Ю.Д. Филатов, д-р техн. наук, Киев, Украина

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ ШЛАМА И ИЗНОСА В ЗОНЕ КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА И ДЕТАЛИ ПРИ ПОЛИРОВАНИИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

It is established, that at interaction of not charged particles of deterioration and particles u_{AAA} they dissipate on corners $80-140^{\circ}$ and of 50 nm move on circular trajectories in diameter. The charged particles of deterioration dissipate on corners 152–175⁰ and of 150 nm move on channels in diameter.

Введение. Состояние проблемы контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемой детали при полировании неметаллических материалов (HM) характеризуется решением вопросов, связанных с изучением механизмов диспергирования частиц шлама и их распределения по размерам, исследованием закономерностей формообразования прецизионных поверхностей и управлением точностью их формы за счет оптимизации кинематических и режимных параметров процесса и выбора функционально-ориентированных конструкций и характеристик рабочего слоя инструмента, разработкой методов расчета интенсивности съема обрабатываемого материала и компьютерного моделирования микро- и макрорельефа взаимодействующих поверхностей детали и инструмента. В настоящее время для процессов алмазного шлифования НМ на основе физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама [1], а также результатов исследования динамики их столкновений и рассеяния в контактной зоне определены параметры шероховатости плоских прецизионных поверхностей и их координатная зависимость, а также обосновано образование налета частиц шлама на рабочей поверхности инструмента [2]. Процессы взаимодействия частиц шлама в зоне контакта инструмента и детали в процессе полирования изучены [3, 4] в предположении отсутствия частиц износа инструмента, как при шлифовании [2], а причины возникновения налета частиц шлама и частиц износа рабочего слоя инструмента на взаимодействующих поверхностях не выяснены окончательно. Только на основе изучения взаимодействия частиц шлама и износа в контактной зоне можно выяснить особенности формирования микрорельефа поверхностей обрабатываемой детали и рабочего слоя инструмента.

Закономерности взаимодействия частиц износа инструмента с частицами шлама в зоне контакта. Концентрации частиц шлама в точке с координатой z (по нормали к обрабатываемой поверхности) при полировании определяется, исходя из физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама [1], в соответствии с формулой:

$$c_{i}(z,\tau) = n_{0i} \left(1 - \frac{1}{erf(\beta_{i})} erf\left(\frac{z}{2\sqrt{\eta_{i}\tau}}\right) \right)_{i}$$

где: n_{0i} – число *i*–х частиц шлама на обрабатываемой поверхности, $\eta_i(\rho)$ – коэффициенты объемного износа, τ – время

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{0}^{x} e^{-t^{2}} dt$$

полирования,

(1)

рования, $\sqrt{\pi} \stackrel{0}{_{0}}$ – интеграл ошибок, $i = \overline{0, n-1}$ – номер группы частиц, n – число групп [4]. Коэффициенты объемного износа зависят от размеров d_i частиц шлама и времени τ_c их контакта с поверхностью инструмента в соответствии с формулой $\eta_i = d_i^2 / 4\beta_i^2 \tau_c$, а коэффициенты β_i являются решениями *n* трансцендентных

уравнений [1]:

$$\frac{e^{-\beta_i^2}}{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\beta_i)} = \frac{L_t}{n_{0i}S_i} \sqrt{\frac{\lambda T\tau_c}{p_a}},$$
(2)

где p_a – номинальное давление прижима инструмента к детали; L_t – длина пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности рабочего слоя инструмента; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала; *Т*=300 *К* – температура; *S_i* – площадь поверхности *i*-й частицы [1].

