

11. Майстренко А. Л., Кулич В. Г., Ткач В. Н. Закономерности формирования высокоплотной структуры самосвязанного карбида кремния // Сверхтвердые матер. – 2009. – № 1. – С. 18–35.
12. Ивженко В. В. Исследование влияния параметров инъекционного литья термопластичных масс на основе порошков AlN, Si₃N₄, SiC, WC на процесс формования заготовок // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2008. – Вып. 11. – С. 407–411.
13. Исследование упругого последействия при инъекционном литье термопластичных масс на основе порошков SiC, AlN, WC и его влияния на механические свойства материала заготовок изделий / В. В. Ивженко, Н. В. Новиков, Г. Ф. Сарнавская и др. // Сверхтвердые матер. – 2009. – № 1. – С. 49–57.
14. Получение и свойства горячепрессованных материалов на основе карбида кремния с добавками карбидов бора и титана / В. В. Ивженко, О. Н. Кайдаш, Г. Ф. Сарнавская и др. // Сверхтвердые матер. – 2016. – № 5. – С. 25–34.

Поступила 15.05.17

УДК 621.371

Ю. Д. Филатов, В. И. Сидорко, доктора технических наук, **С. В. Ковалев**¹;
В. А. Ковалев, О. Я. Юрчишин², кандидаты технических наук

¹Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

²Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»

ОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТИЦ ШЛАМА И ИЗНОСА ПОЛИРОВАЛЬНОГО ПОРОШКА ПРИ ПОЛИРОВАНИИ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ

В результате исследования закономерностей образования продуктов износа при полировании нитрида алюминия суспензией порошков нитрида бора показано, что общее количество частиц шлама и частиц износа полировального порошка в 10⁵ раз больше, чем зерен полировального порошка, а их общий объем в 10 раз меньше.

Ключевые слова: полирование, нитрид алюминия, частицы шлама, частицы износа полировального порошка.

Введение

Состояние проблемы контактного взаимодействия поверхности обрабатываемой детали с зернами полировального порошка в суспензии при полировании неметаллических материалов характеризуется успешным решением вопросов, связанных с изучением механизмов диспергирования частиц шлама и их распределения по размерам [1–3], исследованием закономерностей формообразования прецизионных поверхностей оптических деталей и элементов электронной техники за счет выбора функционально ориентированных конструкций и характеристик рабочего слоя инструмента со связанным полировальным порошком [3–6], разработкой методов компьютерного моделирования и расчета интенсивности съема обрабатываемого материала и микро- и нанорельефа обработанной

поверхности [7; 8]. Изучено влияние технологических и конструктивных параметров, физико-химических свойств деталей, инструмента и смазывающе-охлаждающей технологической среды на эффективность съема обрабатываемого материала и качество обработки неметаллических материалов при полировании инструментом со связанным полировальным порошком [3; 7–9]. На основе физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама [10], а также результатов исследования динамики их столкновений и рассеяния в зоне контакта обрабатываемой детали и инструмента определены параметры шероховатости поверхности и изучен механизм образования и локализации налета из продуктов износа на рабочей поверхности инструмента [11; 12]. Вместе с тем, процессы взаимодействия частиц шлама и частиц износа полировального порошка в зоне контакта обрабатываемой поверхности с поверхностью притира внутри полировальной суспензии при полировании элементов опико-электронной техники из керамики и полупроводниковых кристаллов изучены недостаточно, а причины возникновения налета частиц шлама и частиц износа зерен полировального порошка на поверхности притира не выяснены окончательно. Только на основании изучения закономерностей взаимодействия частиц шлама и износа полировального порошка внутри полировальной суспензии можно выявить особенности формирования микро- и нанорельефа поверхности обрабатываемой детали и налета на поверхности притира, а значит наметить пути повышения качества обрабатываемых поверхностей.

Цель настоящего исследования – изучить механизм образования частиц шлама и износа полировального порошка при обработке элементов из керамики на основе нитрида алюминия с помощью суспензии порошков нитрида бора КМ 0,5/0.

