

Исследование процессов обработки

УДК 621.623

**Ю. Д. Филатов, А. Ю. Филатов, О. О. Сирота,
В. П. Ящук** (г. Киев)
Г. Монтей (г. Безансон, Франция)
У. Хайзель, М. Сторчак (г. Штуттгарт, Германия)

Влияние рассеяния частиц износа инструмента в контактной зоне на формирование микропрофиля обработанной поверхности при полировании кварца

Описано взаимодействие и рассеяние частиц износа в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали в процессе полирования и объяснена осцилляционная структура рассеяния частиц износа инструмента на частицах шлама и на частицах износа. Показано, что дифференциальное сечение рассеяния частиц износа на частицах шлама, равно как и на частицах износа, максимально при рассеянии вперед на центральных участках контактной зоны. Рассчитаны координатная зависимость дифференциального сечения рассеяния частиц износа инструмента и зависимость высоты микропрофиля обработанной поверхности детали от радиуса круговых зон. Показано соответствие экспериментальной и теоретической кривых микронеровностей профиля полированной поверхности детали из кварца.

Ключевые слова: полирование, рассеяние частиц, сечение рассеяния, микропрофиль.

ВВЕДЕНИЕ

Кинетику взаимодействия частиц шлама и частиц износа в зоне контакта инструмента и детали в процессе полирования неметаллических материалов исследовали в [1] на основе физико-статистической модели образования и удаления с поверхности частиц шлама. При компьютерном моделировании было показано, что угол рассеяния частиц шлама в зоне контакта практически не зависит от их зарядового состояния и изменяется в широком диапазоне. Траектории движения частиц шлама и частиц износа инструмента практически не имеют преимущественных направлений, а их анализ не позволяет объяснить известные экспериментальные закономерности формирования налета из продуктов износа на контактирующих поверхностях

© Ю. Д. ФИЛАТОВ, А. Ю. ФИЛАТОВ, О. О. СИРОТА, В. П. ЯЩУК, Г. МОНТЕЙ, У. ХАЙЗЕЛЬ, М. СТОРЧАК,
2010

инструмента и детали и координатную зависимость шероховатости полированной поверхности [2, 3]. Это связано с тем, что нельзя строго определить траекторию движения наноразмерных частиц износа и шлама, возникающих в процессе полирования, поскольку соотношение неопределенности Гайзенберга налагает ограничения на одновременное точное описание векторов координаты и импульса частицы [4, 5].

РАССЕЯНИЕ ЧАСТИЦ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА НА ЧАСТИЦАХ ШЛАМА И ЧАСТИЦАХ ИЗНОСА В КОНТАКТНОЙ ЗОНЕ

В процессе взаимодействия частиц износа и частиц шлама в зоне контакта полировального инструмента и обрабатываемой детали происходит их рассеяние. Полирование плоской поверхности детали диаметром 36 мм из кварца (плотность — $2,65 \cdot 10^3$ кг/м³, коэффициент теплопроводности — 1,38 Вт/(мК)) инструментом аквапол диаметром 60 мм (плотность полировального порошка диоксида церия — $6,7 \cdot 10^3$ кг/м³) осуществляли на шлифовально-полировальном станке [6, 7] при частоте вращения детали $\omega_1 = 3,17$ с⁻¹, давлении прижима детали к инструменту — 1 кПа, температуре смазывающе-охлаждаемой технологической среды (воды) — 300 К. Частицы шлама в соответствии с распределением Пуассона по площадям поверхности ($\nu = 0,87$ — параметр распределения) имеют наиболее вероятный размер $a_\nu = 3,3$ нм [3, 6]. На основе кластерной модели износа и физико-статистической модели образования и удаления частиц износа [3, 8, 9] показано, что при коэффициенте относительного износа инструмента $f = 0,9$ и производительности съема обрабатываемого материала $Q = 1,4 \cdot 10^{-12}$ м³/с за время одного оборота детали в зоне контакта образуется $n_1 = 1,37 \cdot 10^{14}$ частиц шлама со средним объемом $V_1 = 19,1$ нм³ и $n_2 = 1,57 \cdot 10^{14}$ частиц износа инструмента размером $d_2 \approx 3$ нм со средним объемом $V_2 = 15,0$ нм³. При этом в средней области зоны контакта инструмента и детали ($\rho = R_1/2$; ρ — радиус круговой зоны; $R_1 = 18$ мм — радиус детали) на одну частицу износа или шлама приходится объем ~ 350 нм³, равный кубу с длиной ребра 7 нм, приблизительно вдвое большей размеров частиц. Для рассеяния частиц в центрально-симметричном поле $V(r)$ волновая функция, удовлетворяющая уравнению Шредингера в асимптотической области $r \rightarrow \infty$, имеет вид [4, 5]

