10^{-13}$	$2,5 \cdot 10^{-13}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$0,8 \cdot 10^{-13}$
Погрешность расчета, %	4	15	20	6	2

Согласно результатам анализа приведенных в таблице данных производительность съема монокристаллического сапфира зависит от наиболее вероятного размера частиц шлама, объемного η и массового ξ_w коэффициентов износа, характеризующих интенсивность съема обрабатываемого материала при всех видах финишной алмазно-абразивной обработки неметаллических материалов [2; 3; 12; 13]. Чем меньше приведенные коэффициенты, тем ниже производительность съема обрабатываемого материала. Основным параметром, который характеризует эффективность полирования, является энергия переноса [3; 13].

Зависимость производительности полирования монокристаллического сапфира от энергии переноса W , показывающей часть механической энергии, которая переносится частицами шлама единичной массы с обрабатываемой поверхности в контактную зону, приведена на рис. 1. Полученная зависимость в логарифмических координатах линейная: $\ln Q = -k_1 \ln W + b$ ($k_1 = 1,05$; $b = 0,34$ – коэффициенты, определенные методом наименьших квадратов, погрешность аппроксимации – менее 1%). Это означает, что зависимость производительности полирования монокристаллического сапфира от энергии переноса можно описать функцией $Q = k_2/\rho W$ ($k_2 = 1,15$ кВт).

Поскольку энергия переноса W зависит от коэффициента теплопроводности обрабатываемого материала, обычно используют приведенную энергию переноса $W_0 = [\lambda_{K8}/\lambda]W$, которая характеризует участие частиц шлама в передаче тепловой энергии при обработке сапфира относительно полирования эталонного материала – оптического стекла марки К8 с $\lambda_{K8} = 0,95$ Вт/(м·К).

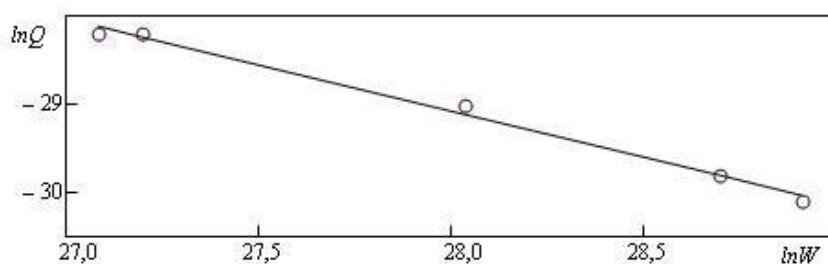


Рис. 1. Зависимость производительности полирования монокристаллического сапфира от энергии переноса (\square – теория; \circ – эксперимент)

На рис. 2 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 (нумерация в соответствии с таблицей). Проанализировав приведенные на диаграмме прямую $\lg W_0 = 10$, соответствующую классическому полированию оптических поверхностей деталей из стекла марки К8, и прямую $\lg W_0 = 11$, соответствующую нанополированию, приходим к выводу, что монокристаллический сапфир целесообразно полировать в несколько переходов: сначала с помощью порошков МАХ-фазы Ti_3AlC_2 или порошков кубического нитрида бора при максимальной производительности съема

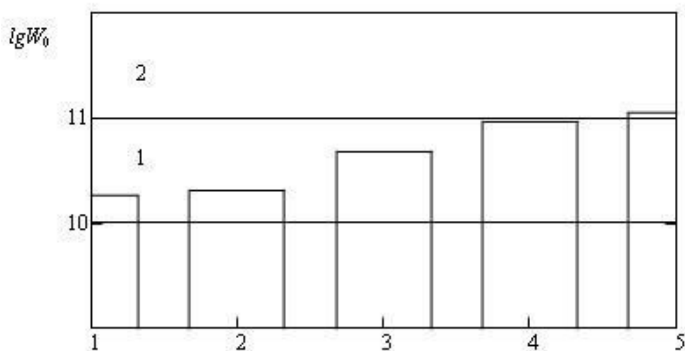


Рис. 2. Приведенная энергия переноса при полировании монокристаллического сапфира

обрабатываемого материала, сняв основной припуск на полирование, а затем осуществить нанополирование с помощью коллоидных систем из наночастиц (№ 4 или 5).

Сравнение результатов расчета производительности полирования плоских поверхностей элементов из монокристаллического сапфира с помощью суспензий из полировальных порошков и

коллоидных систем из наночастиц с экспериментальными данными показало их хорошую сходимость (отклонение расчетных и экспериментальных результатов составляло 2–20 %, см. таблицу), что подтверждает эффективность применения обобщенной модели образования и удаления частиц шлама и съема обрабатываемого материала для полирования.

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 порошков МАХ-фазы Ti_3AlC_2 и кубического нитрида бора для полирования и коллоидных систем из наночастиц для нанополирования.

У результаті дослідження закономірностей полірування монокристалічного сафіру обґрунтовано доцільність послідовного застосування водних полірувальних суспензій з порошків МАХ-фази Ti_3AlC_2 та кубічного нітриду бору, а також колоїдних систем з наночастинок полірувальних порошків.

Ключові слова: монокристалічний сафір, енергія перенесення, продуктивність полірування.

As a result of studies of regularities polishing single-crystal sapphire expedience consistent application of water-shaft polishing slurries of MAX-phase powders Ti_3AlC_2 and cubic boron nitride powders, as well as colloidal systems of nanoparticles polishing powders.

Key words: single crystal sapphire, the energy transfer, efficiency of polishing.

