

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-33-39>

УДК 681.7.023.72

Двусторонняя обработка линз малой жесткости

Докт. техн. наук, проф. А. С. Козерук¹⁾, инж. В. В. Сафонов²⁾,
кандидаты техн. наук, доценты М. И. Филонова¹⁾, В. О. Кузнецик¹⁾, В. И. Юринок¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Унитарное предприятие «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО»

Реферат. Рассмотрена схема устройства для обработки линз с выпукло-вогнутыми сферическими поверхностями типа отрицательный мениск среднего диаметра, позволяющего гибко и в широких пределах управлять процессом одновременного двустороннего абразивного формообразования отмеченных оптических деталей. Выполнено математическое моделирование обработки сферических поверхностей по методу свободного притирания с помощью инструмента в виде гриба и чашки. Получено аналитическое выражение для расчета путей скольжения, которые, согласно формуле Ф. Престона, пропорциональны величине съема материала с обрабатываемой заготовки. Проведен расчет путей скольжения в диаметральных сечениях обрабатываемых сферических поверхностей. Расчет выполнен для различных значений таких параметров режимов обработки, как амплитуды возвратно-вращательного движения инструментов и числа их двойных ходов в минуту, а также скорости вращения линзы. При этом рассматривали сечение с наибольшим расхождением путей скольжения и определяли относительное значение этих путей, которое пропорционально точности обработки. Выполнены исследования, позволившие установить, что при исправлении макропогрешностей на исполнительной поверхности линзы наиболее эффективно изменять амплитуду возвратно-вращательного движения инструментов, причем данные изменения следует выполнять в пределах от минимальной величины этой амплитуды, определяемой конструктивными особенностями конкретного базового технологического оборудования, до ее значения 0,65 от диаметра обрабатываемой детали. При этом для минимизации локальных погрешностей последней скорость ее вращения целесообразно назначать 60–70 об/мин.

Ключевые слова: оптические детали, абразивное формообразование, отрицательный мениск, свободное притирание, математическое моделирование, режимы обработки, пути резания

Для цитирования: Двусторонняя обработка линз малой жесткости / А. С. Козерук [и др.] // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 1. С. 33–39. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-33-39>

Double-Sided Processing of Low-Hardness Lenses

A. S. Kozeruk¹⁾, V. V. Safonov²⁾, M. I. Filonova¹⁾, V. O. Kuznechik¹⁾, V. I. Yurinok¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾NTTs “LEMT” BelOMO – Scientific and Technical Center “Lasers in Ecology, Medicine, Technology”
Belarusian Optical and Mechanical Organization (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The scheme of a device for processing lenses with convex-concave spherical surfaces of the negative meniscus type of average diameter, which allows flexible and wide control over the process of simultaneous bilateral abrasive shaping of the noted optical parts, is considered in the paper. Mathematical modeling of the processing of spherical surfaces using the free grinding method using a tool in the form of a mushroom and a cup was carried out. An analytical expression is obtained for calculating cutting paths, which, according to F. Preston’s formula, are proportional to the amount of material removed

Адрес для переписки

Козерук Альбин Степанович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-74-91
kipp@bntu.by

Address for correspondence

Kozeruk Albin S.
Belarusian National Technical University
22, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-74-91
kipp@bntu.by

from the work-piece being processed. The calculation of cutting paths in the diametrical sections of the processed spherical surfaces was carried out. The calculation was performed for various values of such parameters of processing modes as the amplitude of the reciprocating rotational movement of the tools and the number of their double strokes per minute, as well as the rotation speed of the lens. In this case, the section with the greatest divergence of sliding paths was considered and the relative value of these paths was determined, which is proportional to the processing accuracy. Research has been carried out to establish that when correcting macro-errors on the actuating surface of the lens, it is most effective to change the amplitude of the reciprocating rotational movement of the tools, and these changes should be made within the range from the minimum value of this amplitude, determined by the design features of the specific basic technological equipment, to its value 0.65 of the diameter of the work-piece. In this case, to minimize local errors of the latter, it is advisable to set its rotation speed to 60–70 rpm.

