

УДК 621.923

**Ю. Д. Филатов**, докт. техн. наук

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

## **ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПЛОСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ПОЛИРОВАНИИ**

*Regularities of forming surface of the article and wear of working layer of the tool depending on process and kinematical parameters of polishing, coefficients of wear of tool material for existent technological schemes of machining have been revealed. Methods of calculations of production capacity of polishing flat precise of optical articles and filling coefficients of surface of the tool by working layer, which insure its regular wear.*

### **Введение**

Повышение точности формообразования прецизионных поверхностей оптических деталей при полировании за счет управления кинематическими и режимными параметрами процесса и выбора конструкции и характеристики рабочего слоя полировального инструмента традиционно является актуальной задачей оптического производства. Существующие методики расчета интенсивности съема обрабатываемого материала при полировании, как правило, базируются на законе Престона [1–2]. Они могут применяться, если есть возможность учета распределения давления прижима обрабатываемой детали к поверхности инструмента и теоретико-экспериментального определения «технологической константы», которая по существу ею не является и зависит от конкретных условий процесса обработки. Закономерности процесса диспергирования частиц обрабатываемого материала, а также влияние технологических и конструктивных параметров, физико-химических свойств детали, инструмента и смазывающе-охлаждающей технологической среды (СОТС) на эффективность обработки неметаллических материалов при полировании рассмотрены в [3–5]. Вместе с тем, попытки исследования закономерностей формообразования взаимодействующих поверхностей детали и инструмента в процессе полирования на основе анализа процесса образования частиц шлама, их взаимодействия в контактной зоне и удаления обрабатываемого материала, несмотря на очевидные перспективы, не привели еще к изучению координатных зависимостей их износа (то есть формы взаимно притирающихся поверхностей).

### **Закономерности формообразования плоских оптических поверхностей при полировании**

Объем  $V_1$  удаленного при полировании материала в зависимости от координат  $\rho$ ,  $z$  и времени  $\tau$  определяется в соответствии с общей формулой [6]

$$V_1(\rho, \tau) = \sum_i V_{0i} c_i(z, \rho, \tau) \Big|_{z=R_{\max}}, \quad (1)$$

где  $R_{\max}$  – максимальная высота микронеровностей обработанной поверхности;  
 $c_i(z, \rho, \tau)$  – концентрация частиц шлама, которая зависит от коэффициента объемного износа  $\eta_i(\rho)$ , размеров  $d_i$  частиц шлама, времени  $\tau_c(\rho)$  их контакта с поверхностью инструмента и концентрации  $n_{0i}$   $i$ -х частиц на поверхности детали;  
 $V_{0i}$  – объем частиц шлама.

Коэффициенты объемного износа  $\eta_i(\rho) = d_i^2 / 4 \beta_i^2(\rho) \tau_c(\rho)$  определяются величинами  $\beta_i(\rho)$ , которые являются решениями уравнений

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

где  $p_a(\rho)$  – распределение номинального давления прижима инструмента к детали по круговым зонам радиуса  $\rho$ ;  
 $L_t$  – длина пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности рабочего слоя инструмента;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  
 $T$  – температура;  
 $S_i$  – площадь поверхности  $i$ -й частицы шлама.

Интенсивность съема обрабатываемого материала при полировании неметаллических материалов в зависимости от времени обработки и радиуса круговых зон определяет форму обработанной поверхности и ее изменение во время обработки. При рассмотрении процесса формообразования оптических поверхностей воспользуемся параметрами кластерной модели [5], значениями технологических параметров настройки станка для двух вариантов взаимного расположения инструмента и обрабатываемых деталей, конструкции инструмента и известными значениями физико-химических характеристик материала детали, инструмента и СОТС.