$$\Phi_k(r) = e^{ikz} + \frac{f(\vartheta)e^{ikr}}{r}, \quad (1)$$

где $k(\rho) = \frac{m u(\rho)}{\hbar}$ — волновое число; m — масса частицы; $u(\rho)$ — скорость частицы; $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка; ϑ — угол рассеяния; $f(\vartheta)$ — амплитуда рассеянной волны.

Функция (1) содержит первое слагаемое, описывающее падающую в направлении оси z плоскую волну, и второе — описывающее удаляющуюся волну, распространяющуюся под углом ϑ к оси z . Дифференциальное сечение рассеяния определяют как квадрат модуля амплитуды рассеянной волны $I(\vartheta) = |f(\vartheta)|^2$, а полное эффективное сечение рассеяния вычисляют интегралом по углу рассеяния $Q = 2\pi \int_0^\pi |f(\vartheta)|^2 \sin \vartheta d\vartheta$ [4, 5].

Решение задачи о рассеянии заряженных частиц износа инструмента в контактной зоне сводится к определению амплитуды рассеяния $f(\vartheta)$ по за-

данным потенциалам их взаимодействия с заряженными частицами шлама и между собой [1, 2]:

$$V_{12}(r, j) = -\frac{\hbar\omega_{123}}{16\pi r} \frac{d_1(j)d_2}{d_1(j) + d_2} + \frac{q_1q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}; \quad (2)$$

$$V_{22}(r) = -\frac{\hbar\omega_{223}d_2}{32\pi r} + \frac{q_2^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}, \quad (3)$$

где $d_1(j)$ — размер j -й частицы шлама [3]; $q_1 = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $q_2 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряды частицы шлама и частицы износа соответственно; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость смазывающе-охлаждающей технологической среды; $\hbar\omega_{123}$ и $\hbar\omega_{223}$ — константы Лифшица, $\omega_{123} = 1,4 \cdot 10^{13}$ с $^{-1}$, $\omega_{223} = 2,0 \cdot 10^{13}$ с $^{-1}$.

Из точной квантово-механической теории упругих столкновений в квазиклассическом случае для амплитуды рассеяния частиц износа справедливо выражение [4]

$$f(\vartheta) = \frac{1}{2ik} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) P_l(\cos \vartheta) e^{2i\delta_l}, \quad (4)$$

где l — азимутальное квантовое число частицы износа, определяющее ее угловой момент; $P_l(\cos \vartheta)$ — полиномы Лежандра; δ_l — фазовый сдвиг волновой функции l -го порядка.

В этом случае амплитуда рассеяния частиц износа определяется в основном членами с большими l , полиномы Лежандра заменяют на их асимптотическое выражение, а угол рассеяния частиц износа на частицах шлама и частицах износа получают из уравнения [4]

$$\int_{r_0}^{\infty} \frac{b_j dr}{r^2 \sqrt{1 - \frac{V(r)}{W_2} - \left(\frac{b_j}{r}\right)^2}} = \frac{\pi \mp \vartheta}{2}, \quad (5)$$

где $b_j = \frac{d_1(j) + d_2}{2}$; $b = d_2$ — прицельное расстояние для рассеяния в поле $V_{12}(r, j)$ или $V_{22}(r)$; W_2 — кинетическая энергия частицы износа. Угол рассеяния в поле притяжения (на частицах шлама) определяется уравнением (5) при знаке плюс и в поле отталкивания (на частицах износа) — при знаке минус. В квазиклассическом приближении абсолютная величина угла рассеяния частиц износа инструмента на частицах шлама и на частицах износа убывает от центральных зон контакта к периферийным.

