

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-383-392>

УДК 681.7.032.72

Формализация исполнительного механизма технологического оборудования для обработки линз с тонким центром

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

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

²⁾Унитарное предприятие «НТЦ “ЛЭМТ” БелОМО»

Реферат. При обработке оптических деталей, в том числе линз, используют метод силового замыкания, который отличается от геометрического замыкания, применяемого в механообработке, тем, что в нем инструмент самопроизвольно устанавливается по детали и совершает сложное перемещение по ее исполнительной поверхности, состоящее из относительного и переносного движений. Изложена принципиальная конструкция технологического оборудования для параллельного формообразования исполнительных поверхностей линз в условиях силового замыкания при непрерывном направлении рабочего усилия по нормали к обрабатываемым сферическим поверхностям детали и при постоянном его значении в процессе возвратно-вращательных движений инструментов, обусловленном наличием в конструкции оборудования механизмов регулирования величины усилия прижима инструментов к заготовке детали посредством изменения угла наклона рабочих элементов этих механизмов. Представлены результаты определения скорости съема припуска с исполнительной поверхности линзы при направлении силы прижима инструмента по вертикали и по радиусу кривизны детали. Выполнена формализация геометрических связей исполнительного механизма технологического оборудования. Получены формулы для расчета длины входного звена исполнительного механизма, обеспечивающей необходимую амплитуду переносного движения его выходного звена, и для определения линейной скорости инструмента в его возвратно-вращательном перемещении по обрабатываемой поверхности линзы. Проведены экспериментальные исследования процесса финишной обработки линз по классической схеме, когда усилие прижима инструмента в процессе его возвратно-вращательного перемещения по исполнительной поверхности детали направлено по вертикали, и по схеме, когда это усилие совпадает с нормалью к сферической поверхности детали. В результате выявлено повышение производительности и качества обработки в среднем на 15 и 30 % соответственно.

Ключевые слова: технологическое оборудование, исполнительный механизм, рабочее усилие, линзы с тонким центром, двустороннее формообразование

Для цитирования: Формализация исполнительного механизма технологического оборудования для обработки линз с тонким центром / А. С. Козерук [и др.] // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 5. С. 383–392. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-383-392>

Formalization of the Actuator Mechanism of the Technological Equipment for Processing Lenses with a Thin Center

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

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. When processing optical parts, including lenses, a force-locking method is used, which differs from the geometric locking used in mechanical processing in that the tool is spontaneously positioned on the part and performs a complex

Адрес для переписки

Филонова Марина Игоревна
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-74-91
kippp@bntu.by

Address for correspondence

Filonova Marina I.
Belarusian National Technical University
22, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-74-91
kippp@bntu.by

movement along its working surface, consisting of relative and translational methods. The fundamental design of technological equipment for parallel shaping of the actuator surfaces of lenses under conditions of force closure with continuous direction of the working force along the normal to the processed spherical surfaces of the part and with its constant value in the process of reciprocating rotational movements of the tools, due to the presence in the equipment design of mechanisms for regulating the magnitude of the force pressing the tools to the workpiece by changing the angle of inclination of the working elements of these mechanisms is presented in the paper. The results of determining the rate of removal of the allowance from the working surface of the lens are presented when the tool pressing force is directed vertically and along the radius of curvature of the part. The geometrical relationships of the actuator of the technological equipment have been formalized. Formulas have been obtained for calculating the length of the input link of the actuator, providing the necessary amplitude of the translational movement of its output link, and for determining the linear speed of the tool in its reciprocating-rotational movement along the processed surface of the lens. Experimental studies have been conducted on the process of finishing lenses using the classical scheme, when the pressing force of the tool during its reciprocating-rotational movement along the working surface of the part is directed vertically, and according to the scheme, when this force coincides with the normal to the spherical surface of the part. As a result, an increase in productivity and quality of processing by an average of 15 and 30 %, respectively has been revealed.

Keywords: technological equipment, actuator, working force, lenses with a thin center, two-sided shaping

For citation: Kozeruk A. S., Safonov V. V., Yurinok V. I., Filonova M. I., Kuznechik V. O. (2025) Formalization of the Actuator Mechanism of the Technological Equipment for Processing Lenses with a Thin Center. *Science and Technique*. 24 (5), 383–392. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-383-392>

Введение

При обработке оптических деталей, в том числе линз, используют метод силового замыкания, который отличается от геометрического замыкания, применяемого в механообработке, тем, что в нем инструмент самопроизвольно устанавливается по детали и совершает сложное перемещение по ее исполнительной поверхности, состоящее из относительного и переносного движений. При этом используются так называемые рычажные станки, обеспечивающие шарнирное соединение их выходного звена с инструментом, что позволяет последнему самоустанавливаться по обрабатываемой сферической поверхности заготовки детали в случае ее возможных наклонов в процессе обработки, способствуя тем самым повышению параметров точности формообразования. Однако эти параметры несколько ухудшаются за счет крепления линз на специальные приспособления в виде гриба или чашки посредством наклеечной смолы, которая вызывает в заготовках упругие деформации, искажающие точно обработанную поверхность детали после ее разблокировки. Отмеченных деформаций можно избежать в случае крепления линз за их боковую цилиндрическую поверхность [1]. И поскольку при этом освобождаются от наклеечного вещества обе исполнительные поверхности деталей, представляется возможность реализовать одновременную двустороннюю их обработку.

