

УДК 621.923

Ю.Д. Филатов<sup>1</sup> д-р техн.наук, О.Я. Юрчишин<sup>2</sup> канд.техн.наук

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

2 – НТУ Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЦИЗИОННОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*Досліджено закономірності утворення форми обробленої плоскої поверхні прецизійної оптичної деталі в процесі тонкого алмазного шліфування стосовно до запропонованої моделі, в якій передбачено лише примусове обертання деталі. На основі фізико-статистичної моделі утворення та видалення частинок шлама, а також методу усереднення відносної швидкості переміщення інструмента і деталі за координатними змінними отримані залежності знімання оброблюваного матеріалу, що характеризують еволюцію форми шліфованої поверхні та величину відхилення від площинності. Визначено найбільш доцільні значення ексцентриситету та відстані між осями обертання деталі та інструменту, за яких досягається потрібна точність формоутворення.*

*Laws of formation of the form of a processed flat surface of a precision optical detail in the course of diamond grinding with 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, and also a method of averaging of relative speed of moving on coordinate variables dependences of size removal the processed material, forms characterising evolution grinding a surface and size of a deviation from flatness are received. The most rational values eccentricity and distances between axes of rotation of a detail and the tool at which demanded accuracy formation is reached are defined.*

**Постановка проблеми.** Состояние проблемы высокопроизводительного алмазного шлифования неметаллических материалов (НМ) в настоящее время характеризуется значительными достижениями в решении технологических вопросов, связанных с повышением производительности и качества обработки на операциях тонкого (ТАШ) и супертонкого (СТАШ) алмазного шлифования. Вместе с тем, проблема повышения точности формообразования прецизионных поверхностей деталей электронной техники и оптических систем при алмазном шлифовании за счет управления кинематическими и режимными параметрами процесса шлифования и выбора функционально-ориентированных конструкции и характеристики рабочего слоя инструмента решается путем моделирования процесса обработки и применения экспериментально-расчетных методов определения его показателей. Существующие модели процессов механической обработки НМ, а также методики расчета интенсивности съема материала с обрабатываемой детали, износа рабочего слоя инструмента и эволюции их формы при шлифовании НМ базируются на уравнении Престона (Preston, 1927) [1–5], и могут быть применены только при допущениях и приближениях, правомерных лишь для определенных условий обработки. Высокая точность формообразования плоских поверхностей достигается при равномерном износе рабочего слоя инструмента, что может быть обеспечено двумя путями. Один из них связан с использованием оптимальной конструкции рабочего слоя инструмента относительно конкретной схемы обработки, второй – с использованием оптимальных значений режимных и кинематических параметров настройки станка относительно к конкретной схеме обработки и конструкции инструмента.

Для процессов шлифования деталей широкой номенклатуры из различных материалов, которые осуществляются при сложном относительном движении детали и инструмента, наиболее целесообразно использовать модели настройки станка по кинематическим параметрам относительно инструмента определенной конструкции. При моделировании процессов формообразования прецизионных поверхностей деталей из НМ следует учитывать, что современный уровень развития оптической технологии предусматривает возможность осуществления мониторинга качества непосредственно в процессе обработки [6–8].

Процесс диспергирования частиц обрабатываемого материала (шлама) при шлифовании является стохастическим, функции их распределения по размерам и площадям поверхности изучены для стекла [9–10] и многих других материалов. В настоящее время изучено влияние технологических и конструктивных параметров, физико-химических свойств детали, инструмента и смазывающе-охлаждающей технологической среды (СОТС) на эффективность и качество обработки неметаллических материалов, а также разработаны методы расчета интенсивности и характера съема (износа) взаимодействующих поверхностей детали и инструмента, основанные на физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама (износа) [11].

**Моделирование процесса формообразования плоских поверхностей при шлифовании.** Для реализации процесса ТАШ плоских поверхностей, 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 (верхнее звено) прижимается к детали и вращается в том же направлении за счет сил трения между их притирающимися поверхностями (рис. 1). Для осуществления их взаимного перемещения используется не устройство станка, а эксцентричное вращение нижнего звена, за счет которого обеспечивается периодическое изменение расстояния между центрами (РМЦ) инструмента и