Keywords: optical parts, abrasive shaping, negative meniscus, free grinding, mathematical modeling, processing modes, cutting paths

For citation: Kozeruk A. S., Safonov V. V., Filonova M. I., Kuznechik V. O., Yurinok V. I. (2025) Double-Sided Processing of Low-Hardness Lenses. *Science and Technique*. 24 (1), 33–39. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-33-39>

Введение

Половина общей номенклатуры линз относится к мало жестким деталям с тонким центром [1]. Это, в частности, двояко-, плоско- и выпукло-вогнутые линзы, в которых вогнутый радиус меньше выпуклого (отрицательные мениски). По существующей технологии обработки таких оптических деталей их закрепляют (блокируют) на металлические оправки наклеивая смолой [2]. При этом выполняют нагрев оправок, смолы и заготовок линз. Ввиду различных значений температурных объемных изменений металла, смолы и стекла после их остывания до комнатной температуры возникают упругие деформации в заготовке линзы, которые после обработки деталей и снятия их с оправки вызывают местные погрешности на исполнительной поверхности [3]. Эти погрешности являются несимметричными, поэтому их невозможно компенсировать при сборке оптических приборов, что влияет на разрешающую способность последних и качество сформированного ими изображения [4]. Поэтому линзы

малой жесткости с локальными погрешностями, превышающими допустимое значение, направляют на операцию доводки. Операция эта выполняется поштучно вручную высококвалифицированным рабочим-оптиком и относится к трудоемким и дорогостоящим.

Отмеченную проблему можно решить, если линзы малой жесткости закреплять точно, причем не за исполнительную сферическую, а за боковую цилиндрическую поверхность с помощью фотополимерной смолы, затвердевающей при комнатной температуре [5]. Такой способ крепления не вызывает деформаций в заготовке линзы и позволяет реализовать параллельную обработку исполнительных поверхностей линз.

Устройство для двусторонней обработки линз малой жесткости

Принципиальная схема устройства для обработки линз с выпукло-вогнутыми сферическими поверхностями типа отрицательный мениск диаметром до 45 мм показана на рис. 1 [6].

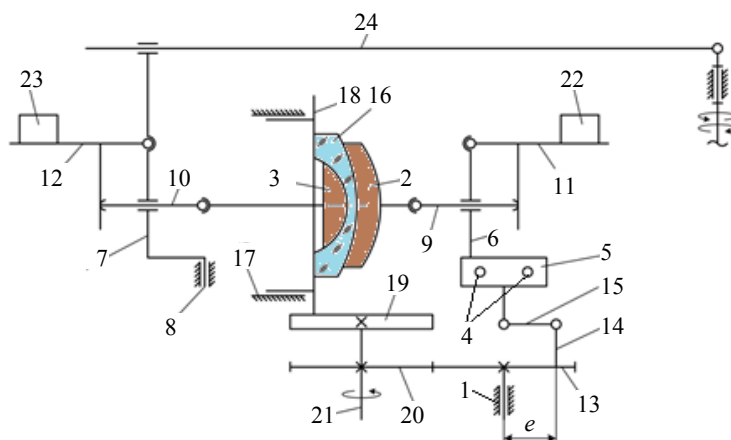


Рис. 1. Схема устройства для обработки отрицательных менисков среднего диаметра

Fig. 1. Diagram of device for processing negative menisci of medium diameter

Устройство содержит основание 1, на котором смонтированы механизмы качания вогнутого 2 и выпуклого 3 инструментов. Первый из этих механизмов состоит из направляющих 4 с кареткой 5 и закрепленной на ней стойкой 6, а второй включает в себя Г-образное звено 7 с осью 8. На них установлены механизмы сообщения рабочего усилия инструментам 2 и 3. Каждый из последних механизмов представляет собой поводки 9 и 10 с кронштейнами 11 и 12, причем поводки расположены соответственно в стойке и в Г-образном звене, а кронштейны шарнирно соединены с ними. На основании установлены также зубчатое колесо 13 с выходным звеном 14, соединенным посредством тяги 15 с кареткой, и механизм относительного вращения детали 16, включающей в себя цилиндр 17 и гильзу 18 с посадочным гнездом, находящуюся во взаимодействии с ведущей планшайбой 19, закрепленной вместе с ведущим зубчатым колесом 20 на шпинделе 21 базового станка, при этом последнее находится в зацеплении с ведомым зубчатым колесом. Для сообщения рабочего усилия инструментам 2 и 3 предусмотрены грузы 22 и 23, установленные на кронштейнах, а Г-образное звено подвижно соединено с выходным звеном 24 базового станка.