При взаимном расположении инструмента (верхнее звено) и детали (нижнее звено) полирование плоских поверхностей деталей из стекла осуществляется на шлифовально-полировальном станке мод. ЗШП-350 по методу притира. Плотность стекла марки К8  $\rho_1 = 2,52 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; коэффициент теплопроводности – 0,95 Вт/(м·К); энергия связи – 3,9 эВ (90 ккал/моль); энергия кластера – 5,3 эВ; количество фрагментов O=Si=O в кластере – 96; значение константы Лифшица  $\omega_{123} = 1,36 \cdot 10^{13}$  с<sup>-1</sup>; параметр распределения частиц шлама по размерам (распределения Пуассона) – 0,74; наиболее вероятный размер частиц шлама  $a_v = 3,2$  нм; концентрация частиц шлама –  $1,1 \cdot 10^{23}$  (м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>). Длина пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности рабочего слоя инструмента  $L_t = d_t$ ; скорость его относительного перемещения  $u(\rho) = \omega_1 \rho$ ; время контакта с поверхностью зерна полировального порошка (CeO<sub>2</sub>,  $d_g = 1$  мкм)  $\tau_c(\rho) = d_g / u(\rho)$ ; температура в зоне контакта инст-

румента и детали  $T = 300 \text{ K}$ ; максимальная высота микронеровностей профиля обработанной поверхности  $= 0,1 \text{ мкм}$ .

Распределение давления прижима по круговым зонам детали определяется формулой [7, 8]

$$p_a(\rho) = \frac{2P_0 F[\varphi_k(\rho), k_1]}{\pi D_t (\rho + e_0) \varphi_k(\rho)}, \quad (3)$$

где  $F(\varphi_k(\rho), k_1)$  – неполный эллиптический интеграл 1-го рода;

$$k_1 = \frac{2\sqrt{\rho e_0}}{\rho + e_0} \text{ – модуль интеграла;}$$

функция покрытия –

$$\varphi_k(\rho) = \begin{cases} \pi, & \rho \leq D_t/2 - e_0 \\ \arccos\left(\frac{\rho^2 + e_0^2 - (D_t/2)^2}{2\rho e_0}\right), & \frac{D_t}{2} - e_0 < \rho < \frac{D_t}{2} + e_0 \\ 0, & \rho \geq D_t/2 + e_0 \end{cases} \quad (4)$$

Путем решения численными методами уравнения (2) и определяя коэффициент объемного износа  $\eta_i(\rho)$ , рассчитаны объемы  $V_l$  материала, удаленного при полировании за 1 с, в зависимости от радиуса круговых зон  $\rho$ .

$$\text{Средняя величина объема снятого за 1 с материала } Q_s = \frac{2}{D_s} \int_0^{D_s/2} V_1(\rho, \tau = 1) d\rho = 1,9 \cdot 10^{-10}$$

$\text{м}^3/\text{с}$  незначительно отличается (погрешность расчета  $\delta_1 = 13 \%$ ) от экспериментального значения производительности съема стекла  $Q_e = 1,7 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/\text{с}$  (линейный съем  $\Delta h = 0,4 \text{ мкм/мин}$ ) при полировании (табл., п. 1).

Форма, которую приобретает обрабатываемая поверхность детали за время полирования  $t_0 = 15 \text{ мин}$  при такой зависимости съема  $V_1(\rho, t_0)$ , является вогнутой сферической («яма»). Общее отклонение от плоскостности, которое формируется за единицу времени, оценивается величиной  $\delta h_1 = \frac{V_1(D_s/2) - V_1(0)}{S} = -0,73 \text{ мкм/мин}$  ( $S$  – суммарная площадь

обрабатываемых поверхностей), а неплоскостность обработанной поверхности одной детали за время полирования  $t_0$  составляет 4–5 интерференционных колец ( $\delta N_1 = \delta h_1 \left(\frac{d_l}{D_s}\right)^2 t_0 = 1,2$   $\text{мкм}$  или  $N = 4,86$  интерференционных кольца).

