

Ю. Д. Филатов

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля
НАН Украины, г. Киев, Украина
filatov@ism.kiev.ua

Взаимодействие частиц шлама с частицами износа полировального порошка при полировании оптоэлектронных элементов

В результате анализа взаимодействия частиц шлама и износа полировального порошка показано, что рассеяние частиц происходит на углы $136,8^\circ$ – $173,2^\circ$, а эффективное дифференциальное сечение рассеяния составляет $0,4$ – $1,8$ Тб. Траектории движения частиц представляют собой кольца, расположенные у обрабатываемой поверхности в зоне, толщина которой приблизительно равна среднему радиусу зерна полировального порошка.

Ключевые слова: частица шлама, частица износа полировального порошка, угол рассеяния, сечение рассеяния.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение закономерностей взаимодействия зерен полировального порошка с поверхностью обрабатываемой детали при полировании неметаллических материалов осуществляется при использовании разработанных в последнее время методов компьютерного моделирования и расчета интенсивности съема обрабатываемого материала и нанорельефа обработанной поверхности [1, 2], основанных на кластерной [3] и физико-статистической моделях образования и удаления частиц шлама [4], результатах исследования механизма диспергирования частиц шлама, их распределения по размерам [5, 6], а также динамики их столкновений и рассеяния в контактной зоне [7]. Вместе с тем, процессы взаимодействия частиц шлама (ЧШ) и частиц износа (ЧИ) полировального порошка в зоне контакта обрабатываемой поверхности с поверхностью притира внутри полировальной суспензии при полировании элементов электронной техники и оптических систем из керамических материалов, оптических и полупроводниковых кристаллов изучены недостаточно, а причины возникновения налета частиц шлама и частиц износа зерен полировального порошка на поверхности притира не выяснены.

Целью настоящего исследования являлось изучение закономерностей взаимодействия частиц шлама с частицами износа зерен полировального порошка при обработке оптоэлектронных элементов полировальными порошками в свободном состоянии.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ ШЛАМА И ЧАСТИЦ ИЗНОСА В ЗОНЕ КОНТАКТА ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ПРИТИРА

В соответствии с кластерной моделью съема обрабатываемого материала в процессе полирования [1, 8] образование частиц шлама является результа-

том возбуждения нормальных колебаний молекул в обрабатываемом материале и зернах полировального порошка, взаимодействующих за счет вандер-ваальсовых сил [9, 10]. Под влиянием этого возмущения происходят переходы кластера между стационарными состояниями, характеризующимися эквидистантно расположенными энергетическими уровнями, в результате которых образуется частица шлама. Концентрацию n , $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$, частиц шлама, образующихся на площади контакта S_c обрабатываемой поверхности и притира в единицу времени, определяли по формуле [9–11]

$$n = \frac{\hbar\omega_{123}}{4\pi^2\hbar S_c l_0} P(v) \int_0^{l_0} \left[\frac{d}{2r} + \frac{d}{2(r+d)} + \ln\left(\frac{r}{r+d}\right) \right] dr, \quad (1)$$

где $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; d – диаметр частиц полировального порошка; r – кратчайшее расстояние между частицей и обрабатываемой поверхностью; $\omega_{123} = \int_0^\infty \frac{[\epsilon_1 - \epsilon_3][\epsilon_2 - \epsilon_3]}{[\epsilon_1 + \epsilon_3][\epsilon_2 + \epsilon_3]} d\Omega$ – частотная функция ди-

электрических проницаемостей [8, 9]; $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ – статические диэлектрические проницаемости обрабатываемого материала, полировального порошка и суспензии соответственно; l_0 – толщина зазора между поверхностями обрабатываемой детали и притира; $P(v)$ – распределение Пуассона; v – параметр распределения.

Для определения среднего объема частиц шлама или частиц износа полировального порошка использовали формулу

$$V_{1,2} = \frac{M_{1,2} k_a \xi_{1,2}}{N_A \rho_{1,2}}, \quad (2)$$

где M_1, M_2 – молекулярная масса обрабатываемого материала и полировального порошка соответственно; ρ_1, ρ_2 – плотность обрабатываемого материала и полировального порошка соответственно; k_a – число атомов в молекуле;

N_A – число Авогадро; $\xi_1 = \left(\frac{\omega_{01}^2}{\omega_{01}^2 - \omega_{02}^2} \right)^2$ – число молекулярных фрагментов в

частице шлама; $\xi_2 = \left(\frac{\omega_{02}^2}{\omega_{01}^2 - \omega_{02}^2} \right)^2$ – число молекулярных фрагментов в час-

тице износа полировального порошка; ω_{01}, ω_{02} – частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов в обрабатываемой детали и полировальном порошке соответственно.