Математическое моделирование

Обработка оптических деталей на финишных операциях шлифования и полирования по существующей в настоящее время технологии выполняется в большинстве случаев по методу свободного притирания [7]. При этом для управления процессом формообразования регулируют определенные наладочные параметры режимов обработки, в частности скорость вращения инструмента, амплитуду его колебательного движения по исполнительной поверхности детали и частоту этого движения. В настоящее время данное регулирование выполняет рабочий-оптик, основываясь на своих интуиции и опыте. Технология трудоемкая и требует высокой квалификации исполнителя. С целью решения отмеченных проблем предлагается выполнить математическое моделирование закономерностей съема припуска при свободном притирании инструмента и детали,

который, согласно формуле Ф. Престона, пропорционален скорости скольжения притирающихся поверхностей [8]. Такое моделирование дает возможность выявить зависимость скорости скольжения, пропорциональной интенсивности съема припуска, в зоне притирающихся поверхностей инструмента и линзы от режимов обработки, что позволяет назначать наиболее выгодные из этих режимов в каждом конкретном случае, т. е. управлять процессом формообразования на основе знания.

Анализируя обработку линзы на предлагаемом устройстве (рис. 1), можно записать следующее выражение для скорости скольжения v в произвольной ее точке M [9]:

$$\vec{v} = \vec{v}_л - \vec{v}_и, \quad (1)$$

где $v_л$ и $v_и$ – линейные скорости, обусловленные вращениями соответственно линзы и инструмента. Последняя из отмеченных скоростей определяется выражением

$$\vec{v}_и = \vec{v}_{1в} + \vec{v}_{1к}, \quad (2)$$

где $v_{1в}$ и $v_{1к}$ – линейные скорости инструмента, которые отображают его относительное и переносное (колебательное) движения соответственно.

С учетом векторной формулы Эйлера входящие в равенства (1) и (2) линейные скорости можно выразить следующим образом:

$$\vec{v}_л = \vec{\omega}_л \times \vec{r}_1, \quad (3)$$

$$\vec{v}_{1в} = \vec{\omega}_и \times \vec{r}_1, \quad (4)$$

$$\vec{v}_{1к} = \vec{\Omega}_к \times \vec{r}_1. \quad (5)$$

В формулах (3)–(5) $\omega_л$, $\omega_и$ и $\Omega_к$ – угловые скорости, обусловленные относительными движениями линзы и инструмента, а также переносным (колебательным) перемещением последнего соответственно; r – расстояние от центра обрабатываемой сферической поверхности линзы до точки M на этой поверхности.

Если назначать соответствующие значения $\omega_и$, $\Omega_к$ и r , а скорость $\omega_л$ оставлять неизменной, полученные соотношения (1)–(5) можно применять для оценки интенсивности съема припуска как на вогнутой, так и на выпуклой исполнительных поверхностях линзы.

Определим угловые скорости вращения детали и инструментов. Для этого обратимся к рис. 2, из анализа которого можно записать, что

$$\omega_d = \frac{R_{пл}}{R_r} \omega_{пл}, \quad (6)$$

где $R_{пл}$ – радиус ведущей планшайбы (радиус окружности, на которой ведущая планшайба 1 контактирует с гильзой 2, несущей линзу 3); R_r – радиус гильзы; $\omega_{пл}$ – угловая скорость планшайбы 1.

