

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
RADIO ELECTRONICS, INSTRUMENT MAKINGУДК 681.7.023.72
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-429-437>Поступила в редакцию 21.12.2018
Received 21.12.2018**А. С. Козерук¹, Д. Л. Мальпика^{1,2}, А. А. Сухоцкий¹, В. И. Юринок¹, М. И. Филонова¹,
В. И. Шамкалович¹**¹*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*²*Университет Якамбу, Баркисимето, Венесуэла***АНАЛИЗ КИНЕМАТИКИ КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ
ПРИ ОБРАБОТКЕ ЛИНЗ**

Аннотация. Используя первую аксиому статики для равновесия системы двух сил, приложенных к точкам твердого тела, обосновано, что давление в зоне контакта инструмента с линзой в процессе ее абразивной обработки по методу свободного притирания распределено неравномерно. С учетом этого графически представлен характер распределения эпюры давления, отображающий условие равновесия при повороте инструмента вокруг центра сферической поверхности линзы относительно ее оси симметрии, и записано усилие прижима притирающихся звеньев, на основе которого предложено выражение для определения текущего давления в произвольно выбранной точке на поверхности линзы. Получено выражение для определения непрерывно изменяющейся площади контакта инструмента и линзы в процессе ее обработки по методу свободного притирания. Выполнен расчет текущего давления в различных точках диаметрального сечения зоны соприкосновения притирающихся поверхностей инструмента, совершающего колебательное движение, и линзы. В результате выявлена неравномерность распределения давления в исследуемой зоне, причем минимальное значение этого показателя имеет место в зоне контакта края инструмента с линзой, а максимальное – в зоне контакта края линзы с инструментом. Отмеченная неравномерность усиливается с увеличением угла отклонения инструмента от оси симметрии линзы. Проведены теоретические и экспериментальные исследования влияния диаметра инструмента на процесс полирования линзы в условиях свободного притирания, при котором исключается появление локальной погрешности в краевой зоне последней, обусловленное перепадом эпюры давления между притирающимися поверхностями в процессе переносного движения инструмента. При этом установлено, что во избежание «завала края» необходимо использовать инструмент диаметром не менее 0,8 от диаметра линзы (в случае, если она является нижним звеном). Полученные результаты позволяют назначить оптимальный диаметр инструмента в зависимости от размеров обрабатываемой линзы без проведения предварительных трудоемких экспериментов и могут быть использованы в оптическом и оптико-электронном приборостроении.

Ключевые слова: линза, свободное притирание, эпюра давления, зона сопряжения, возвратно-вращательное движение, угол наклона, локальная погрешность

Для цитирования: Анализ кинематики контакта инструмента и заготовки при обработке линз / А. С. Козерук [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, №4. – С. 429–437. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-429-437>

A. S. Kozeruk¹, Y. L. Malpica^{1,2}, A. A. Sukhotski¹, V. I. Yurinok¹, M. I. Filonova¹, V. I. Shamkalovich¹¹*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*²*University Yacambu, Barquisimeto, Venezuela***ANALYSIS OF KINEMATICS OF TOOL AND WORK PIECE CONTACT DURING LENS PROCESSING**

Abstract. Using the first axiom of statics for equilibrium of a two forces system applied to points of a solid body, it was verified, that the pressure in the zone of contact of a tool with a lens during its abrasive processing by the grinding-free method is unevenly distributed. With this in mind, the nature of the distribution of the pressure profile has been presented

graphically, showing the equilibrium condition when the tool is rotated around the center of the spherical surface of the lens relative to its axis of symmetry and the clamping force of the unions that are grinded has been recorded. On that base an expression is proposed for determining the current pressure at an arbitrarily chosen point on the surface of the lens. An expression for determining the continuously changing contact area of the instrument and the lens during its processing by grinding-free method is obtained. The calculation of current pressure at different points of the diametrical cross-section of the contact zone of the lapping surfaces of the tool, performing oscillatory motion, and the lens is performed. As a result, the uneven distribution of pressure in the area under study was revealed, with the minimum value of this indicator taking place in the zone of contact of the tool edge with the lens, and the maximum in the zone of contact of the lens edge with the tool. The observed non-uniformity increases with an increase in the angle of deviation of the tool from the axis of symmetry of the lens. Theoretical and experimental studies of the influence of the tool diameter on the polishing process of the lens under conditions of free grinding, which prevents the occurrence of local error in the marginal zone of the latter due to the pressure drop between the grinding surfaces during the instrument movement, are carried out. At the same time it was found that in order to avoid a “blockage of the edge”, it is necessary to use a tool with diameter of at least 0.8 of the diameter of the lens (in case it is the lower link). The obtained results allow assigning the optimal diameter of the tool depending on the size of the processed lens without preliminary laborious experiments and can be used in optical and optoelectronic instrument making.