При полировании плоских поверхностей деталей из стекла диаметром 60 мм инструментом диаметром D₁=60 мм, рабочий слой которого выполнен в виде 12 полировальных элементов Аквапол ЭП1 диаметром d₁=10 мм, на шлифовально-полировальном станке типа ШП номинальное давление прижима составляло $p_a = 0.05$ МПа, а частота вращения детали $\omega_1 = 20.9 \text{ c}^{-1}$ (200 об/мин). Параметры и характеристики стекла марки К8: плотность $\rho = 2.52 \cdot 10^3$ кг/м³; $\lambda = 0.95$ Bt/(м·K); энергия связи – 3.9 эВ (90 ккал/моль); энергия кластера – 5.3 эВ; количество фрагментов O=Si=O в кластере ξ = 96; значение константы Лифшица ω_{123} =1,36·10¹³ с⁻¹; параметр распределения частиц шлама по размерам (распределения Пуассона) – v = 0,74). Площадь поверхности частиц шлама определена, исходя из кластерной модели, по формуле $S_i = S_0(i+1)$, в которой $S_0 = (\xi/2)L_x^2 + 8\xi^{1/2}L_xL_y$, а L_x и L_y – расстояния между соседними фрагментами на поверхности и между слоями фрагментов соответственно [5]. Наиболее вероятный размер частиц шлама $a_v=3,2$ нм; концентрация частиц шлама – $2,2\cdot10^{23}$ м⁻²·c⁻¹, длина пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности рабочего слоя инструмента $L_t = d_t$; скорость его относительного перемещения $u = \omega_1 D_1/4$; время контакта с поверхностью зерна полировального порошка (CeO₂, $d_g=1$ мкм) $\tau_c=d_g/u$.

При решении численными методами *n* уравнений (2) и определяя коэффициенты объемного износа η_i , была рассчитана концентрации *i*-х частиц шлама $c_i(z_0, t)$ и число частиц шлама на площади контакта инструмента и детали 6,1·10¹³. Наиболее вероятный объем частицы шлама составляет v₁ = 17,3·10^{-27 м3}. Производительность полирования стекла марки К8 при данных условиях, рассчитанная по величинам концентрации частиц шлама $c_i(z = R \max, \tau = 1)$ с учетом их пуассоновского распределения по площадям поверхности, составляет 1,19·10⁻¹¹ м³/с и

незначительно отличается (погрешность расчета 11,9 %) от экспериментального значения 1,06·10⁻¹¹ м³/с (линейный съем – 1,6 мг/мин или 0,225 мкм/мин – в средней зоне обрабатываемой поверхности).

Образовавшиеся за время одного оборота детали частицы шлама имеют суммарный объем 3,18·10^{-12 м3}. Объем частиц, расположенных на площади контакта инструмента и детали, составляет 1,06·10^{-12 м3}, а объем контактной зоны 5,7 10^{-10 м3}. Для расчета концентрации и размеров частиц износа инструмента, исходя из экспериментального значения величины относительного износа инструмента f = 0,9, находились значения линейного износа инструмента $\Delta S = 3,4\cdot10^{-9}$ м и суммарного объема частиц износа 9,5·10-13 м³, образовавшихся за время 1 оборота детали. Исходя из кластерной модели [5], значений атомной массы диоксида церия $M_2 = 172$ и его плотности $\rho_2 = 6,7\cdot 10^3$ кг/м³, рассчитывались количество фрагментов CeO₂ в частице износа ξ = 117, энергия кластера 6,75 эВ, объем частицы износа 15 нм³, средний размер $d_2 = 3,06$ нм и число частиц износа $6,4\cdot 10^{13}$. Общее число частиц шлама и износа в контактной зоне – 1,25·10¹⁴, а объем зоны на 1 частицу составляет 4,5·10^{-24 м3}. То есть в элементарном объеме 16.5x16.5x16.5 нм³ находится одна частица, причем в контактной зоне частиц износа приблизительно столько же как и частиц шлама, а среднее расстояние между ними составляет $l \approx 16,5$ нм, что в 5 раз больше, чем средний размер частиц шлама или износа. Число таких ячеек вдоль оси z (число слоев) составляет $(l_0 - z_0) / l \approx 36$.