Технологическое оборудование для формообразования линз с тонким центром

Работа технологического оборудования для двусторонней обработки оптических деталей со сферическими поверхностями, кинематическая схема которого приведена на рис. 1 [2], сводится к следующему. Закрепив линзу 7 с помощью фотополимерной смолы в сепараторе 6 за цилиндрическую поверхность, на ее выпуклую и вогнутую поверхности помещают обрабатывающие соответственно вогнутый 10 и выпуклый 8 инструменты. После этого по формуле

$$\alpha = 64,15 - 36,1\lambda, \quad (1)$$

где λ – отношение диаметров инструментов 8 и 10 к диаметру линзы 7, которое может изменяться в пределах от 0,7 до 0,9 в зависимости от характера распределения по исполнительным поверхностям А и Б линзы 7 подлежащего удалению припуска, определяют углы наклона α_A и α_B рабочего элемента копира 38, 39, при которых обеспечивается постоянное значение давления в непрерывно изменяющейся по величине площади контакта обрабатываемых поверхностей линзы 7 с вогнутым 10 и выпуклым 8 инструментами в процессе возвратно-вращательного перемещения последних, осевыми смещениями П-образного кронштейна 36, 37 вдоль оси полого цилиндра 46, 47 и стержня 40, 41 с копиром 38, 39 вдоль оси полого цилиндра 42, 43 добиваются необходимого значения

исходного рабочего усилия инструментов 10, 8 на поверхности А, Б линзы 7 при их полном соприкосновении, зажимают стопорные винты 48, 49 и 50, 51 и последовательно включают электродвигатели 4, 30, 31, 9, 11, крутящие моменты которых через соответствующие звенья технологического оборудования (рис. 1) вызывают относительное и переносное движения инструментов 8, 10 по обрабатываемой линзе.

При возвратно-вращательном перемещении штанги 24, 25 происходит возвратно-вращательное движение тарированной пружины 32, 33, П-образного кронштейна 36, 37, замыкающей пружины 34, 35 и полого цилиндра 46, 47 вокруг оси симметрии неподвижного кронштейна 44, 45, проходящей через центр кривизны C_A , C_B поверхности А, Б линзы 7.

