

- физического материаловедения: Сб. науч. тр. – К: изд-во ИПМ НАН Украины, 1992. – С. 70–74.
2. Аврамчук С. К. Особливості отримання, структура, склад та властивості розпилених порошків сплавів Ni–Mn для синтезу алмазів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.06 / Ін-т проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. – К., 2001. – 20 с.
 3. Соколов В. Н. Центрофугирование. – М.: Техника, 1976. – 408 с.
 4. Аврамчук С. К., Волкогон В. М. Математический расчет параметров процесса центробежного распыления порошков сплава Ni–Mn заданного гранулометрического состава // Матер. 9-го Междунар. науч.-техн. семинара «Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте» 23–27 февр. 2009 г., г. Свалява. – К: Изд-во АТМ України, 2009. – С. 5–10.

Поступила 22.06.10

УДК 621.371

Ю. Д. Филатов, д-р техн. наук; **С. В. Ковалев**

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

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА С ЧАСТИЦАМИ ШЛАМА В ЗОНЕ КОНТАКТА ПРИ ПОЛИРОВАНИИ КВАРЦА

Methods of quantum mechanics define full and differential sections of dispersion of particles of deterioration of the tool on particles slime in a zone of contact of flat surfaces of the tool from oxide cerium and a detail from quartz.

Введение

На основе результатов исследования динамики столкновений и рассеяния частиц шлама с учетом интенсивности эрозионного износа поверхности потоком частиц была рассчитана координатная зависимость шероховатости плоских поверхностей деталей из оптического стекла при тонком алмазном шлифовании и объяснено явление образования налета на рабочей поверхности инструмента [1]. Кинетика взаимодействия частиц шлама и износа в зоне контакта инструмента и детали в процессе полирования неметаллических материалов исследовалась на основе физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама с обрабатываемой поверхности [2; 3]. Результаты компьютерного моделирования показали, что угол рассеяния частиц шлама в зоне контакта не зависит от их зарядового состояния, составляет $79,3\text{--}79,5^\circ$ и изменяется в диапазоне от 1 до 127° . При этом эффективное дифференциальное сечение рассеяния составляет приблизительно $0,8\text{--}4,0$ Тб. Методом Монте-Карло рассчитаны траектории движения частиц шлама и показано, что они располагаются внутри сферы, которая имеет тенденцию к смещению в направлении рабочей поверхности инструмента, а время между двумя столкновениями составляет $43\text{--}44$ нс. Нейтральные частицы износа рабочего слоя инструмента, взаимодействуя с незаряженными частицами шлама, рассеиваются на $80\text{--}140^\circ$ и перемещаются по круговым траекториям в неподвижной сфере размером до 50 нм. Заряженные частицы износа (CeO_2), взаимодействуя с заряженными частицами шлама (SiO_2), рассеиваются на $152\text{--}175^\circ$ и канализуются, перемещаясь вдоль круговых «каналов» диаметром более 150 нм. Время между столкновениями частиц износа с частицами шлама независимо от их зарядового состояния составляет $32\text{--}34$ нс [2–4].

Рассчитанные траектории движения частиц шлама и частиц износа показывают лишь тенденции формирования преимущественных направлений их перемещения и не позволяют объяснить известные экспериментальные закономерности формирования налета из продуктов износа на контактирующих поверхностях инструмента и детали и координатной зависимости шероховатости полированной поверхности [1; 5]. Это связано с принципиальным недостатком классического подхода ограниченным соотношением неопределенности Гейзенберга [6; 7].

Рассеяние частиц износа инструмента на частицах шлама в контактной зоне

Классические траектории, определяемые функцией рассеяния и прицельным параметром, нельзя использовать для описания взаимодействия образующихся в процессе полирования частиц шлама и износа размером в несколько нанометров. Для потока частиц, или волнового пакета, ширина которого определяется размерами частиц, неопределенность импульса ΔP

$> \frac{\hbar}{d_2}$ ($\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, d_2 – наиболее вероятный размер частицы изно-

са, $d_2 = 3,1$ нм), а неопределенность прицельного параметра $\Delta b \approx \hbar / \Delta P$, так что соотношение неопределенности $\Delta P \Delta b \geq \hbar$ справедливо. Невозможность точного определения угла рассеяния особенно проявляется при его приближении к нулю. Классические траектории утрачивают физический смысл, дифференциальное сечение при нулевом угле рассеяния невозможно объяснить в рамках классических представлений [5]. Вместо начальных векторов положения и импульса частицы в квантовой механике рассматривают волновую функцию, которая удовлетворяет уравнению Шредингера. Для рассеяния частиц в центрально-симметричном поле $V(r)$ решение уравнения в асимптотической области $r \rightarrow \infty$ выражается функцией вида