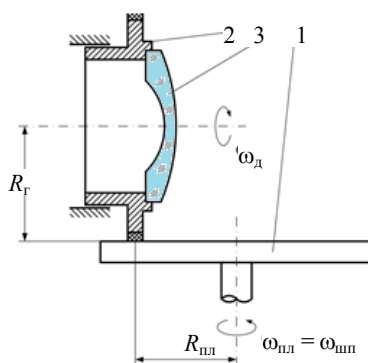


Рис. 2. Схема узла вращения линзы

Fig. 2. Diagram of lens rotation unit

Поскольку в нашем случае рассматривается обработка по методу свободного притирания, когда линза вращается принудительно с фиксированной угловой скоростью ω_d , а угловые скорости инструментов ω_1 и ω_2 непостоянны (зависят от непрерывно изменяющейся величины площадей контакта инструментов с обрабатываемыми поверхностями линзы), справедливы следующие выражения:

$$\omega_1 = k_1 \omega_d; \quad (7)$$

$$\omega_2 = k_2 \omega_d, \quad (8)$$

где k_1 и k_2 – множители (коэффициенты), изменяющиеся, как установлено на практике, в диапазоне от 0,7 до 0,9 [2].

Для определения угловой скорости колебательного движения первого (выпуклого) инструмента $\Omega_{к1}$ обратимся к рис. 3, из которого можно записать векторное уравнение

$$\vec{l}_B = \vec{g} + \vec{h}, \quad (9)$$

где l_B – длина выходного звена базового станка, g – расстояние между осью его вращения и центром кривизны O_1 вогнутой исполнительной поверхности линзы 1; h – длина поводка выпуклого инструмента 2.

Запишем уравнение

$$\dot{\varphi}_1 = \Omega_{к1} = \frac{\dot{\varphi}_B l_B}{\cos(\varphi_1 - \varphi_B)}, \quad (10)$$

где φ_B – угол отклонения выходного звена базового станка от исходного положения (рис. 1); φ_1 – угол, определяемый согласно (10) следующим образом [9]:

$$\varphi_1 = \arcsin\left(\frac{l_B \sin \varphi_B}{h}\right). \quad (11)$$

Из векторного треугольника AO_1O на рис. 3 можно записать равенство

$$h^2 = g^2 + l_B^2 - 2gl_B \cos \varphi_B,$$

решение которого позволяет получить следующее выражение для длины выходного звена исполнительного механизма базового станка l_B :

$$l_B = g \cos \varphi_B + \sqrt{h^2 - g^2 \sin^2 \varphi_B}. \quad (12)$$

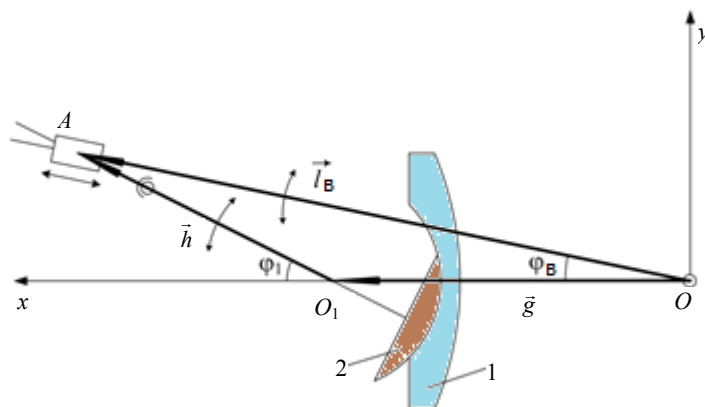


Рис. 3. Схема формообразования вогнутой исполнительной поверхности линзы

Fig. 3. Shaping scheme of concave actuating lens surface

Получим выражение для скорости колебательного движения второго (вогнутого) инструмента $\Omega_{к2}$. С этой целью рассмотрим схему обработки выпуклой исполнительной поверхности линзы, приведенную на рис. 4. Из анализа этой схемы можно записать следующее векторное уравнение:

$$\vec{b} + \vec{c} = \vec{a} + \vec{d}, \quad (13)$$

где b – расстояние от центра кривизны O_2 выпуклой исполнительной поверхности линзы 1 до оси OY системы координат OXY ; c – смещение вогнутого инструмента 2 от начального положения; a – величина, равная длине радиуса кривизны выпуклой поверхности линзы и толщине вогнутого инструмента по центру; d – расстояние от оси OY системы координат OXY до инструмента 2.