Закономерности образования частиц шлама и частиц износа в зоне контакта обрабатываемой поверхности и притира

Плоские поверхности элементов из нитрида алюминия общей площадью 26 см², закрепленных на блоке диаметром 60 мм, полировали суспензией порошков КМ 0,5/0 на шлифовально-полировальном станке модели 2ШП-200М при следующих режимных и кинематических параметрах: частоте вращения притира – полировальника из пенополиуретана диаметром 100 мм – 90 об./мин, усилия прижима детали диаметром 60 мм к полировальнику – 50,5 Н, средней температуре в зоне контакта 300 К, смещении штриха 30 мм, длине 50 мм и несимметрии штриха 39 мм, продолжительности цикла полирования 30 мин. На поверхность элемента из AlN (плотность – 3,26 г/см³, энергия связи – 6,2 эВ, коэффициент теплопроводности – 200 Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 8,5, постоянные решетки $a = 0,3112$ нм, $c = 0,4982$ нм, частота собственных колебаний молекулярных фрагментов AlN – 248,6; 611,0; 657,4; 670,8; 890,0 и 912,0 см⁻¹ [13; 14]) воздействовали суспензией зерен полировального порошка cBN (плотность – 2,18 г/см³, статическая диэлектрическая проницаемость – 2,5, частота собственных колебаний молекулярных фрагментов – 1055; 1125 и 1305 см⁻¹ [15]), в результате чего образовались частицы шлама и износа полировального порошка, которые взаимодействовали между собой, а также обрабатываемой поверхностью и находящимися внутри суспензии полировальными зёрнами.

В соответствии с кластерной моделью съема обрабатываемого материала в процессе полирования [7; 16; 17] частицы шлама образуются в результате возбуждения нормальных колебаний молекул в обрабатываемом материале и зёрнах полировального порошка, взаимодействующих вследствие ван-дер-ваальсовых сил (сил Лифшица) [18; 19]. Под влиянием этого возмущения происходят переходы кластера между стационарными состояниями, характеризуемыми эквидистантно расположенными энергетическими уровнями. В ангармоническом приближении в соответствии с квантово-механической

теорией возмущений показано, что вероятность перехода кластера в возбужденное состояние описывается распределением Пуассона.

Количество кластеров n_c , удаляемых с обрабатываемой поверхности при полировании (частиц шлама) определяется как произведение количества всех возбужденных кластеров n_0 на вероятность их перехода в возбужденное состояние $P(i, \nu) = \frac{e^{-\nu} \nu^i}{i!}$ (параметр распределения $\nu = E_b/E_c$, E_b – энергия связи обрабатываемого материала; E_c – энергия кластера; i – номер кластера). Вместе с тем количество возбужденных кластеров зависит от продолжительности t взаимодействия поверхностей. Зависимость $n_0 = n_0(t)$ можно определить при допущении, согласно которому переходы в дискретном спектре уровней кластера происходят при периодическом возмущении. Это действительно так, поскольку внутри суспензии при относительном перемещении зерен полировального порошка и обрабатываемой поверхности на произвольный (условно выделенный) кластер периодически воздействуют отдельные полировальные зерна. Кластер переходит на более высокие уровни энергии до тех пор, пока его энергия не превысит энергию связи обрабатываемого материала. Согласно [20] при возмущении W , периодически действующем в интервале $[0, \tau]$, вероятность переходов в дискретном спектре за время t определяется в соответствии с формулой

$$P = \frac{1}{2} \left| 1 - \cos\left(\frac{2W}{\hbar} t\right) \right|. \quad (1)$$

Частота этих переходов, а следовательно, и количество возбужденных кластеров тем больше, чем сильнее возмущение. Кроме того, в рассматриваемом случае, когда уровни энергии кластера эквидистантны, система будет переходить на все более высокие энергетические уровни, что соответствует раскачке кластера под действием возмущения. Принимая в качестве продолжительности действия возмущения текущую продолжительность полирования и полагая, что за время $t = t_0$ энергетический переход кластера (образование частицы шлама) произойдет с вероятностью, равной 1 (достоверно), из формулы (1) получим $t_0 = \frac{\pi \hbar}{2W}$. Тогда за время полирования t количество всех возбужденных кластеров можно рассчитать по формуле

$$n_0 = \frac{2Wt}{\pi \hbar}. \quad (2)$$

Энергию возмущения кластера W можно определить как энергию взаимодействия (притяжения) сферических частиц полировального порошка и обрабатываемой плоской поверхности в соответствии с приближенной формулой [18; 19; 21]

$$U(x) = \frac{\hbar \bar{\omega}}{8\pi} \left[\frac{d}{2x} + \frac{d}{2(x+d)} + \ln\left(\frac{x}{x+d}\right) \right], \quad (3)$$