Keywords: lens, grinding-free method, pressure profile, interface zone, return-rotational movement, angle of inclination, local error

For citation: Kozeruk A. S., Malpica Y. L., Sukhotski A. A., Yurinok V. I., Filonova M. I., Shamkalovich V. I. Analysis of kinematics of tool and work piece contact during lens processing. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 4, pp. 429–437 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-429-437>

Введение. В оптическом приборостроении при изготовлении деталей из стекла наиболее часто используется метод свободного притирания инструмента и заготовки, позволяющий получить две точные поверхности одинаковой кривизны (одна выпуклая, другая вогнутая). Один из характерных признаков данного метода – непрерывное изменение площади контакта притирающихся тел, что приводит к непостоянству давления в пределах данной площади. И поскольку давление является существенным фактором, определяющим показатели качества и производительности процесса, то для математического моделирования закономерностей срабатывания инструмента и заготовки, что необходимо для инженерного управления процессом формообразования оптических деталей, требуется выявить функциональную связь рассматриваемого фактора с законом переносного (возвратно-вращательного) перемещении инструмента по поверхности линзы. Как показал анализ отечественных и зарубежных литературных источников, подобной функциональной связи в настоящее время не выявлено. Предлагаемая работа направлена на решение обозначенной актуальной проблемы.

Анализ эпюры давления. При обработке оптических деталей, в том числе линз, по методу свободного притирания интенсивность съема припуска с заготовки, согласно гипотезе Ф. Престона, можно представить в виде [1]

$$u = ckpv, \quad (1)$$

где c – коэффициент, зависящий от условий обработки; k – коэффициент износостойкости стекла; p – давление в зоне контакта; v – скорость скольжения инструмента относительно произвольно выбранной точки на обрабатываемой поверхности заготовки.

Для анализа влияния параметра p в приведенной формуле на процесс обработки по методу свободного притирания будем исходить из условия равновесия верхнего звена (в нашем случае инструмента), которое имеет вид [2]

$$Q - P = 0, \quad (2)$$

где Q – рабочее усилие прижима, P – равнодействующая давления.

Согласно первой аксиоме статики, для равновесия системы двух сил, приложенных к точкам твердого тела, необходимо и достаточно, чтобы эти силы были равны по модулю и действовали вдоль одной прямой, проходящей через точки их приложения, в противоположных направлениях [3]. Следовательно, равнодействующая давления приложена в центре рабочей поверхности верхнего звена и в процессе его колебательного движения смещена относительно центра тяжести зоны контакта. Последнее означает, что давление в зоне контакта распределено неравномерно, в противном случае его равнодействующая была бы приложена в центре тяжести.

На рис. 1 графически представлен характер распределения эпюры давления p , отображающий условие равновесия (2) при повороте инструмента I вокруг центра сферы радиусом R на угол φ относительно оси симметрии линзы 2. Текущую площадь контакта S_T инструмента с деталью на этом рисунке можно представить в виде двух площадей: $S_{AB_1KB_2}$ и $S_{CB_1KB_2}$. Тогда усилие прижима Q запишется:

$$Q = p_1 S_{AB_1KB_2} + p_2 S_{CB_1KB_2}, \quad (3)$$

где p_1 и p_2 – давление на площадях соответственно $S_{AB_1KB_2}$ и $S_{CB_1KB_2}$.

Поскольку в уравнении (3) слагаемые $p_1 S_{AB_1KB_2}$ и $p_2 S_{CB_1KB_2}$ представляют собой реакции R_1 и R_2 рассматриваемых участков линзы, а суммарный крутящий момент относительно точки K , расположенной на оси симметрии рабочей поверхности инструмента I , равняется нулю, то справедливо равенство

$$R_1 a_1 - R_2 a_2 = 0,$$

или

$$p_1 S_{CB_1KB_2} a_1 - p_2 S_{AB_1KB_2} a_2 = 0.$$

Отсюда

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{S_{AB_1KB_2} a_2}{S_{CB_1KB_2} a_1}, \quad (4)$$

где a_1 и a_2 – расстояния от оси симметрии инструмента I до центра площадей $S_{CB_1KB_2}$ и $S_{AB_1KB_2}$ соответственно, причем, как видно из рис. 1, $a_1 = \frac{d_{\text{л}}}{4}$, $a_2 = \frac{BT}{2}$, где $BT = K'C = R \cdot \sin \varphi'$, $\varphi = \varphi_{\text{л}} - \varphi$, $\varphi_{\text{л}} = \arcsin \frac{d_{\text{л}}}{2R}$ – угол раствора линзы диаметром $d_{\text{л}}$; $d_{\text{и}}$ – диаметр инструмента. Следовательно

$$a_2 = \frac{R \cdot \sin \left(\arcsin \frac{d_{\text{л}}}{2R} - \varphi \right)}{2}.$$

Определив тем или иным образом значение давления, например p_1 , из равенства (4) можно рассчитать величину давления p_2 .

