

## Математическое моделирование технологического оборудования для обработки оптических деталей

Доктора техн. наук, профессора И. П. Филонов<sup>1)</sup>, А. С. Козерук<sup>1)</sup>, асп. Д. Л. Мальпика<sup>1)</sup>, кандидаты техн. наук, доценты М. И. Филонова<sup>1)</sup>, В. О. Кузнецик<sup>1)</sup>, магистрант Р. О. Диас Гонсалес<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Описана функциональная схема станка для одновременной абразивной обработки линз с пологими высокоточными исполнительными поверхностями, позволяющего гибко и в широких пределах управлять процессом формообразования посредством изменения таких наладочных параметров, как частота вращения инструментов и заготовки, величина амплитуды колебательных движений инструментов, их диаметров и количество двойных ходов в минуту. В процессе обработки на данном станке рабочее усилие направлено по нормали к обрабатываемой поверхности, в результате чего представляется возможным ускорить процесс формообразования оптических деталей, что способствует уменьшению локальных погрешностей на их исполнительных поверхностях. Рассмотрена структура исполнительного механизма станка, сообщающего переносное движение инструментам, состоящего из вращательных и поступательных кинематических пар, образующих шарнирный четырехзвенник, кривошип которого является ведущим звеном. Угол поворота этого звена выбран в качестве обобщенной координаты исполнительного механизма. Установлена связь между обобщенной координатой и положениями звеньев исполнительного механизма станка, позволившая получить аналитическую зависимость между движениями входного и выходного звеньев механизма с учетом его кинематической передаточной функции, представляющей собой отношение угловой скорости выходного звена к угловой скорости входного. На основе анализа геометрических параметров возвратно-вращательного движения верхнего звена предложенного станка получено выражение для расчета длины шатуна исполнительного механизма, которая обеспечивает симметричное положение центра упомянутого звена относительно оси симметрии нижнего звена. Поскольку в станке для двусторонней обработки линз величина амплитуды колебательного движения выходного звена исполнительного механизма регулируется посредством изменения длины его входного звена (кривошипа), установлена аналитическая связь между этими геометрическими параметрами, дающая возможность целенаправленно изменять интенсивность обработки в центральной или краевой зоне детали в зависимости от технологической наследственности заготовки с точки зрения распределения по ее поверхности подлежащего съему припуска.

**Ключевые слова:** технологическое оборудование, исполнительный механизм, линза, абразивная обработка, математическое моделирование

**Для цитирования:** Математическое моделирование технологического оборудования для обработки оптических деталей / И. П. Филонов [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 367–375. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-367-375

## Mathematical Simulation of Technological Equipment for Processing of Optical Parts

I. P. Filonov<sup>1)</sup>, A. S. Kozeruk<sup>1)</sup>, Y. L. Malpica<sup>1)</sup>, M. I. Filonova<sup>1)</sup>, V. O. Kuznechik<sup>1)</sup>, R. O. Dias Gonzalez<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper describes a functional scheme of a machine-tool for simultaneous abrasive machining of lenses with shallow high-accuracy executive surface. The machine-tools permits flexibly and within long range to control shape-forma-

### 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

tion process through changing such adjustment parameters as tool and rough workpiece frequency rotation, amplitude value of tool oscillatory motion, their diameters and number of double strokes per minute. While using the given machine-tool for machining process an operating force is directed along normal to the working surface and due to this there is a possibility to accelerate a shape-formation process of optical parts that leads to reduction of local errors on their executive surfaces. The paper considers a structure of the executive machine-tool mechanism which transfers translational motion to the tools and consists of rotational and rectilinear kinematic pairs forming a four-bar linkage and its crank is a guide link. A turning angle of the link is selected as a generalized coordinate of the executive mechanism. A relationship between the generalized coordinates and link positions of the executive machine-tool mechanism has been established in the paper and it permits to obtain analytical dependence between motions of input and output mechanism links with due account of its kinematic transfer function which represents in itself a ratio of angular output link speed to an angular velocity of the input link. An analysis of geometric parameters for backward-rotational motion of the top link in the proposed machine-tool has made it possible to obtain an expression to calculate a rod length of the executive mechanism which ensures symmetrical center position of the above-mentioned link relative to a symmetry axis of the bottom link. As an amplitude value of oscillatory motion for an output link in the executive mechanism is regulated in the machine-tool for two-sided lens machining while changing length of its input link (crank) an analytical relationship has been established between these geometric parameters and the relationship provides a possibility purposefully to change a machining intensity in the central or edge zone of a part according to technological blank heredity in the context of allowance which is to be removed and which is distributed along its surface.

