

**ПЕРСПЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДВУСТОРОННЕЙ ОБРАБОТКИ  
ВЫСОКОТОЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ  
СО СФЕРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ**

*Инж. КЛИМОВИЧ В. Ф.<sup>1)</sup>, докт. техн. наук, проф. КОЗЕРУК А. С.<sup>2)</sup>*

<sup>1)</sup>СП ЗАО «Международный деловой альянс»,

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет

Постоянное совершенствование изделий точного машино- и приборостроения требует повышения качества деталей и снижения их себестоимости. Качество функциональных деталей оптических приборов определяется в первую очередь величиной локальных погрешностей на исполнительных поверхностях. Одной из причин появления обсуждаемой погрешности являются упругие деформации в стекле, возникающие при закреплении заготовки на приспособлении для последующих шлифования и полирования. По существующей технологии блокировка оптических деталей производится посредством наклеенной смолы, которую нагревают наряду с приспособлением и заготовкой. Из-за различных температурных коэффициентов линейного расширения стекла, металла и наклеенного вещества возникают натяжения

в детали, которые при снятии последней с блока после обработки релаксируют, вследствие чего и появляются локальные погрешности.

Отмеченных недостатков можно избежать, если обрабатывать одновременно обе поверхности линзы без ее закрепления поочередно за каждую из исполнительных поверхностей, что исключает деформирование детали и, следовательно, возникновение температурных локальных погрешностей.

Для реализации технологии одновременной двусторонней обработки высокоточных линз по

методу свободного притирания создано специальное технологическое оборудование.

Среди предложенных технических решений в устройстве для шлифования и полирования двояковыпуклых линз [1] привод детали содержит ведущий, опорный и прижимной ролики с коническими канавками на торцах, в которые устанавливается заготовка. Предусмотрена возможность смещения прижимного ролика в радиальном направлении линзы, что позволяет регулировать силу ее зажима, не вызывая упругих деформаций в стекле, являющихся источником локальных погрешностей на исполнительных поверхностях детали.

Особенностью устройства для двусторонней обработки линз с выпукло-вогнутыми и плосковогнутыми поверхностями диаметром до 90 мм является компоновка механизмов качания инструментов, позволяющая расположить заготовку в рабочей зоне вертикально [2]. Отмеченная схема формообразования обеспечивает более равномерное распределение абразивной суспензии в зоне соприкосновения инструмента и детали. В результате практически исключается локальная погрешность в виде сорванного края.

Для обработки двояковогнутых линз с широким диапазоном значений радиусов кривизны и диаметров разработаны два станка. Один из них предназначен для формообразования линз, диаметр которых не превышает  $1/6$  радиуса кривизны, а другой – для линз диаметром более  $1/6$  этого радиуса. Принципиальная ки-

нематическая схема второго станка показана на рис. 1.

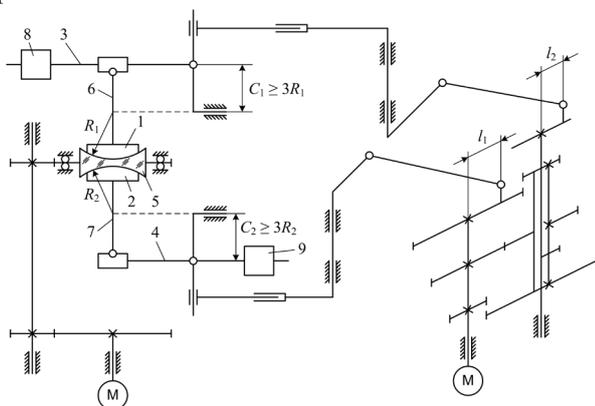


Рис. 1. Схема станка для одновременной двусторонней обработки линз с кривыми вогнутыми поверхностями

В качестве исполнительного механизма созданного станка выбран шарнирный четырехзвенник, изменением размера входного звена которого ( $l_1, l_2$  на рис. 1) устанавливается требуемая по условиям обработки величина амплитуды возвратно-вращательного перемещения инструментов 1, 2, рабочее усилие на которые регулируется с помощью грузов 8, 9.