Фазы волновых функций частиц износа для рассеяния в поле $V_{12}(r, j)$ или $V_{22}(r)$ определяются интегралом [4]

$$\delta_l(\rho, l, j) = - \int_{r_0 = \frac{1}{2}(d_1 + d_2)}^{\infty} \frac{mV_{12}(r, j) dr}{\hbar^2 \sqrt{k(\rho)^2 - \frac{(l+1/2)^2}{r^2}}}; \quad (6)$$

$$\delta_l(\rho, l) = - \int_{r_0 = d_2}^{\infty} \frac{mV_{22}(r) dr}{\hbar^2 \sqrt{k(\rho)^2 - \frac{(l+1/2)^2}{r^2}}}, \quad (7)$$

где r_0 — координата, определяющая классически доступную область движения частицы $r > r_0$.

При $\frac{mV_{12}(r_0, j)r_0}{k(\rho)\hbar^2} \gg 1$ и $l_{\max} \approx k(\rho)r_0$ методом парциальных волн [4, 5]

можно определить полное эффективное сечение σ_1 рассеяния частиц износа инструмента на всех частицах шлама и полное эффективное сечение σ_2 рассеяния частиц износа на частицах износа (рис. 1, а, б):

$$\sigma_1(\rho) = \frac{4\pi}{k(\rho)^2} \sum_{j=0}^N \sum_{l=0}^{l_{\max}} (2l+1) \sin^2 \delta_l(\rho, l, j); \quad (8)$$

$$\sigma_2(\rho) = \frac{4\pi}{k(\rho)^2} \sum_{l=0}^{l_{\max}} (2l+1) \sin^2 \delta_l(\rho, l). \quad (9)$$

Из рис. 1 следует, что полные эффективные сечения рассеяния частиц износа инструмента на частицах шлама σ_1 и на частицах износа σ_2 , характеризующие вероятность рассеяния потока частиц в единицу времени одним центром рассеяния, уменьшаются от центральной части контактной зоны к периферии и осциллируют около функций $\sigma = k_{mn}^2 \rho^{-2}$, где k_{mn} , м^2 — коэффициенты:

$$k_{mn} = \begin{cases} 2,6 \cdot 10^{-11}, & m=2, \quad n=1; \\ 0,8 \cdot 10^{-11}, & m=2, \quad n=2. \end{cases}$$