Введем прямоугольную систему координат $O'x'y'$, расположенную, как показано на рис. 1, и совершающую колебательные движения вместе с инструментом I , при этом ось $O'y'$ постоянно параллельна оси симметрии инструмента. В данной системе координат через точки с координатами $(0, p_1)$ и (x'_2, p_2) проведем прямую, угол наклона α которой запишется следующим образом:

$$\text{tg} \alpha = \frac{p_2 - p_1}{x'_2}, \quad (5)$$

при этом текущее давление $p_{x'}$ определяется по формуле

$$P_{x'} = x' \text{tg} \alpha, \quad (6)$$

где x' – абсцисса произвольно выбранной точки на поверхности линзы в зоне ее контакта с инструментом, а x'_2 – абсцисса точки на краю линзы (в точке C на рис. 1).

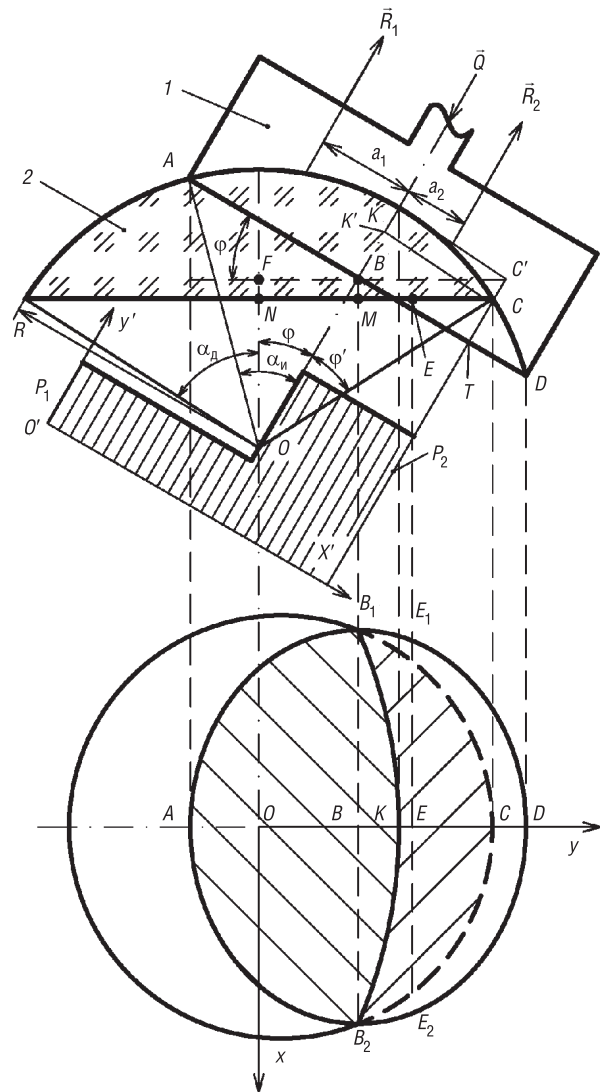


Рис. 1. Характер распределения эпюры давления в зоне сопряжения инструмента с линзой (вверху) и площадь их контакта (внизу)

Fig. 1. The nature of the distribution of the pressure profile in the interface of the tool with the lens (above) and the area of their contact (at the bottom)

Для определения параметра x'_2 обратимся к рис. 1, из которого видно, что $x'_2 = AB + BT$, где $AB = \frac{d_n}{2}$. Следовательно

$$x'_2 = \frac{d_n}{2} + R \sin \left(\arcsin \frac{d_n}{2R} - \varphi \right). \quad (7)$$

Используя равенства (4)–(7) и эмпирическое выражение для p_2

$$p_2 = p_0 + p_0 \frac{S_{\max} - S_T}{S_{\max}}, \quad (8)$$

по формуле (6) можно рассчитать давление в окрестности выбранной точки на обрабатываемой поверхности линзы.

Входящее в равенство (8) p_0 представляет собой значение давления в зоне сопряжения инструмента и линзы при их полном контакте, а S_{\max} – максимальную площадь соприкосновения инструмента и заготовки, которая равна площади рабочей поверхности инструмента и определяется из выражения

$$S_{\max} = 2\pi R \left(R - \sqrt{R^2 - \frac{d_n^2}{4}} \right). \quad (9)$$

При этом

$$S_{CB_1KB_2} = S_T - S_{AB_1KB_2}, \quad (10)$$

где $S_{AB_1KB_2} = \frac{S_{\max}}{2}$, то есть

$$S_{AB_1KB_2} = \pi R \left(R - \sqrt{R^2 - \frac{d_n^2}{4}} \right). \quad (11)$$

Определение площади контакта инструмента и линзы. Для определения площади S_T воспользуемся интегралом первого рода [4]

$$S_T(\varphi) = \iint_{S_{xy}} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2} dx dy, \quad (12)$$

где S_{xy} – проекция площади соприкосновения инструмента и линзы на плоскость Oxy прямоугольной системы координат, начало которой расположено в центре кривизны притирающихся звеньев (см. рис. 1); $z = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2}$ – уравнение сферической поверхности линзы радиусом кривизны R .