Взаимодействия звеньев станка отображены на рис. 1, а их движения понятны из его анализа.

Для одновременной обработки обеих сферических поверхностей линзы не может быть использован традиционный метод их крепления, при котором заготовку детали поочередно фиксируют за каждую из исполнительных поверхностей, обрабатывая при этом одну из них. В качестве возможного варианта решения проблемы предложен способ точечного крепления линзы за боковую поверхность, когда заготовку помещают в посадочное отверстие оправки определенной конструкции и в зазор между оправкой и боковой поверхностью линзы наносят клеящее вещество в виде шариков диаметром 1–2 мм. Такое крепление не вызывает упругих деформаций в стекле, в то время как классические эластичный и жесткий методы блокировки приводят к появлению локальной погрешности на рабочей поверхности линзы в пределах от 0,2 до 2,0 интерференционных колец Ньютона (0,05–0,50 мкм, в зависимости от конструкции детали и метода блокировки – эластичный, эластичный с разгрузкой или жесткий).

Проведенные экспериментальные исследования показали, что обработка высокоточных линз с радиусами кривизны от 12 до 95 мм (кривые сферические поверхности) становится менее трудоемкой и более качественной, если в процессе колебательного движения инструмента рабочее усилие направлять по нормали к исполнительной поверхности детали. Для реализации выявленной особенности в предложенной схеме станка возвратно-вращательное движение инструментов 1, 2 организовано с помощью рычагов 3, 4, установленных с возможностью вращения в вертикальной плоскости вокруг центров кривизны сферических поверхностей детали 5. При этом поводки 6, 7 соединены с рычагами 3, 4 шарнирно, а с инструментами – жестко. Такая конструкция рабочей зоны требует определенной длины поводка, при которой исключается раскрытие стыка

в системе заготовка – инструмент, приводящее к появлению локальной погрешности  $\Delta N$  в краевой зоне детали. Для выявления оптимальной длины поводка были проведены экспериментальные исследования процесса полирования вогнутой сферической поверхности радиусом кривизны 33,19 мм плосковогнутой линзы диаметром 90 мм.

В процессе проведения экспериментальных исследований изменяли длину поводка. Контролировали локальную погрешность  $\Delta N$ , представляющую собой величину отклонения интерференционного кольца Ньютона от правильной геометрической формы, на полированной поверхности. Контроль выполняли на интерферометре KUI-35/RME-500 фирмы KUGLER (ФРГ). Результаты измерения приведены в табл. 1. Анализ таблицы показывает, что для исключения погрешности  $\Delta N$  длина поводка  $L$  должна составлять не менее  $4R$ .

Таблица 1  
Зависимость локальной погрешности  $\Delta N$  ( $\Delta h$ ) от длины поводка  $L$

$L$ , мм	$3R$	$3,2R$	$3,4R$	$3,6R$	$3,8R$	$4R$	$4,2R$
$\Delta N$	2	1,4	0,8	0,1	0,08	0,05	–
$\Delta h$ , мкм	0,5	0,35	0,2	0,025	0,02	0,0125	–

Одной из характерных особенностей обработки деталей с прецизионными поверхностями

по методу свободного притирания является необходимостью периодически выполнять регулирование наладочных параметров станка. При этом выбор наиболее эффективного из них определяет оператор, исходя из своего опыта и интуиции, причем не всегда удачно.

С целью создания инженерных методов управления процессом формообразования высокоточных поверхностей деталей машин и приборов по методу свободного притирания выполнено математическое моделирование закономерностей съема припуска с обрабатываемой поверхности полноразмерным инструментом при его сложном перемещении по вращающейся детали.