Элементы из нитрида алюминия полировали водной суспензией порошков нитрида бора КМ 0,5/0 на шлифовально-полировальном станке мод. 2ШП-200М, частота вращения притира диаметром 100 мм из пенополиуретана была равна 90 об/мин, усилие прижима детали диаметром 60 мм к полировальнику – 50,5 Н, средняя температура в зоне контакта – 300 К, смещение – 30 мм, длина – 50 мм, несимметрия штриха – 39 мм, времени полирования – 30 мин. Элементы 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 [12, 13]) обрабатывали суспензией порошка

cBN (плотность – 2,18 г/см³, статическая диэлектрическая проницаемость – 2,5, частота собственных колебаний молекулярных фрагментов – 1055, 1125 и 1305 см⁻¹ [14]), в результате чего образовывались частицы шлама и частицы износа полировального порошка, которые взаимодействовали между собой, а также с обрабатываемой поверхностью.

Взаимодействие частиц шлама с частицами износа полировального порошка рассмотрим на конкретном примере полирования элементов из нитрида алюминия при помощи суспензии порошков кубического нитрида бора (КМ 0,5/0). В этом случае 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, которые образуются 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 нм³, количество молекулярных фрагментов AlN в частице шлама $\xi_1 = 57$. Среднее значение объема частиц износа полировального порошка – 2,8 нм³ (средний размер – 1,8 нм), количество молекулярных фрагментов BN в частице износа $\xi_2 = 74$. В процессе полирования в зоне контакта обрабатываемой детали и притира (объемом 1,39 мм³) образуются частицы шлама и частицы износа полировального порошка общим объемом $9 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$, т. е. объем всех образовавшихся за это время частиц меньше объема контактной зоны приблизительно в 500 раз. На одну частицу шлама (или частицу износа полировального порошка) приходится объем приблизительно 760 нм³, а среднее расстояние между ними составляет $l \approx 9 \text{ нм}$. Число таких ячеек (число слоев) составляет $l_0/l \approx 60$.

Исходя из этого, можно определить координаты частиц шлама с учетом их размеров: $i - z_i = z_0 + d_i/2$, $j - z_j = z_0 + d_j/2$ (d_i – диаметр i -ой частицы, $z_0 = Ra$ – среднее арифметическое отклонение профиля обрабатываемой поверхности), их концентрацию на площади контакта за время 1 с в соответствии с формулой (1), а также зависимость концентрации частиц шлама от их размеров (рис. 1).

При изучении взаимодействия частиц шлама в контактной зоне на основе известных закономерностей динамики молекулярных столкновений и классической теории рассеяния частиц [15–17] учитывали, что потенциал межмолекулярного взаимодействия частиц шлама, которые образуются в процессе полирования и имеют размеры от 1,7 до 3,8 нанометров, выражается формулой

$$U_{ij}(x) = -\frac{\hbar\omega_{113}}{16\pi l} \cdot \frac{d_i d_j}{d_i + d_j}, \quad (3)$$

где $\omega_{113} = 1,3 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ – функция диэлектрических проницаемостей; l – расстояние между частицами шлама.

Определив прицельное расстояние $b_{ij} = \frac{1}{2}(d_i + d_j)$ и кинетическую энергию частицы $E_i = \frac{1}{2}\rho_1 v_i u^2$ (v_i – объем i -й частицы, $i = \overline{0, k-1}$ – номер части-

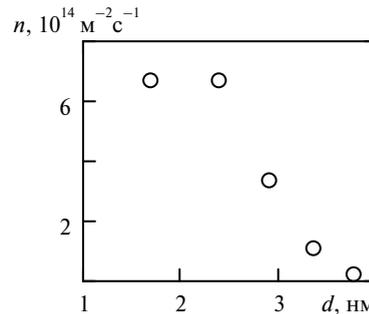


Рис. 1. Зависимость концентрации частиц шлама от их размеров.

цы, $k = 5$ – число выборок в пуассоновском распределении частиц шлама по площадям поверхности, $u = 0,24$ м/с – скорость относительного перемещения детали и притира), для двухчастичных столкновений угол θ_{ij} рассеяния можно выразить по формуле [15, 16, 18]

$$\theta_{ij} = \pi - 2 \int_{R \min}^{l_0} \frac{b_{ij} dx}{x^2 \sqrt{1 - \left(\frac{b_{ij}}{x}\right)^2 - \frac{U_{ij}(x)}{E_i}}}, \quad (4)$$

где $R \min = \frac{1}{2}(d_{i=0} + d_{j=0})$ – расстояние наибольшего сближения частиц.