**Keywords:** technological equipment, executive mechanism, lens, abrasive processing, mathematical simulation

**For citation:** Filonov I. P., Kozeluk A. S., Malpika D. L., Filonova M. I., Kuznechik V. O., Dias Gonzalez R. O. (2017) Mathematical Simulation of Technological Equipment for Processing of Optical Parts. *Science and Technique*. 16 (5), 367–375. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-367-375 (in Russian)

**Введение**

По существующей технологии обработки оптических деталей (в том числе линз) в условиях свободного притирания их поочередно закрепляют за исполнительные поверхности на металлическое приспособление с помощью наклеенного вещества (наиболее часто с помощью наклеенной смолы специального состава). Из-за различных температурных коэффициентов линейного расширения металла, смолы и стекла происходит деформация заготовки оптической детали, что в конечном итоге приводит к возникновению несимметричных и поэтому некомпенсируемых локальных погрешностей на ее обработанной поверхности. Во избежание отмеченного предложен способ одновременной двусторонней обработки линз [1], исключаяющей их крепление за рабочие поверхности, и станок для реализации этого способа [2]. Станок состоит из двух секций, каждая из которых обеспечивает независимое и гибкое регулирование ее наладочных параметров в широких пределах при закреплении заготовки линзы за боковую нерабочую поверхность.

**Станок для двусторонней обработки линз**

Принципиальная схема станка для одновременной двусторонней обработки линз приведена на рис. 1. Станок работает следующим образом. Линзу 7 неподвижно закрепляют в сепараторе 6, на ее исполнительные поверхности устанавли-

вают инструмент 8 и верхний инструмент 10 и последовательно включают приводы вращения 4, 30, 31, 9, 11. Крутящий момент от первого из них через вал 3, ведущее 2 и ведомое 5 зубчатые колеса и сепаратор 6 вызывает вращение линзы, а крутящий момент от приводов вращения 30 и 31 через валы инструментов 28 и 29 сообщает вращение инструменту 8 и верхнему инструменту 10.

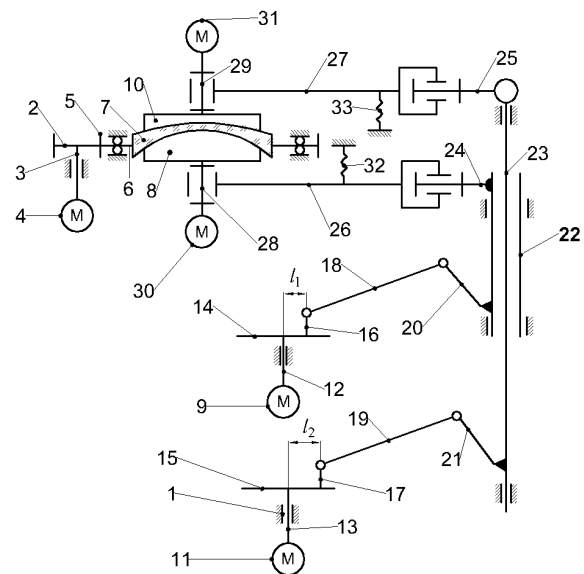


Рис. 1. Кинематическая схема станка для двусторонней обработки линз

Fig. 1. Kinematic scheme of machine-tool for two-sided lens processing

Крутящие моменты от приводов вращения 9 и 11 соответственно через входной вал 12 и до-

полнительный входной вал 13, дополнительный кривошипный диск 14 и кривошипный диск 15, палец 16 и дополнительный палец 17, шатуны 18 и 19, рычаги 20 и 21, вал штанги 22 и дополнительный вал штанги 23, штанги 24 и 25, вращающиеся части штанги 26 и 27, валы инструментов 28 и 29 вызывают возвратно-вращательное перемещение инструмента 8 и верхнего инструмента 10 по исполнительным поверхностям линзы.