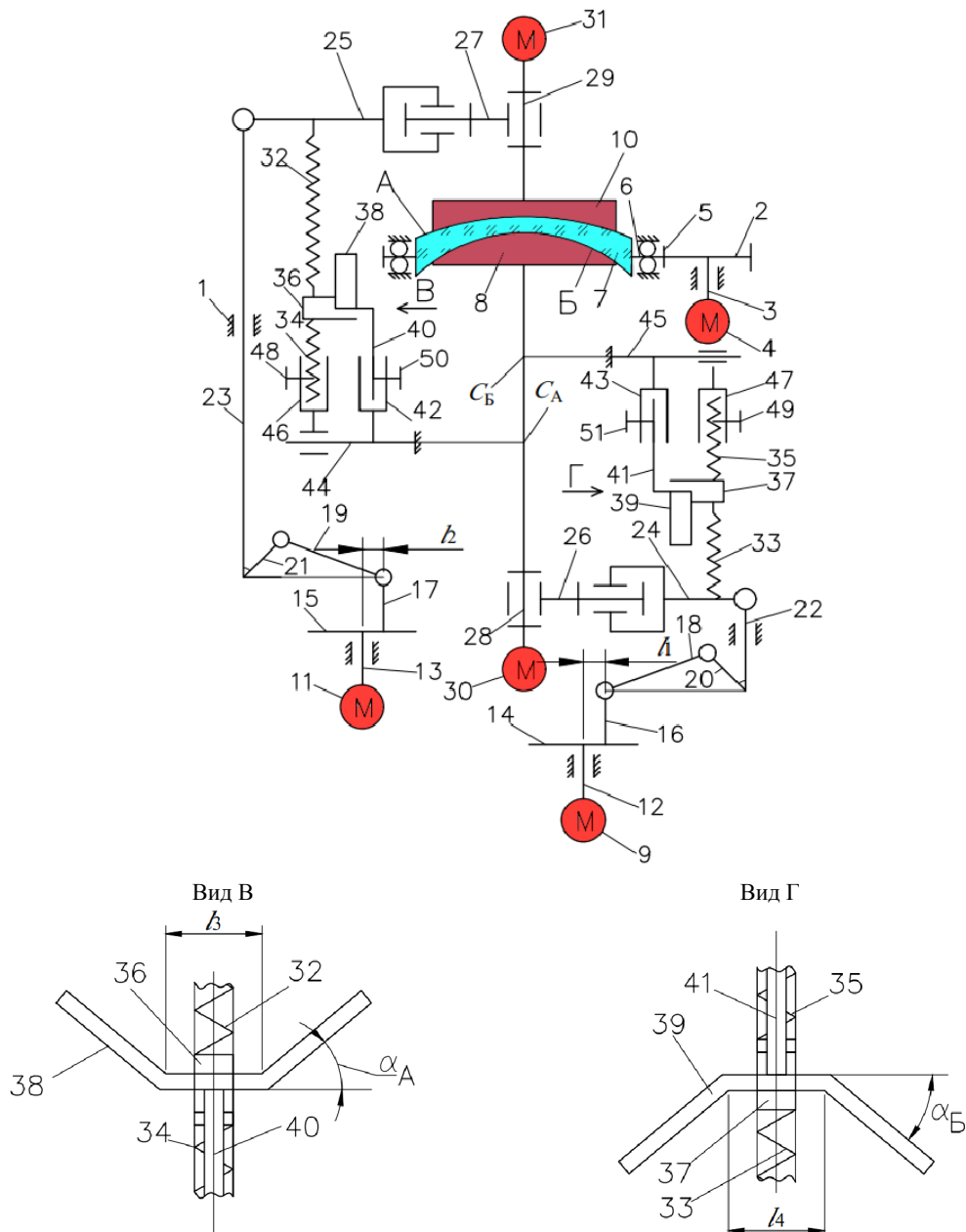


Рис. 1. Принципиальная кинематическая схема технологического оборудования для двустороннего формообразования линз с тонким центром

Fig. 1. Schematic diagram of the process equipment for two-sided shaping of thin-center lenses

Вследствие этого развиваемое тарированной пружиной исходное рабочее усилие постоянно направлено по нормали к обрабатываемым поверхностям линзы. И поскольку при этом копир 38, 39, рычаг 40, 44 и полый цилиндр 46, 47 находятся в неподвижном состоянии, одна из полок П-образного кронштейна 36, 37 скользит по рабочему элементу копира 38, 39. При начальном возвратно-вращательном перемещении штанги 24, 25 перемещение П-образного кронштейна происходит в пределах горизонтального участка рабочего элемента копиров длиной $l_3 = d_{\text{л}} - d_{\text{в}}$; $l_4 = d_{\text{л}} - d_{\text{н}}$, где $d_{\text{л}}$ – диаметр линзы, $d_{\text{в}}$ и $d_{\text{н}}$ – диаметры верхнего и нижнего инструментов соответственно, благодаря чему длина тарированной пружины 32, 33 не изменяется и исходное рабочее усилие на исполнительные поверхности линзы 7 остается постоянным. При дальнейшем увеличении амплитуды возвратно-вращательного перемещения штанги 24, 25 П-образный кронштейн 36, 37 начинает перемещаться по наклонному участку рабочего элемента копира 38, 39, что приводит к уменьшению длины тарированной пружины 32, 33 и, следовательно, к уменьшению исходного рабочего усилия на величину, пропорциональную текущей площади соприкосновения инструментов 10, 8 с поверхностями А, Б линзы 7. При уменьшении амплитуды возвратно-вращательного перемещения штанги 24, 25 вместе с тарированной пружиной 32, 33, П-образным кронштейном 36, 37, замыкающей пружиной 34, 35 и полым цилиндром 46, 47 под действием замыкающей пружины длина тарированной пружины увеличивается, вызывая повышение рабочего усилия на инструменты 10, 8 пропорционально увеличению площади их соприкосновения с исполнительными поверхностями линзы 7. Отмеченное обеспечивает неизменное значение удельного давления в зоне контакта инструментов с линзой в пределах рабочего цикла.

В процессе доводки геометрической точности сферических поверхностей линзы (точности радиусов кривизны) выполняют соответствующие регулирования (в зависимости от технологической наследственности заготовки линзы, т. е. от характера распределения по ее обрабатываемой поверхности подлежащего удалению припуска) наладочных параметров технологического оборудования, в частности скорости

вращения инструментов и величины амплитуды их колебательного движения, а также значения рабочего усилия на инструменты и скорости вращения линзы.

В предлагаемой конструкции технологического оборудования для обработки линз с тонким центром основным механизмом является шарнирный четырехзвенник, содержащий звенья 14 и 15, 18 и 19, 20 и 21, причем кривошип 14, 15 относится к ведущему (входному) звену [3]. И если известен угол поворота φ_2 этого звена, т. е. закон его движения в виде функции $\varphi_2 = \varphi_2(t)$, тем самым можно определить положение остальных звеньев шарнирного четырехзвенника в произвольно выбранный момент времени t .