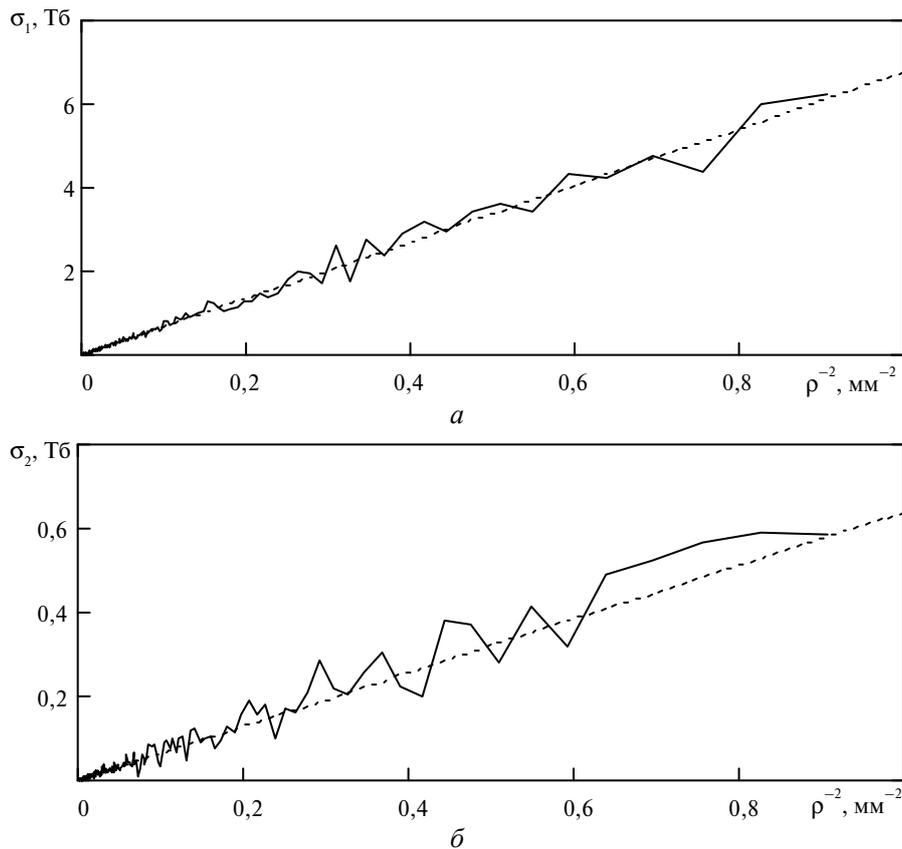


Рис. 1. Зависимость полного эффективного сечения рассеяния частиц износа на частицах шлама (а) и на частицах износа (б) от радиуса круговых зон обрабатываемой поверхности.

Полные эффективные сечения рассеяния частиц износа инструмента на частицах шлама σ_1 и на частицах износа σ_2 имеют сопоставимые значения на всех участках зоны контакта инструмента и детали, а σ_2 составляет 5—20 % от σ_1 (рис. 2).

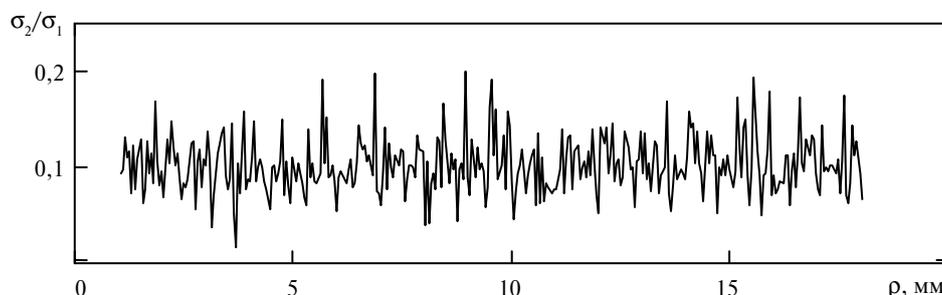


Рис. 2. Зависимость отношения σ_2/σ_1 от радиуса круговых зон обрабатываемой поверхности.

Дифференциальное сечение рассеяния [4, 5] частиц износа на частицах шлама $I(\vartheta) = |f(\vartheta)|^2 = [\text{Re } f(\vartheta)]^2 + [\text{Im } f(\vartheta)]^2$ достигает максимальных значений при малых углах рассеяния для центральных участков контактной зоны, достигающих величин от $I_1 = 0,5$ Тб/ср (при рассеянии на средних и крупных частицах шлама) до 3,0 Тб/ср (при рассеянии на самых мелких частицах). На периферийных участках контактной зоны (при $\rho \rightarrow R_1$) дифференциальное сечение рассеяния частиц износа на частицах шлама достигает максимальных значений при углах около нуля (рассеяние вперед) и 180° (рассеяние назад), а его величина приблизительно в 10^3 раз меньше, чем в центре зоны контакта инструмента и детали. Анализ угловых зависимостей дифференциального сечения рассеяния I_2 частиц износа на частицах износа показывает, что его максимальное значение достигает 0,3 Тб/ср при рассеянии вперед (при углах близких к нулю) и наблюдается на центральных участках контактной зоны. Зависимости дифференциального сечения рассеяния частиц износа (вперед) на частицах шлама I_1 (рис. 3, а) и на частицах износа инструмента I_2 (рис. 3, б) от радиуса круговых зон обрабатываемой поверхности позволяют объяснить осцилляторную структуру рассеяния частиц износа как результат интерференции соседних волновых пакетов и рассчитать величину суммарного дифференциального сечения рассеяния по формуле

$$I(\rho) = \frac{I_1(\rho)}{2} + \frac{I_2(\rho)}{2}. \quad (10)$$

Координатная зависимость дифференциального сечения рассеяния частиц износа инструмента на частицах шлама и на частицах износа (рис. 4) позволяет определить вероятность рассеяния частиц износа инструмента за единицу времени через единицу площади для процесса полирования оптической детали из кварца. Преимущественное рассеяние частиц износа вперед предопределяет их движение в направлении обрабатываемой поверхности в соответствии с координатной зависимостью дифференциального сечения рассеяния $I(\rho)$ (см. рис. 4), т. е. при значительно большей вероятности рассеяния потока частиц износа на центральных участках зоны контакта инструмента и обрабатываемой детали, чем на периферийных.