При управлении величиной съема припуска в той или иной зоне исполнительных поверхностей линзы в процессе ее обработки производят независимое регулирование следующих наладочных параметров станка: скорости вращения линзы; амплитуды возвратно-вращательных перемещений инструмента 8 и верхнего инструмента 10 по поверхностям линзы, что достигается регулированием расстояний  $l_1$  и  $l_2$  между осями симметрии пальца 16 и дополнительного пальца 17, с одной стороны, и соответственно входного вала 12 и дополнительного входного вала 13, с другой стороны; количества двойных ходов в минуту инструмента 8 и верхнего инструмента 10, что обеспечивается изменением скорости вращения входного вала 12 и дополнительного входного вала 13 соответственно; скорости вращения инструментов и рабочего усилия посредством изменения жесткости пружин 32 и 33 [3].

Звенья 14 и 15, 18 и 19, 20 и 21 образуют плоские механизмы, называемые кривошипно-шатунными или шарнирными четырехзвенниками [4]. При этом кривошипы 14, 15 являются ведущими звеньями и их удобно выбрать в качестве входных. Если известен закон движения кривошипа в виде функции  $\varphi_2 = \varphi_2(t)$ , где  $\varphi_2$  – угол поворота кривошипа, то остальные звенья будут двигаться вполне определенным образом, зависящим от  $\varphi_2(t)$ . Таким образом, угол  $\varphi_2$  однозначно определяет положение звеньев шарнирного четырехзвенника и поэтому может быть выбран в качестве обобщенной координаты этого механизма.

Механизмы шарнирных четырехзвенников работают следующим образом. Вращательное движение кривошипов 14 и 15 через шатуны 18 и 19 преобразуются в возвратно-вращательное движение звеньев 20 и 21 и рычагов (штанг) 26 и 27. Последние через поводки 28 и 29 вы-

зывают возвратно-вращательные перемещения инструментов 8 и 10 относительно линзы.

Отличительной особенностью предлагаемого станка по сравнению с классическим технологическим оборудованием аналогичного назначения является то, что при его реализации рабочее усилие направлено по нормали к обрабатываемой поверхности. Такая схема обработки обеспечивается тем, что штанги 24, 25, установленные с возможностью качания в вертикальной плоскости, снабжены вращающейся их частью 26, 27. Пространственное движение последних задается формой обрабатываемой поверхности детали, по которой скользит инструмент, копируя ее [5] и через валы инструментов 28, 29 наклоняя вращающиеся части штанг. Эти элементы, находясь в нагруженном состоянии благодаря действию пружин 32, 33, и обеспечивают гарантированное направление рабочего усилия по нормали (по радиусу) обрабатываемой сферической поверхности. Такая обработка позволяет ускорить процесс формообразования оптических деталей и способствует уменьшению локальных погрешностей на их исполнительных поверхностях, что следует из экспериментальных результатов, представленных на рис. 2.

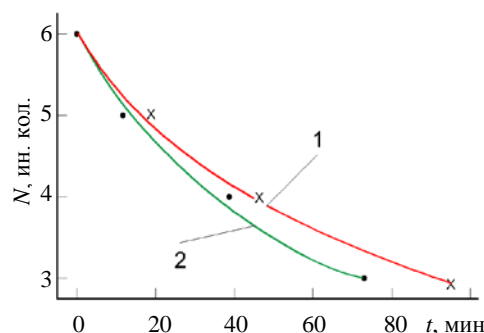


Рис. 2. Зависимость количества интерференционных колец Ньютона от времени полирования по схеме с направлением рабочего усилия по вертикали (1) и по нормали (2) к обрабатываемой поверхности

Fig. 2. Dependence of interference Newton's ring number on polishing time period according to scheme with operating force direction vertically (1) and normally (2) in respect of the machined surface

Эксперименты сводились к полированию вогнутой поверхности линзы  $R = 50,34$  мм, изготовленной из оптического стекла марки К8, пенополиуретановым полировальником по клас-

сической схеме с направлением рабочего усилия по вертикали и с направлением его по нормали к обрабатываемой поверхности [6].

Точность обработки контролировали по количеству  $N$  интерференционных колец Ньютона, возникавших в воздушном промежутке между обрабатываемой и эталонной поверхностями. В качестве последней использовали так называемое пробное стекло.