Так как

$$\frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{x}{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}}, \text{ а } \frac{\partial z}{\partial y} = -\frac{y}{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}},$$

то

$$\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2} = \frac{R}{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}}. \quad (13)$$

Поскольку, как видно из рис. 1, площадь S_{xy} ограничена дугой E_1AE_2 в виде эллипса с большой BB_1 и малой AB полуосями и дугой E_1CE_2 в виде окружности радиусом $\frac{d_n}{2}$ и состоит из двух равных между собой площадей ACE_1 и ACE_2 , равенство (12) с учетом выражения (13) можно записать следующим образом:

$$S_T(\varphi) = 2R \int_{y_A}^{y_E} \left(\int_0^{b(\varphi)} \frac{dx}{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}} \right) dy + 2R \int_{y_E}^{d_n/2} \left(\int_0^{\sqrt{(d_n/2)^2 - y^2}} \frac{dx}{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}} \right) dy. \quad (14)$$

В (14) $b(\varphi)$ – часть дуги CE_1AE_2 в виде эллипса E_1AE_2 ; $y_A = \left(-\frac{d_n}{2}\right)\cos\varphi + OB\sin\varphi$; $y_E = FB + MB\operatorname{ctg}\varphi$, где, как видно из рис. 1, $FB = OB\sin\varphi$, $MB = OF - ON$, $OF = OB\cos\varphi$, $ON = \sqrt{R^2 - \left(\frac{d_n}{2}\right)^2}$, то есть

$$y_E = OB\sin\varphi + \left(OB\cos\varphi - \sqrt{R^2 - \left(\frac{d_n}{2}\right)^2} \right) \operatorname{ctg}\varphi,$$

где φ – угол между осями симметрии инструмента и линзы (угол отклонения инструмента).

Для получения уравнения рассматриваемого эллипса воспользуемся уравнением плоскости ABE верхнего звена (в нашем случае линзы), повернутой на угол φ и проходящей через точку B с координатами $(0, OB\sin\varphi, OB\cos\varphi)$ в направлении нормального вектора с координатами $(0, \sin\varphi, \cos\varphi)$. В результате запишем

$$0(x - 0) + \sin\varphi(y - OB \cdot \sin\varphi) + \cos\varphi(z - OB \cdot \cos\varphi) = 0,$$

откуда

$$y\sin\varphi + z\cos\varphi = OB.$$

Следовательно, искомое выражение эллипса получим из решения системы уравнений

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = R^2, \\ y\sin\varphi + z\cos\varphi = OB. \end{cases}$$

С учетом того, что $R^2 - (OB)^2 = \left(\frac{d_n}{2}\right)^2$, после соответствующих преобразований уравнение эллипса принимает вид

$$\frac{x^2}{\left(\frac{d_n}{2}\right)^2} + \frac{(y - OB\sin\varphi)^2}{\left(\frac{d_n}{2}\cos\varphi\right)^2} = 1.$$

Отсюда

$$b(\varphi) = x = \frac{d_n}{2} \sqrt{1 - \frac{(y - OB\sin\varphi)^2}{\left(\frac{d_n}{2}\cos\varphi\right)^2}}. \tag{15}$$

Поскольку дуга E_1CE_2 является частью окружности

$$x^2 + y^2 = \left(\frac{d_n}{2}\right)^2, \tag{16}$$

выражение (14) с учетом равенств (15) и (16) в итоге запишется следующим образом:

$$S_T(\varphi) = 2R \int_{y_A}^{y_E} \arcsin \frac{\frac{d_n}{2} \sqrt{1 - \frac{(y - OB\sin\varphi)^2}{\left(\frac{d_n}{2}\cos\varphi\right)^2}}}{\sqrt{R^2 - y^2}} dy + 2R \int_{y_E}^{\frac{d_n}{2}} \arcsin \frac{\sqrt{\left(\frac{d_n}{2}\right)^2 - y^2}}{\sqrt{R^2 - y^2}} dy. \tag{17}$$

Для получения выражения, позволяющего определить максимально допустимую величину амплитуды возвратно-вращательного движения инструмента по обрабатываемой поверхности заготовки L_{\max} , при которой $S_{CB_1KB_2}$ составляет половину площади инструмента, рассмотрим рис. 3. На этом рисунке показано крайнее положение инструмента I (точки диаметрального сечения инструмента B_1 и B_2 не выходят за край заготовки 2), обеспечивающее выполнение предъявленных требований к площади $S_{AB_1KB_2}$.