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

где $k = mu/\hbar$ – волновое число; m – масса частицы; u – скорость частицы; ϑ – угол рассеяния; $f(\vartheta)$ – амплитуда рассеянной волны) [6; 8]. Первое слагаемое в этой функции описывает падающую в направлении оси z плоскую волну, второе – удаляющуюся волну, распространяющуюся под углом ϑ к оси z . При равенстве плотности потока падающих и удаляющихся волновых пакетов дифференциальное сечение рассеяния определяется как квадрат модуля амплитуды рассеянной волны

$$I(\vartheta) = |f(\vartheta)|^2,$$

а полное эффективное сечение рассеяния интегралом

$$Q = 2\pi \int_0^\pi |f(\vartheta)|^2 \sin \vartheta d\vartheta \quad [6, 8].$$

Решение задачи о рассеянии частиц износа инструмента в контактной зоне сводится к определению амплитуды рассеяния $f(\vartheta)$ по заданному потенциалу взаимодействия $V(r)$. Взаимодействие положительно заряженных частиц износа инструмента с отрицательно заряженными частицами шлама в контактной зоне [3; 9] с учетом потенциала их межмолекулярного взаимодействия описывается потенциалом

$$V(r, j) = -\frac{\hbar\omega_{123}}{8\pi r} \frac{d_1(j)d_2}{d_1(j) + d_2} + \frac{q_1q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}, \quad (1)$$

где $d_1(j)$ – размер j -й частицы шлама [10], d_2 – размер частиц износа инструмента; q_1, q_2 – заряд частицы шлама и частицы износа соответственно, $q_1 = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $q_2 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость смазывающе-охлаждающей технологической среды.

Исходя из общей теории упругих столкновений для квазиклассического случая при исключении из рассмотрения нулевого угла рассеяния, для амплитуды рассеяния частиц износа можно записать выражение, следующее из точной квантово-механической теории [8]:

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

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.

Дифференциальное сечение рассеяния частиц износа в общем случае выражается формулой

$$I(\vartheta) = |f(\vartheta)|^2 = [\operatorname{Re} f(\vartheta)]^2 + [\operatorname{Im} f(\vartheta)]^2. \quad (3)$$

В квазиклассическом приближении, когда сумма в формуле (2) определяется в основном членами с большими значениями l и полиномы Лежандра заменяются на их асимптотическое выражение, можно рассчитать угол рассеяния, совпадающий с результатами исследования динамики столкновений и рассеяния частиц износа инструмента на частицах шлама в контактной зоне [2–4].

Фазы волновых функций частиц износа для рассеяния в поле $V(r)$ определяются интегралом [8]

$$\delta_{lj} = - \int_{r_0}^{\infty} \frac{mV(r, j) dr}{\hbar^2 \sqrt{k^2 - \frac{(l+1/2)^2}{r^2}}}, \quad (4)$$

где $r_0 = (d_1(j=0) + d_2)/2$ – координата, определяющая классически доступную область движения $r > r_0$.

Порядок величины интеграла (4) $mV(r_0)r_0/(k\hbar^2) \gg 1$. Порядок числа $l - l_{max} = kr_0$ [8]. Методом парциальных волн [6–8] определяются парциальное сечение рассеяния частиц износа на j -й частице шлама с заданным угловым моментом (числом l) σ_{lj} и полное эффективное сечение σ рассеяния частиц износа инструмента на всех частицах шлама ($j = 0, N-1, N$ – количество выборок в распределении частиц шлама по площади поверхности [10]):

$$\sigma_j = \frac{4\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{l_{max}} (2l+1) \sin^2 \delta_{lj}, \quad (5)$$

$$\sigma = \sum_{j=0}^N \sigma_j. \quad (6)$$

Квантово-механический подход позволяет объяснить осцилляторную структуру рассеяния частиц износа инструмента на частицах шлама как результат интерференции соседних волновых пакетов и рассчитать полное сечение рассеяния в соответствии с оптической теоремой через амплитуду рассеяния (2) при $\vartheta = 0$ согласно формуле [6]:

$$\sigma = \frac{4\pi}{k} \operatorname{Im}[f(\vartheta = 0)]. \quad (7)$$

Рассеяние частиц износа инструмента на частицах шлама при полировании кварца

Рассмотрим взаимодействие частиц износа инструмента Аквапол [11] среднего размера 3,1 нм и частиц шлама кварца, размеры которых определяются распределением Пуассона ($\nu = 0,87$). Наиболее вероятный размер частиц шлама кварца $a_\nu = 3,3$ нм при $N = 5$ [10]. Полировали плоскую деталь из кварца диаметром 36 мм на шлифовально-полировальном устройстве, оснащённом лазерным эллипсометром ЛЭФ-3М для *in situ* контроля качества обработанной поверхности [12] при частоте вращения детали 30,3 об./мин (угловая скорость вращения – $3,17 \text{ с}^{-1}$) и номинальном давлении ее прижима к инструменту 1,0 кПа. При таких условиях за один оборот детали в контактной зоне образуется $1,37 \cdot 10^{14}$ частиц шлама и $1,57 \cdot 10^{14}$ частиц износа инструмента, которые располагаются на расстоянии 7,0 нм, приблизительно в 2 раза превышающем их собственные размеры (a_ν или d_2). В квазиклассическом приближе-