На рис. 2 приведены зависимости угла рассеяния частиц шлама на частицах шлама от номера i (от их размеров). С учетом распределения частиц шлама по размерам определен диапазон возможных значений угла рассеяния частиц шлама на частицах шлама (см. рис. 2, зона ограниченная прямыми 1 и 2), а также его среднее $\bar{\theta} = 153,8^\circ$, минимальное $\theta_{\min} = 136,8^\circ$ и максимальное $\theta_{\max} = 171,0^\circ$ значения.

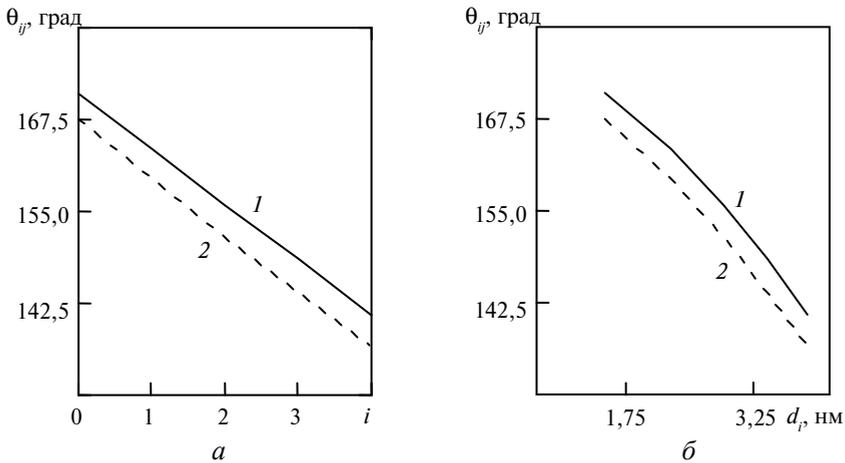


Рис. 2. Зависимости угла рассеяния частиц шлама на частицах шлама θ_{ij} от номера i (а) и размера частиц (б): $j = 0$ (1), 4 (2).

Из этого следует, что при увеличении размера i -х частиц (номера i) угол рассеяния уменьшается, то есть более крупные частицы шлама рассеиваются на меньшие углы. С увеличением размера частиц шлама, на которых происходит рассеивание частиц, угол рассеяния также уменьшается. Кроме того, для произвольных размеров частиц шлама, участвующих в процессе рассеяния, частицы после соударений изменяют направление своего движения на угол не менее $3\pi/4$ рад, разлетаясь практически в противоположные стороны.

Эффективное дифференциальное сечение рассеяния частиц шлама $\sigma_{ij} = \pi(d_i + d_j)^2$ для всех рассматриваемых соударений частиц изменяется от 0,4 до 1,8 Тб (1 барн = 10^{-24} см²). Значение эффективного дифференциального сечения рассеяния частиц шлама увеличивается при увеличении размеров частиц, участвующих в рассеянии (рис. 3).

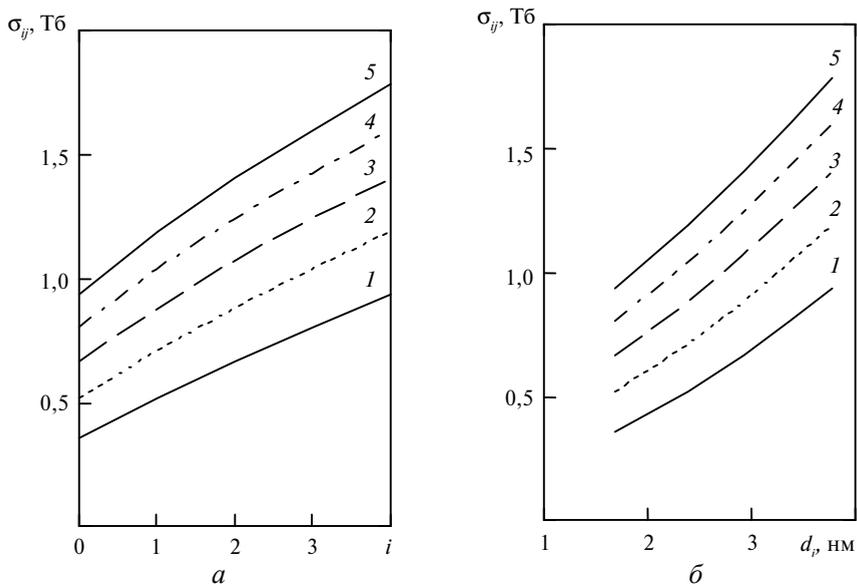


Рис. 3. Зависимости эффективного дифференциального сечения рассеяния частиц шлама σ_{ij} от номера i (а) и размера частиц (б): $j = 0$ (1), 1 (2), 2 (3), 3 (4), 4 (5).