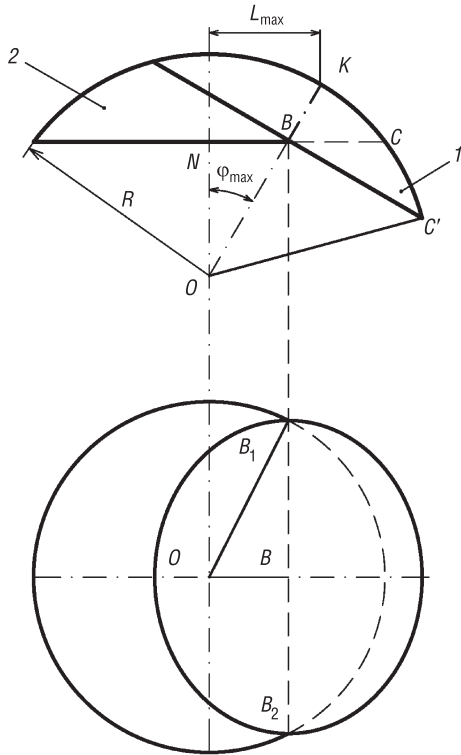


Рис. 2. К определению максимального угла отклонения инструмента на поверхности линзы (вверху) и площадь их контакта (внизу)
 Fig. 2. To the definition of the maximum deflection angle of the tool on the lens surface (above) and the area of their contact (at the bottom)

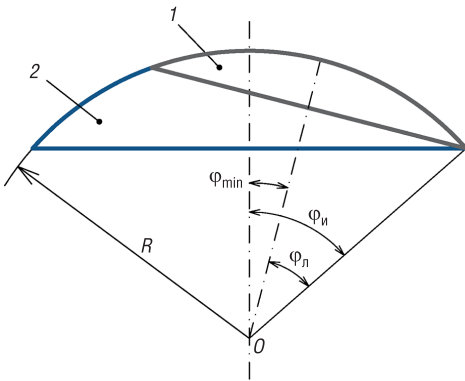


Рис. 3. К определению минимального угла отклонения инструмента на поверхности линзы

Fig. 3. To determine the minimum angle of deflection of the tool on the surface of the lens

с радиусом сферической поверхности до 100 мм возрастает, что свидетельствует о существенной неравномерности распределения давления в зоне обработки линз с малым радиусом кривизны. Однако с увеличением R зависимость $\alpha(R)$ стабилизируется, что указывает на более равномерное распределение давления по обрабатываемой поверхности.

Авторами настоящей статьи проведен расчет $\alpha(R)$ для линз, близких к полусфере, в случае их обработки прежним инструментом. Результаты такого расчета для $R = 51\div 59$ мм представлены

Из треугольника ONB на рис. 2 видно, что максимально допустимый угол отклонения инструмента φ_{\max} равен

$$\varphi_{\max} = \arcsin \frac{NB}{OB},$$

где $NB = \sqrt{OB_1^2 - BB_1^2} = \frac{\sqrt{d_{\text{л}}^2 - d_{\text{и}}^2}}{2}$ (из треугольника OOB_1 на рис. 2), а $OB = R - BK = \sqrt{R^2 - \frac{d_{\text{и}}^2}{4}}$ (из треугольника OBC' на рис. 3). Следовательно,

$$\varphi_{\max} = \arcsin \frac{\sqrt{d_{\text{л}}^2 - d_{\text{и}}^2}}{\sqrt{4R^2 - d_{\text{и}}^2}}, \quad (18)$$

а минимальное значение φ , как видно из рис. 3, определяется из соотношения

$$\varphi_{\min} = \varphi_{\text{л}} - \varphi_{\text{и}}, \quad (19)$$

где $\varphi_{\text{и}} = \arcsin \frac{d_{\text{и}}}{2R}$ – угол раствора инструмента.

Исследование давления в зоне контакта инструмента и линзы. Используя изложенное, выполнили расчет текущего давления p'_x в различных точках x' диаметрального сечения зоны соприкосновения притирающихся поверхностей линзы и инструмента при колебательном движении последнего. Результаты расчета представлены на рис. 4 для линзы диаметром и радиусом кривизны сферической поверхности по 100 мм, диаметр инструмента был равен 70 мм. Расчет проводился для четырех положений инструмента: $\varphi_1 = 65^\circ$, $\varphi_2 = 70^\circ$, $\varphi_3 = 75^\circ$ и $\varphi_4 = 80^\circ$. Анализ результатов свидетельствует о неравномерности распределения давления в исследуемой зоне: минимальное значение p'_x имеет место в зоне контакта края инструмента с линзой (начальные точки зависимостей на рис. 4), а максимальное – в зоне контакта края линзы с инструментом (конечные точки зависимостей $p'_x(x')$ на рис. 4). Отмеченная неравномерность усиливается с увеличением угла отклонения инструмента от оси симметрии линзы и отображается увеличением угла наклона α зависимостей на рис. 4.

На рис. 5 приведены закономерности изменения угла α в зависимости от радиусов кривизны сферической поверхности линз в пределах от 60 до 400 мм для принятых положений инструмента. Эти изменения имеют нелинейный характер, причем их наклон с увеличением угла наклона инструмента в случае использования линз

на рис. 6. Анализ этих результатов показывает, что при углах наклона инструмента до $\varphi_1 = 65^\circ$ происходит, в отличие от данных на рис. 5, постепенное увеличение $\alpha(R)$ (кривая 1), что указывает на более высокое давление в краевой зоне линзы при обработке ее инструментом диаметром 70 мм и приводит к так называемому завалу края. При наклоне инструмента до $\varphi_2 = 70^\circ$ такое явление имеет место, как видно из рис. 6, только для радиуса кривизны линзы до 56 мм (кривая 2). При дальнейшем увеличении угла φ зависимость $\alpha(R)$ стабилизируется – с возрастанием R угол α постепенно уменьшается (кривые 3 и 4).