Для определения скорости износа рабочего слоя инструмента в зависимости от координат его круговых зон  $r$  использовалось уравнение, полученное в рамках физико-статистической модели образования и удаления частиц износа [15, 16]:

$$V_2(r) = \frac{\xi_w}{\rho_2 S_k} p_a(r) L_2(r), \quad (5)$$

где:  $\xi_w = \frac{\xi}{p_a}$ ,  $\xi = \rho_2 \cdot \eta_2$  – коэффициенты удельного и массового износа соответственно;

$\rho_2$  – плотность полировального инструмента ( $\text{CeO}_2$ );

$L_2(r) = L_2$  – длина пути трения элемента рабочего слоя инструмента по обрабатываемой поверхности (длина дуги на среднем радиусе детали).

Уравнение (5) можно представить в виде

$$V_2(r) = \frac{L_2 \eta_2(r) p_a(r)}{S_k p_a k_i(r)}, \quad (6)$$

где:  $\eta_2(r)$  – коэффициент объемного износа инструмента;

$S_k$  – номинальная площадь контакта поверхностей инструмента и детали (площадь рабочего слоя инструмента);

$k_i(r)$  – коэффициент заполнения поверхности инструмента рабочим слоем (элементами ЭП1-АКВАПОЛ).

Распределение номинального давления прижима инструмента к детали по круговым зонам радиуса  $r$  и его среднее значение определяются формулами [7, 8]:

$$p_a(r) = \frac{P_0}{\pi D_t r}; \quad \overline{p_a} = \frac{2}{D_t - d_0} \int_{d_0/2}^{D_t/2} p_a(r) dr. \quad (7)$$

Коэффициент объемного износа инструмента определялся, исходя из решения уравнений (2), с учетом известных значений плотности полировального порошка (полирита) –  $6,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; коэффициента теплопроводности – 0,1 Вт/(м·К); энергии кластера – 6,7 эВ; количества фрагментов СеО<sub>2</sub> в кластере – 117; наиболее вероятного размера частиц износа 3,1 нм и площади их поверхности  $S_i = 29,4 \cdot 10^{-18}$  м<sup>2</sup>. Длина пути трения элемента поверхности рабочего слоя инструмента по обрабатываемой поверхности  $L_{t2} = a_v$ ; скорость его относительного перемещения  $u_2(r) = \frac{2 \omega_1 r E(r, k_2)}{\pi}$ ; ( $E(r, k_2)$  – полный эллиптический интеграл 2-

го рода;  $k_2 = \frac{e_0}{r}$  – модуль интеграла) и время контакта  $t_c(r) = a_v / u_2(r)$ . Коэффициент заполнения поверхности инструмента рабочим слоем, при котором достигается его равномерный износ, в соответствии с [7] определяется формулой

$$k_i(r) = [E(r, k_2)]^{-1},$$

которая для рассматриваемого случая может быть выражена следующей приближенной зависимостью ( $[r]$  – м):

$$k_i(r) = \begin{cases} 0, & r < 0,01 \\ 0,8, & 0,01 \leq r \leq 0,02 \\ 0,66, & r > 0,02 \end{cases}.$$

В результате расчета показано, что усредненная величина скорости износа рабочего

слоя инструмента  $V_{2s} = \frac{2}{D_t} \int_0^{D_t/2} V_2(r) dr = 2,0 \cdot 10^{-9}$  м/с удовлетворительно согласуется с экс-

периментальными данными, полученными при полировании оптических деталей в описанных выше условиях ( $2,5 \cdot 10^{-9}$  м/с; линейный износ  $\Delta s = 0,15$  мкм/мин; погрешность расчета  $\delta_2 = 20$  %). При этом форма рабочей поверхности инструмента является выпуклой («бугор»), общее отклонение от плоскостности за время полирования  $t_0$  составляет

$$\delta N_2 = [V_2(D_t/2) - V_2(0)] \cdot t_0 = 0,9 \text{ мкм}.$$

Коэффициент относительного износа  $f = \Delta s / \Delta h = 0,38$ . Коэффициент равномерности

износа инструмента [7]  $\sigma = \left| 1 - \frac{V_2(0)}{V_2(D_t/2)} \right| = 0,5$  (табл., п. 1).