В процессе работы четырехзвенников вращение их кривошипов 14, 15 через шатуны 18, 19 и звенья 20, 21 вызывает колебательное движение рычагов 26, 27, которые с помощью поводков 28, 29 сообщают аналогичное движение инструментам 8, 10 по обрабатываемым поверхностям детали.

Существенными отличиями рассматриваемой конструкции технологического оборудования от известных технических решений в области обработки оптических деталей по методу свободного притирания являются направление прикладываемого к обрабатываемым поверхностям рабочего усилия по нормали к этим поверхностям независимо от радиуса их кривизны и постоянное значение давления в непрерывно изменяющейся по величине площади контакта инструментов и линзы в процессе колебательного движения рычагов. Первая из отмеченных особенностей обеспечивается тем, что оси переносного (возвратно-вращательного) движения инструментов проходят через центры кривизны обрабатываемых поверхностей линзы (точки C_A и C_B на рис. 1), а вторая – применением копиров с регулируемыми углами наклона α_A и α_B их рабочих элементов. Эти углы рассчитываются по приведенной выше эмпирической формуле (1), полученной исходя из следующих рассуждений.

В [4] показано, что текущую площадь соприкосновения притирающихся поверхностей инструмента и детали при реализации ее обработки в условиях силового замыкания можно выразить формулой

$$S_T(\varphi) = 2R \int_{y_a}^{y_e} \arcsin \frac{\frac{d_n}{2} \sqrt{1 - \frac{(y - OB \sin \varphi)^2}{\left(\frac{d_n}{2} \cos \varphi\right)^2}}}{\sqrt{R^2 - y^2}} dy +$$

$$+ 2R \int_{y_e}^{\frac{d_n}{2}} \arcsin \frac{\sqrt{\left(\frac{d_n}{2}\right)^2 - y^2}}{\sqrt{R^2 - y^2}} dy, \quad (2)$$

где R – радиус обрабатываемой поверхности линзы диаметром d_n ; d_n – диаметр инструмента; φ – угол наклона инструмента относительно линзы.

Характер изменения этой площади с увеличением амплитуды возвратно-вращательного движения инструмента по обрабатываемой поверхности (с увеличением смещения инструмента относительно оси симметрии последней), как показали расчеты, носит линейный характер и выражается уравнением прямой с угловым коэффициентом, значение которого определяется соотношением диаметров линзы и инструмента и практически не зависит от радиуса кривизны R последней (табл. 1).

Линейную зависимость $\alpha = \frac{dS(\varphi)}{d\varphi}$ от λ_i

представим в виде

$$\frac{dS(\varphi)}{d\varphi} = b_0 + b_1 \lambda_i. \quad (3)$$

Входящие в выражение (3) величины b_0 и b_1 определяются по методу наименьших квадра-

тов как коэффициенты линейной регрессии, и они имеют вид:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{dS(\varphi)_i}{d\varphi} \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 - \sum_{i=1}^n \lambda_i \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{dS(\varphi)_i}{d\varphi}}{n \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \right)^2}; \quad (4)$$

$$b_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{dS(\varphi)_i}{d\varphi} - \sum_{i=1}^n \lambda_i \sum_{i=1}^n \frac{dS(\varphi)_i}{d\varphi}}{n \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \right)^2}. \quad (5)$$

Используя данные табл. 1, для $R = 140$ мм получим: $b_0 = 64,15$; $b_1 = -36,1$. Следовательно, $\alpha = 64,15 - 36,1\lambda$.

Если принять, например, $\lambda = 0,8$, то $\frac{dS(\varphi)}{d\varphi} = 35,27^\circ$, что коррелирует с данными табл. 1 с точностью 99,2 %, которая является приемлемой для практических целей.

Реализация в предлагаемом технологическом оборудовании направления рабочего усилия по нормали к обрабатываемым поверхностям линзы способствует, как видно из представленных на рис. 2 результатов экспериментальных исследований, уменьшению времени достижения требуемой ее точности по сравнению с вертикальным направлением обсуждаемого усилия.

Таблица 1

Значения угла наклона кривой изменения площади $\frac{dS(\varphi)}{d\varphi}$ в зависимости от соотношения диаметров инструмента и линзы $\lambda_i = d_n/d_n$ для различных R

Values of the slope of the curve of change in area $\frac{dS(\varphi)}{d\varphi}$ depending on the ratio of the diameters of the tool and lens $\lambda_i = d_n/d_n$

for different R

$R, \text{ мм}$	$d_n = 50$	$d_n = 60$	$d_n = 80$	$d_n = 80$	$d_n = 90$
	λ_i				
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
80	48°	43,5°	39,4°	35,9°	32,9°
100	47,5°	42,7°	38,7°	35,4°	32,5°
120	47,6°	42,7°	38,8°	35,6°	32,8°
140	46,8°	42,1°	38,2°	35,0°	32,3°