где $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; d – диаметр частиц полировального порошка; x – кратчайшее расстояние между частицей и обрабатываемой поверхностью; $\bar{\omega} \approx \int_0^\infty \frac{[\varepsilon_1 - \varepsilon_3][\varepsilon_2 - \varepsilon_3]}{[\varepsilon_1 + \varepsilon_3][\varepsilon_2 + \varepsilon_3]} d\Omega$ – функция диэлектрических проницаемостей [17; 18]; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ –

статические диэлектрические проницаемости соответственно обрабатываемого материала, полировального порошка и суспензии. Среднее значение потенциала взаимодействия частиц

полировального порошка с обрабатываемой поверхностью детали определяется в соответствии с формулой

$$W = \frac{1}{l_0} \int_0^{l_0} U(x) dx, \quad (4)$$

где l_0 – толщина зазора между поверхностями обрабатываемой детали и притира, заполненного полировальной суспензией.

С учетом формул (2) – (4) можно получить выражение для определения концентрации частиц шлама, которые образуются при полировании плоской поверхности с помощью суспензии полировального порошка, на площади контакта S_c обрабатываемой поверхности и притира в единицу времени ($m^{-2}c^{-1}$):

$$n = \frac{n_0 P(i, v)}{S_c t} = \frac{2W}{\pi h S_c} P(i, v). \quad (5)$$

Средний объем частицы шлама можно рассчитать по формуле

$$V_{01} = \frac{M_1 k_a \xi_1}{N_a \rho_1}, \quad (6)$$

где M_1 – молекулярная масса обрабатываемого материала; k_a – число атомов в молекуле; ξ_1 – число молекулярных фрагментов в частице шлама; N_a – число Авогадро; ρ_1 – плотность обрабатываемого материала.

Для определения количества молекулярных фрагментов в кластере согласно кластерной модели принято допущение, что отношение энергий колебаний кластера и одного молекулярного фрагмента (квадратов амплитуд их колебаний) равно отношению их объемов. Учитывая, что амплитуда колебаний кластера пропорциональна $(\omega_{01}^2 - \omega_{02}^2)^{-1}$, а амплитуда колебаний молекулярного фрагмента пропорциональна ω_{01}^{-2} (ω_{01} , ω_{02} – частота собственных колебаний молекулярных фрагментов соответственно в обрабатываемой детали и полировальном порошке), получаем формулу для определения количества молекулярных фрагментов в частице шлама: $\xi_1 = \left(\frac{\omega_{01}^2}{\omega_{01}^2 - \omega_{02}^2} \right)^2$.

Рассматривая полировальную суспензию как дисперсионную систему, состоящую из дисперсной фазы (зерна полировального порошка) и жидкой дисперсионной среды, можно определить количество частиц полировального порошка, находящихся в контактной зоне объемом $S_c l_0$, исходя из массы m_2 и плотности ρ_2 полировального порошка, а также массы m_3 и плотности ρ_3 дисперсионной среды, по формуле

$$n_p = \frac{6m_2 S_c l_0}{\pi d^3 \rho_2} \left(\frac{m_2}{\rho_2} + \frac{m_3}{\rho_3} \right)^{-1}. \quad (7)$$

При этом концентрация полировального порошка в суспензии определяется по формуле $k_p = m_2 / (m_2 + m_3)$ (масс. %).

В процессе полирования зерна полировального порошка изнашиваются, от них отрываются частицы износа. Средний объем частицы износа полировального порошка рассчитывают по формуле

$$V_{02} = \frac{M_2 k_a \xi_2}{N_a \rho_2},$$

где M_2 – молекулярная масса полировального порошка; $\xi_2 = \left(\frac{\omega_{02}^2}{\omega_{01}^2 - \omega_{02}^2} \right)^2$ – количество молекулярных фрагментов в частице износа полировального порошка.