Исходное количество интерференционных колец составляло  $N = 6$ . Полирование проводили до получения  $N = 3$ . Такая форма детали достигалась за 96 мин при обработке по классической схеме с вертикальным направлением рабочего усилия (рис. 2, кривая 1) и за 74 мин при его направлении по нормали (рис. 2, кривая 2). При этом локальная погрешность  $\Delta N$  в первом случае составляла 0,4, а во втором 0,3 ширины интерференционного кольца.

#### Особенности формообразования прецизионных поверхностей в условиях свободного притирания

В соответствии с гипотезой Ф. Престона, величина съема материала в произвольно выбранной точке заготовки при ее обработке в условиях свободного притирания пропорциональна скорости скольжения притирающихся поверхностей, давлению в зоне контакта и времени формообразования [7]. Эти параметры в свою очередь определяются геометрическими, кинематическими и динамическими параметрами технологического оборудования и режимами его работы. Для финишной обработки прецизионных сферических поверхностей деталей характерно сложное распределение относительных скоростей скольжения и давления в зоне контакта. Неодинаково для различных зон сопряженных поверхностей и время обработки, что обусловлено выходом верхнего звена за край нижнего. В результате съем припуска с заготовки и изнашивание инструмента также происходят неравномерно [8]. Поэтому аналитическое определение формы обработанной поверхности детали и изношенной рабочей поверхности инструмента является сложной задачей, решение которой необходимо начинать с установления геометрических и кинематических

связей используемого технологического оборудования в процессе его математического моделирования.

#### Математическое описание геометрических и кинематических связей станка

При обработке в условиях свободного притирания для определения скорости скольжения  $v$ , входящей в формулу Ф. Престона, необходимо учитывать линейные скорости всех движений, совершаемых деталью и инструментом. Одно из таких движений – возвратно-вращательное перемещение инструментов 8 и 10, осуществляемое штангами 26 и 27 соответственно (рис. 1). Следовательно, закон колебательных движений последних определяет закономерность возвратно-вращательного перемещения инструментов 8 и 10. Поэтому установим аналитическое выражение, характеризующее положение штанги в горизонтальной плоскости.

Поскольку звенья 20, 22 и 28, а также 21, 23 и 29 (рис. 1) в процессе обработки не изменяют своего положения друг относительно друга и их можно рассматривать как одно звено, то для описания движения штанг 26 и 27 достаточно исследовать работу шарнирного четырехзвенника 1–15–19–21 или 1–14–18–20. Введем в рассмотрение векторы  $\vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3, \vec{l}_4$  и  $\vec{s}$ , как это показано на рис. 3.

Для любого положения исследуемого механизма справедливы векторные равенства:

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

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

где  $\vec{l}_1 - \vec{l}_4$  – длина соответствующих звеньев шарнирного четырехзвенника;  $\vec{s}$  – переменный по модулю вспомогательный вектор, определяющий положение точки  $B'$ .

Из анализа рис. 1, 3 следует, что отклонение штанг 26 и 27 в горизонтальной плоскости от начального положения на угол  $\varphi_5$  происходит синхронно с изменением положения звеньев 20 и 21, определяемого углом  $\varphi_4$ , т. е.  $\varphi_5 \sim \varphi_4$ .