Литература

1. Филатов Ю. Д. Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком / Ю.Д. Филатов // Сверхтвердые матер. – 2001. – № 3. – С. 36–49.
2. Филатов Ю. Д. Полирование прецизионных поверхностей деталей из неметаллических материалов инструментом со связанным полировальным порошком / Ю.Д. Филатов // Сверхтвердые матер. – 2008. – № 1. – С. 59–66.
3. Филатов Ю. Д. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании / Ю.Д. Филатов, В.И. Сидорко // Сверхтвердые матер. – 2005. – № 1. – С. 58–66.
4. Filatov O. Yu. In situ ellipsometry of surface layer of nonmetallic transparent materials during its finish processing / O.Yu. Filatov, L.V. Poperenko // Applied Surface Sci. – 2006. – V. 253. – Is. 1. – P. 163–166.
5. In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method / Yu.D. Filatov, O.Yu. Filatov, U. Heisel et al. // Optical Micro- and Nanometrology III, Proc. of SPIE. – 2010. – V. 7718. – P. 77181J–9.
6. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials / Yu.D. Filatov, O.Yu. Filatov, G. Monteil et al. // Optical Engineering. – 2011. – V. 50. – Is. 6. – P. 063401–063407.
7. Филатов А. Ю. Локализация фрагментов налета на обрабатываемой поверхности при полировании неметаллических материалов / А.Ю. Филатов, В.И. Сидорко // Сверхтвердые матер. – 2011. – № 5. – С. 73–87.
8. Бахолдин С.И. Моделирование поверхностных энергий кристаллов сапфира / С.И. Бахолдин, В.Н. Маслов // ФТТ. – 2015. – Т. 57. – вып. 6. – С. 1213–1219.
9. Добровинская Е.Р. Энциклопедия сапфира / Е.Р. Добровинская, Л.А. Литвинов, В.В. Пищик. – Х.: 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. Raman spectra of synthetic sapphire / M. Kadleikova, J. Breza, M. Vesely // Microelectronics J. – 2001. – N 32. – P. 955–958.
12. Закономерности финишной алмазно-абразивной обработки монокристаллического карбида кремния / Ю.Д. Филатов, А.Г. Ветров, В.И. Сидорко и др. // Сверхтвердые матер. – 2013. – № 5. – С. 63–71.

13. Полирование элементов оптико-электронной техники из монокристаллического карбида кремния / Ю.Д. Филатов, А.Г. Ветров, В.И. Сидорко и др. // Сверхтв. материалы. – 2015. – № 1. – С. 63–71.
14. Файнер Н.И. Тонкие пленки карбонитридов кремния и бора: синтез, исследование состава и структуры / Н.И. Файнер, М.Л. Косинова, Ю.М. Румянцев / Рос. хим. журн. Рос. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева. – 2001. – № 3. – Т. XLV. – С. 101–108.
15. Исследование стойкости к окислению, механических характеристик материалов на основе МАХ-фаз систем Ti–Al–(C, N) и возможности их использования в качестве инструментальных связок и для полирования / Т.А. Прихна, А.В. Старостина, Д. Лицендорф и др. // Сверхтвердые матер. – 2014.– № 1. – С. 14–26.
16. Физические свойства алмаза : справочник / под ред. Н.В. Новикова. – К.: Наук. думка, 1987. – 188 с.
17. Dielectric properties of Ti₂AlC and Ti₂AlN MAX phases: The conductivity anisotropy / N. Haddad, E. Garcia-Caurel, L. Hultman et al. // J. of Appl. Phys. – 2008. – V. 104. – P. 023531–10.

Поступила 25.05.15

УДК 621.941:534.647

Г. Г. Добровольский, д-р техн. наук¹, С. В. Рычев, аспирант²

¹ТОВ «УНВЦНТ», г. Киев, Украина

²Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

ЗАВИСИМОСТЬ ФОРМЫ ПРОТАЧИВАЕМОЙ МЕТАЛЛООПТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ АЛМАЗНОМ МИКРОТОЧЕНИИ

Предложен метод точения оптической поверхности заданного качества при алмазном микроточении по зависимости значений RMS (среднеквадратическое отклонение волнового фронта) от значений составляющих сил резания P_z/P_y . Аналитически и экспериментально исследовано влияние геометрических параметров реза (радиуса округления режущей кромки реза ρ , переднего угла γ , заднего угла α , режимов резания – глубины резания t , подачи на оборот при резании S_o , на составляющие сил резания P_x, P_y, P_z .

Ключевые слова: алмазное микроточение, косоугольное резание, угол косоугольного резания λ , соотношение сил резания P_z/P_y , радиус округления режущей кромки ρ , шероховатость поверхности R_z , точность протачиваемой поверхности (среднеквадратическое отклонение волнового фронта RMS), задний угол резания α , передний угол резания γ , глубина резания t , подача на оборот при резании S_o .

Введение

Алмазное микроточение – современный метод сверхточной обработки, при котором точность формы достигается с помощью алмазного монокристаллического резца, высокоточного станка, технологических методов алмазного микроточения и ЧПУ. Алмазное микроточение реализуется на особо точных станках. Такие станки разрабатывают в ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины [1, 2]. За рубежом подобные станки разрабатывают и изготавливают специалисты фирм, AOS (Apollo Optical System), Nanophorm, (LLNL) (Ливерморская национальная лаборатория [2, 3, 4] и др.

Общий вид станка алмазного микроточения САТ1807, для обработки плоских, сферических и асферических поверхностей диаметром до 600 мм показан на рис.1. Согласно кинематике этого станка создается постоянный контакт по длине режущей кромки с обрабатываемой заготовкой (рис. 2, б). При этом возможны глубина резания $t = 2 - 5$ мкм, подача $S_o = 2 - 10$ мкм/об., радиус лезвия резца в плане 1 – 6 мм; длина контакта режущей кромки с обрабатываемым материалом по передней грани ≈ 80 мкм.