нии угол рассеяния частиц износа инструмента на частицах обрабатываемого материала (шлама) рассчитывается по формуле

$$\vartheta_j = -\pi + 2 \int_{r_0}^{\infty} \frac{b_j dr}{r^2 \sqrt{1 - \frac{V(r, j)}{W_2} - \left(\frac{b_j}{r}\right)^2}}, \quad (7)$$

где b_j – прицельное расстояние, $b_j = (d_1(j) + d_2)/2$; W_2 – кинетическая энергия частицы износа. Угол рассеяния частиц износа инструмента составляет около $-178,3^\circ$ и не зависит от размера частиц шлама.

При определении фазы волновых функций частиц износа (3) и их амплитуды рассеяния (2) для азимутальных квантовых чисел с $l_{\max} = 75$ методом парциальных волн рассчитали полное эффективное сечение σ рассеяния частиц износа инструмента на j -х частицах шлама. Из зависимости $\sigma = f(j)$ (рис. 1) следует, что полное эффективное сечение рассеяния частиц износа составляет 0,4–0,5 Тб, что приблизительно в 2–10 раз меньше значения, полученного методом компьютерного моделирования [2; 3]. Такая же зависимость полного эффективного сечения рассеяния частиц износа от размеров j -х частиц шлама получается при расчете по формуле (7).

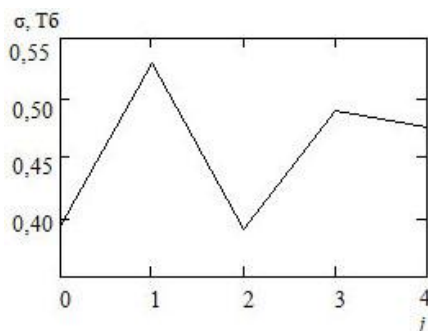


Рис. 1. Зависимость $\sigma = f(j)$ при $j = \overline{0,4}$

Из зависимости дифференциального сечения рассеяния частиц износа [см. формулу (3)] от угла рассеяния (рис. 2) следует, что при углах рассеяния около 0° (рассеяние вперед) и 180° (рассеяние назад) дифференциальное сечение рассеяния частиц износа резко увеличивается до 4 Тб, которые получены в рамках классического рассмотрения, и существенно зависит от размера рассеивающих центров – частиц шлама (рис. 3).

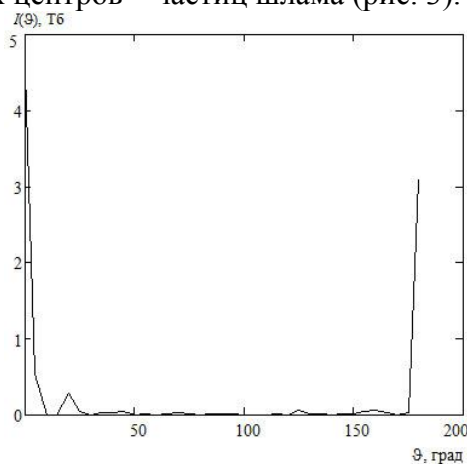


Рис. 2. Зависимость дифференциального сечения рассеяния частиц износа от угла рассеяния

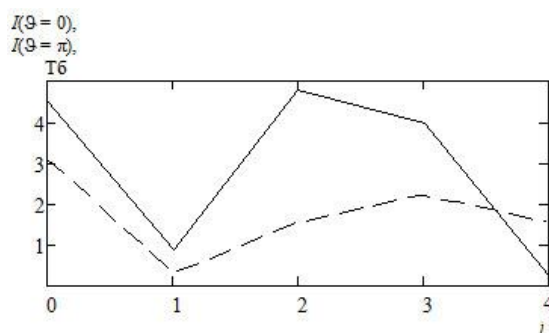


Рис. 3. Зависимость дифференциального сечения рассеяния частиц износа от j при углах рассеяния $\vartheta = 0^\circ$ и $\vartheta = 180^\circ$

Преимущественное рассеяние частиц износа вперед и назад предопределяет их движение как в направлении обрабатываемой поверхности, так и в направлении поверхности инструмента.

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.