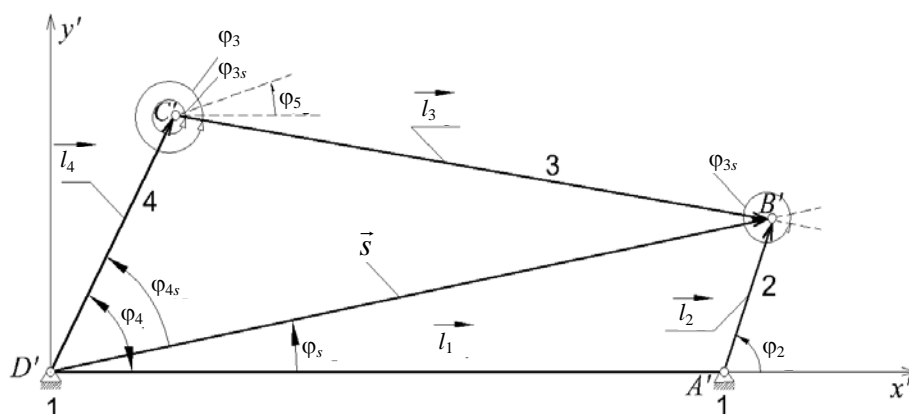


Рис. 3. Шарнирный четырехзвенник исполнительного механизма

Fig. 3. Four-bar linkage of executive mechanism

Будем учитывать, что  $\varphi_4$  зависит от угла  $\varphi_2$ , определяющего положение входного звена 2 (рис. 1, звенья 14 и 15). Причем при  $\varphi_2 = 0$   $\varphi_4 \neq 0$ . Последнее неравенство выполняется также в случае, когда  $l_2 \rightarrow 0$ , т. е. отсутствует движение всех звеньев станка и  $\varphi_5 = 0$ . Значение, которое принимает при этом  $\varphi_{4s}$ , в большинстве случаев составляет  $90^\circ$  ( $\varphi_{4s} = 90^\circ$ ) [9]. Тогда ранее записанное тождество  $\varphi_5 \sim \varphi_4$  можно представить в виде равенства

$$\varphi_5 = \varphi_4 - \varphi_{4s}. \quad (3)$$

Определим угол  $\varphi_4$ . Из рис. 3 видно, что

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

Из треугольника  $B'C'D'$  на рис. 3 можно записать

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

а для определения угла  $\varphi_s$  спроецируем равенство (2) на оси координат  $x'$  и  $y'$  неподвижной системы координат с началом в точке  $D'$ :

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

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

Учитывая (6) и (7), получим

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

а из треугольника  $D'A'B'$  следует, что

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

Найдем геометрические параметры возвратно-вращательного движения инструментов 8 и 10. Это движение определяется перемещением центра  $C$  их рабочей поверхности. Положение радиус-вектора  $\vec{l}_{OC}$  рассматриваемого центра в горизонтальной плоскости будем характеризовать углом  $\psi_C$  (рис. 4).

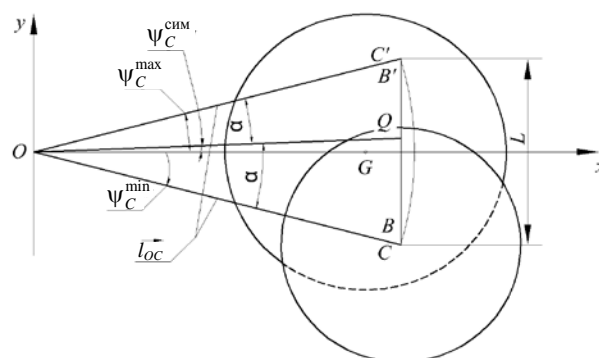

 Рис. 4. Траектория возвратно-вращательного движения центра  $C$  рабочей поверхности верхнего звена

 Fig. 4. Trajectory of backward-rotational motion of centre  $C$  in working surface of top link

В процессе обработки этот вектор и штанги 26, 27 (рис. 1) расположены в одной вертикальной плоскости, следовательно

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

Из рис. 4 видно, что геометрическими параметрами возвратно-вращательного движения

верхнего звена являются углы  $\psi_C^{\text{сим}}$ ,  $\psi_C^{\text{max}}$ ,  $\psi_C^{\text{min}}$ , определяющие положение его оси симметрии в крайних точках траектории  $L$ . Согласно (10) и (3), для нахождения этих углов достаточно вычислить  $\varphi_4^{\text{сим}}$ ,  $\varphi_4^{\text{max}}$ ,  $\varphi_4^{\text{min}}$ , которые характеризуют возвратно-вращательное движение звеньев 20, 21.

Как следует из рис. 5, 6, звено 4, а значит, и верхнее звено, занимают крайние положения, тогда как звенья 2 и 3 лежат на одной прямой.

Нетрудно заметить, что чем меньше длина кривошипа  $l_2$ , тем меньше диапазон изменения угла  $\varphi_4$ . При  $l_2 \rightarrow 0$   $\varphi_4$  стремится к  $\varphi_4^{\text{сим}}$ , и если принять  $l_2 = 0$ , то механизм станет неподвижным, и  $\varphi_4$  будет равным  $\varphi_4^{\text{сим}}$ , как это показано на рис. 7, из которого следует, что