На основе обобщенной модели съема обрабатываемого материала при полировании [7] рассчитали производительность съема обрабатываемого материала по формуле $Q = \eta \cdot L_t$, где $\eta = \sum_{i=1}^m \frac{d(i)^2}{4\beta(i)t_c}$ – коэффициент объемного износа [10], зависящий от размеров $d(i)$ частиц

шлама и продолжительности их контакта с поверхностью зерна полировального порошка t_c ; L_t – длина пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности притира. Значения безразмерной величины $\beta(i)$ определяли путем решения трансцендентных уравнений $\frac{\exp(-\beta(i)^2)}{\sqrt{\text{erf}(\beta(i))}} = \frac{1}{n(i) S_i} \sqrt{L_t d S_c \vartheta}$, где S_i – площадь поверхности i -й частицы шлама; d –

средний размер зерен полировального порошка; $\vartheta = \frac{\lambda T L_t}{p_a u S_c}$ – безразмерный параметр; λ –

коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала; T – температура в контактной зоне; p_a – номинальное давление прижима детали к притиру; u – скорость их относительного перемещения.

Результаты исследования и их обсуждение

Показано, что при полировании элементов из нитрида алюминия с помощью суспензии порошков КМ 0,5/0 образуются частицы шлама, размеры которых составляют дискретный набор: 1,7; 2,4; 2,9; 3,4 и 3,8 нм, их наиболее вероятный размер – 2,3 нм. Концентрация частиц шлама, образующихся на площади контакта обрабатываемой поверхности и притира в единицу времени составляет $1,83 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Среднее значение объема частиц шлама – $2,4 \text{ нм}^3$, количество молекулярных фрагментов AlN в частице шлама $\xi_1 = 57$. Среднее значение объема частиц износа полировального порошка – $2,8 \cdot \text{нм}^3$ (средний размер – 1,8 нм), количество молекулярных фрагментов BN в частице износа $\xi_2 = 74$. Расчетное значение производительности съема обрабатываемого материала $Q = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ совпадает (отклонение 8%) с экспериментально определенным значением $1,1 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ (0,22 мг/мин или 1,54 мкм/ч). При использовании суспензии полировального порошка КМ 0,5/0 (средний размер частиц 0,239 мкм, концентрация $k_p = 14,1$ масс. %) количество полировальных зерен, находящихся в контактной зоне, $n_p = 1,36 \cdot 10^{10}$.

Выводы

Проанализировав механизм образования частиц шлама и износа полировального порошка при полировании нитрида алюминия суспензией порошков нитрида бора в соответствии с кластерной моделью, пришли к выводу, что в результате съема обрабатываемого материала и износа зерен полировального порошка в зоне контакта обрабатываемой детали и притира, где находится приблизительно 10^{10} полировальных зерен общим объемом 10^{-10} м^3 (7% объема контактной зоны), образуется приблизительно 10^{15}

частиц шлама общим объемом $4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3$ (0,3% объема контактной зоны) и 10^{15} частиц износа полировального порошка общим объемом $5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3$ (0,4% объема контактной зоны).

Установлено, что в элементарном объеме полировальной суспензии ($0,5 \times 0,5 \times 0,5 \text{ мкм}^3$) на одно зерно полировального порошка приходится приблизительно 10^5 частиц шлама и частиц износа зерен полировального порошка, что позволяет при изучении механики взаимодействия последних пренебречь наличием зерен полировального порошка.

У результаті дослідження закономірностей утворення продуктів зносу при поліруванні нітриду алюмінію суспензією порошоків нітриду бору показано, що загальна кількість частинок шламу та частинок зносу полірувального порошку в 10^5 разів більша, ніж зерен полірувального порошку, а їх загальний об'єм в 10 разів менший.

Ключові слова: полірування, нітрид алюмінію, частинки шламу, частинки зносу полірувального порошку.

EDUCATION OF SLUDGE PARTICLES AND WEAR PARTICLES POLISHING POWDER IN THE POLISHING PROCESS NITRIDE ALUMINUM

As a result of studying the patterns of formation of nasal products during the polishing of aluminum nitride with a suspension of boron nitride powders, it was shown that the total amount of sludge particles and wear particles of a polishing powder is 10^5 times larger than polishing powder grains, and their total volume is 10 times smaller.

Key words: polishing, nitride aluminum, sludge particles, wear particles of a polishing powder.