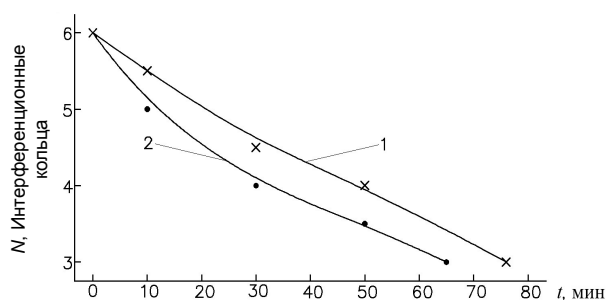


Рис. 2. Характер изменения скорости съема припуска с исполнительной поверхности линзы при направлении силы прижима инструмента по вертикали (1) и по радиусу кривизны (2) детали

Fig. 2. Nature of the change in the rate of allowance removal from the working surface of the lens when the tool pressure is directed vertically (1) and along the radius of curvature of the part (2)

Обработка сводилась к полированию выпуклой сферической поверхности радиусом кривизны 132,84 мм линзы диаметром 72 мм из оптического стекла марки ТФ1 пенополиуретановым полировальником диаметром 60 мм с использованием водной суспензии полирита с оптимальным соотношением Т (твердая фаза – порошок полирита) к Ж (жидкая фаза – вода), равным 1 к 9 [5]. Стабильность радиуса кривизны полировальника поддерживалась периодической правкой его рабочей поверхности алмазным правильником в виде гриба с точно настроенным по определенной методике радиусом кривизны.

Для оценки точности радиуса кривизны линзы использовалось стекло с эталонной рабочей поверхностью $-R132,84$ мм (рабочее

пробное стекло), которая сопрягалась с обрабатываемой поверхностью линзы. При этом определяли количество интерференционных колец Ньютона N в плоскости сопряжения.

В качестве исходного образца использовали линзу, предварительно отполированную с точностью кривизны сферической поверхности $N = 6$, которую подвергали дальнейшему полированию до достижения точности $N = 3$. Эта точность достигалась за 77 и 66 мин в случае соответственно вертикального направления рабочего усилия (кривая 1 на рис. 2) и при его направлении по нормали (кривая 2 на рис. 2). Следовательно, производительность процесса во втором случае повышается в среднем на 15 %. Кроме того, уменьшается местная (локальная) погрешность ΔN с 0,3 до 0,2, что свидетельствует об улучшении качества обработки.

Формализация геометрических связей исполнительного механизма технологического оборудования

При абразивной обработке оптических деталей в условиях силового замыкания величина снимаемого материала с заготовки определяется скоростью скольжения инструмента относительно обрабатываемой поверхности [6]. Значение этой скорости представляет собой результат геометрического сложения векторов линейных скоростей относительного вращения инструмента и детали, а также переносного (колебательного) движения последней относительно инструмента (или наоборот).

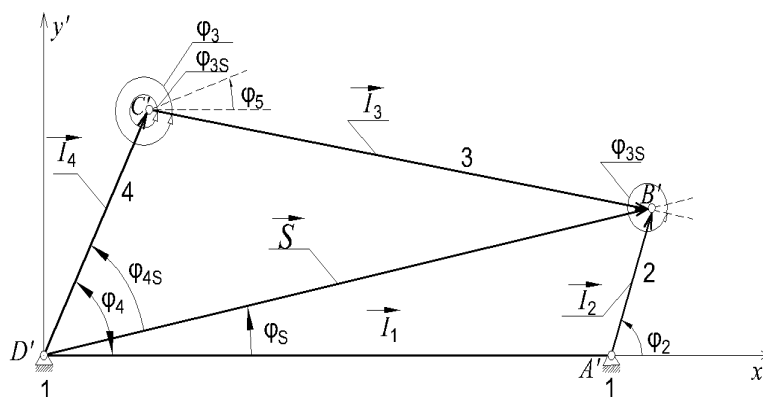


Рис. 3. Конструктивная связь звеньев кривошипно-шатунного механизма

Fig. 3. Structural connection of the links of the crank mechanism

Определим аналитическое выражение для линейной скорости переносного движения инструмента при обработке выпуклой поверхности линзы, которое задается возвратно-вращательным перемещением выходного звена исполнительного механизма технологического оборудования. Отмеченное перемещение, в свою очередь, определяется движением звеньев 15, 19, 21 (рис. 1) шарнирного четырехзвенника. В связи с этим проведем исследование работы последнего, векторная схема которого приведена на рис. 3, где $\vec{l}_1 \dots \vec{l}_4$ – длина его звеньев, $\vec{s}$ – вспомогательный вектор, необходимый для определения координат точки B' .