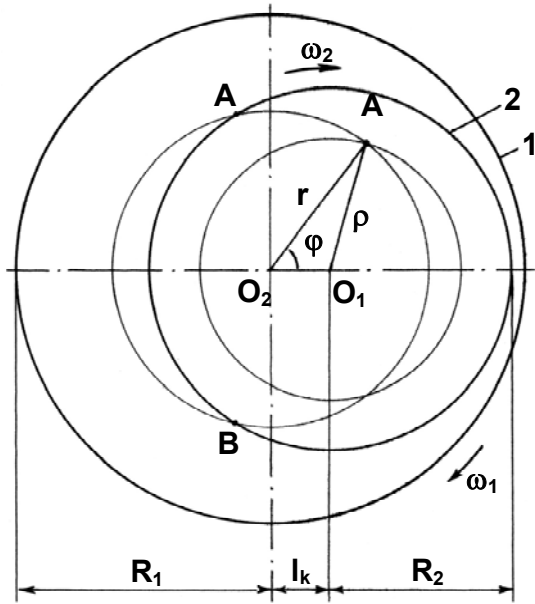


Рис. 1. Схема обработки плоской прецизионной поверхности

детали –  $O_1O_2$  (ось вращения нижнего звена находится между точками  $O_1$  и  $O_2$ ). В отличие от классического процесса формообразования радиус дуги, по которой движется центр верхнего звена по поверхности нижнего, в рассматриваемой 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  $(\xi, \phi)$  с полюсом в точке  $O_2$  определяется величиной (рис. 2)

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

( $e_2$  - расстояние между осями вращения детали и инструмента,  $e_1 + e_2 = O_1O_2$ ), а эквивалентное значение несимметрии штриха определяется его усредненным значением  $e_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \xi(\phi) d\phi$ . Скорость относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности, расположенного в круговой зоне радиуса  $\rho$ , усредненная по координатным переменным: радиусу круговых зон инструмента  $r \in [l_k - \rho, l_k + \rho]$  и расстоянию между центрами инструмента и детали

$l_k \in [e_1 - e_2, e_1 + e_2]$ , выражалась в соответствии с формулой [12, 13]

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

В качестве конкретного примера рассмотрим процесс ТАШ плоских поверхностей оптических деталей из стекла марки К8 диаметром 60 мм инструментом 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  $p_a = 8,1 \text{ кПа}$ , время цикла шлифования 1 мин.

**Закономерности образования формы плоской поверхности при шлифовании.** В результате исследования контактного взаимодействия инструмента и детали на основе модели образования и удаления частиц шлама обрабатываемого материала [10] показано, что объем  $V$  удаленного материала за время  $\tau$  обработки в зависимости от координат  $\rho$  и  $z$  определяется в соответствии с формулой

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

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

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

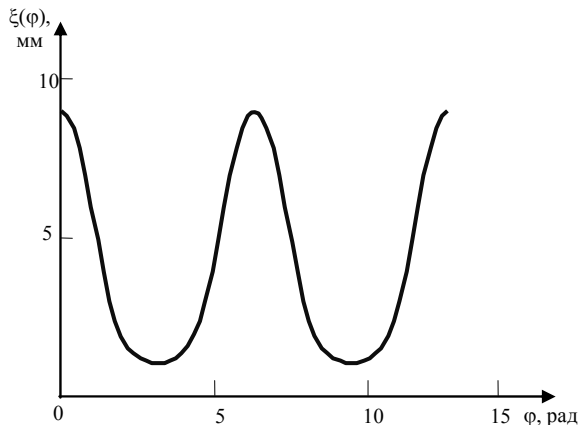


Рис. 2. Периодическое изменение РМЦ инструмента и обрабатываемой детали

$n_0$  - 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  $a_v$  частиц шлама, времени  $\tau_c(\rho)$  их контакта с поверхностью инструмента и определяются формулой

$$\eta(\rho) = a_v^2 / 4 \beta^2(\rho) \tau_c(\rho).$$

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

$$f(\beta_i(\rho)) = D(\rho, i), \quad (5)$$

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

$$D(\rho) = \frac{L_t}{n_0(\rho) S_i} \sqrt{\frac{\lambda T \tau_c(\rho)}{p_a(\rho)}}$$

$p_a(\rho)$  – 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,  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  
 $T$  – температура,  
 $S_i$  – площадь поверхности частицы шлама.