Количество частиц шлама, рассеянных в телесный угол $d\Omega = 2\pi \sin \vartheta d\vartheta$ за единицу времени, определяется в соответствие с формулой [15, 17] $dn = n_i n_j \sigma_{ij} d\Omega$, что позволяет представить зависимость плотности распределение частиц шлама $\frac{dn}{d\Omega}$ от угла рассеяния (рис. 4), из которой следует, чем больше размеры частиц, тем меньше их рассеяние. При этом максимум распределения соответствует рассеянию частиц шлама, средний размер которых составляет 2,4 нм ($i = 1$) на таких же частицах ($j = 1$), $\left(\frac{dn}{d\Omega}\right)_{\max} = 0,33 \cdot 10^{14}$,

$$\left(\frac{dn}{d\theta}\right)_{\max} = 1,0 \cdot 10^{14} \text{ при угле рассеяния } 162,3^\circ.$$

Число частиц шлама, рассеянных в интервале углов $[\theta_{\min}; \theta_{\max}]$ (рис. 5) в плоскости, перпендикулярной обрабатываемой поверхности, тем больше, чем мельче размеры взаимодействующих частиц шлама.

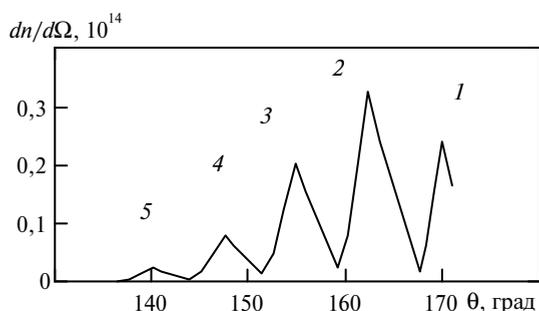


Рис. 4. Угловая зависимость плотности распределения частиц шлама $\frac{dn}{d\Omega}$: $j = 0$ (1), 1 (2), 2 (3), 3 (4), 4 (5).

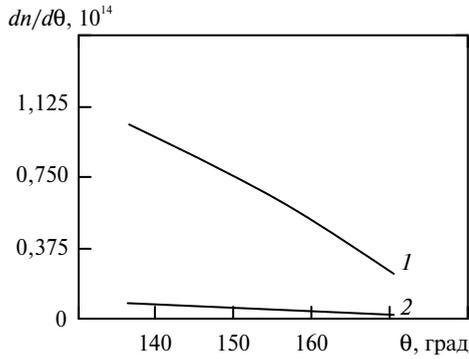


Рис. 5. Плотность распределение частиц шлама $\frac{dn}{d\theta}$ в зависимости от угла рассеяния: $j = 1$ (1) и 4 (2).

Рассмотрим взаимодействие частиц шлама с частицами износа полировального порошка в контактной зоне с учетом, что потенциал их межмолекулярного взаимодействия определяется функцией диэлектрических проницаемостей $\omega_{123} = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$, а частицы износа полировального порошка имеют средний размер $d_2 = 1,8 \text{ нм}$. Определив прицельное расстояние $b_i = \frac{1}{2}(d_i + d_2)$ и расстояние наибольшего сближения частиц шлама с частицами износа как $R \min = \frac{1}{2}(d_{i=0} + d_2)$, можно рассчитать угол $\theta_2(i)$ рассеяния частиц износа, выявив зависимость угла рассеяния частиц износа полировального порошка на частицах шлама от их размеров (рис. 6), а также определить его минимальное ($\theta_{\min} = 143,8^\circ$) и максимальное ($\theta_{\max} = 171,6^\circ$) значения.

При увеличении размера i -х частиц шлама угол рассеяния частиц износа на них уменьшается, то есть частицы износа полировального порошка рассеиваются на более крупных частицах шлама на меньший угол. Эффективное дифференциальное сечение рассеяния частиц износа полировального порошка на частицах шлама $\sigma_i = \pi(d_i + d_2)^2$ изменяется в диапазоне от 0,4 до 1,0 Тб и возрастает при увеличении размеров частиц шлама, участвующих в рассеянии (рис. 7).

Зависимость плотности распределение частиц износа полировального порошка $\frac{dn}{d\Omega}$ от угла их рассеяния на частицах шлама, представленная на

рис. 8, имеет максимум $\left(\frac{dn}{d\Omega}\right)_{\max} = 0,66 \cdot 10^{14}$, $\left(\frac{dn}{d\theta}\right)_{\max} = 1,7 \cdot 10^{14}$ при угле рас-

сеяния $164,7^\circ$, соответствующий частицам шлама, средний размер которых составляет 2,4 нм ($i = 1$), на которых рассеиваются частицы износа на угол $164\text{--}165^\circ$. Число частиц износа полировального порошка, рассеянных на частицах шлама в интервале углов $143,8\text{--}171,6^\circ$ (рис. 9), уменьшается при увеличении размеров частиц шлама.