Для выяснения условий, при которых кривые $\alpha(R)$ не имеют точек перегиба, то есть происходит плавное их уменьшение для любого радиуса кривизны линзы, выполнен расчет α для R линз в пределах от 51 до 80 мм диаметром 100 мм при их обработке инструментами диаметром от 65 до 90 мм. Результаты расчета представлены в таблице. Ее анализ показывает, что для достижения плавного изменения α , что требуется для линз с любым радиусом кривизны, начиная с полусферы, во избежание «завала края» необходимо использовать инструмент диаметром не менее 0,8, а не $0,7d_{л}$ (в случае, если линза является нижним звеном), как это принято считать в производственной практике [5].

С целью проверки полученных результатов расчета проводилась финишная обработка (полирование) выпуклой поверхности линзы радиусом кривизны 120,85 мм и диаметром 90 мм по методу свободного притирания на рычажном полировально-доводочном станке модели 6ПД-200.

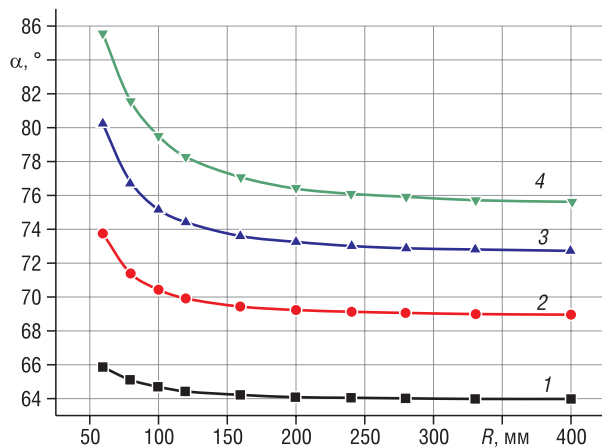


Рис. 5. Закономерности изменения угла наклона α зависимостей $p_x(x')$ для линз диаметром 100 мм радиусами кривизны от 60 до 400 мм при углах отклонения инструмента $\varphi_1 = 65^\circ$ (1), $\varphi_2 = 70^\circ$ (2), $\varphi_3 = 75^\circ$ (3) и $\varphi_4 = 80^\circ$ (4). Диаметр инструмента 70 мм

Fig. 5. Patterns of change in the angle of inclination of α dependencies $p_x(x')$ for lenses with a diameter of 100 mm and radius of curvature from 60 to 400 mm at the tool deflection angles $\varphi_1 = 65^\circ$ (1), $\varphi_2 = 70^\circ$ (2), $\varphi_3 = 75^\circ$ (3) и $\varphi_4 = 80^\circ$ (4). Tool diameter 70 mm

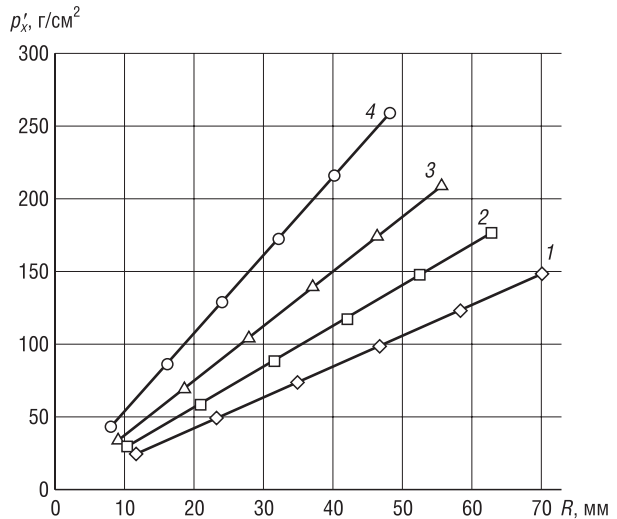


Рис. 4. Распределение текущего давления в различных точках диаметального сечения зоны соприкосновения инструмента диаметром 70 мм и линзы диаметром 100 мм при углах отклонения инструмента $\varphi_1 = 65^\circ$ (1), $\varphi_2 = 70^\circ$ (2), $\varphi_3 = 75^\circ$ (3) и $\varphi_4 = 80^\circ$ (4)

Fig. 4. Distribution of the current pressure at various points of the diametrical cross section of the contact area of the tool with a diameter of 70 mm and a lens with a diameter of 100 mm at the tool deflection angles $\varphi_1 = 65^\circ$ (1), $\varphi_2 = 70^\circ$ (2), $\varphi_3 = 75^\circ$ (3) и $\varphi_4 = 80^\circ$ (4)