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

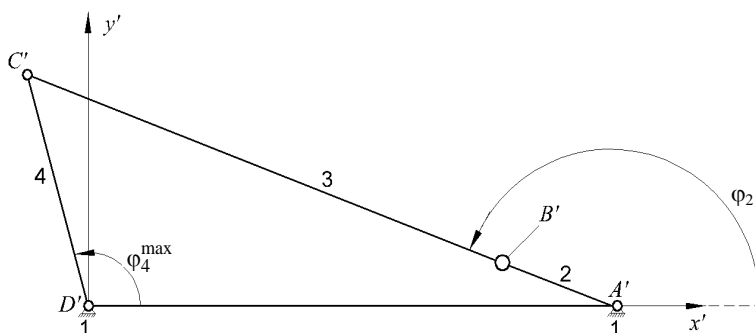


Рис. 5. К определению угла  $\varphi_4^{\text{max}}$

Fig. 5. For determination of angle  $\varphi_4^{\text{max}}$

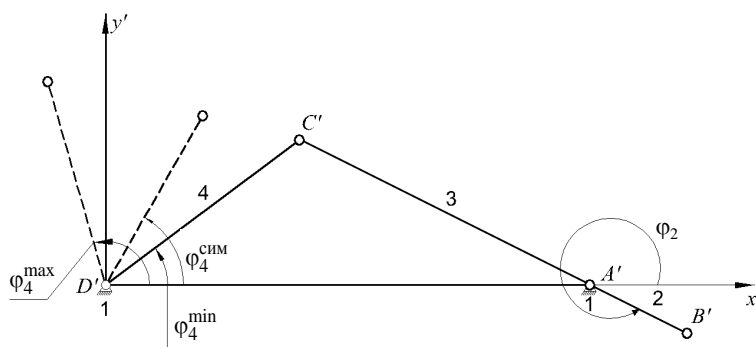


Рис. 6. К определению угла  $\varphi_4^{\text{min}}$

Fig. 6. For determination of angle  $\varphi_4^{\text{min}}$

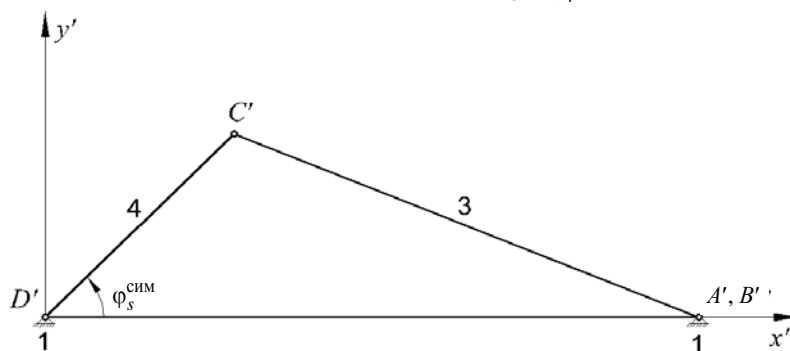


Рис. 7. К определению угла  $\varphi_4^{\text{сим}}$

Fig. 7. For determination of angle  $\varphi_4^{\text{сим}}$

Углы  $\varphi_4^{\text{сим}}$  и  $\varphi_4^{\text{мин}}$  определим из рис. 4, 5 соответственно:

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

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

Таким образом, выражения (10)–(13) и (3) позволяют определить предельные и средние значения углов  $\varphi_4$ ,  $\varphi_5$  и  $\psi_C$ .

Выясним условия, при которых возвратно-вращательное движение верхнего звена будет симметричным относительно оси  $x$ , проходящей через центр  $G$  рабочей поверхности нижнего звена. Согласно рис. 4, это условие запишется в виде  $\psi_C^{\text{сим}} = 0$  или, с учетом (10) и (3),  $\psi_4^{\text{сим}} = \varphi_{45}$ . Тогда, принимая во внимание (11), получим

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

Установим связь между величиной штриха и длиной кривошипа. Проекция на горизонтальную плоскость расстояния между крайними положениями центра шарика поводка является геометрическим наладочным параметром и называется длиной штриха  $L$ . В рычажных станках величина  $L$  регулируется посредством изменения длины  $l_2$  кривошипа, следовательно, необходимо установить аналитическую связь между этими геометрическими параметрами. Из рис. 3:

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

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

Аналогичные равенства можно записать и для угла  $\varphi_4$ :

$$\varphi_4^{\text{max}} = \varphi_4^{\text{сим}} + \arcsin \frac{L}{2l_{OC}}; \quad (15)$$

