

УДК 621.923

Ю.Д. ФИЛАТОВ (докт. техн. наук, проф., filatov@ism.kiev.ua)

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

О.Я. ЮРЧИШИН (канд. техн. наук, доц.)

Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев, Украина

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Исследованы закономерности образования формы обрабатываемой поверхности оптической детали относительно предложенной модели, в которой предусмотрено только принудительное вращение детали. На основе физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама получены зависимости съема обрабатываемого материала, характеризующие эволюцию формы шлифованной поверхности и величину отклонения от плоскостности.

#### моделирование, формообразование, отклонение от плоскостности

Для реализации процесса формообразования плоских поверхностей оптических деталей, при котором деталь и инструмент попутно вращаются и совершают относительное возвратно-поступательное движение («по штриху»), применим модель, в которой предусмотрено лишь принудительное вращение детали (нижнее звено). Инструмент 1 (верхнее звено) прижимается к детали 2 и вращается в том же направлении за счет сил трения между их притирающимися поверхностями (рис. 1). Для осуществления их взаимного перемещения используется эксцентричное вращение нижнего звена, за счет которого обеспечивается периодическое изменение расстояния между центрами (РМЦ) инструмента и детали –  $O_1O_2$  (ось вращения нижнего звена  $O$  находится между точками  $O_1$  и  $O_2$ ).

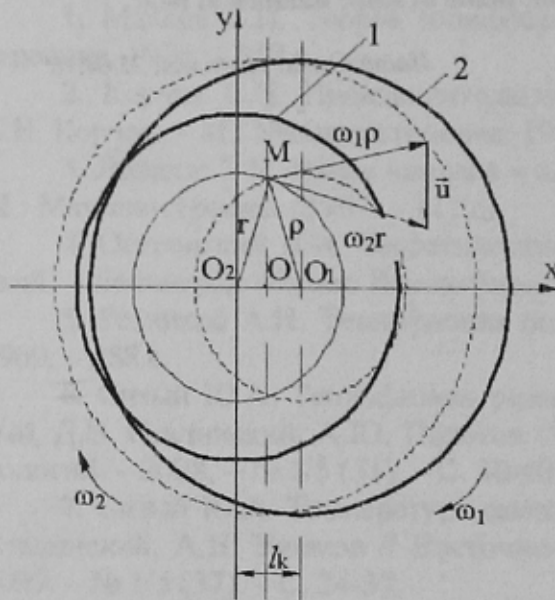


Рис. 1. Схема обработки плоской прецизионной поверхности

В отличие от классического процесса формообразования радиус дуги, по которой движется центр верхнего звена по поверхности нижнего, в этой модели определяется эксцентриситетом  $e_1$  - расстоянием между осью вращения и геометрическим центром поверхности детали, а длина штриха составляет  $L = \pi e_1$ . РМЦ ( $l_k$ ) инструмента и детали в полярной системе координат ( $\xi, \varphi$ ) с полюсом в точке  $O_2$  определяется величиной

$$\xi(\varphi) = e_2 \left[ \cos \varphi + \sqrt{\left(\frac{e_1}{e_2}\right)^2 - (1 - \cos^2 \varphi)} \right], \quad (1)$$

где  $e_2$  - расстояние между осями вращения детали и инструмента,  $e_1 + e_2 = O_1O_2$ , а эквивалентное значение

несимметрии штриха определяется его усредненным значением

$v_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \dot{z}(\varphi) d\varphi$ . Скорость относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности, расположенного в круговой зоне радиуса  $\rho$ , усреднялась по координатным переменным [1, 2]. Для рассматриваемой модели в качестве переменных выбраны: радиус круговых зон инструмента  $r \in [l_k - \rho, l_k + \rho]$  и расстояние между центрами инструмента и детали  $l_k \in [e_1 - e_2, e_1 + e_2]$ . Величина относительной скорости перемещения детали и инструмента выражалась в соответствии с формулой

$$u(\rho) = \frac{1}{2\rho e_2} \int_{e_1 - e_2}^{e_1 + e_2} dl_k \int_{l_k - \rho}^{l_k + \rho} \sqrt{(\omega_2 - \omega_1)(\omega_2 r^2 - \omega_1 \rho^2) + \omega_1 \omega_2 l_k^2} dr. \quad (2)$$

Процесс формообразования плоских поверхностей оптических деталей из стекла марки К8 диаметром 60 мм осуществлялся при помощи инструмента диаметром 46 мм, рабочий слой которого выполнен из алмазных таблеток АТ6 15x5-АСМ 20/14 на связке из полиэтилентерефталата (7 шт.), на шлифовально-полировальном устройстве при следующих режимных и кинематических параметрах: угловые скорости вращения детали и инструмента  $\omega_1 = 83,8 \text{ с}^{-1}$  и  $\omega_2 = 78,5 \text{ с}^{-1}$ , номинальное давление прижима детали к инструменту  $p_a = 8,1 \text{ кПа}$ .