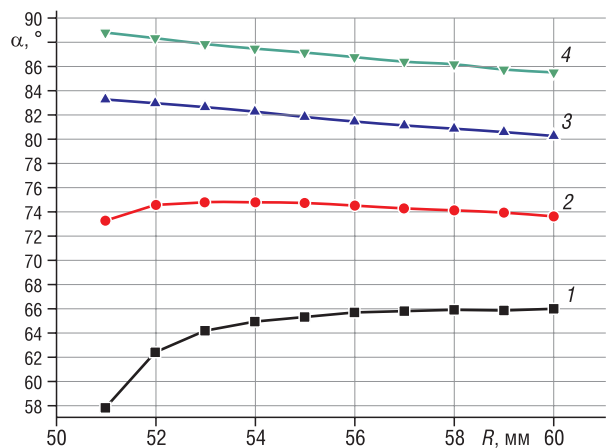


Рис. 6. Закономерности изменения угла наклона α зависимостей $p_x(x')$ для линз диаметром 100 мм радиусами кривизны от 51 до 59 мм при углах отклонения инструмента $\varphi_1 = 65^\circ$ (1), $\varphi_2 = 70^\circ$ (2), $\varphi_3 = 75^\circ$ (3) и $\varphi_4 = 80^\circ$ (4). Диаметр инструмента 70 мм

Fig. 6. Patterns of change in the angle of inclination of α dependencies $p_x(x')$ for lenses with a diameter of 100 mm and radius of curvature from 51 to 59 mm at the tool deflection angles $\varphi_1 = 65^\circ$ (1), $\varphi_2 = 70^\circ$ (2), $\varphi_3 = 75^\circ$ (3) и $\varphi_4 = 80^\circ$ (4). Tool diameter 70 mm

Значения угла наклона α зависимостей $p'_x(x')$ для линз радиусами кривизны от 51 до 80 мм диаметром 100 мм при обработке их инструментами диаметром от 65 до 90 мм

The values of angle of inclination of α dependencies $p'_x(x')$ for lenses with radiuses of curvature from 51 to 80 mm with a diameter of 100 mm when processing them with tools with a diameter from 65 to 90 mm

Угол наклона α , град	Диаметр инструмента d_n , мм											
	65			75			80			90		
	Радиус кривизны линзы R , мм			Радиус кривизны линзы R , мм			Радиус кривизны линзы R , мм			Радиус кривизны линзы R , мм		
	51	60	80	51	60	80	51	60	80	51	60	80
α_1	25,43	65,61	67,37	62,81	63,73	62,25	62,87	60,72	58,99	57,06	53,09	51,89
α_2	64,53	75,71	74,32	73,93	70,75	67,80	72,30	66,80	63,67	63,47	56,18	54,36
α_3	81,90	82,25	79,75	82,67	77,26	72,78	81,03	73,03	67,97	72,37	59,12	56,45
α_4	88,96	86,97	84,30	88,42	83,77	77,53	87,71	79,39	72,06	82,39	63,79	57,88

Обработка выполнялась водной суспензией полирита (двуокиси церия) в соотношении Т : Ж = 1 : 10 (Т и Ж – количество соответственно полирита – твердая фаза и воды – жидкая фаза). В качестве инструментов использовались полиуретановые полировальники диаметром рабочей поверхности от 60 до 80 мм. Толщина пенополиуретановой пленки составляла 1 мм. Радиус сферической поверхности полировальников поддерживался постоянным с помощью алмазного правильного. Полирование выполнялось при следующих режимах: рабочее усилие на линзу – $0,4H$, частота вращения линзы – 6 с^{-1} , амплитуда и частота колебательных движений инструмента – соответственно 40 мм и $2,7 \text{ с}^{-1}$. Продолжительность полирования каждым инструментом составляла 40 мин. При этом макропогрешность (отклонение радиуса кривизны от заданного значения) находилась на уровне четырех интерференционных колец Ньютона. Перед началом полирования каждым инструментом линзу шлифовали алмазным шлифовальником на медной связке с фракцией алмазных зерен 14/10 марки АСМ концентрации 10 %. С помощью наладочного инструмента по специальной методике [6] радиус шлифовальника поддерживался постоянным.

Оценка результатов полирования проводилась по величине локальной погрешности (микропогрешности) ΔN (величина отклонения интерференционного кольца Ньютона от правильной окружности, деленная на ширину между соседними интерференционными кольцами) в краевой зоне полированной поверхности линзы. Погрешность ΔN определяли с помощью интерферометра КУИ-35/RME-500. Результаты измерений приведены на рис. 7, из которого следует, что минимальных значений погрешность ΔN достигает при использовании инструмента диаметром в диапазоне 70–75 мм, что составляет $(0,76–0,83)d_n$, то есть удовлетворительно согласуется с результатами теоретических исследований.