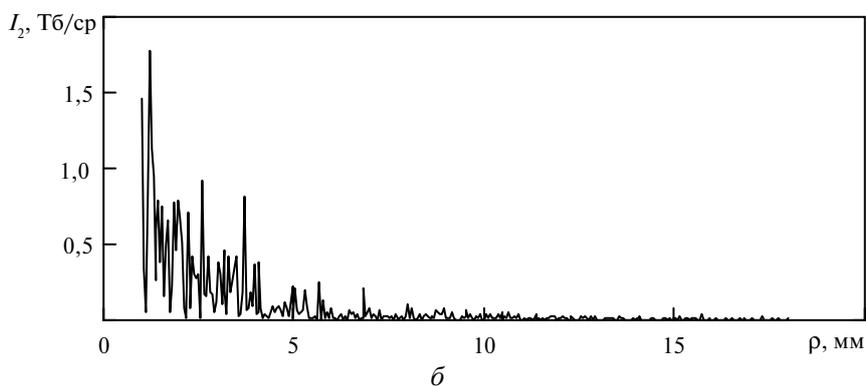
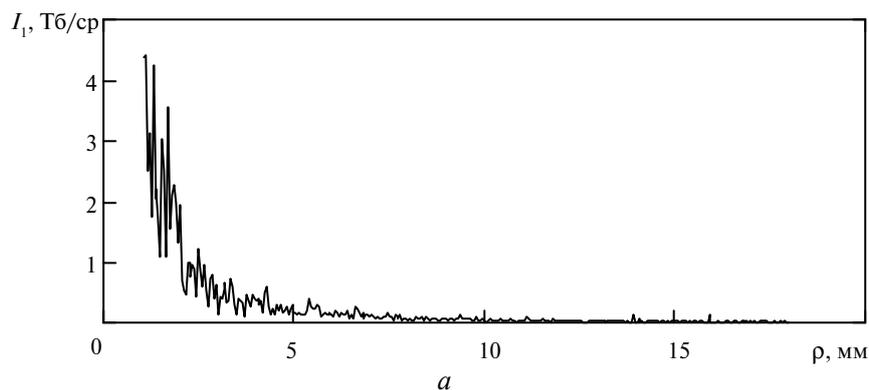


Рис. 3. Зависимость дифференциального сечения рассеяния частиц износа на частицах шлама (а) и на частицах износа (б) от радиуса круговых зон обрабатываемой поверхности.

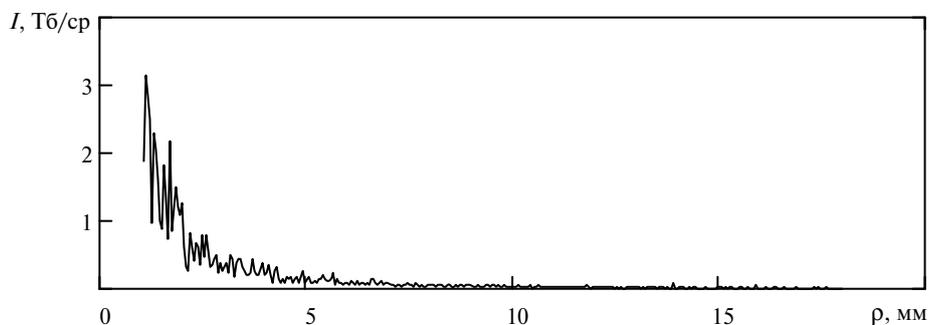


Рис. 4. Зависимость дифференциального сечения рассеяния частиц износа на частицах шлама и на частицах износа от радиуса круговых зон обрабатываемой поверхности.