Исходя из проведенного анализа, можно определить координаты частиц шлама $z_i = z + d_i/2$ и частиц износа z_2 $= z + d_2/2$ (di – размер i-ой частицы шлама), их концентрацию в соответствии с формулой (1) за время 1 с на плошали

$$n_i(z) = c_i(z + \frac{a_i}{2}, \tau = 1)$$
, а также изучить закономерности столкновений и рассеяния частиц износа.

Рассмотрим сначала взаимодействие частиц износа инструмента с частицами шлама в контактной зоне на основе известных закономерностей динамики молекулярных столкновений и классической теории рассеяния частии [6] с учетом, что электрический заряд частиц отсутствует, а потенциал их межмолекулярного взаимодействия выражается формулой

$$U_{i}(x) = -\frac{\hbar\omega_{123}}{8\pi x} \cdot \frac{d_{i}d_{2}}{d_{i}+d_{2}},$$
(3)

где \hbar – постоянная Планка. *x* – расстояние между частицами.

 $b_i = \frac{1}{2}(d_i + d_2)$ и кинетическую энергию частицы износа $E_k = \frac{1}{2} \rho_2 v_2 u^2$ Определив прицельное расстояние – объем частицы износа), для двухчастичных столкновений угол θ_i рассеяния можно выразить следующим образом:

$$\vartheta_{i} = \pi - 2 \int_{R\min}^{l_{i}} \frac{b_{i} dx}{x^{2} \sqrt{1 - \left(\frac{b_{i}}{x}\right)^{2} - \frac{U_{i}(x)}{E_{k}}}},$$
(4)

 $Rmin = \frac{1}{2}(d_{i=n-1} + d_2)$ - расстояние наибольшего сближения частиц. С учетом распределения частиц шлама по размерам рассчитаны возможные значения угла рассеяния частиц

 $=101.4^{\circ}$, минимальное Θ min $= 80^{\circ}$ и максимальное износа при столкновении с ними, а также его среднее Θ max = 140[°] значения.

Определяя эффективное дифференциальное сечение рассеяния частиц износа на частицах шлама $\sigma_i = \pi (d_i + d_2)^2$, можно рассчитать число частиц, рассеянных в телесный угол $d\Omega = 2\pi \sin \Theta d\Theta$ за единицу времени dN [6, 7] $dN = N_{mi}N_2\sigma_i d\Omega$. Из зависимости плотности распределение частиц шлама $\overline{d\Omega}$ от угла рассеяния следует, что

наибольшее количество частиц рассеивается на угол приблизительно 110°. Эффективное дифференциальное сечение рассеяния частиц износа ^Ф*i* изменяется от 1,0 Тб до 2,4 Тб.

Траектории движения частиц износа рассчитаны в системе координат, связанной с технологической средой, заполняющей контактную зону, исходя из допущения, что они влетают в неподвижную среду, в которой частицы шлама и частицы износа равномерно распределены в ячейках объемом l^3 , с постоянной скоростью u. Методом Монте-Карло рассчитывались углы, на которые отклонялась частица износа при рассеянии на *i*-ой частице шлама. При помощи генератора чисел в соответствии с распределением Пуассона случайным образом выбирался номер m и соответственно определялся угол рассеяния θ_{im} . Величина угла, на который отклонилась частица износа после mстолкновений, определялась формулой

(5)

$$\Delta_{im} = (m+1)\pi - \sum_{m=0}^{m} \vartheta_{im},$$

а ее координаты в системе XOZ (ось OX совпадает со средней линией профиля обрабатываемой поверхности):

$$X_{im} = \sum_{m=0}^{m} l \cos \Delta_{im} , \qquad (6)$$

$$Z_{im} = z_2 + \sum_{m=0}^{m} l \sin \Delta_{im}$$

В результате расчетов показано, что траектории движения нейтральных частиц износа инструмента, которые взаимодействуют с незаряженными частицами шлама, двигаются в технологической среде по круговым траекториям, расположенным в практически недвижимой сфере размерами до 50 нм.