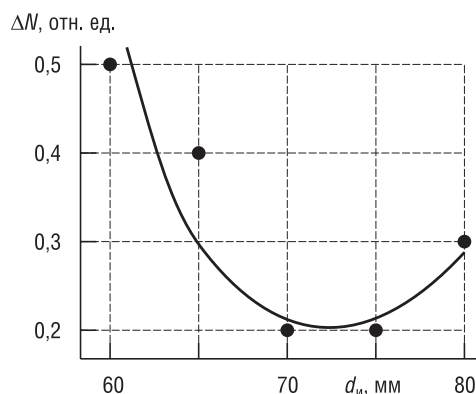


Рис. 7. Закономерности изменения локальной погрешности ΔN в краевой зоне линзы при полировании ее инструментами различного диаметра

Fig. 7. Patterns of changes in the local error ΔN in the marginal zone of the lens when polishing it with tools of different diameters

Заключение. Выполненное математическое моделирование позволяет определить динамическую эпюру давления в непрерывно изменяющейся по величине зоне контакта инструмента и заготовки при обработке сферических поверхностей по методу свободного притирания. Зная закономерность изменения этого давления, представляется возможным, используя гипотезу Ф. Престона, более точно рассчитать интенсивность съема припуска с заготовки в процессе формообразования высокоточных линз.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования влияния диаметра инструмента на процесс полирования сферической поверхности в условиях свободного притирания позволили определить минимально допустимый диаметр полировальника для конкретного диаметра линзы, при котором исключается появление локальной погрешности в краевой зоне последней, обусловленное перепадом эпюры давления между притирающимися поверхностями в процессе переносного движения инструмента. Полученные результаты позволя-

ют назначить оптимальный диаметр инструмента в зависимости от размеров обрабатываемой линзы без проведения предварительных трудоемких экспериментов и могут быть использованы в оптическом и оптико-электронном приборостроении.

Список использованных источников

1. Preston, E. W. The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines / E. W. Preston // *Journal of the Society of Glass Technology*. – 1927. – № 11. – P. 214–256.
2. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. – М.: Наука, 1988. – 639 с.
3. Абрамов, Ю. Т. Влияние «выхода за край» на распределение контактных давлений между инструментом и изделием дисковой формы / Ю. Т. Абрамов, М. И. Перец // *Вопросы механики и машиностроения*. – Рига, 1973. – Вып. 4. – С. 42–52.
4. Математика для инженеров: в 2 т. / С. А. Минюк [и др.]; под общ. ред. Н. А. Микулика. – Минск: ООО «Элайда», 2006. – Т. 2. – 496 с.
5. Зубаков, В. Г. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков, М. Н. Семибратов, С. К. Штандель; под ред. М. Н. Семибратова. – М.: Машиностроение, 1985. – 368 с.
6. Козерук, А. С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на основе математического моделирования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01, 05.02.08 / А. С. Козерук. – Минск, 1997. – 317 л.

References

1. Preston E. W. The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines. *Journal of the Society of Glass Technology*, 1927, no. 11, pp. 214–256.
2. Artobolevskii I. I. *Theory of Mechanisms and Machines*. Moscow, Nauka Publ., 1988. 640 p. (in Russian).
3. Abramov Yu. T., Perets M. I. Influence of the “overrun” on the distribution of contact pressure between the tool and the disk-shaped product. *Voprosy mekhaniki i mashinostroeniya* [Questions of Mechanics and Mechanical Engineering]. Riga, 1973, vol. 4, pp. 42–52 (in Russian).
4. Minyuk S. A., Berezkina N. S., Goncharova M. N., Metel'skii A. V., Mikulik N. A. (ed.). *Mathematics for Engineers*. Vol. 2. Minsk, Elaida Publ., 2006. 496 p. (in Russian).
5. Zubakov V. G., Semibratov M. N., Shtandel S. K. Semibratov M. N. (ed.). *Optical Parts Technology*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 368 p. (in Russian).
6. Kozeruk A. S. *Controlling the Formation of Precision Surfaces of Machine Parts and Devices Based on Mathematical Modeling*. Minsk, 1997. 317 sheets (in Russian).

Информация об авторах

Козерук Альбин Степанович – доктор технических наук, профессор, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: akozeryk@tut.by. <https://orcid.org/0000-0001-5484-9294>

Джейсонт Луис Мальпика – аспирант, Университет Якамбу (Жилой парк La Mora, ул. 1А между пр. 3 и 4, Кабударе 3023, Лара, Венесуэла). E-mail: yeisonthl@gmail.com

Сухоцкий Александр Анатольевич – старший преподаватель, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sukhotsky&list.ru

Юринок Виктор Иванович – кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vyurinok@tut.by

Филонова Марина Игоревна – кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: filonovami@mail.ru

Шамкалович Виктор Иванович – кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shamkalovich@bntu.by

Information about the authors

Albin S. Kozeruk – D. Sc. (Engineering), Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: akozeryk@tut.by. <https://orcid.org/0000-0001-5484-9294>

Yeisonth Louis Malpica – Graduate Student, Yacambu University (Residencial Park La Mora, street 1A between avenues 3 and 4, Cabudare 3023, Lara, Venezuela). E-mail: yeisonthl@gmail.com

Alexander A. Sukhotski – Senior Lecturer, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sukhotsky-&list.ru

Viktar I. Yurynok – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vyurinok@tut.by

Marina I. Filonova – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: filonovami@mail.ru

Viktar I. Shamkalovich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shamkalovich@bntu.by