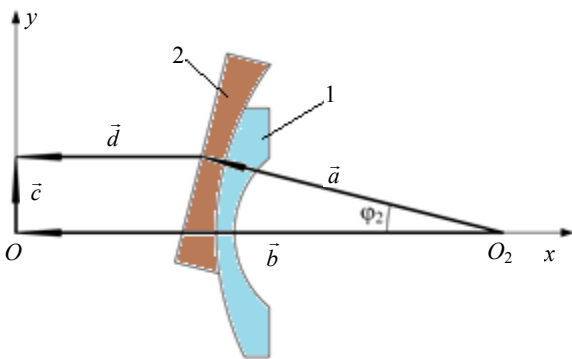


Рис. 4. Схема формообразования выпуклой исполнительной поверхности линзы

Fig. 4. Shaping scheme of convex actuating lens surface

Если спроецировать уравнение (13) на оси системы координат OXY и продифференцировать полученную систему уравнений, то в результате можно записать:

$$\dot{\varphi}_2 = \Omega_{к2} = \frac{\dot{c}}{a \cos \varphi_2}. \quad (14)$$

Входящий в равенство угол φ_2 определяется из выражения [9]

$$\varphi_2 = \arcsin \frac{c}{a}. \quad (15)$$

Для определения смещения вогнутого инструмента c на рис. 4 будем учитывать теоретические основы работы шарнирного четырехзвенника, положенного в основу исполнитель-

ного механизма базового рычажного станка. Из анализа этого механизма, схема которого приведена в [7], можно записать

$$c = l_4 - l_1 = l_4 - l_2 \cos \varphi_{13} - l_3 \sqrt{1 - \frac{l_2^2}{l_3^2} \sin^2 \varphi_{12}}, \quad (16)$$

где l_4 , l_1 , l_2 и l_3 – длина выходного звена, неподвижного звена, кривошипа и шатуна исполнительного механизма соответственно; φ_{12} и φ_{13} – углы, отображающие поворот кривошипа и шатуна.

Взяв производную по времени равенства (16), получим:

$$v_c = \dot{c} = \omega_{12} l_2 \frac{\sin(\varphi_{13} - \varphi_{12})}{\cos \varphi_{13}}, \quad (17)$$

где v_c – линейная скорость движения вогнутого инструмента в направлении, перпендикулярном траектории его колебательного движения; ω_{12} – угловая скорость движения входного звена 2 (кривошипа); φ_{13} – угол отклонения шатуна 3 от исходного положения, величина которого приведена в [9].

С учетом соотношений (1)–(5) для вогнутой исполнительной поверхности линзы можно записать следующее выражение для скорости скольжения:

$$\vec{v} = \left((\vec{\omega}_d - \vec{\omega}_1 - \vec{\Omega}_1) \times \vec{r}_1 \right). \quad (18)$$

Если векторы, входящие в равенство (18), записать в координатной форме [9] и раскрыть полученное векторное равенство, после соответствующих преобразований проекции скорости скольжения в прямоугольной системе координат $Oxyz$, начало которой расположено в центре кривизны колебательного движения инструмента, а ее ось Ox совпадает с осью вращения последнего, получим:

$$\begin{aligned} v_x &= (\Omega_1 Y_M - \omega_1 \sin \varphi_1 Z_M) \cos \Delta - \\ &\quad - (\Omega_1 Z_M + \omega_1 \sin \varphi_1 Y_M) \sin \Delta; \\ v_y &= (\omega_1 \cos \varphi_1 - \omega_d) \cdot (Y_M \sin \Delta + Z_M \cos \Delta) - \Omega_1 X_M; \\ v_z &= \omega_1 \sin \varphi_1 X_M + \\ &\quad + (\omega_d - \omega_1 \cos \varphi_1) (Y_M \cos \Delta - Z_M \sin \Delta), \end{aligned} \quad (19)$$

где X_M , Y_M , Z_M – координаты опорной точки M на обрабатываемой поверхности линзы, которые определяются по методике, изложенной в [9].

