

2. **Vrubel, Yu. A.**, & Kapsky, D. V. (2010) *To Driver About Road Traffic*. 3<sup>rd</sup> Revised Edition. Minsk: BNTU. 139 p. (in Russian).
3. **Vrubel, Yu. A.**, Kapsky, D. V., & Kot, E. N. (2006) *Determination of Losses in Road Traffic*. Minsk: BNTU, 240 p. (in Russian).
4. **About approval** of the Concept of Ensuring Road Safety in Belarus: the Republic of Belarus Council of Ministers Decision on the 14<sup>th</sup> of June, 2006, No 757. *Natsional'nyi reestr Pravovoykh Aktov Respubliki Belarus'* [The Republic of Belarus National Registry of Legislative Acts], 2006, 5/22459 (in Russian).
5. **Elvick, R.**, Vaa, T., Hoyer, A., & Sorensen, M. (2009) *The Handbook of Road Safety Measures*. Bingley, Emerald Group Published Limited. 1124 p.
6. **Main** transport indices. *UN Economic Commission for Europe*. Available at: [http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/brochures/transport\\_indicators\\_2010r.pdf](http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/brochures/transport_indicators_2010r.pdf). (accessed 20 February 2012).
7. **Zhivogliadov, V. G.** (2004) Principles for Qualitative Evaluation of Road Traffic Organization and Management. *Organization and Safety of Road Traffic in Big Cities: Book of Reports of 6<sup>th</sup> International Conference Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*, 222–227 (in Russian).
8. **Zyrianov, V. V.** (1993) *Criteria for Evaluation of Traffic Operation Conditions and Traffic Stream Models*. Kemerovo: Kuzbass Polytechnical Institute. 164 p. (in Russian).
9. **El'vik, R.**, Miusen, A. B., Vaa, T., & Silianov, V. V. (2001) *Reference Book on Road Traffic Safety*. Moscow, Moscow Automobile and Road Institute Publ. 754 p. (in Russian).
10. **Kapsky, D. V.** (2008). *Accident Forecast in Road Traffic*. Minsk: BNTU. 243 p. (in Russian).
11. **Vrubel, Yu. A.**, & Kapsky, D. V. (2013) *Risks in Road Traffic*. Moscow, Novoye Znanie Publ. 244 p. (in Russian).
12. **Kapskii, D. V.**, Rozhanskii, D. V., Navoi, D. V., & Kot, E. N. (2011) *Coordinated Management of Road Traffic*. Minsk: BNTU. 230 p. (in Russian).

Поступила 20.10.2014

УДК 681.7.023.72

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ОДНОВРЕМЕННОГО ДВУСТОРОННЕГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЛИНЗ НА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ СТАДИИ ОБРАБОТКИ

*Доктора техн. наук, профессора ФИЛОНОВ И. П., КОЗЕРУК А. С., магистрант ЛАПТЕВА Е. О.,  
кандидаты техн. наук, доценты ФИЛОНОВА М. И., КУЗНЕЧИК В. О.,  
студ. ВАСИЛЕВИЧ А. В.*

*Белорусский национальный технический университет*

E-mail: akozyerk@mail.ru

Разработана методика определения оптимальных наладочных параметров технологического оборудования, обеспечивающих заданную точность детали на предварительной стадии обработки в условиях свободного притирания. Показана схема разбиения поверхности линзы на элементарные площадки, в центре которых выбираются так называемые опорные точки и рассчитываются пути их трения, прямо пропорционально связанные с интенсивностью съема припуска с заготовки в условиях обработки по методу свободного притирания. Предложена методика определения диапазона изменения длины штриха колебательных движений инструмента и получены аналитические выражения для расчета этого диапазона в каждом конкретном случае. Выполнен расчет путей трения в опорных точках диаметрального сечения линзы для различных комбинаций таких наладочных параметров технологического оборудования для одновременной обработки линз, как длина штриха колебательного движения инструмента, частота вращения линзы и входного звена исполнительного механизма станка, диаметр инструмента и отношение частоты его вращения к частоте вращения линзы.

Показано, что если управление процессом формообразования проводить посредством регулирования частот вращения линзы и входного звена исполнительного механизма станка, то при их одинаковых значениях получается неприемлемая точность обработанной поверхности, а наивысшей точности обработанной поверхности можно достичь при регулировании величины отношения частот вращения инструмента и линзы в комбинации с изменением диаметра инструмента. Проведены экспериментальные исследования процесса шлифования выпуклой поверхности

линзы, которые коррелируют с теоретическими расчетами. Метод исследования – математическое моделирование рабочей зоны технологического оборудования для обработки высокоточных сферических поверхностей в условиях свободного притирания.

**Ключевые слова:** технологическое оборудование, наладочные параметры, съем припуска, путь трения, элементарная площадка, рабочая поверхность.

Ил. 6. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

## CONTROL OVER PROCESS OF SIMULTANEOUS DOUBLE-SIDED LENS FORMATION AT PRELIMINARY PROCESSING STAGE

FILONOV I. P., KOZERUK A. S., LAPTEVA E. O., FILONOVA M. I.,  
KUZNECHIK V. O., VASILEVICH A. V.

*Belarusian National Technical University*

Methodology for determination of optimum setting parameters for technological equipment that ensure the prescribed accuracy of a work-piece at the preliminary machining stage under conditions of free rubbing has been developed in the paper. The paper describes a scheme for dividing lens surface into elementary sites. The so called reference points are accepted in the centre of the sites and ways of their friction are calculated which are directly-proportional connected with intensity of metal envelope removal under machining conditions using free rubbing method. Methodology for determination of range in length change of line mark during tool oscillatory motion has been proposed and analytical expressions for calculation of this range for every specific case have been obtained in the paper. The paper contains calculation of friction ways in reference points of lens diametrical cross-section for various combinations of such setting parameters of technological equipment to ensure simultaneous lens processing as length of mark line during tool oscillatory motion, rotation frequency of a lens and an input element in an executing mechanism of a machine tool, tool diameter and ratio of its frequency rotation to lens frequency rotation.