Учитывая расположение векторов на рис. 3, можно записать:

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{s}; \quad (1)$$

$$\vec{l}_3 + \vec{l}_4 = \vec{s}. \quad (2)$$

Из рис. 1 и 3 видно, что переносное движение рычага 27, характеризуемое углом φ_5 , зависит от угла φ_4 , т. е. $\varphi_5 \sim \varphi_4$. Угол φ_4 , в свою очередь, является функцией угла φ_2 [7], значение которого определяется положением входного звена 2 исполнительного механизма. Если учесть, что согласно конструктивным особенностям последнего при $\varphi_2 = 0$; $\varphi_4 \neq 0$; а $\varphi_{45} = 90^\circ$ [8], запись $\varphi_5 \sim \varphi_4$ можно представить в виде следующего равенства:

$$\varphi_5 = \varphi_4 - \varphi_{45}. \quad (3)$$

Входящий в (3) угол φ_4 , как видно из рис. 3, выражается соотношением

$$\varphi_4 = \varphi_{4s} + \varphi_s, \quad (4)$$

причем (см. треугольник $B'C'D'$ на рис. 3)

$$\varphi_{4s} = \arccos \frac{l_4^2 + s^2 - l_3^2}{2l_4s}. \quad (5)$$

Выражения для угла φ_s и параметра s можно получить соответственно из проекций соотношения (2) на оси координат x' и y' и треугольника $D'A'B'$ (рис. 3). Данные проекции имеют вид:

$$l_1 + l_2 \cos \varphi_2 = s \cos \varphi_s; \quad (6)$$

$$l_2 \sin \varphi_2 = s \sin \varphi_s. \quad (7)$$

Отсюда

$$\operatorname{tg} \varphi_s = \frac{l_2 \sin \varphi_2}{l_1 + l_1 \cos \varphi_2}. \quad (8)$$

С учетом отмеченного для параметра s получаем следующее равенство:

$$s = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos \varphi_2}. \quad (9)$$

При определении характера колебательного движения инструментов 8 и 10 по поверхности линзы будем рассматривать перемещение точек C , расположенных на оси их вращения и характеризуемых радиус-вектором $\vec{l}_{OC}$. Для определения положения этого вектора введем угол ψ_C (рис. 4), который равен углу отклонения оси симметрии выходного звена исполнительного механизма технологического оборудования, т. е.

$$\psi_C = \varphi_5, \quad (10)$$

причем в крайних точках длины штриха L верхнего звена этот угол принимает значения $\psi_C^{\max}$, и $\psi_C^{\min}$, а в среднем – $\psi_C^{\text{сим}}$. Эти углы, как видно из соотношений (3) и (10), можно определить, если известен закон движения звеньев 20, 21 шарнирного четырехзвенника, который (закон) определяется углами $\varphi_4^{\max}$, $\varphi_4^{\min}$, $\varphi_4^{\text{сим}}$.

Анализ работы шарнирного четырехзвенника позволяет заключить (рис. 3), что при расположении звеньев 2 и 3 вдоль одной линии выходное звено исполнительного механизма будет принимать максимальные отклонения от среднего значения в своем колебательном движении, причем в случае равенства нулю длины второго звена остальные звенья неподвижны. Тогда, как видно из рис. 3, получим

$$\cos \varphi_4^{\text{сим}} = \frac{l_4^2 + l_1^2 - l_3^2}{2l_4l_1}, \quad (11)$$

причем

$$\cos \varphi_4^{\max} = \frac{l_1^2 + l_4^2 - (l_2 + l_3)^2}{2l_1l_4}; \quad (12)$$

$$\cos \varphi_4^{\min} = \frac{l_1^2 + l_4^2 - (l_3 - l_2)^2}{2l_1l_4}. \quad (13)$$

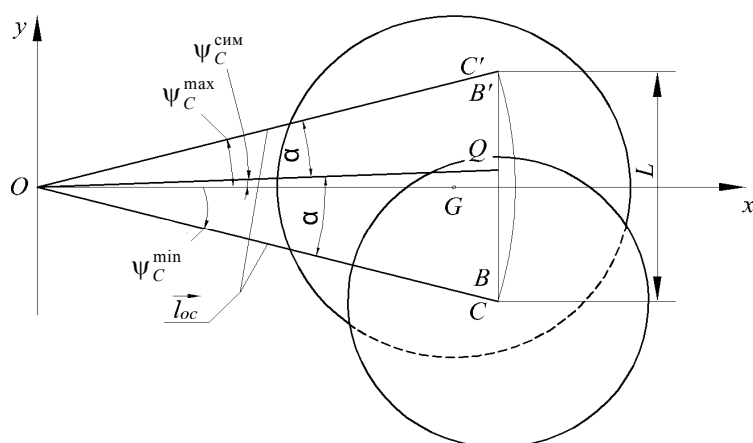


Рис. 4. Траектория колебательного перемещения инструмента

Fig. 4. Trajectory of the oscillatory movement of the tool

Если амплитуда колебательного движения инструмента по обрабатываемой поверхности линзы симметрична относительно оси ее вращения, то, как видно из рис. 4, $\psi_C^{\text{сим}} = 0$. Тогда, принимая во внимание равенства (10) и (3), можно записать, что $\psi_4^{\text{сим}} = \varphi_{45}$, а с учетом выражения (11) получим