В результате исследования взаимодействия инструмента и детали на основе модели образования и удаления частиц шлама обрабатываемого материала [3] показано, что объем  $V$  удаленного материала за время  $\tau$  обработки в зависимости от координат  $\rho$  и  $z$  определяется в соответствии с формулой

$$V(\rho, \tau) = V_0 \alpha(z, \rho, \tau) |_{z=R_{\max}}, \quad (3)$$

где:  $R_{\max}$  - максимальная высота микронеровностей обработанной поверхности,

$$\alpha(z, \rho, \tau) = n_0 \left[ 1 - \frac{\text{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{\eta(\rho)\tau}}\right)}{\text{erf}\left(\frac{\alpha_r(\rho)}{2\sqrt{\eta(\rho)}}\right)} \right] - \text{концентрация частиц шлама}, \quad (4)$$

$n_0$  - концентрация частиц шлама на поверхности,  
 $\alpha_r(\rho)$  -- коэффициент, определяющий закон движения границы раздела инструмент - обрабатываемая поверхность,

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt - \text{интеграл ошибок},$$

$V_0$  - средний объем частицы шлама.

Коэффициенты объемного износа  $\eta(\rho)$  зависят от наиболее вероятного размера  $a$ , частиц шлама, времени  $\tau_c(\rho)$  их контакта с поверхностью инструмента и определяются формулой  $\eta(\rho) = \alpha_v^2 / 4 \beta^2(\rho) \tau_c(\rho)$ .

Величины  $\beta(\rho)$  являются решениями уравнений

$$f(\beta(\rho)) = D(\rho), \quad (5)$$

где:  $f(\beta) = \frac{e^{-\beta^2}}{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\beta)}$ ,

$$D(\rho) = \frac{L_t}{u_0(\rho) S_i} \sqrt{\frac{\lambda T \tau_c(\rho)}{p_a(\rho)}}$$

$p_a(\rho)$  – 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,

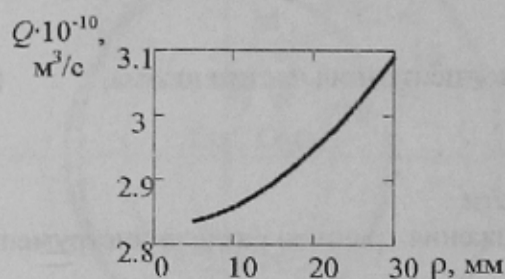
$S_i$  – площадь поверхности частицы шлама,

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности,

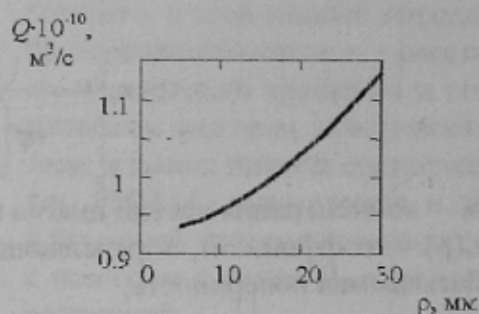
$T$  – температура.

Уравнение (3) позволяет рассчитать интенсивность съема обрабатываемого материала при шлифовании в зависимости от времени обработки и радиуса круговых зон, то есть определить форму обработанной поверхности и ее изменение во время обработки. Концентрация частиц шлама определялась в соответствии с формулой (4) с учетом физико-механических свойств обрабатываемого материала – стекла марки К3 (плотность стекла  $\rho_s = 2,52 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,952$  Вт/(м·К), поверхностная энергия  $\sigma = 0,385$  Дж/м<sup>2</sup>), наиболее вероятный размер частиц шлама  $a_s = 5,35$  мкм [3]) и условий шлифования (коэффициент трения  $k_t = 0,18$ , температура в зоне контакта инструмента и детали  $T = 293$  К) [4].