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

Учитывая зависимости (12) и (15), определим выражение для  $l_2$

$$l_2 = \sqrt{l_4^2 + l_1^2 - 2l_1l_4 \cos \left( \varphi_4^{\text{сим}} + \arcsin \frac{L}{2l_{OC}} \right)} - l_3. \quad (16)$$

Установим кинематические связи исполнительного механизма рычажного станка, для чего, исходя из рис. 2, запишем векторное равенство

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{l}_3 + \vec{l}_4. \quad (17)$$

Спроецировав это равенство на ось  $D'x'$  и продифференцировав его по обобщенной координате  $\varphi_2$ , после введения обозначений:

$$i_{32} = \frac{d\varphi_3}{d\varphi_2}; \quad i_{42} = \frac{d\varphi_4}{d\varphi_2}$$

получим

$$l_2 \sin \varphi_2 = l_3 \sin \varphi_3 i_{32} + l_4 \sin \varphi_4 i_{42}. \quad (18)$$

Величины  $i_{32}$  и  $i_{42}$  равны отношениям угловых скоростей  $\omega_3$  и  $\omega_4$  к угловой скорости  $\omega_2$  входного звена:

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

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

Величина  $i_{42}$  в рассматриваемом случае есть отношение угловой скорости выходного звена к угловой скорости входного и, следовательно, является кинематической передаточной функцией исполнительного механизма станка.

Если систему координат  $D'x'y'$  повернуть по часовой стрелке на угол  $\omega_3$ , то углы  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  и  $\omega_4$ , отсчитываемые от положительного направления оси  $D'x'$ , уменьшатся на эту же величину, и (18) примет вид

$$l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3) = l_4 \sin(\varphi_4 - \varphi_3) i_{42},$$

откуда

$$i_{42} = \frac{l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)}{l_4 \sin(\varphi_4 - \varphi_2)}. \quad (19)$$

Таким образом, если известен закон движения входного звена  $\omega_2 = \omega_2(t)$ , то законы вращательных движений звеньев 20, 21 и радиус-вектора  $\vec{I}_{OC}$  центра  $C$  рабочей поверхности верхнего звена будут иметь вид [10]:

$$\omega_4(t) = i_{42}\omega_2(t); \quad (20)$$

$$\omega_5(t) = \dot{\psi}_C. \quad (21)$$

В заключение рассмотрим движение центра  $C$  рабочей поверхности инструментов 8 и 10. Вектор  $\vec{V}_C$  линейной скорости этого центра определяется как векторное произведение вектора его угловой скорости  $\dot{\psi}_C$  и радиус-вектора  $\vec{I}_{OC}$ , т. е.

$$\vec{V}_C = \dot{\psi}_C \times \vec{I}_{OC}. \quad (22)$$

Поскольку в системе координат  $Oxyz$  векторы  $\dot{\psi}_C$  и  $\vec{I}_{OC}$  имеют проекции  $\dot{\psi}_C = (0 \ 0 \ \dot{\psi}_C)^T$  и  $\vec{I}_{OC} = (l_{OC} \cos \psi_C \ l_{OC} \sin \psi_C \ 0)^T$ , раскрыв векторное произведение (22)

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_C \times \vec{I}_{OC} &= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & 0 & \dot{\psi}_C \\ l_{OC} \cos \psi_C & l_{OC} \sin \psi_C & 0 \end{vmatrix} = \\ &= -\dot{\psi}_C l_{OC} \sin \psi_C \vec{i} + \dot{\psi}_C l_{OC} \cos \psi_C \vec{j}, \end{aligned}$$

получим вектор

$$\vec{V}_C = (-\dot{\psi}_C l_{OC} \sin \psi_C \ \dot{\psi}_C l_{OC} \cos \psi_C \ 0)^T, \quad (23)$$

модуль которого

$$V_C = \dot{\psi}_C l_{OC}. \quad (24)$$

### ВЫВОДЫ

1. Предложенный станок для одновременной двусторонней обработки оптических деталей со сферическими поверхностями позволяет

по меньшей мере в два раза снизить затраты времени на изготовление линз, повысить их качество за счет исключения температурной деформации заготовок на стадии блокировки поочередно за каждую из исполнительных поверхностей, что имеет место в классической технологии односторонней обработки и может быть положен в основу создания энерго- и ресурсосберегающего, экологически чистого производства оптико-электронных приборов.