$$l_3 = \sqrt{l_1^2 + l_4^2 - 2l_1l_4 \cos \varphi_{45}}. \quad (14)$$

Обработка оптических деталей по методу свободного притирания является одним из наиболее точных приемов получения прецизионных поверхностей плоского и сферического профилей, что достигается гибким регулированием параметров режимов обработки. Наиболее действенным из этих параметров является изменение величины амплитуды L колебательного движения инструмента. Это изменение выполняется регулированием величины звена 2 кривошипно-шатунного механизма (рис. 3) (в технологическом оборудовании на рис. 1 – регулированием расстояний l_1 и l_2 кривошипов 14 и 15). Поэтому для эффективного осуществления такого регулирования на практике целесообразно установить аналитическую связь между L и l_2 .

Из рис. 3 можно записать:

$$\psi_C^{\text{max}} = \psi_C^{\text{сим}} + \arcsin \frac{L}{2l_{OC}}; \quad (15)$$

$$\psi_C^{\text{min}} = \arcsin \frac{L}{2l_{OC}} - \psi_C^{\text{сим}}. \quad (16)$$

С учетом этого справедливы следующие равенства для φ_4 :

$$\varphi_4^{\text{max}} = \varphi_4^{\text{сим}} + \arcsin \frac{L}{2l_{OC}}; \quad (17)$$

$$\varphi_4^{\text{min}} = \arcsin \frac{L}{2l_{OC}} - \varphi_4^{\text{сим}}.$$

Тогда на основании (12) и (17) получим

$$l_2 = \sqrt{l_4^2 + l_1^2 - 2l_1l_4 \cos \left(\varphi_4^{\text{сим}} + \arcsin \frac{L}{2l_{OC}} \right)} - l_3. \quad (18)$$

Кроме того, рис. 3 позволяет записать выражение, отображающее геометрическую связь звеньев исполнительного механизма. Это выражение имеет вид

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{l}_3 + \vec{l}_4. \quad (19)$$

Если равенство (19) спроецировать на координатную ось $D'x'$ (рис. 3), а затем продифференцировать его по φ_2 , то в результате получим

$$l_2 \sin \varphi_2 = l_3 \sin \varphi_3 i_{32} + l_4 \sin \varphi_4 i_{42}, \quad (20)$$

где [8]

$$i_{32} = \frac{d\varphi_3}{d\varphi_2} = \frac{d\varphi_3/dt}{d\varphi_2/dt} = \frac{\omega_3}{\omega_2}; \quad (21)$$

$$i_{42} = \frac{d\varphi_4}{d\varphi_2} = \frac{d\varphi_4/dt}{d\varphi_2/dt} = \frac{\omega_4}{\omega_2}. \quad (22)$$

Следовательно, угловая скорость четвертого звена четырехзвенника связана с кинематической передаточной функцией i_{42} соотношением

$$\omega_4(t) = i_{42}\omega_2(t), \quad (23)$$

причем [9]

$$i_{42} = \frac{l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)}{l_4 \sin(\varphi_4 - \varphi_2)}. \quad (24)$$

Согласно кинематической схеме технологического оборудования для обработки линз (рис. 1) движения рычагов 20, 21 и штанг 24, 25 совершаются синхронно. Поэтому с учетом рис. 3 можно записать

$$\omega_4(t) = \omega_5(t) = \dot{\psi}_C, \quad (25)$$

где $\omega_5(t)$ и $\dot{\psi}_C$ – угловые скорости выходного звена исполнительного механизма и центра инструмента соответственно.

Используя формулу Эйлера, линейную скорость инструментов в векторной форме можно записать в виде [10]

$$\vec{V}_C = \vec{\dot{\psi}}_C \times \vec{l}_{OC}, \quad (26)$$

где $\vec{l}_{OC}$ – длина выходного звена исполнительного механизма технологического оборудования (рис. 4).

Если учесть проекции векторов $\dot{\psi}_C$ и $\vec{l}_{OC}$ в виде соответственно $\dot{\psi}_C = (0 \ 0 \ \dot{\psi}_C)^T$; $\vec{l}_{OC} = (l_{OC} \cos \psi_C \ l_{OC} \sin \psi_C \ 0)^T$ и решить векторное равенство (26), то в итоге можно записать вектор

$$\vec{V}_C = (-\dot{\psi}_C l_{OC} \sin \psi_C \ \dot{\psi}_C l_{OC} \cos \psi_C \ 0)^T, \quad (27)$$

модуль которого $V_C = \dot{\psi}_C l_{OC}$ и представляет собой искомую скорость возвратно-вращательных перемещений инструментов в процессе обработки оптических деталей со сферическими поверхностями на предлагаемом технологическом оборудовании.