Используя полученные уравнения, по формуле

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (20)$$

можно вычислить искомую скорость скольжения, а умножив ее на время обработки, получим путь скольжения $l_{ск}$ в зоне притирающихся поверхностей линзы и инструмента.

Для вычисления скорости скольжения в опорной точке на выпуклой исполнительной поверхности линзы используются аналогичные соотношения (23) и (24), но с соответствующими параметрами в системе уравнений (19)–(23).

Исследование качества и производительности двусторонней обработки линз

Рассчитывали пути скольжения при обработке выпуклой поверхности радиусом кривизны 76,28 мм отрицательного мениска диаметром 92 мм. При этом определяли параметр $\Delta l_{отн}$, значения которого обратно пропорциональны величине микропогрешности на обрабатываемой поверхности. Эта погрешность определяется величиной локальных отклонений интерференционных колец Ньютона, возникающих в воздушном зазоре между обработанной и эталонной поверхностями, от круглой формы и характеризует качество обработки. Для определения $\Delta l_{отн}$ использовали формулу

$$\Delta l_{отн} = \frac{l_{max} - l_{min}}{l_{max}} \cdot 100, \quad (21)$$

где l_{max} и l_{min} – максимальная и минимальная величины $l_{ск}$ в опорных точках диаметрального сечения на обрабатываемой поверхности.

Полученные расчетные результаты зависимости $\Delta l_{отн}$ от угловой скорости линзы ω_l и амплитуды колебательного движения L вогнутого инструмента по обрабатываемой поверхности представлены на рис. 5.

Из анализа полученных результатов следует, что при скорости вращения линзы 40 об/мин и более увеличение амплитуды L от ее минимального значения (в нашем случае 20 мм до ~60 мм, что составляет в среднем 0,65 от диаметра детали), способствует уменьшению $\Delta l_{отн}$, т. е. качество обработки повышается. Однако при дальнейшем увеличении L значение $\Delta l_{отн}$ возрастает, что свидетельствует об ухудшении качества обработки.

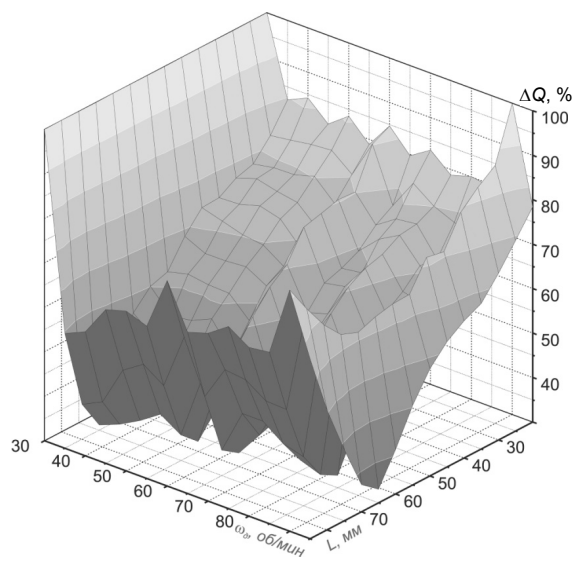


Рис. 5. Распределение относительных путей скольжения $\Delta l_{отн}$ по обрабатываемой поверхности в зависимости от угловой скорости линзы ω_l и амплитуды колебательного движения L инструмента

Fig. 5. Distribution of relative sliding paths Δl_{rel} over the machined surface depending on the angular velocity of the lens ω_l and amplitude of the oscillatory motion L of the tool

ВЫВОДЫ

1. Предложенная схема устройства для одновременной двусторонней обработки линз с тонким центром позволяет по меньшей мере в два раза повысить производительность обработки и уменьшить локальные погрешности на исполнительных поверхностях деталей за счет крепления их за боковую нерабочую поверхность с помощью фотополимерной смолы, которая не требует нагрева заготовки в процессе ее блокировки, что исключает термические деформации в стекле, искажающие сферическую форму изготовленной детали.