С учетом того, что время контакта  $\tau_c(\rho) = d_t / u(\rho)$ , длина пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности рабочего слоя инструмента  $L_t = d_t$  ( $d_t = 15$  мм – диаметр алмазных таблеток), а среднее значение  $R_{\max} = 2,1$  мкм, рассчитаны объемы  $V$  материала, удаленного при обработке за 1 с, в зависимости от радиуса круговых зон  $\rho$ . На рис. 2. представлены зависимости величины производительности съема материала от радиуса круговых зон детали, характерные для рассматриваемой модели процесса формообразования – с эксцентриситетом (а) и для классического процесса формообразования (б).



а



б

Рис. 2. Зависимость величины производительности съема материала от радиуса  $\rho$ : а – модель с эксцентриситетом; б – классическая модель.

Почти трехкратное превышение производительности съема обрабатываемого материала по модели с эксцентриситетом (а) над величиной производительности обработки по классической модели (б) объясняется соотношением величин относительной скорости перемещения инструмента и детали в этих моделях.

Усредненная величина объема удаленного материала при обработке плоских оптических поверхностей деталей из стекла в соответствии с моделью а (при кинематиче-

ских параметрах  $e_1 = 5$  мм,  $e_2 = 4$  мм) составила  $Q_s = 1,2 \cdot 10^{-10}$  м<sup>3</sup>/с, что незначительно отличается от экспериментально определенной величины производительности съема стекла  $Q_s = 1,32 \cdot 10^{-10}$  м<sup>3</sup>/с (линейный съем  $3,0 \pm 0,3$  мкм/мин) при обработке в описанных выше условиях (погрешность расчета 7–8 %). Форма обработанной поверхности детали при такой координатной зависимости съема – выпуклая («бугор»), а отклонение от плоскостности определяется величиной  $\delta = \frac{V(D_1/2) - V(0)}{S} \cdot 60$  ( $S$  - площадь обрабатываемой

поверхности,  $D_1$  - диаметр детали). При кинематических параметрах  $e_1 = 5$  мм,  $e_2 = 4$  мм отклонение от плоскостности составляет 1,1 мкм/мин. Неплоскостность выпуклой поверхности детали, обрабатываемой в данных условиях в течение 5 мин в описанных условиях составила  $6,0 \pm 1,0$  мкм.

В результате моделирования процесса формообразования плоских прецизионных поверхностей и исследования влияния кинематических параметров настройки шлифовального устройства  $e_1$  и  $e_2$  на точность формы обработанных поверхностей (отклонение от плоскостности  $\delta$ ) установлено, что форма обрабатываемой поверхности остается выпуклой (рис. 3) при произвольных настройках по кинематическому параметру  $e_1$  при модели (а) и несимметрии  $e_0$  штриха в классическом методе формообразования при модели (б). При увеличении параметра  $e_1$  (рис. 3. а) и параметра  $e_0$  (рис. 3. б) наблюдается уменьшение отклонения от плоскостности обрабатываемой поверхности при любых  $e$ . Зависимость отклонения от плоскостности обрабатываемой поверхности от параметра  $e_2$  (рис. 4. а) и от длины штриха  $L$  (рис. 4. б) для обеих моделей более сложная.