Максимальная величина полного сечения рассеяния частиц износа на частицах шлама составляет 6,0 Тб и более чем на порядок величины превышает классическую величину $\sigma = \pi[(d_1/2) + (d_2/2)]^2$, составляющую 0,2—0,6 Тб. Для их рассеяния на частицах износа максимальная величина полного сечения составляет 0,6 Тб и согласуется с классической величиной. Кроме того, в приближении Бора [4] для случая больших $(k(\rho)r_0 \gg 1)$ скоростей, который реализуется для всех круговых зон обрабатываемой поверхности кроме $\rho \rightarrow 0$, рассеяние частиц износа резко анизотропно и направлено вперед в пределах узкого конуса с углом раствора $\Delta\vartheta \approx [k(\rho)r_0]^{-1}$.

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОПРОФИЛЯ ПОЛИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

При попадании частиц износа инструмента (диоксида церия) на поверхность кварца (кремнезема) происходит их контактное взаимодействие, в результате чего образуются новые частицы шлама (снимается обрабатываемый материал). Определение координат зон максимального воздействия частиц CeO_2 на обрабатываемую поверхность кварца с учетом их скорости и кинетической энергии позволяет оценить характер съема материала и формирования микрорельефа обрабатываемой поверхности в зависимости от радиуса круговых зон. Высота микропрофиля обрабатываемой поверхности в точке с координатой ρ (рис. 5) определяется вероятностью попадания частицы износа в эту точку, которая может быть определена по дифференциальному сечению рассеяния $I(\rho)$, отнесенному к площади поверхности (πd_2^2) и телесному углу $\Delta\vartheta^2$ (при $r_0 = \max(d_1, d_2)$), умноженному на величину наиболее вероятного размера частиц шлама a_v в соответствии с формулой

$$Z_1(\rho) = \frac{I(\rho)a_v}{\pi d_2^2 [\Delta\vartheta(\rho)]^2}. \quad (11)$$

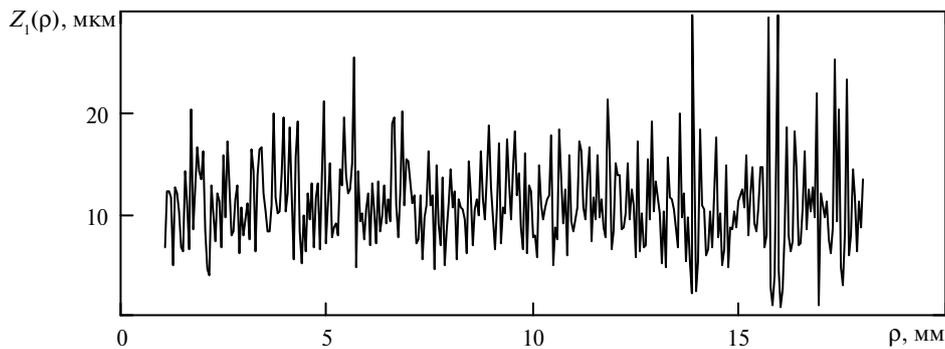


Рис. 5. Расчетная функция микропрофиля обработанной поверхности.

Функция макропрофиля обрабатываемой поверхности $Z_2(\rho)$ описывает ее геометрическую форму и определяется режимными и кинематическими параметрами процесса полирования. Для описанных выше условий формообразования плоской поверхности характерной является выпуклая форма. На рис. 6 представлена функция макропрофиля обработанной поверхности (вдоль диаметрального сечения), полученная при помощи оптической измерительной системы “Alisona”, анализ которой позволил аппроксимировать ее частью окружности с радиусом кривизны $R_0 = 16,2$ м.

Профиль обработанной поверхности детали из кварца $Z_t(\rho)$, который описывается наложением функций микро- и макропрофиля $Z_1(\rho)$ и $Z_2(\rho)$, в направлении от края детали к центру представлен на рис. 7, а. На рис. 7, б для сравнения приведены результаты сканирования участка полированной поверхности (вдоль диаметрального сечения в направлении от края детали к центру). Профиль поверхности был зарегистрирован при помощи оптического профилометра с точечным конфокальным лазерным датчиком Stil® с вертикальным разрешением до 10 нм и диаметром пятна 8 мкм. Сравнивая теоретическую Z_t и экспериментальную Z_e кривые микронеровностей профиля обработанной поверхности, приведенные на рис. 7, можно отметить их очень

хорошее соответствие, подтверждающее правомерность результатов, полученных на основе квантово-механических расчетов.