Моделирование основано на использовании гипотезы Ф. Престона, согласно которой срабатывание  $U$  в произвольно выбранной опорной точке на обрабатываемой поверхности за время обработки  $T$  можно определить следующим образом:

$$U = k \int_0^T v p dt, \quad (1)$$

где  $k$  – технологический коэффициент, зависящий от марки стекла, материала инструмента, состава и зернистости зерен абразивной суспензии, а также от условий обработки;  $v$  – скорость опорной точки заготовки по отношению к поверхности инструмента;  $p$  – давление в зоне соприкосновения инструмента и заготовки.

Вектор скорости скольжения  $\vec{v}$  при обработке в условиях свободного притирания, когда деталь и инструмент вращаются вокруг своих осей с частотой соответственно  $\omega_d, c^{-1}$ , и  $\omega_1, c^{-1}$ , а последний, кроме того, совершает переносное возвратно-вращательное движение с частотой  $\Omega_1, c^{-1}$ , можно представить в виде

$$\vec{v} = ((\vec{\omega}_d - \vec{\omega}_1 - \vec{\Omega}_1) \times \vec{r}_1), \quad (2)$$

где  $\vec{r}_1$  – радиус-вектор опорной точки, м.

Частота  $\Omega_1$  в случае обработки, например по схеме, реализованной в устройстве для двустороннего формообразования отрицательных менисков, определяется следующим образом. Принимая во внимание векторную модель обработки на рассматриваемом устройстве (рис. 2), можно записать равенство

$$\vec{l}_{ш} = \vec{g} + \vec{h}, \quad (3)$$

спроецировав которое на оси  $x$  и  $y$ , получим систему уравнений:

$$\begin{cases} l_{ш} \cos \varphi_{ш} = g + h \cos \varphi_1; \\ l_{ш} \sin \varphi_{ш} = h \sin \varphi_1, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\varphi_{ш}$  и  $\varphi_1$  – углы отклонения штанги и первого инструмента 2 от исходного положения, которые согласно теории механизма шарнирного четырехзвенника и второму уравнению системы (4) можно записать в виде:

$$\varphi_{ш} = 180^\circ + \varphi_x - \varphi_{42} - \varphi_1; \quad (5)$$

$$\varphi_1 = \arcsin\left(\frac{l_{ш} \sin \varphi_{ш}}{h}\right); \quad (6)$$

$l_{ш}$  и  $h$  – длина штанги и поводка соответственно (конструктивные параметры);  $g$  – расстояние между центром координат  $O$  и центром сферы  $O_1$  первой поверхности детали 1.

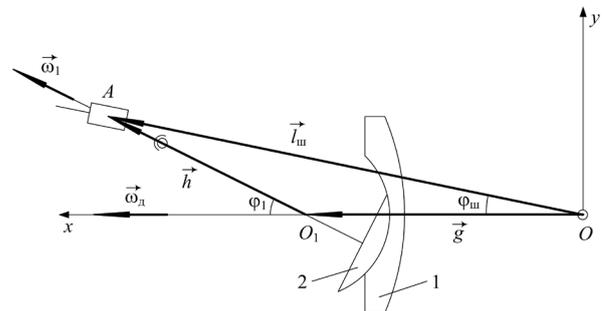


Рис. 2. Векторная модель обработки первой поверхности детали

Слагаемое  $\varphi_{42}$  в уравнении (5) определяется по стандартной формуле для шарнирного четырехзвенника [3], которая содержит размеры звеньев конкретного исполнительного механизма ( $\varphi_x$  в выражении (5) – конструктивный параметр).

Продифференцировав уравнения (4) по времени, получим выражение для  $\Omega_1$  в виде

$$\dot{\varphi}_1 = \Omega_1 = \frac{\dot{\varphi}_{ш} l_{ш}}{h \cos(\varphi_1 - \varphi_{ш})}. \quad (7)$$

Если учесть направление векторов  $\vec{\omega}_d, \vec{\omega}_1$  и  $\vec{\Omega}_1$ , показанных на рис. 1 (вектор  $\vec{\Omega}_1$  направлен