При расположении инструмента в нижнем положении и детали – в верхнем характер износа поверхности рабочего слоя инструмента и форма обрабатываемой плоской поверхности детали в процессе полирования по методу притира противоположны приведенным выше. Анализ точности формообразования плоских оптических поверхностей и характера износа рабочего слоя полировального инструмента, как и в предыдущем случае, выполняется на основе кластерной модели износа [5] взаимопротирающихся поверхностей инструмента и детали и физико-статистической модели образования и удаления частиц износа [6].

При решении уравнений (1)–(2) учитывалось, что скорость относительного перемещения инструмента и детали выражается формулой  $u(\rho) = \frac{2\omega_2 \rho E(\rho, k_3)}{\pi}$  ( $E(\rho, k_3)$  – полный

эллиптический интеграл 2-го рода;  $k_3 = \frac{e_0}{\rho}$  – модуль интеграла;  $\omega_2$  – угловая скорость вращения инструмента), а распределение давления прижима по круговым зонам детали определяется формулой (7) при замене  $\rho \rightarrow r$  и  $D_t \rightarrow D_s$ .

Для определения скорости износа рабочего слоя инструмента в зависимости от координаты  $r$  – радиуса круговых зон в соответствии с формулой (6) и расчета коэффициента объемного износа инструмента  $\eta_2(r)$  учитывались зависимости относительной скорости перемещения инструмента и детали  $u_2 = \omega_2 r$ , распределение давления прижима детали к инструменту:

$$p_a(r) = \frac{2P_0 F(\Psi_k(r), k_4)}{\pi D_s (r + e_0) \Psi_k(r)}, \quad (8)$$

где  $F(\Psi_k(r), k_4)$  – неполный эллиптический интеграл 1-го рода;

$$k_4 = \frac{2\sqrt{re_0}}{r + e_0} \text{ – модуль интеграла;}$$

$\Psi_k(r)$  – функция покрытия, совпадающая с  $\Phi_k(\rho)$  (формула (4)) при замене  $\rho \rightarrow r$  и  $D_t \rightarrow D_s$ .

Коэффициент заполнения поверхности инструмента рабочим слоем, при котором достигается его равномерный износ, в соответствии с [7–8] определяется уравнением

$$k_i(r) = \frac{4\Psi_k(r)}{5\pi F(\Psi_k(r), k_4)} \cdot \frac{r + e_0}{r},$$

которое может быть выражено приближенной формулой ( $[r]$  – м):

$$k_i(r) = \begin{cases} 0,43, & r < 0,03 \\ 0,25, & 0,03 \leq r \leq D_t / 2 \\ 0, & r > D_t / 2 \end{cases}$$

Результаты расчета параметров точности формообразования поверхностей оптических деталей и характеристик износа полировального инструмента в зависимости от конструктивных параметров инструментов и деталей, а также режимных и кинематических параметров настройки станка при обработке плоских поверхностей по методу притира, когда деталь расположена сверху, а инструмент – снизу, представлены в табл. (п.п. 2–4).

**Параметры точности формообразования обработанных поверхностей оптических деталей из стекла и характеристики износостойкости полировального инструмента**