Рассмотрим взаимодействие частиц износа полировального порошка между собой с учетом, что потенциал их межмолекулярного взаимодействия определяется функцией диэлектрических проницаемостей $\omega_{223} = 1,8 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$, а прицельное расстояние и расстояние их наибольшего сближения равны их среднему размеру $d_2 = 1,8 \text{ нм}$. Угол рассеяния частиц износа полировального

порошка на частицах износа, рассчитанный по формуле, аналогичной (4), составляет $\theta_{22} = 173,2^\circ$. При этом их эффективное дифференциальное сечение рассеяния достигает значения $\sim 0,4$ Тб, плотности распределения частиц шлама $\frac{dn}{d\Omega} = 1,3 \cdot 10^{14}$ и $\frac{dn}{d\theta} = 1,0 \cdot 10^{14}$.

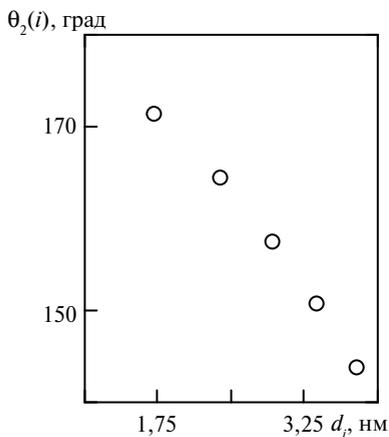


Рис. 6. Зависимость угла рассеяния частиц износа полировального порошка на частицах шлама $\theta_2(i)$ от их размера.

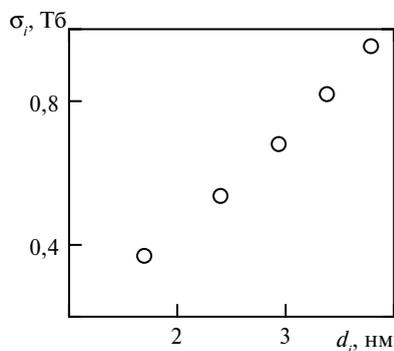


Рис. 7. Зависимость эффективного дифференциального сечения рассеяния частиц шлама на частицах износа полировального порошка σ_i от их размера.

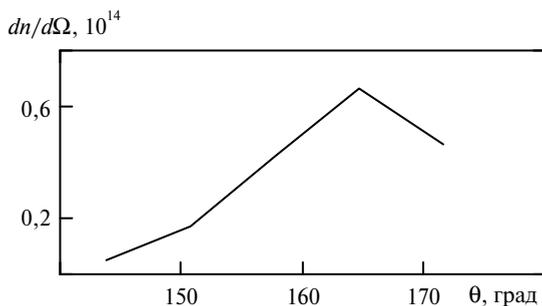


Рис. 8. Зависимость плотности распределения частиц износа полировального порошка $\frac{dn}{d\Omega}$, которые рассеиваются на частицах шлама, от угла рассеяния.

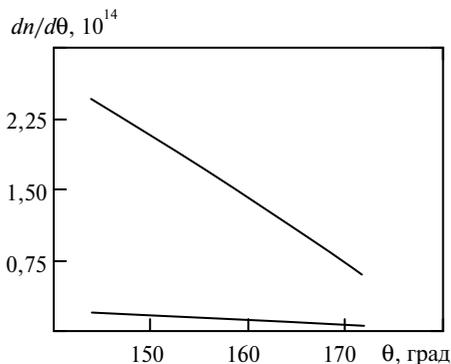


Рис. 9. Плотность распределение частиц шлама $\frac{dn}{d\theta}$ в зависимости от угла их рассеяния на частицах износа полировального порошка.

В результате анализа закономерностей взаимодействия частиц шлама и частиц износа полировального порошка в зоне контакта обрабатываемой детали и притира на основе классической теории рассеяния частиц установлено, что при рассеянии всех частиц, которые образуются в процессе полирования внутри суспензии (частиц шлама на частицах шлама, частиц шлама на частицах износа полировального порошка и частиц износа на частицах износа), угол рассеяния лежит в диапазоне $136,8^\circ - 173,2^\circ$, эффективное дифференциальное сечение рассеяния равно $0,4 - 1,8$ Тб, плотности распределения частиц $\frac{dn}{d\Omega} = (0,3 - 1,3) \cdot 10^{14}$ и $\frac{dn}{d\theta} = (1,0 - 1,7) \cdot 10^{14}$.

ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ШЛАМА И ИЗНОСА ПОЛИРОВАЛЬНОГО ПОРОШКА

Траектории движения частиц рассчитаны в системе координат, связанной с суспензией, заполняющей контактную зону, исходя из допущения, что частицы влетают в неподвижную среду, в которой они равномерно распределены в ячейках объемом l^3 , с постоянной скоростью u . Методом Монте-Карло рассчитывали углы, на которые отклонялась i -я частица шлама при рассеянии на j -ой частице шлама. При помощи генератора чисел в соответствии с распределением Пуассона случайным образом выбирали номер j_m и определяли угол рассеяния. При рассеивании частиц шлама и износа полировального

порошка угол рассеяния $\theta = \begin{cases} \theta_{ij}, & \text{ЧШ + ЧШ} \\ \vartheta_2(i), & \text{Чи + ЧШ} \\ \vartheta_{22}, & \text{ЧИ + ЧИ} \end{cases}$, угол, на который отклони-

лась частица после m столкновений $\Delta_m = \begin{cases} 0, & m = 0 \\ \Delta, & m \geq 1 \end{cases}$ (где $\Delta = (m + 1)\pi - \sum_{m=1}^m \theta$) и

ее координаты в системе XOZ (ось OX совпадает со средней линией профиля обрабатываемой поверхности, $z_0 = Ra$) определялись формулами

$$x = \sum_{m=0}^m l \cos \Delta, \quad (5)$$

$$z = z_0 + \sum_{m=0}^m l \sin \Delta. \quad (6)$$

В результате расчета координат частиц в соответствие с формулами (5)–(6) после $m = 10$ и 100 столкновений установлено следующее. При рассеянии i -х частиц шлама на частицах шлама ($j = \overline{0,4}$) траектории их движения закручиваются (рис. 10, кривые $l-5$) и частицы переходят на орбитальные траектории (рис. 11, кривые $l-5$) [15], радиус которых тем больше, чем меньше размер рассеиваемых частиц (при уменьшении $i = \overline{0,4}$). Эти траектории представляют собой кольца, диаметр которых составляет 100 нм (для $i = 0$), 60 нм (для $i = 1$), 40 нм (для $i = 2$), 30 нм (для $i = 3$), 25 нм (для $i = 4$), а толщина не превышает 10 нм. Эти кольца расположены в непосредственной близости к обрабатываемой поверхности (в окрестности прямой $z = z_0$).

При рассеивании частиц износа полировального порошка друг на друге они двигаются внутри суспензии аналогично самым мелким частицам шлама ($i = 0$) (см. рис. 10, кривая 7), закручиваясь и переходя на орбитальные траектории (см. рис. 11, кривая 7) диаметром более 150 нм.

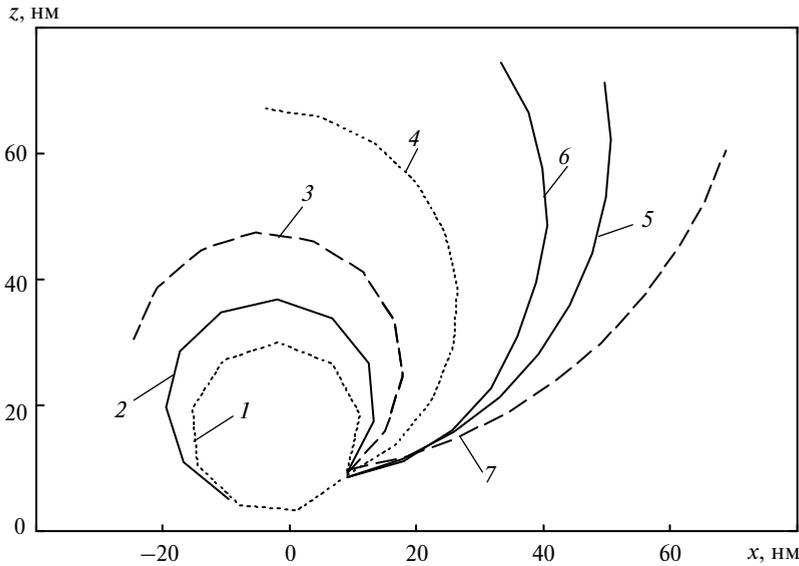


Рис. 10. Траектории движения частиц шлама и частиц износа полировального порошка после $m = 10$ столкновений: 1 – ЧШ ($i = 4$) + ЧШ; 2 – ЧШ ($i = 3$) + ЧШ; 3 – ЧШ ($i = 2$) + ЧШ; 4 – ЧШ ($i = 1$) + ЧШ; 5 – ЧШ ($i = 0$) + ЧШ; 6 – ЧИ + ЧШ ($i = \overline{0,4}$); 7 – ЧИ + ЧИ.