перпендикулярно рисунку), и представить их в координатной форме, то, раскрыв векторное равенство (2) и выполнив соответствующие

$$\begin{cases} v_x = (\Omega_1 Y_M - \omega_1 \sin \varphi_1 Z_M) \cos \Delta - (\Omega_1 Z_M + \omega_1 \sin \varphi_1 Y_M) \sin \Delta; \\ v_y = (\omega_1 \cos \varphi_1 - \omega_d)(Y_M \sin \Delta + Z_M \cos \Delta) - \Omega_1 X_M; \\ v_z = \omega_1 \sin \varphi_1 X_M + (\omega_d - \omega_1 \cos \varphi_1)(Y_M \cos \Delta - Z_M \sin \Delta). \end{cases} \quad (8)$$

Тогда по формуле

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (9)$$

можно рассчитать величину скорости скольжения в произвольно выбранной опорной точке на поверхности детали.

Входящие в систему уравнений (8) множители  $X_M, Y_M, Z_M$  представляют собой координаты радиус-вектора  $\vec{r}_1$  опорной точки  $M$  в неподвижной системе координат  $OXYZ$  с началом на оси возвратно-вращательного движения выходного звена конкретного исполнительного механизма технологического оборудования. Эти координаты рассчитываются по формулам:

$$\begin{cases} X_M^{nk} = R_1 \cos\left(\frac{n-0,5}{N} \arcsin \frac{D_1}{2R_1}\right); \\ Y_M^{nk} = R_1 \sin\left(\frac{n-0,5}{N} \arcsin \frac{D_1}{2R_1}\right) \cos\left(k \frac{2\pi}{K}\right); \\ Z_M^{nk} = R_1 \sin\left(\frac{n-0,5}{N} \arcsin \frac{D_1}{2R_1}\right) \sin\left(k \frac{2\pi}{K}\right), \end{cases} \quad (10)$$

где  $N$  и  $K$  – общее число зон и секторов, на которое разбита обрабатываемая поверхность детали посредством проведения концентрических окружностей и лучей;  $n$  и  $k$  – номера зоны и сектора, в центре площади пересечения которых выбрана опорная точка  $M$ ;  $R_1$  и  $D_1$  – радиус и диаметр первой поверхности детали.

Система уравнений (10) получена в результате проецирования радиуса-вектора опорной точки  $M$  на соответствующие оси неподвижной системы координат с началом на оси линзы.

Аналогичным образом могут быть получены необходимые выражения для расчета скорости  $v$  на второй поверхности линзы.

преобразования, получим координаты скорости скольжения  $v$  в виде:

Текущее значение давления  $p_r$  на расстоянии  $x$  от оси вращения детали определяли по формуле

$$p_r = \frac{p_{r2} - p_{r1}}{l_1 - l_2} l_r, \quad (11)$$

где  $p_{r1} = p_0 - \frac{p_0}{L_{\max} - L_{\min}}$ ;  $p_{r2} = p_0 + \frac{p_{\max}}{L_{\max} - L_{\min}} \times$

$\times (L_r - L_{\min})$  – минимальное и максимальное давления в текущей эпюре;  $l_1 = r \sin \left[ \gamma_{\text{и}} - \arcsin \times$

$\times \left( \frac{L_r}{2r} \right) \right]$  – расстояние от края инструмента,

контактирующего с деталью, до оси вращения детали;  $\gamma_{\text{и}}$  – угол раствора инструмента;  $l_2 = 0,5d_d$ ;  $l_r = l_1 + x$  – то же от края инструмента до рассматриваемой точки с текущим давлением  $p_r$ ;  $x$  – то же от оси вращения детали до точки с давлением  $p_r$ .

Разработана методика оценки напряженного состояния линз с тонким центром, позволяющая определить положение плоскости приложения усилия зажима деталей данного класса за боковую поверхность в процессе блокировки, при котором упругие деформации в стекле принимают минимальное значение, способствуя тем самым уменьшению погрешности радиуса кривизны линзы. При этом использовалась усовершенствованная математическая модель однородного упругого изотропного деформирования твердого тела [4]. Для применения данной модели при исследовании распределения напряжений в линзе последняя аппроксимировалась совокупностью элементов с конечным числом степеней свободы. Отмеченные элементы взаимосвязаны между собой только в узловых точках, куда прикладываются фиктивные силы, эквивалентные поверхност-

ным напряжениям, распределенным по границам элементов.