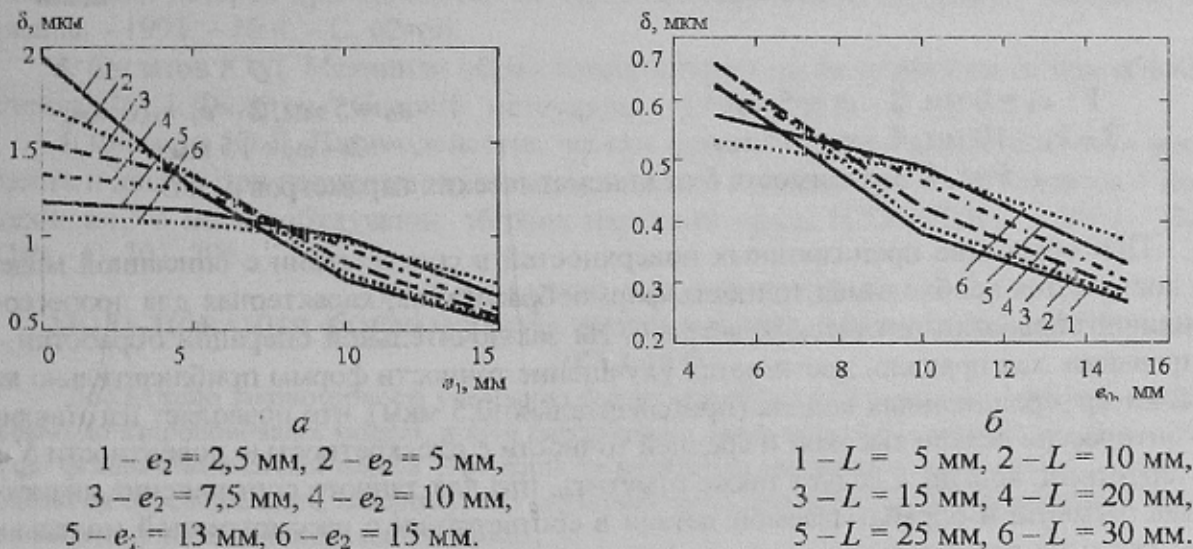


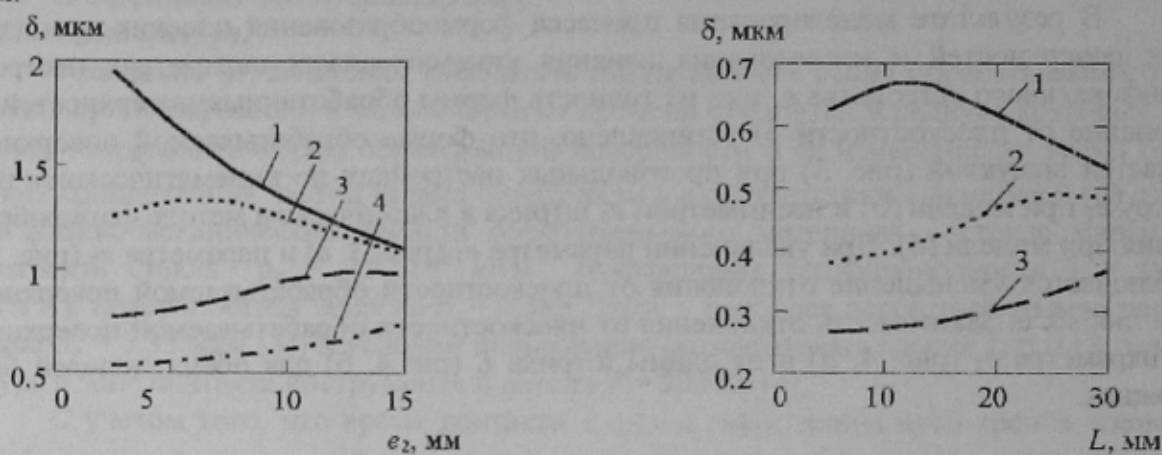
Рис. 3. Зависимость  $\delta$  от кинематических параметров  $e_1$  и  $e_0$

При значениях эксцентриситета  $e_1 = 0$  (классическая схема шлифования) зависимость  $\delta = f(e_2)$  – монотонно-убывающая и лежит в пределах 2,0 – 1,0 мкм/мин; при больших значениях  $e_1$  эта зависимость экстремальная, а ее максимум уменьшается по величине и смещается в сторону больших  $e_2$  при увеличении эксцентриситета  $e_1$ . Аналогичным образом изменяется отклонение от плоскостности при изменении длины штриха  $L$  в классическом процессе формообразования.

Максимальная точность формообразования для модели с эксцентриситетом достигается при кинематических параметрах:  $e_1 = 15$  мм,  $e_2 = 2,5$  мм ( $\delta = 0,5$  мкм/мин). При

этом производительность съема обрабатываемого материала составляет  $2,9 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/\text{с}$  (линейный съем 6,7 мкм/мин), что позволяет выполнять операцию обработки оптических деталей из стекла в течение 3 мин, обеспечивая снятие припуска в 0,02 мм и отклонение от плоскостности приблизительно 1,5 мкм.

При сравнительном анализе процесса обработки указанных деталей в описанных выше условиях по классической схеме формообразования показано, что максимальная точность формы достигается при кинематических параметрах: несимметрия штриха  $e_0 = 15 \text{ мм}$ , длина штриха  $L = 5 \text{ мм}$  ( $\delta_1 = 0,27 \text{ мкм/мин}$ ). При этом производительность съема обрабатываемого материала вдвое меньше и составляет  $1,45 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/\text{с}$  (линейный съем 3,3 мкм/мин), что позволяет выполнять операцию обработки этих деталей в течение 6 мин, обеспечивая снятие припуска в 0,02 мм и отклонение от плоскостности – 1,6 мкм.



**а**  
 1 –  $e_1 = 0 \text{ мм}$ , 2 –  $e_1 = 5 \text{ мм}$ ,  
 3 –  $e_1 = 10 \text{ мм}$ , 4 –  $e_1 = 15 \text{ мм}$ .