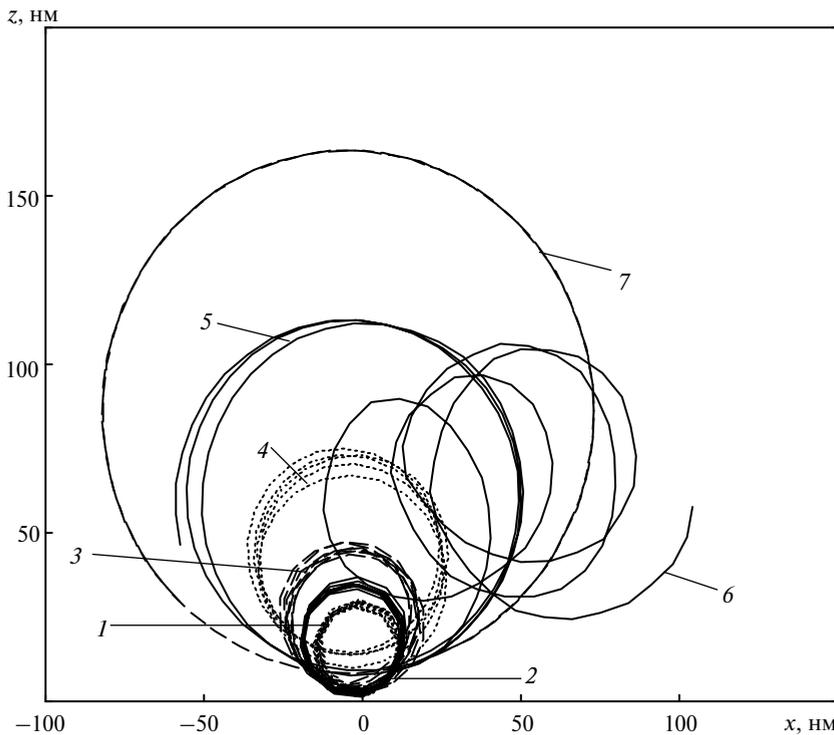


Рис. 11. Траектории движения частиц шлама и частиц износа полировального порошка после $m = 100$ столкновений: 1 – ЧШ ($i = 4$) + ЧШ; 2 – ЧШ ($i = 3$) + ЧШ; 3 – ЧШ ($i = 2$) + ЧШ; 4 – ЧШ ($i = 1$) + ЧШ; 5 – ЧШ ($i = 0$) + ЧШ; 6 – ЧИ + ЧШ ($i = \overline{0,4}$); 7 – ЧИ + ЧИ.

При рассеивании частиц износа полировального порошка на i -х частицах шлама траектория их движения характеризуется кривой б (см. рис. 10), кото-

рая закручивается приблизительно так же, как и траектории движения самых мелких частиц шлама (см. рис. 10, кривая 5) и частиц износа полировального порошка после рассеивания друг на друге (см. рис. 10, кривая 7). Эти частицы не переходят на орбитальные траектории (см. рис. 11, кривая 6), а совершают движение по линиям близким к окружностям, расположенным в зоне толщиной около 100 нм, которая примыкает к обрабатываемой поверхности (прямой $z = z_0$).

ВЫВОДЫ

При полировании оптоэлектронных элементов из нитрида алюминия суспензией порошков нитрида бора внутри суспензии образуются частицы шлама и частицы износа полировального порошка, общий объем которых составляет приблизительно 1/500 часть объема зоны контакта обрабатываемой детали и притира. На одну частицу шлама (или частицу износа полировального порошка) приходится объем приблизительно 760 нм^3 , а среднее расстояние между ними составляет приблизительно 9 нм. Анализ взаимодействия частиц шлама и частиц износа полировального порошка на основе классической теории рассеяния частиц показал, что рассеяние частиц происходит на углы $136,8^\circ$ – $173,2^\circ$, а эффективное дифференциальное сечение рассеяния составляет 0,4–1,8 Тб.

Рассчитанные при помощи метода Монте-Карло траектории движения частиц шлама и износа полировального порошка представляют собой кольца или линии близкие к окружностям, расположенные в непосредственной близости к обрабатываемой поверхности в зоне толщиной приблизительно 150 нм. На основании этого можно сделать вывод, что частицы шлама и износа полировального порошка, которые образовались вблизи обрабатываемой поверхности, «перекатываются» вдоль нее, находясь внутри суспензии в зоне, толщина которой приблизительно равна среднему радиусу зерна полировального порошка, что согласуется с классическими представлениями о процессе полирования неметаллических материалов.

В результаті аналізу взаємодії частинок шламу та зносу полірувального порошку показано, що розсіювання частинок відбувається на кути $136,8^\circ$ – $173,2^\circ$, а ефективний диференційний переріз розсіювання складає 0,4–1,8 Тб. Траєкторії руху частинок являють собою кільця, розташовані поблизу оброблюваної поверхні у зоні, товщина якої приблизно дорівнює середньому радіусу зерна полірувального порошку.