№ пп	Конструктивные параметры инструмента и деталей	Технологические параметры настройки оборудования	Параметры точности формообразования обработанных поверхностей	Характеристики износостойкости инструмента
1	<i>Деталь (внизу):</i> Стекло К8, $D_s = 180$ мм, $d_l = 60$ мм. <i>Инструмент:</i> $D_t = 150$ мм, $d_t = 10$ мм, $N_t = 66$ -ЭП1.	$P_0 = 250$ Н, $\omega_1 = 20,9$ с <sup>-1</sup> , $\omega_2 = 18,9$ с <sup>-1</sup> , $L = 30$ мм, $e_0 = 10$ мм, $t_0 = 15$ мин, СОТС – вода.	$Q_s = 1,9 \cdot 10^{-10}$ м <sup>3</sup> /с, $\Delta h = 0,4$ мкм/мин, $\delta_1 = 13$ %, $N = -4,86$ , $N_{\text{эсп}} = 4-5$ интерференционных колец.	$V_{2s} = 2,0 \cdot 10^{-9}$ м/с, $\Delta s = 0,15$ мкм/мин, $\delta_2 = 20$ %, $f = 0,38$ , $\delta N_2 = 0,9$ мкм, $\sigma = 0,5$ .
2	<i>Деталь (вверху):</i> Стекло К8, ТК14, $D_s = 350$ мм, $d_l = 17$ мм. <i>Инструмент:</i> $D_t = 350$ мм, $d_t = 10$ мм, $N_t = 135$ -ЭП1.	$P_0 = 350$ Н, $\omega_1 = 8,4$ с <sup>-1</sup> , $\omega_2 = 10,5$ с <sup>-1</sup> , $L = 100$ мм, $e_0 = 20$ мм, $t_0 = 60$ мин, СОТС – вода.	$Q_s = 3,9 \cdot 10^{-10}$ м <sup>3</sup> /с, $\Delta h = 0,3$ мкм/мин, $\delta_1 = 19$ %, $N = -0,55$ , $N_{\text{эсп}} = 1-3$ интерференционных кольца.	$V_{2s} = 4,7 \cdot 10^{-9}$ м/с, $\Delta s = 0,25$ мкм/мин, $\delta_2 = 12$ %, $f = 0,8$ , $\delta N_2 = 1,6$ мкм, $\sigma = 0,3$ .
3	<i>Деталь (вверху):</i> Стекло К8, К14, $D_s = 320$ мм, $d_l = 15$ мм. <i>Инструмент:</i> $D_t = 350$ мм, $d_t = 10$ мм, $N_t = 200$ -ЭП1.	$P_0 = 450$ Н, $\omega_1 = 8,4$ с <sup>-1</sup> , $\omega_2 = 10,5$ с <sup>-1</sup> , $L = 125$ мм, $e_0 = 20$ мм, $t_0 = 60$ мин, СОТС – вода.	$Q_s = 5,6 \cdot 10^{-10}$ м <sup>3</sup> /с, $\Delta h = 0,4$ мкм/мин, $\delta_1 = 5$ %, $N = -0,9$ , $N_{\text{эсп}} = 1-2$ интерференционных кольца.	$V_{2s} = 2,2 \cdot 10^{-9}$ м/с, $\Delta s = 0,15$ мкм/мин, $\delta_2 = 15$ %, $f = 0,38$ , $\delta N_2 = 1,5$ мкм, $\sigma = 0,22$ .
4	<i>Деталь (вверху):</i> Стекло К108, К14 $D_s = 150$ мм, $d_l = 17$ мм. <i>Инструмент:</i> $D_t = 170$ мм, $d_t = 10$ мм, $N_t = 36$ -ЭП1.	$P_0 = 200$ Н, $\omega_1 = 18,9$ с <sup>-1</sup> , $\omega_2 = 20,9$ с <sup>-1</sup> , $L = 25$ мм, $e_0 = 10$ мм, $t_0 = 30$ мин, СОТС – вода.	$Q_s = 1,1 \cdot 10^{-10}$ м <sup>3</sup> /с, $\Delta h = 0,3$ мкм/мин, $\delta_1 = 18$ %, $N = -3,56$ , $N_{\text{эсп}} = 3-5$ интерференционных колец.	$V_{2s} = 7,0 \cdot 10^{-9}$ м/с, $\Delta s = 0,35$ мкм/мин, $\delta_2 = 18$ %, $f = 1,2$ , $\delta N_2 = 1,1$ мкм, $\sigma = 0,09$ .

При полировании плоских поверхностей оптических деталей различного назначения и конструкции инструментами со связанным полировальным порошком производительность съема стекла  $Q_s = (1,1-5,6) \cdot 10^{-10}$  м<sup>3</sup>/с (величина линейного съема  $\Delta h = 0,3-0,4$  мкм/мин) линейно возрастает, а скорость износа рабочего слоя инструмента  $V_{2s} = (2,2-7,0) \cdot 10^{-9}$  м/с (величина линейного износа  $\Delta s = 0,15-0,35$  мкм/мин; коэффициент относительного износа  $f = 0,38-1,10$ ) линейно уменьшается при увеличении площади контакта взаимодействующих поверхностей инструмента и детали, то есть количества полировальных элементов ЭП1-АКВАПОЛ.