При реализации обсуждаемой методики выполняют следующие действия:

1. Создают твердотельную модель. В связи с симметричностью рассматриваемой детали создается модель четверть области линзы с конкретными геометрическими параметрами.

2. Разбивают четверть область на конечные элементы.

3. Задают краевые условия по перемещениям на участках границы области и выполняют численные исследования, в процессе которых определяют зависимость перемещений в стекле от положения плоскости приложения усилия к ее боковой поверхности.

Разработана методика теоретических исследований процесса одновременного двустороннего формообразования высокоточных линз на созданном технологическом оборудовании. Сущность методики заключается в следующем. Используя данные табл. 2, полученные экспериментальным путем, для линзы с конкретными геометрическими параметрами первоначально назначают близкие к оптимальным значениям переносную скорость инструмента  $\omega_2$ , скорость вращения детали  $\omega_d$  в зависимости от диаметра последней, точности обрабатываемой поверхности и динамики технологического оборудования, исходя из диаметра детали  $d_d$  принимают диаметр инструмента  $d_n$  и рассчитывают параметр  $Q = pI$  ( $I$  – длина пути трения опорной точки, произвольно выбранной на поверхности детали, относительно инструмента) в диаметральной сечении линзы для различных значений амплитуды  $L$  возвратно-вращательных движений инструмента. Выполнив анализ полученных результатов, определяют такую величину  $L$ , при которой параметр  $Q$  принимает одинаковое значение в центральной и краевой зонах детали, т. е. происходит равномерное удаление материала по всей поверхности линзы.

Назначив оптимальную величину  $L$  и прежние  $\omega_d$  и  $\omega_2$ , уточняют диаметр инструмента, при котором обеспечивается одинаковый съём припуска по всей поверхности линзы.

Далее принимают выявленные наиболее выгодные значения  $L$ ,  $d_n$ ,  $\omega_d$  и уточняют наладочный параметр  $\omega_2$ .

В заключение уточняют скорость вращения детали  $\omega_d$  при оптимальных  $L$ ,  $d_n$ ,  $\omega_2$ .

Для проведения исследований, направленных на определение наиболее выгодных значений скоростей  $\omega_d$  и  $\omega_2$  в зависимости от заданной точности радиусов кривизны  $\Delta R$  и значений диаметра детали  $d_d$ , а также от величины биений шпинделя  $\Delta_{шп}$  и стойки рычага станка  $\Delta_r$ , был изготовлен экспериментальный образец станка, схема которого показана на рис. 3. В этом станке шпиндель 1 и стойка 2 рычага 3 смонтированы в нижних сферических подшипниках качения 4, 5 и в верхних подшипниках скольжения 6, 7 в виде разрезных втулок, установленных с возможностью радиального смещения их секторов.

Для обеспечения требуемой величины биения шпинделя  $\Delta_{шп}$  и стойки рычага  $\Delta_r$  секторы подшипников 6 и 7 смещались в направлении от оси вращения упомянутых элементов станка. Величину смещения измеряли с помощью микронного индикатора часового типа.

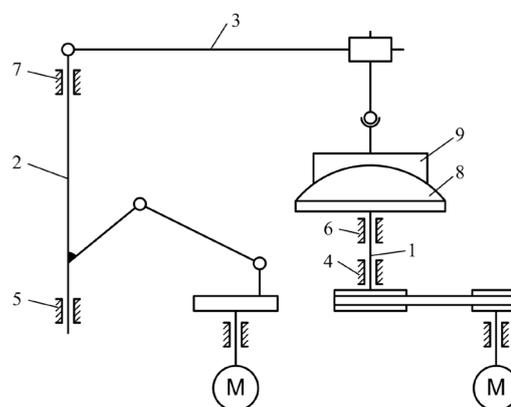


Рис. 3. Схема экспериментального образца станка

В процессе проведения экспериментов выполняли шлифование и полирование линзы 8 из оптического стекла марки К8. Диаметр детали составляет 82 мм, а радиус кривизны – 112,43 мм. Оценку результатов обработки проводили посредством контроля локальной погрешности  $\Delta N$  на отполированной поверхности. Контроль  $\Delta N$  выполняли на универсальном интерферометре KUI-35/RME-500.