2. Выполненное математическое моделирование созданного станка для двусторонней обработки линз с тонким центром позволило установить связь между обобщенной координатой его исполнительного механизма и положениями звеньев этого механизма, на основе которой получена аналитическая зависимость величины амплитуды колебательного движения выходного звена упомянутого механизма от длины его входного звена, что дает возможность рассчитать с помощью ЭВМ наиболее выгодные режимы обработки оптических деталей с учетом характера распределения припуска на обработку по исполнительным поверхностям заготовки.

3. Выполненные экспериментальные исследования полирования линз по схеме, когда рабочее усилие направлено по нормали к обрабатываемой поверхности, показали, что такая обработка позволяет ускорить процесс формообразования оптических деталей и способствует уменьшению локальных погрешностей на их исполнительных поверхностях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Способ одновременной двусторонней обработки деталей со сферическими поверхностями: пат. 7911 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/00 / А. С. Козерук, И. П. Филонов; дата публ. 30.04.2006.
2. Станок для одновременной двусторонней обработки линз с кривыми вогнутыми поверхностями: пат. 10726 Респ. Беларусь, МПК В24В 13/00 / А. С. Козерук, И. П. Филонов, А. А. Сухоцкий, В. Ф. Климович, Е. С. Таболина; дата публ. 30.06.2008.
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. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. 4-е изд. М.: Наука, 1988. 639 с.
  5. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. М.: Высш. шк., 1963. 519 с.
  6. Сулим, А. В. Производство оптических деталей / А. В. Сулим. М.: Высш. шк., 1969. 303 с.
  7. 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.
  8. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. 176 с.
  9. Козерук, А. С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на основе математического моделирования / А. С. Козерук. Минск, 1997. 317 с.
  10. Исследование кинематических закономерностей процесса двусторонней обработки двояковыпуклых оптических деталей / А. С. Козерук [и др.] // *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук*. 2008. № 2. С. 26–31.
- Поступила 22.12.2016  
 Подписана в печать 27.01.2017  
 Опубликовано онлайн 29.09.2017
- REFERENCES
1. Kozeruk A. S., Filonov I. P. (2006) *Method for Simultaneous Two-Sided Machining of Parts with Spherical Surface*: Patent Republic of Belarus No 7911 (in Russian).
  2. Kozeruk A. S., Filonov I. P., Sukhotsky A. A., Klimovich V. F., Tabolina E. S. (2008). *Machine-Tool for Simultaneous Two-Sided Processing of Lenses with Steep Concave Surface*: Patent Republic of Belarus No 10726 (in Russian).
  3. Filonov I. P., Klimovich V. F., Kozeruk A. S. (1995). *Control Over Shape-Formation of Precision Surface of Machine and Device Parts*. Minsk, DizaynPRO Publ. 208 (in Russian).
  4. Artobolevsky I. I. (1988). *Theory of Mechanisms and Machines*. 4<sup>th</sup> Edition. Moscow, Nauka Publ. 639 (in Russian).
  5. Bardin A. N. (1963). *Technology of Optical Glass*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 519 (in Russian).
  6. Sulim A. V. (1969). *Production of Optical Parts*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 303 (in Russian).
  7. Preston E. W. (1927). The Theory and Design Plate Glass Polishing Machines. *Journal of the Society Technology*, (11), 214–256.
  8. Kozeruk A. S. (1997). *Shape-Formation of Precision Surfaces*. Minsk, Publishing House “VUZ-UNITI”. 176 (in Russian).
  9. Kozeruk A. S. (1997). *Control Over Shape-Formation of Precision Surface of Machine and Device Parts on the Basis of Mathematical Simulation*. Minsk. 317 (in Russian).
  10. Kozeruk A. S., Sukhotskii A. A., Klimovich V. F., Filonova M. I. (2008) Investigation of Kinematics Regularities in Two-Sided Processing of Concavo-Convex Optical Parts. *Vesti Natsyional'nai Akademii Navuk Belarusi. Ser. Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of National Academy of Science of Belarus. Series of Physical and Technical Sciences*, (2), 26–31 (in Russian).
- Received: 22.12.2016  
 Accepted: 27.01.2017  
 Published online: 29.09.2017