Зависимости производительности полирования оптических деталей из стекла марки К8 (в м<sup>3</sup>/с), скорости износа рабочего слоя инструмента (в м/с) и коэффициента относитель-

ного износа от количества полировальных элементов на рабочей поверхности инструмента аппроксимированы следующими функциями:

$$\begin{pmatrix} Q_s \\ V_{2s} \\ f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,75 \cdot 10^{-12} \\ -0,3 \cdot 10^{-10} \\ -4,9 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix} N_t + \begin{pmatrix} 13 \cdot 10^{-12} \\ 82 \cdot 10^{-10} \\ 1,4 \end{pmatrix}.$$

Точность формы полированных поверхностей оптических деталей оценивается величиной отклонения от плоскостности  $N = 3-5$  интерференционных колец, а коэффициент равномерности износа рабочего слоя инструмента при этом составляет  $\sigma = 0,09 - 0,30$ .

### Выводы

В результате исследования закономерностей прецизионного формообразования плоских поверхностей оптических деталей показано, что для описания координатных зависимостей интенсивности съема обрабатываемого материала с поверхности детали и скорости износа рабочего слоя инструмента, которые определяют их форму и ее изменение во время процесса обработки, вместо традиционного решения уравнения Престона целесообразно использовать физико-статистическую модель образования и удаления частиц шлама обрабатываемого материала и частиц износа рабочего слоя инструмента, а также основные положения кластерной модели.

Расчеты количества частиц шлама и частиц износа инструмента, определение их размеров, исследование функции распределения по площадям поверхности и коэффициентов объемного износа обрабатываемого материала и инструмента в зависимости от кинематических и режимных параметров процесса полирования позволили с достаточной степенью точности (погрешности не более 20 %) рассчитать координатную зависимость съема обрабатываемого материала и форму обработанной поверхности. Представленная методика расчета показателей формообразования поверхностей оптических деталей может быть использована как для прогнозирования точности формы плоских поверхностей, так и для разработки технологических процессов их полирования и оптимизации конструкции рабочего слоя инструментов со связанными полировальными порошками.

### Литература

1. Komanduri R., Lucca D. A., Tani Y. Technological Advances in Fine Abrasive Processes / Annals of the CIRP.– 1997. – N 46/2. – P. 545–596.
2. ITIRM as a tool for qualifying polishing processes / Oliver W. Fahnle, Torsten Wons, Evelyn Koch, Sebastien Debruyne, Mark Meeder, Silvia M. Booij and Joseph J. M. Braat // Applied Optics.– 41, N 19/1, July 2002. – P. 4036–4038.
3. Filatov Yu. D. Mechanism of formation of surface microrelief in machining glass // Soviet Journal of superhard materials.– 13, N 5, 1991. – P. 63–67.
4. Rogov V. V., Filatov Yu. D., Kottler W., Sobol V. P. New technology of precision polishing of glass optic // Optical Engineering. – 40, August 2001. – P. 1641–1645.
5. Filatov Yu. D. Polishing of aluminosilicate materials with bound abrasive tools // Journal of superhard materials (Allerton Press, New York). – 23, N 3. – 2001 – P. 32–42.
6. Filatov Yu. D. and Sidorko V. I. Statistical approach to wear of nonmetallic workpiece surfaces in polishing // Journal of superhard materials.– 27, N 1.– 2005. – P. 53–60.
7. Filatov Yu. D. Ensuring the accuracy of profiling flat optical surface in lapping // Soviet Journal of superhard materials.– 13, N 4.– 1991.– P. 62–66.
8. Филатов Ю. Д. Определение оптимальной формы инструмента при полировании плоских оптических поверхностей / Трение и износ.– 12, N 3.– 1991.– С. 452–458.

Поступила 12.06.07.