ВЫВОДЫ

1. Приведена кинематическая схема технологического оборудования, позволяющая ре-

ализовать двустороннюю обработку линз с тонким центром при направлении рабочего усилия по нормали к формообразующей сферической поверхности и поддержании постоянного давления в непрерывно изменяющейся зоне контакта притирающихся сегментов инструмента и детали, что способствует повышению параметров качества линз и производительности процесса их шлифования и полирования.

2. Выполнена формализация исполнительного механизма предложенного технологического оборудования с учетом геометрических и кинематических связей его звеньев, в результате чего получено аналитическое выражение для расчета линейной скорости возвратно-вращательного перемещения инструментов, являющейся одной из основных составляющих в результирующей скорости скольжения последних по обрабатываемой поверхности линзы.

3. Проведены экспериментальные исследования процесса финишной обработки линз по классической схеме, когда усилие прижима инструмента в процессе его возвратно-вращательного перемещения по исполнительной поверхности детали направлено по вертикали, и по схеме, когда это усилие совпадает с нормалью к сферической поверхности детали. В результате выявлено повышение производительности и качества обработки в среднем на 15 и 30 % соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент ВУ 7911, МПК В 24В 13/00 (2006.01). Способ одновременной двусторонней обработки деталей со сферическими поверхностями: № а 20030242: заявлено 18.02.2003: опубл. 30.04.2006 / А. С. Козерук, И. П. Филонов; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/57016/7911.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
2. Патент ВУ 22390, МПК7 В 24 В 13/02 (2006.01). Станок для одновременно двусторонней обработки высокоточной линзы малой жесткости с пологими поверхностями: № а 20170098: заявлено 28.03.2017: опубл. 30.10.2018 / А. С. Козерук; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/61155/22390.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
3. 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.

4. Анализ кинематики контакта инструмента и заготовки при обработке линз / А. С. Козерук, Д. Л. Мальпика, А. А. Сухоцкий [и др.] // Вес. Нац. акад. наук. Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2019. Т. 64, № 2. С. 429–437. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-429-437>.
5. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. М.: Высш. шк., 1963. 519 с.
6. Preston, E. W. The Theory and Design Plate Glass Polishing Machines / E. W. Preston // Journal of the Society Technology. 1927. No 11. P. 214–256.
7. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. 176 с.
8. 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.
9. Исследование кинематических закономерностей процесса двусторонней обработки двояковыпуклых оптических деталей / А. С. Козерук, А. А. Сухоцкий, В. Ф. Климович [и др.] // Весці Нац. акад. навук. Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2008. № 2. С. 26–31.
10. Двусторонняя обработка линз малой жесткости / А. С. Козерук, В. В. Сафонов, М. И. Филонова [и др.] // Наука и техника. 2025. Т. 24, № 1. С. 33–39. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-33-39>.

Поступила 02.06.2025

Подписана в печать 12.08.2025

Опубликована онлайн 30.09.2025

REFERENCES

1. Kozeruk A. S., Filonov I. P. (2006) *Method for Simultaneous Double-Sided Machining of Parts with Spherical Surfaces*: Patent Republic of Belarus no. 7911. Available at: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/57016/7911.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (in Russian).
2. Kozeruk A. S. (2018) *Machine for Simultaneous Double-Sided Processing of High-Precision, Low-Rigidity Lenses*

with Flat Surfaces. Patent Republic of Belarus no. 22390. Available at: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/61155/22390.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (in Russian).

3. 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).
4. Kozeruk A. S., Malpica Y. L., Sukhotski A. A., Yurinok V. I., Filonova M. I., Shamkalovich V. I. (2019) Analysis of Kinematics of Tool and Work Piece Contact During Lens Processing. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 64 (4), 429–437. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-429-437> (in Russian).
5. Bardin A. N. (1963) *Optical Glass Technology*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 519 (in Russian).
6. Preston E. W. (1927) The Theory and Design Plate Glass Polishing Machines. *Journal of the Society Technology*, (11), 214–256.
7. Kozeruk A. S. (1997) *Shaping of Precision Surfaces*. Minsk, Publishing House "VUZ-UNITI". 176 (in Russian).
8. Kozeruk A. S. (1997) *Control of the Shaping of Precision Surfaces of Machine Parts and Devices Based on Mathematical Modeling* [dissertation]. Minsk. 317 (in Russian).
9. Kozeruk A. S., Sukhotski A. A., Klimovich V. F., Filonova M. I. (2008) Study of Kinematic Regularities of the Process of Double-Sided Processing of Biconvex Optical Parts. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, (2), 26–31 (in Russian).
10. Kozeruk A. S., Safonov V. V., Filonova M. I., Kuznechik V. O., Yurinok V. I. (2025) Double-Sided Processing of Low-Hardness Lenses. *Nauka i Tehnika = Science and Technique*. 24 (1), 33–39. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-33-39> (in Russian).

Received: 02.06.2025

Accepted: 12.08.2025

Published online: 30.09.2025