2. Поскольку при исправлении макропогрешностей на исполнительной поверхности линзы (увеличенное количество интерференционных колец Ньютона) в виде общей «ямы» или общего «бугра» наиболее эффективно изменять амплитуду колебательного движения инструмента L , эти изменения следует выполнять в пределах от минимального значения L принятого диапазона в каждом конкретном случае до $L = 0,65$ от диаметра детали, при этом для минимизации локальных погрешностей последней скорость ее вращения целесообразно назначать 60–70 об/мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. М.: Высш. шк., 1963. 519 с.
2. Зубаков, В. Г. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков, М. Н. Семибратов, С. К. Штандель. М.: Машиностроение, 1985. 368 с.
3. Schwiegerling, J. Optical Specification, Fabrication, and Testing / J. Schwiegerling // International Society for Optics and Photonics (SPIE), 2014. <https://doi.org/10.1117/3.1002794>.
4. Козерук, А. С. Технология оптического приборостроения / А. С. Козерук. Минск: БНТУ, 2016. 504 с.
5. Tyson, R. K. Introduction to Adaptive Optics / R. K. Tyson. International Society for Optics and Photonics (SPIE), 2000. <https://doi.org/10.1117/3.358220>.
6. Устройство для двусторонней обработки сферических поверхностей: пат. 8956 Респ. Беларусь, МПК7 В 24 В 13/02 / А. С. Козерук, И. П. Филонов, В. Ф. Климович, М. И. Филонова. Опубл. 28.02.2007.
7. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. 176 с.
8. Preston, F. W. The Theory and Design Plate Glase Polishing Machines / F.W. Preston // Journal of the Society Technology. 1927. No 11. P. 214–256.
9. 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 с.
10. Филонов, И. П. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов / И. П. Филонов, Ф. Ф. Климович, А. С. Козерук. Минск: ДизайнПРО, 1995. 208 с.

Поступила 16.11.2023

Подписана к печати 23.01.2024

Опубликована онлайн 31.01.2025

REFERENCES

1. Bardin A. N. (1963) *Optical Glass Technology*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 519 (in Russian).
2. Zubakov V. G., Semibratov M. N., Shtandel' S. K. (1985) *Optical Parts Technology*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 368 (in Russian).
3. Schwiegerling J. (2014) *Optical Specification, Fabrication, and Testing*. International Society for Optics and Photonics (SPIE). <https://doi.org/10.1117/3.1002794>.
4. Kozeruk A. S. (2016) *Optical Instrumentation Technology*. Minsk, Belarusian National Technical University. 504 (in Russian).
5. Tyson R. K. (2000) *Introduction to Adaptive Optics*. International Society for Optics and Photonics (SPIE). <https://doi.org/10.1117/3.358220>.
6. Kozeruk A. S., Filonov I. P., Klimovich V. F., Filonova M. I. (2007) Device for Double-Sided Processing of Spherical Surfaces: Patent No 8956 Republic of Belarus (in Russian).
7. Kozeruk A. S. (1997) *Shaping of Precision Surfaces*. Minsk, Publishing House "VUZ-UNITI". 176 (in Russian).
8. Preston F. W. (1927) The Theory and Design Plate Glase Polishing Machines. *Journal of the Society Technology*, (11), 214–256.
9. Kozeruk A. S. (1997) *Control of the Shaping of Precision Surfaces of Machine Parts and Devices Based on Mathematical Modeling*. Minsk. 317 (in Russian).
10. Filonov I. P., Klimovich F. F., Kozeruk A. S. (1995) *Control of the Shaping of Precision Surfaces of Machine Parts and Devices*. Minsk, DesignPRO Publ. 208 (in Russian).

Received: 16.11.2023

Accepted: 23.01.2024

Published online: 31.01.2025