Литература

1. Филатов Ю. Д., Бурман Л. Л., Рогов В. В. Закономерности распределения диспергируемых частиц стекла по размерам // Сверхтвердые матер. – 1989. – № 5. – С. 53–55.
2. Филатов Ю. Д. Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла // Сверхтвердые матер. – 1991. – № 5. – С. 61–65.
3. New technology of precision polishing of glass optic / V. V. Rogov, Y. D. Filatov, W. Kottler, V. P. Sobol // Optical Eng. – 2001. – 40. – P. 1641–1645.
4. ITIRM as a tool for qualifying polishing processes / O. W. Fahnle, T. Wons, E. Koch et al. // Appl. Optics. 2002. – 41. – N 19/1. – P. 4036–4038.
5. Филатов Ю. Д., Юрчишин О. Я. Моделирование процесса прецизионного формообразования плоских поверхностей // Вісн. Нац. техн. ун-ту України «Київський політехнічний інститут». Сер. «Машинобудування». – 2010. – № 58. – С. 241–244.
6. Филатов Ю. Д., Ковалев В. А., Юрчишин О. Я. Формообразование плоских оптических поверхностей при полировании // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х., 2016. – Вип. 33(1205). – С. 34–37.
7. Производительность полирования анизотропных монокристаллических материалов для оптоэлектроники / Ю. Д. Филатов, А. Ю. Филатов, В. И. Сидорко и др. // Сверхтвердые матер. – 2016. – № 2. – С. 65–76.
8. Шероховатость полированных поверхностей оптико-электронных элементов из монокристаллических материалов / Ю. Д. Филатов, А. Ю. Филатов, В. И. Сидорко и др. // Сверхтвердые матер. – 2016. – № 3. – С. 63–76.

9. Polishing substrates of single crystal silicon carbide and sapphire for optoelectronics / Y. D. Filatov, O. Yu. Filatov, V. I. Sidorko et al. // *Functional mater.* – 2016. – 23. – N 1. – P. 104–110.
10. Филатов Ю. Д., Сидорко В. И. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // *Сверхтвердые матер.* – 2005. – № 1. – С. 58–66.
11. Филатов А. Ю., Сидорко В. И., Филатов Ю. Д. Особенности формирования макро- и микрорельефа плоских поверхностей деталей из неметаллических материалов при алмазном шлифовании // *Сверхтвердые матер.* – 2007. – № 6. – С. 48–57.
12. Sidorko V., Novikov M., Filatov Yu. Diamond-abrasive finishing non-metallic materials // *Abstracts of Intern. Conf. "Advanced Processing for Novel Functional Materials – APNFM 2008"*. – Dresden, 2008. – P. 103.
13. Properties of the III-nitride semiconductors [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.semiconductors.co.uk/nitrides.htm>.
14. Phonon dispersion and Raman scattering in hexagonal GaN and AlN / V. Yu. Davydov, Yu. E. Kitaev, I. N. Goncharuk et al. // *Phys. Rev.* – 1998. – 58. – N 19. – P. 12899–12907.
15. An investigation of residual stresses in brazed cubic boron nitride abrasive grains by finite element modelling and Raman spectroscopy / Y. Zhua, W. Dinga, J. Xua, C. Yan // *Mater. and Design.* – 2015. – 87. – P. 342–351.
16. Филатов Ю. Д. Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // *Сверхтвердые матер.* – 2001. – № 3. – С. 36–49.
17. Филатов Ю. Д., Рогов В. В. Кластерная модель механизма усталостного износа SiO₂-содержащих материалов при их полировании инструментом со связанным полировальным порошком на основе диоксида церия. Часть 1 // *Сверхтвердые матер.* – 1994. – № 3. – С. 40–43.
18. Кац Е. И. Силы Ван-дер-Ваальса, Казимира и Лифшица в мягкой материи // *Успехи физ. наук.* – 2015. – 185. – № 9. – С. 964–969.
19. Дерягин Б. В., Абрикосова И. И., Лифшиц Е. М. Молекулярное притяжение конденсированных тел // *Успехи физ. наук.* – 2015. – 185. – № 9. – С. 981–1001.
20. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1963. – 703 с.
21. Филатов Ю. Д., Рогов В. В. Особенности процесса полирования стекла инструментом со связанным полировальным порошком // *Оптика и спектроскопия* – 1993. – 74. – Вып. 6. – С. 1229–1235.

Поступила 29.05.17