Уравнение (3) позволяет рассчитать интенсивность съема обрабатываемого материала при шлифовании неметаллических материалов 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 (плотность стекла марки К8  $\rho_s = 2,52 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,952 \text{ Вт/(м·К)}$ , поверхностная энергия  $\sigma = 0,385 \text{ Дж/м}^2$ ), наиболее вероятный размер частиц шлама  $a_v = 5,35 \text{ мкм}$  [9, 10] и условий шлифования (коэффициент трения  $k_t = 0,18$ , температура в зоне контакта инструмента и детали  $T = 293 \text{ К}$ ) [11].

С учетом того, что время контакта  $\tau_c(\rho) = d_t / u(\rho)$ , длина пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности рабочего слоя инструмента  $L_t = d_t$  ( $d_t = 15 \text{ мм}$  – диаметр алмазных таблеток), а среднее значение  $R_{\max} = 2,1 \text{ мкм}$ , рассчитаны объемы  $V$  материала, удаленного при ТАШ за 1 с, в зависимости от радиуса круговых зон  $\rho$ . Усредненная величина объема удаленного материала (при кинематических параметрах  $e_1 = 5 \text{ мм}$ ,  $e_2 = 4 \text{ мм}$ ) составила  $Q_s = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/\text{с}$ , что незначительно отличается от экспериментально определенной величины производительности съема стекла  $Q_e = 1,32 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/\text{с}$  (линейный съем  $3,0 \pm 0,3 \text{ мкм/мин}$ ) при ТАШ 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

$$\delta_1 = \frac{V(D_1/2) - V(0)}{S} \cdot 60 \quad (S - \text{площадь обрабатываемой поверхности, } D_1 - \text{диаметр детали}), \text{ которая при}$$

кинематических параметрах  $e_1 = 5 \text{ мм}$ ,  $e_2 = 4 \text{ мм}$  составляет 1,1 мкм/мин, что подтверждается экспериментально. Неплоскостность выпуклой поверхности детали, обрабатываемой в течение 5 мин в описанных условиях, измеренная при помощи оптиметра мод. «ИКВ-3», составила  $6,0 \pm 1,0 \text{ мкм}$ .

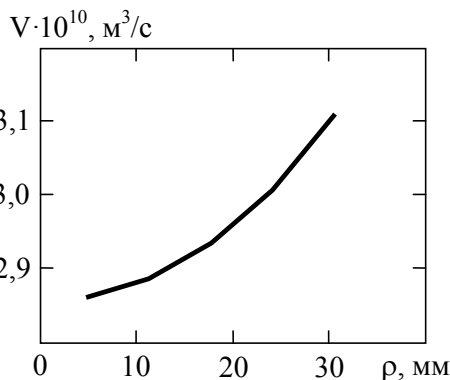


Рис. 3. Зависимость объема удаленного материала от радиуса круговых зон на обрабатываемой поверхности  $\rho$

В результате моделирования процесса формообразования плоских прецизионных поверхностей и исследования влияния кинематических параметров настройки шлифовального устройства  $e_1$  и  $e_2$  на производительность ТАШ и точность формы обработанных поверхностей установлено, что величина объема удаленного материала достигает максимального значения при увеличении  $e_1$  до  $D_1/4$  и уменьшении  $e_2$  (рис. 3), а форма обрабатываемой поверхности остается выпуклой при произвольных настройках по кинематическим параметрам  $e_1$  и  $e_2$ .

При увеличении параметра  $e_1$  наблюдается уменьшение отклонения от плоскостности обрабатываемой поверхности при любых  $e_2$ . Зависимость отклонения от плоскостности обрабатываемой поверхности от параметра  $e_2$  более сложная. При значении эксцентриситета  $e_1 = 0$  (классическая схема шлифования) зависимость  $\delta_1 = f(e_2)$  – монотонно-убывающая и лежит в пределах  $1,5 - 1,0 \text{ мкм/мин}$ ; при больших значениях  $e_1$  эта зависимость экстремальная, а ее максимум уменьшается по

величине и смещается в сторону больших  $e_2$  при увеличении эксцентриситета  $e_1$ . Максимальная точность формообразования достигается при кинематических параметрах:  $e_1 = 15 \text{ мм}$ ,  $e_2 = 2,5 \text{ мм}$  ( $\delta_1 = 0,5 \text{ мкм/мин}$ ). При этом производительность съема обрабатываемого материала составляет  $2,9 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/\text{с}$  (линейный съем  $6,7 \text{ мкм/мин}$ ), что позволяет выполнять операцию ТАШ оптических деталей из стекла в течение 3 мин, обеспечивая снятие припуска в  $0,02 \text{ мм}$  и отклонение от плоскостности приблизительно  $1,5 \text{ мкм}$ . При сравнительном анализе процесса ТАШ 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  $3,3 \text{ мкм/мин}$ ), что позволяет выполнять операцию ТАШ этих деталей в течение 6 мин, обеспечивая снятие припуска в  $0,02 \text{ мм}$  и отклонение от плоскостности –  $1,6 \text{ мкм}$ .