Режимы обработки считались удовлетворительными при достижении  $\Delta N = \pm 0,1$  («бугор» или «яма») величины расстояния между интерференционными кольцами Ньютона, что соответствовало микронеровностям на поверхности детали в пределах  $\pm 0,025$  мкм.

Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2

Рекомендуемые значения  $\omega_1$  и  $\omega_2$  в зависимости от диаметра детали  $d_d$ , точности радиусов кривизны ее исполнительных поверхностей  $\Delta R$ , а также величины биений шпинделя  $\Delta_{шп}$  и стойки рычага станка  $\Delta_p$

$d_d$ , мм	$\Delta R$ , мкм	$\Delta_{шп}$ , мкм	$\Delta_p$ , мкм	$\omega_1$ , с <sup>-1</sup>	$\omega_2$ , с <sup>-1</sup>
20–45	0,25	2	10	4,6	3,9
		5	15	3,8	3,3
		8	20	3,2	2,4
	0,50	2	10	6,7	4,4
		5	15	6,0	3,6
		8	20	5,1	2,7
	1,00	2	10	10,2	4,9
		5	15	9,0	4,0
		8	20	7,9	3,1
50–75	0,25	2	10	3,1	3,4
		5	15	2,5	2,7
		8	20	1,7	1,9
	0,50	2	10	4,6	3,9
		5	15	4,0	3,2
		8	20	3,3	2,3
	1,00	2	10	7,6	4,2
		5	15	7,0	3,4
		8	20	6,2	2,7
80–110	0,25	2	10	2,6	2,8
		5	15	2,0	2,2
		8	20	1,2	1,4
	0,50	2	10	3,8	3,0
		5	15	3,5	2,6
		8	20	3,0	1,9
	1,00	2	10	6,5	3,7

		5	15	6,0	3,0
		8	20	5,3	2,4

## ВЫВОДЫ

1. Созданное технологическое оборудование для двусторонней обработки позволяет, по меньшей мере, в два раза снизить энерго- и трудоемкость производства оптических деталей с высокоточными сферическими поверхностями, а также повысить их качество за счет исключения термической операции блокировки.

2. Разработанная методика проведения численных исследований дает возможность на стадии проектирования технологического процесса рассчитать с помощью ЭВМ наиболее выгодные наладочные параметры технологического оборудования в каждом конкретном случае.

3. Предложенная методика оценки распределения напряжений в линзе в случае ее фиксации за боковую поверхность может быть использована при разработке оправ для крепления линз на стадии совмещения оптической и геометрической осей и в процессе их крепления в оптической системе прибора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Устройство** для одновременной двусторонней обработки оптических деталей с выпуклыми сферическими поверхностями: пат. 9420 Респ. Беларусь, МПК7 В 24 В 13/00 / А. С. Козерук, В. Ф. Климович, М. И. Филонова, И. В. Руттик, Е. Н. Горбаченя; заявитель Белор. национ. техн. ун-т. – № а 20041220; заявл. 23.12.2004; опубл. 30.06.2007.

2. **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; заявитель Белор. национ. техн. ун-т. – № а 20040552; заявл. 15.06.2004; опубл. 28.02.2007.

3. **Артоболевский, И. И.** Теория механизмов и машин: учеб. для вузов / И. И. Артоболевский. – 4-е изд. – М.: Наука, 1988. – С. 112–117.

4. **ANSYS, Inc.** Theory Reference. Release 5.7 Documentation for ANSYS.

Поступила 12.12.2011