Ключові слова: частинка шламу, частинка зносу полірувального порошку, кут розсіювання, переріз розсіювання.

The analysis of interaction between debris particles and polishing powder wear particles has demonstrated that the scattering of particles occurs through angles of 136.8° to 173.2° , and the effective differential scattering cross-section is 0.4 to 1.8 Tb. The trajectories of particles are rings located near the the workpiece surface within a zone whose thickness approximates the mean grain radius of the polishing powder.

Keywords: debris particles, polishing powder wear particles, scattering angle, scattering cross-section.

1. Филатов Ю. Д., Филатов А. Ю., Сидорко В. И., Ветров А. Г. Производительность полирования анизотропных монокристаллических материалов для оптоэлектроники // Сверхтв. материалы. – 2016. – № 2. – С. 65–76.
2. Филатов Ю. Д., Филатов А. Ю., Сидорко В. И., Ветров А. Г. Шероховатость полированных поверхностей оптико-электронных элементов из монокристаллических материалов // Там же. – 2016. – № 3. – С. 63–76.

3. 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 церита Ч. 1. // Там же. – 1994. – № 3. – С. 40–43.
4. Филатов Ю. Д., Сидорко В. И. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // Там же. – 2005. – № 1. – С. 58–66.
5. Filatov Y. D., Filatov O. Y., Heisel U., Storchak M. G., Monteil G. In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method // Optical Micro- and Nanometrology III, Proc. SPIE. – 2010. – Vol. 7718, P. 77181J–77181J–9.
6. Филатов Ю. Д., Ветров А. Г., Сидорко В. И., Филатов А. Ю., Ковалев С. В., Курилович В. Д., Данильченко М. А., Прихна Т. А., Боримский А. И., Куцай А. М., Полторацкий В. Г. Полирование элементов оптико-электронной техники из монокристаллического карбида кремния // Сверхтв. материалы. – 2015. – № 1. – С. 63–74.
7. Sidorko V., Novikov M., Filatov Yu. Diamond-abrasive finishing non-metallic materials // Conf. Proc. Int. Conf. “Advanced Processing for Novel Functional Materials – APNFM 2008”, Dresden, 23–25 Jan., 2008. – P. 141–143.
8. Филатов А. Ю., Ветров А. Г., Сидорко В. И., Филатов А. Ю., Ковалев С. В. Закономерности финишной алмазно-абразивной обработки монокристаллического карбида кремния // Сверхтв. материалы. – 2013. – № 5. – С. 63–71.
9. Кац Е. И. Силы Ван-дер-Ваальса, Казимира и Лифшица в мягкой материи // Успехи физ. наук. – 2015. – **185**, № 9. – С. 964–969.
10. Дерягин Б. В., Абрикосова И. И., Лифшиц Е. М. Молекулярное притяжение конденсированных тел // Там же. – 2015. – **185**, № 9. – С. 981–1001.
11. 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.
12. *Properties of the III-nitride semiconductors.* – Режим доступа: <http://www.semiconductors.co.uk/nitrides.htm>
13. Davydov V. Yu., Kitaev Yu. E., Goncharuk I. N., Smirnov A. N., Graul J., Semchinova O., Uffmann D., Smirnov M. B., Mirgorodsky A. P., R. Evarestov A. Phonon dispersion and Raman scattering in hexagonal GaN and AlN // Phys. Rev. B. – 1998. – **58**, N 19. – P. 12899–12907.
14. Zhua Y., Dinga W., Xua J., Yan C. An investigation of residual stresses in brazed cubic boron nitride abrasive grains by finite element modelling and Raman spectroscopy // Materials and Design. – 2015. – **87**. – P. 342–351.
15. Эйринг Г., Лин С. Г., Лин С. М. Основы химической кинетики: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 528 с.
16. Филатов Ю. Д., Сидорко В. И., Ковалев С. В., Филатов А. Ю. Динамика столкновений и рассеяния частиц шлама в зоне контакта инструмента и детали при полировании стекла // Вестн. нац. техн. ун-та Украины “Киевский политехнический институт”. Машиностроение. – 2008. – № 52. – С. 201–207.
17. Филатов Ю. Д. Взаимодействие частиц шлама и износа в зоне контакта инструмента и детали при полировании неметаллических материалов // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. НТУ “ХПІ”. – 2009. – Вип. 2 (19). – С. 201–206.
18. Юхновський І. Р. Основи квантової механіки: Навч. посіб. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Либідь, 2002. – 392 с.

Поступила 26.07.17