При выполнении операции ТАШ 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  $0,5 \text{ мкм}$ ), что позволяет изготавливать оптические детали высокой и средней точности с плоскостностью поверхности  $N = 4$ . 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  $k_f(r) = 1$ , который всегда изнашивается неравномерно.

При достижении в процессе ТАШ 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.

**Выводы.** 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 вращение детали-нижнего звена. На шлифовально-полировальном устройстве, не обеспечивающем возвратно-поступательного перемещения «по штриху», инструмент (верхнее звено) прижимается к детали и вращается в том же направлении за счет сил трения между взаимопротирающимися поверхностями. На основе физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама, расчета числа всех образовавшихся в процессе шлифования частиц шлама и их объемов (без учета их функции распределения по площадям поверхности), а также метода усреднения относительной скорости перемещения по координатным переменным (эксцентриситету  $e_1$  и расстоянию между осями вращения детали и инструмента  $e_2$  – аналогом несимметрии  $e_0$  и длины штриха  $L$  в классическом методе формообразования) получены координатные зависимости величины съема обрабатываемого материала, характеризующие эволюцию формы шлифованной 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. Preston F.W. The theory and design of plate glass polishing machines. // J. Soc. Glass Technol.– 1927.–11.– P. 214–256.
2. Komanduri R., Lucca D.A., Tani Y. Technological Advances in Fine Abrasive Processes // Annals of the CIRP. – 1997. – No 46/2. – P. 545–596.
3. Oliver W. Fahnle and Hedser van Brug. Novel approaches to generate aspherical optical surfaces // Part of the SPIE Conference on Optical Manufacturing and Testing, Denver, Colorado, July 1999, SPIE, vol. 3782. – P. 170–176.
4. Oliver W. Fahnle, Torsten Wons, Evelyn Koch, Sebastien Debruyne, Mark Meeder, Silvia M. Booij and Joseph J.M. Braat. ПИРМ as a tool for qualifying polishing processes // Applied Optics, July 2002, vol. 41. No 19/1. – P. 4036–4038.
5. D. Okumu Ouma, Duane S. Boning, James E. Chung, William G. Easter, Vivek Saxena, Sudhanshu Misra and Annette Crevasse. Characterization and Modeling of Oxide Chemical-Mechanical Polishing Using Planarization Length and Pattern Density Concepts // IEEE Transactions on semiconductor manufacturing, vol. 15, No 2, May 2002. – P. 232–243.
6. Filatov A. Yu., Popereenko L.V. In Situ Ellipsometry of Surface Layer of Nonmetallic Transparent Materials During Its Finish Processing // Appl. Surf. Sci., 2006. – 253 (1). – P. 163–166.
7. R.-J. van der Bijl, O.W. Fahnle, H. van Brug, J. J.M. Braat. In-process monitoring of grinding and polishing of optical surfaces // Applied Optics., July 2000, vol. 39, No 19. – P. 3300–3303.
8. Blümel T., Bosse M., Kurz M., On-Machine Testing of Optical Quality // Europhotonics. – February/March 2008. – P. 26–28.
9. Филатов Ю.Д., Бурман Л.Л., Погос В.В. Закономерности распределения диспергируемых частиц стекла по размерам // Сверхтв. материалы. – 1989. – № 5. – С. 53–55.
10. Филатов Ю.Д. Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла // Сверхтв. материалы. – 1991. – № 5. – С. 61–65.
11. Филатов Ю.Д. Взаимодействие частиц шлама и износа в зоне контакта инструмента и детали при полировании неметаллических материалов // Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ «ХПІ». – Харків.– 2009.– Вип. 2 (19).– С. 201–206.
12. Филатов Ю.Д. Исследование точности формообразования плоских поверхностей оптических деталей при финишной алмазной обработке // Сверхтв. материалы. – 1985. – № 2. – С. 61–66.
13. Филатов Ю.Д. Обеспечение точности формообразования плоских поверхностей оптических деталей при обработке методом притира // Сверхтв. материалы. – 1991. – № 4. – С. 62–66.