**б**  
 1 –  $e_0 = 5 \text{ мм}$ , 2 –  $e_0 = 10 \text{ мм}$ ,  
 3 –  $e_0 = 15 \text{ мм}$ .

Рис. 4. Зависимость  $\delta$  от кинематических параметров  $e_2$  и  $L$

При обработке прецизионных поверхностей в соответствии с описанной моделью достигается необходимая точность формообразования, характерная для процессов финишной обработки оптических деталей. На заключительной операции обработки – полировании, как правило, достигается улучшение точности формы приблизительно на  $N = 2$  интерференционных кольца (приблизительно 0,5 мкм), что позволяет изготавливать оптические детали высокой и средней точности с плоскостностью поверхности  $N = 4$  интерференц. кольца. Следует также отметить, что для данного соотношения диаметров инструмента и обрабатываемой детали в соответствии с рассмотренной моделью, равно как и по классическому методу формообразования, характер изменения формы обработанной поверхности (на «бугор») соответствует увеличению выпуклости независимо от кинематических параметров настройки станка. Это объясняется использованием сплошного инструмента с коэффициентом заполнения его поверхности рабочим слоем  $k(r) = 1$ , который всегда изнашивается неравномерно.

При достижении в процессе обработки плоских оптических поверхностей практически одинаковых результатов по точности формообразования следует отметить в 2 раза большую производительность съема обрабатываемого материала при использовании модельного процесса по сравнению с классическим процессом обработки по методу притира.

Таким образом, исследованы закономерности образования формы обрабатываемой плоской поверхности прецизионной оптической детали из стекла в процессе тонкого алмазного шлифования применительно к предложенной модели реализации процесса шлифования, в которой предусмотрено лишь принудительное эксцентричное вращение детали - нижнего звена. На основе физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама и метода усреднения относительной скорости перемещения по координатным переменным (эксцентриситету  $e_1$  и расстоянию между осями вращения детали и инструмента  $e_2$  - аналогам несимметрии  $e_0$  и длины штриха  $L$  в классическом методе формообразования) получены координатные зависимости величины съема обрабатываемого материала, характеризующие эволюцию формы обработанной поверхности и величину отклонения от плоскостности. Результаты исследования влияния кинематических параметров настройки на точность геометрической формы обрабатываемой поверхности позволили определить их наиболее рациональные значения, при которых достигается требуемая точность формообразования плоских прецизионных поверхностей деталей из оптического стекла марки К8 при тонком алмазном шлифовании. Результаты теоретического анализа формы поверхностей оптических деталей подтверждены экспериментальными данными.

#### Список литературы

1. Филатов Ю.Д. Исследование точности формообразования плоских поверхностей оптических деталей при финишной алмазной обработке / Ю.Д. Филатов // Сверхтв. материалы. - 1985. - № 2. - С. 61-66.
2. Филатов Ю.Д. Обеспечение точности формообразования плоских поверхностей оптических деталей при обработке методом притира / Ю.Д. Филатов // Сверхтв. материалы. - 1991. - № 4. - С. 62-66.
3. Филатов Ю.Д. Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла / Ю.Д. Филатов // Сверхтв. материалы. - 1991. - № 5. - С. 61-65.
4. Филатов Ю.Д. Взаимодействие частиц шлама и износа в зоне контакта инструмента и детали при полировании неметаллических материалов / Ю.Д. Филатов // Високі технології в машинобудуванні: збірник наукових праць НТУ «ХП». - 2009. - Вип. 2 (19). - С. 201-206.

Ю.Д. ФИЛАТОВ, О.Я. ЮРЧИШИН

#### МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ ОПТИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ

Досліджено закономірності утворення форми обробленої поверхні оптичної деталі стосовно до запропонованої моделі, в якій передбачено лише примусове обертання деталі. На основі фізико-статистичної моделі утворення та видалення частинок шламу отримані залежності знімання оброблюваного матеріалу, що характеризують еволюцію форми шліфованої поверхні та величину відхилення від площинності.

моделювання, формоутворення, відхилення від площинності

Yu.D. FILATOV, O.Ja. YURCHISHIN

#### MODELLING FORMATION OF THE FORM OF FLAT SURFACE OF OPTICAL DETAIL

Laws of formation of the form of a processed flat surface of optical detail reference to the offered model in which only compulsory rotation of a detail is provided are investigated. On the basis of physic and statistical model of formation and removal of particles slime, dependences of size removal the processed material, forms characterizing evolution grinding a surface and size of a deviation from flatness are received.

modelling, forming, deviation from planeness

Рецензент: Калафатова Л.П.

Надійшла до редколегії 16.03.10