Рассмотрим теперь взаимодействие заряженных положительно частиц износа инструмента с отрицательно заряженными частицами шлама в контактной зоне [5] с учетом, что электрический потенциал их взаимодействия выражается формулой

$$U_e(x) = \frac{e_1 e_2}{4\pi x e_0 e_{03}}$$

где $e_1 = -1, 6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд частицы шлама,

 $e_2 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд частицы износа,

 $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \Phi/M$ – электрическая постоянная,

ε₀₃ = 81 − относительная диэлектрическая проницаемость технологической среды (воды).

Угол θ_i рассеяния заряженных частиц износа рассчитывается по формуле (4) с учетом суммарного потенциала

 $= \frac{1}{n} \sum_{i} \vartheta_{i}$

межмолекулярного и электрического взаимодействия. Значения угла рассеяния частиц износа: среднее n_{i} = 165°, минимальное Θ min = 152° и максимальное Θ max = 175°. Эффективное дифференциальное сечение рассеяния частиц износа $\sigma_{i} = 1,0-2,4$ Тб, такое же как и для незаряженных частиц. Зависимость плотности распределение \underline{dN}

частиц шлама d or угла рассеяния – экстремальная, наибольшее количество частиц рассеивается на угол 166°.

Траектории движения частиц износа инструмента – окружности, заряженные частицы CeO₂, взаимодействуя с заряженными частицами шлама (SiO₂), канализуют, двигаясь вдоль кольцевых «каналов», диаметр которых не превышает 150 нм. Время между двумя последовательными столкновениями частиц износа с частицами шлама независимо от их зарядового состояния составляет 32–34 нс.

Выводы. В результате анализа взаимодействия частиц износа инструмента и частиц шлама в зоне контакта инструмента и детали в процессе полирования на основе исследования динамики их столкновений и рассеяния показано, что их эффективное дифференциальное сечение рассеяния составляет 1,0–2,4 Тб. Рассчитанные при помощи метода Монте-Карло траектории движения частиц износа представляют собой окружности. При взаимодействии незаряженных частиц износа и частиц шлама они рассеиваются на углы 80–140° и двигаются по круговым траекториям, расположенным внутри сфер диаметром до 50 нм. Заряженные положительным зарядом частицы износа взаимодействуют с частицами шлама с зарядом противоположного знака, рассеиваются на углы

152–175°, происходит их каналирование – движение по каналам, диаметр которых 150 нм. Частицы износа «перекатываются» в зоне контакта, подобно перекатыванию зерен абразива в классическом процессе формообразования поверхностей по методу притира.

Список литературы: 1. Филатов Ю.Д., Сидорко В.И. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // Сверхтв. материалы. – 2005. – № 1. – С. 58–66. 2. Филатов А. Ю., Сидорко В.И., Филатов Ю.Д. Особенности формирования макро- и микрорельефа плоских поверхностей деталей из неметаллических материалов при алмазном шлифовании // Сверхтв. материалы. – 2007. – № 6. – С. 48–57.

3. Sidorko V, Novikov M., Filatov Yu. Diamond-abrasive finishing non-metallic materials // Abstracts of International Conference "Advanced Processing for Novel Functional Materials – APNFM 2008", Dresden, 23-25 January 2008. – Р. 103. 4. Динамика столкновений и рассеяния частиц шлама в зоне контакта инструмента и детали при полировании стекла / Филатов Ю.Д., Сидорко В.И.,

Ковалев С.В., Филатов А.Ю. // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение.-К.: НТУУ «КПИ».-2008.- № 52.- С. 201-207. **5**. 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 // Сверхтв. материалы. – 1994. – № 3. Ч. 1. – С. 40–43.

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. Посібник.–2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2002. – 392 с.

Поступила в редколлегию 03.07.2009

(7)

(8)