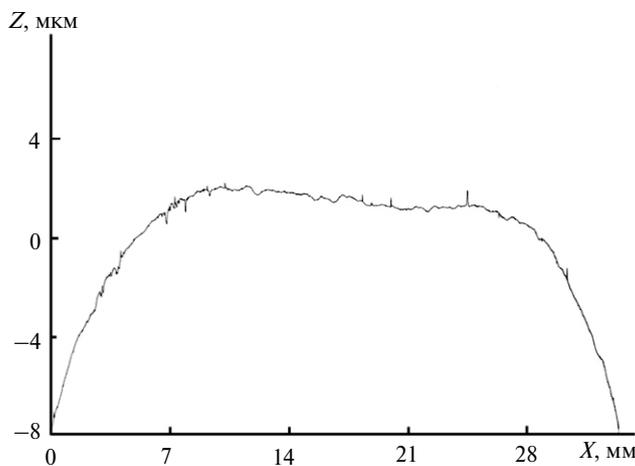
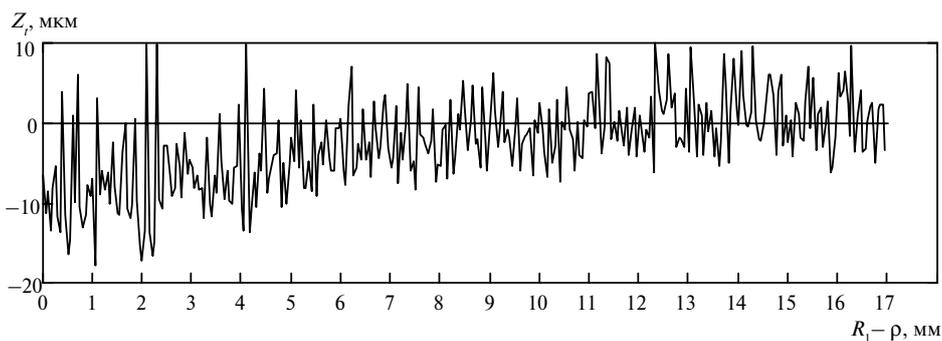
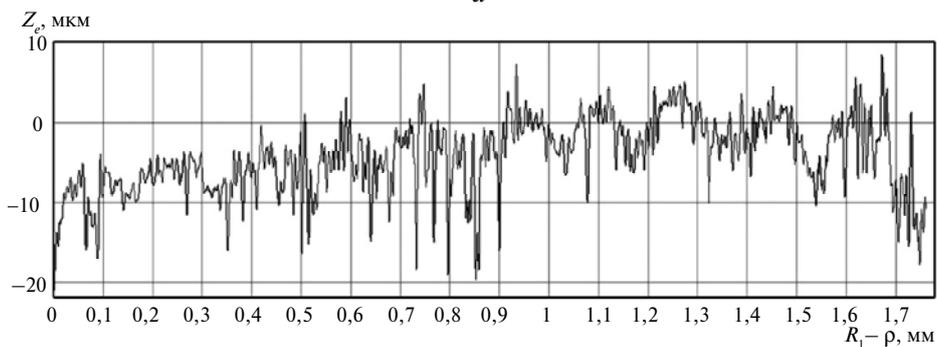


Рис. 6. Форма обработанной поверхности детали из кварца.



a



б

Рис. 7. Теоретическая (*a*) и экспериментальная (*б*) кривые микронеровностей профиля обработанной поверхности.

ВЫВОДЫ

Квантово-механическое описание рассеяния частиц износа в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали в процессе полирования прецизионной оптической поверхности позволило объяснить осцилляторную структуру рассеяния частиц износа инструмента на частицах шлама и на частицах изно-

са и рассчитать полное и дифференциальное сечения их рассеяния. В результате расчетов установлены зависимости дифференциального сечения рассеяния частиц износа на частицах шлама и на частицах износа от угла рассеяния для различных участков контактной зоны с учетом размеров рассеивающих центров. Показано, что дифференциальное сечение рассеяния частиц износа на частицах шлама, равно как и на частицах износа, максимально при углах рассеяния близких к нулю на центральных участках контактной зоны.