Выводы

Таким образом, с помощью описанных методов можно рассчитать полное и дифференциальное сечения рассеяния частиц износа на частицах шлама, а также их зависимость от угла рассеяния. При рассеянии вперед можно определить зоны максимальной локализации частиц износа на обрабатываемой поверхности детали. Это представляет особый интерес с точки зрения объяснения известной из экспериментальных исследований зависимости параметров шероховатости. Кроме того, использование описанных методов для описания полного и дифференциального сечений рассеяния частиц шлама на частицах износа и определения вероятности их попадания в заданную точку каждой из притирающихся поверхностей инструмента и обрабатываемой детали обеспечивает корректное объяснение закономерностей образования налета и установление координатной зависимости шероховатости обработанной поверхности.

Литература

1. 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.
2. Филатов Ю.Д. Взаємодія частинок шламу та зносу в зоні контакту деталі та інструменту при поліруванні неметалевих матеріалів // Зб. наук. пр. «Процеси механічної обробки в машинобудуванні». – Житомир: Вид-во ЖДТУ, 2009. – Вип. 7. – С. 247–256.
3. Филатов Ю. Д. Взаимодействие частиц шлама и износа в зоне контакта инструмента и детали при полировании неметаллических материалов // Зб. наук. пр. «Високі технології в машинобудуванні». – 2009. – Вип. 2(19). – С. 201–206.
4. Филатов Ю. Д. Теоретические основы финишной обработки высоко-качественных прецизионных оптических поверхностей: Сб. Междунар. акад. Контенант. – дек. 2009. – С. 19–30.
5. Филатов Ю. Д., Рогов В. В. Особенности процесса полирования стекла инструментом со связанным полировальным порошком // Оптика и спектроскопия. – 1993. – Т. 74. – Вып. 6. – С. 1229–1235.

6. Эйринг Г., Лин С. Г., Лин С. М. Основы химической кинетики: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 528 с.
7. Юхновський І. Р. Основи квантової механіки: Навч. посіб. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2002. – 392 с.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика. – М.: Физматгиз, 1963. – 702 с.
9. Филатов Ю. Д. Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтвердые матер.– 2001.– № 3.– С. 36–49.
10. In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method / Yu. D. Filatov, O. Yu. Filatov, U. Heisel, M. Storchak, G. Monteil. // SPIE Photonics Europe 2010, Intern. Conf. – Brussels, Belgium, 12–16 Apr. 2010. – Paper 7718-55.
11. New technology of precision polishing of glass optic / V. V. Rogov, Y. D. Filatov, W. Kottler, V. P. Sobol // Opt. Eng. –**40**. – Aug. 2001. – P. 1641–1645.
12. Filatov O. Yu., Poperenko L. V. In situ ellipsometry of surface layer of nonmetallic transparent materials during its finish processing // Applied Surf. Sc.– **253**, 31.– Oct. 2006. – P. 163–166.

Поступила 03.06.10

УДК 621.9.015

А. С. Мановицкий, канд. техн. наук

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

РАСЧЕТ УГЛОВ СДВИГА И ДЕЙСТВИЯ ПРИ ОРТОГОНАЛЬНОМ СВОБОДНОМ РЕЗАНИИ МАЛОПЛАСТИЧНЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

The determination of shearing angle and acting angle when free orthogonal cutting of low-plastic carbon-ferrous alloys is provided by analytic method based on mechanical material resistance.

Стружкообразование в зависимости от степени пластичности обрабатываемого материала в процессе резания происходит либо вследствие пластического течения металла в зоне резания, либо его разрушения с образованием и развитием трещин и последующим отделением элементной или суставчатой стружки. Известные методы подходов к оценке природы деформаций в зоне резания позволяют количественно решить задачу напряженно-деформированного состояния, но не всегда в достаточно полной мере описывают физическую сущность протекающих процессов.

Разработано несколько моделей зоны деформации при резании с одной и более плоскостями сдвига. По мнению подавляющего большинства исследователей процесс стружкообразования является результатом пластического сдвига металла в зоне деформации. Такой подход вполне справедлив для пластичных сплавов при их резании с низкой скоростью, однако, не в полной мере объясняет такие явления, как завивание сливной стружки и образование элементов стружки с формой их продольного сечения, близкой к треугольной. Также большинство исследователей считают, что в зоне пластической деформации действуют большие сжимающие напряжения, препятствующие разрыву материала, несмотря на то, что относительная деформация превосходит то ее значение, при котором происходит разрушение образца при растяжении. Несмотря на то, что более реалистичной представляется модель с развитой зоной деформации, аналитические исследования с применением моделей с одной плоскостью сдвига имеют вполне законченный вид и при обработке с высокой скоростью резания становятся все же более приемлемыми. Особенно это проявляется при обработке малопластичных и хрупких материалов [1].