Рассчитаны координатные зависимости полного сечения рассеяния и показано, что вероятность рассеяния потока частиц износа на центральных участках зоны контакта инструмента и обрабатываемой детали значительно больше, чем на периферийных. Преимущественное рассеяние частиц износа вперед в пределах узкого конуса определяет их движение в направлении обрабатываемой поверхности детали, величину и характер съема материала, а также формирование микрорельефа обрабатываемой поверхности в зависимости от радиуса круговых зон. Высота микропрофиля поверхности пропорциональна вероятности попадания частицы износа в зону, т. е. дифференциальному сечению рассеяния, наиболее вероятному размеру частиц шлама и обратно пропорциональна площади их поверхности и телесному углу (квдрату угла конуса рассеяния вперед). При помощи оптических методов подтверждено соответствие экспериментальной и теоретической кривых микронеровностей профиля полированной поверхности детали из кварца.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Украины (проект № М/126-2009).

Описано взаємодію та розсіювання часточок зносу в зоні контакту інструмента і деталі в процесі полірування та пояснено осциляторну структуру розсіювання часточок зносу інструмента на часточках шламу і часточках зносу. Показано, що диференціальний переріз розсіювання часточок зносу на часточках шламу, так само як на часточках зносу, максимальний при кутах розсіювання вперед на центральних ділянках контактної зони. Розраховано координатну залежність диференціального перерізу розсіювання часточок зносу інструмента та залежність висоти мікропрофілю обробленої поверхні деталі від радіуса кругових зон. Показано відповідність експериментальної та теоретичної кривих мікронерівностей профілю полірованої поверхні деталі з кварцу.

Ключові слова: полірування, розсіювання часточок, переріз розсіювання, мікропрофіль.

The paper describes the interaction and scattering of wear particles in the tool-workpiece contact zone in the course of polishing and explains the oscillatory structure of scattering of the tool wear particles on debris particles and on wear particles. The differential cross-section of scattering of the wear particles on the debris particles as well as on the wear particles is shown to be maximum in the case of forward scattering at the central areas of the contact zone. The authors have calculated the coordinate dependence of the differential cross-section of scattering of tool wear particles and the dependence of the polished surface microprofile height on the radius of circular areas. The theoretical curve of polished surface profile microirregularities is shown to fit well the experimental one for a quartz workpiece.

Keywords: polishing, scattering of particles, scattering cross-section, microprofile.

1. Филатов Ю. Д. Взаимодействие частиц шлама и износа в зоне контакта инструмента и детали при полировании неметаллических материалов // 36. наук. праць НТУ "ХПІ" "Високі технології в машинобудуванні". — Харків, 2009. — Вип. 2 (19). — С. 201—206.

2. *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.
3. *Филатов Ю. Д.* Полирование прецизионных поверхностей деталей из неметаллических материалов инструментом со связанным полировальным порошком // *Сверхтв. материалы*. — 2008. — № 1. — С. 59—66.
4. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Квантовая механика. — М.: Физматгиз, 1963. — 702 с.
5. *Эйринг Г., Лин С. Г., Лин С. М.* Основы химической кинетики: Пер. с англ. — М.: Мир, 1983. — 528 с.
6. *Rogov V. V., Filatov Y. D., Kottler W., Sobol V. P.* New technology of precision polishing of glass optic // *Opt. Eng.* — 2001. — **40**, N 8. — P. 1641—1645.
7. *Filatov O. Yu., Poperenko L. V.* In situ ellipsometry of surface layer of nonmetallic transparent materials during its finish processing // *Appl. Surf. Sci.* — 2006. — **253**, N 1. — P. 163—166.
8. *Filatov Yu. D., Filatov O. Yu., Heisel U. et al.* In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method // *Proc. SPIE*. — 2010. — **7718**. — P. 7718J1—7718J9.
9. *Филатов Ю. Д.* Теоретические основы финишной обработки высококачественных прецизионных оптических поверхностей // *Контенант: науч.-техн. и гуманитар. сб. Международной академии “Контенант” (РОМАК)*. — 2009. — № 2, декабрь. — С. 19—30.

Ин-т сверхтвердых материалов

Поступила 13.07.10

им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Национальный технический ун-т Украины

“Национальный политехнический институт”

Киевский национальный ун-т им. Тараса Шевченко

Национальная высшая школа механики и микротехники

Штуттгартский ун-т