The paper shows that if control over the shaping process is executed through regulation of rotation frequency of the lens and the input element in the machine tool executing mechanism then unacceptable accuracy of the machined surface is obtained in case of their equal values. The highest accuracy of the machined surface can be reached while regulating ratio value of tool and lens rotation in combination with the change of tool diameter. Experimental investigations on polishing of lens convex surface have been carried out and they correlate with theoretical calculations. Such method of investigations as a mathematical simulation of technological equipment operational zone for processing highly-accurate spherical surfaces under conditions of free rubbing has been used in the paper.

**Keywords:** technological equipment, setting parameters, metal envelope removal, friction way, elementary site, operational surface.

Fig. 6. Tab. 1. Ref.: 10 titles.

**Введение.** Одной из особенностей технологии оптического приборостроения является необходимость изготовления оптических деталей с высокой точностью, которая в настоящее время обеспечивается в основном при реализации метода свободного притирания инструмента и заготовки на рычажных шлифовально-полировальных станках модели ШП [1]. Для управления процессом формообразования исполнительных поверхностей деталей на этих станках изменяют величину их наладочных параметров (длину штриха возвратно-вращательных перемещений верхнего звена и количество его двойных ходов в минуту, частоту вращения нижнего звена и др. [2]). На финишной операции шлифования и на этапе полиро-

вания регулируют только один из наладочных параметров станка. В противном случае происходит сравнительно резкое изменение условий притирания инструмента и заготовки и на поверхности последней образуется погрешность в виде нескольких сфер [3]. И если такое случается на стадии полирования, то деталь направляют на перешлифовку, что приводит к увеличению затрат времени на единицу продукции.

По-иному можно организовать обработку оптических деталей на этапе предварительного и основного шлифования. С целью уменьшения времени съема припуска на данной стадии формообразования целесообразно одновременно регулировать по меньшей мере два наладочных параметра технологического оборудова-

ния, а для минимизации возникающей при этом погрешности формы изделия, которая может быть исправлена на этапе финишного шлифования, необходимо в каждом конкретном случае принимать определенные значения регулируемых наладочных параметров. Выявление последних в настоящее время производит рабочий-оптик в процессе проведения дополнительных экспериментов, исходя из своего опыта и интуиции, причем не всегда удачно [4].

Уменьшения непроизводительных затрат времени на обсуждаемой операции обработки оптических деталей (в частности, линз) можно достичь посредством расчета оптимальных режимов формообразования на этапе разработки технологического процесса. Созданию методики определения рациональных наладочных параметров станка с помощью ЭВМ в зависимости от конкретной ситуации и посвящены исследования авторов статьи.

**Методика определения оптимальных наладочных параметров.** Предлагаемая методика включает в себя разработку математической модели процесса двусторонней обработки высокоточных поверхностей линз в условиях свободного притирания, получение аналитического выражения для расчета путей трения  $l$  инструмента относительно детали, расчет этих путей для различных наладочных параметров технологического оборудования и определение качества обработанной поверхности.

Рассчитывали путь трения в так называемых опорных точках на поверхности детали, которые выбирали следующим образом. Обрабатываемую поверхность линзы радиусом  $R$  разбивали на  $n$  кольцевых зон (рис. 1) размером

$$\Delta\beta = \arcsin \frac{d}{2R} / n, \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр линзы.

Зоны пронумеровали, начиная с центральной (от 1 до 5). Далее поверхность линзы разбивали на  $m$  (от 1 до 8) секторов размером

$$\Delta\alpha = \frac{2\pi}{m}. \quad (2)$$

На рис. 1 показаны пять кольцевых зон и восемь секторов. Введем жестко связанную

с центром кривизны  $O$  сферической поверхности линзы полярную систему координат  $OXYZ$ , ось  $OX$  которой направлена вдоль одного из лучей, ограничивающих секторы, которые пронумеруем, начиная от оси  $OX$ , против часовой стрелки. В результате поверхность линзы разбивается на  $mn$  элементарных площадок  $[dS_{ij}]$ ;  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, m}$ . Площадка  $[dS_{ij}]$  представляет собой пересечение кольцевой зоны с номером  $i$  и  $j$ -м сектором.

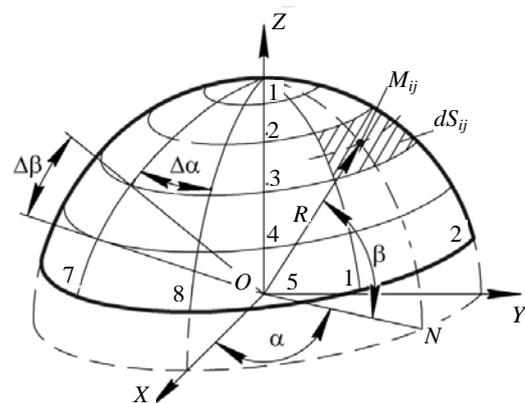


Рис. 1. Моделирование обрабатываемой поверхности линзы

На каждой элементарной площадке  $[dS_{ij}]$  выберем в качестве опорной точку  $M_{ij}$ , расположенную на пересечении окружности и делящую пополам  $i$ -ю кольцевую зону, и луча, делящего пополам  $j$ -й сектор [5]. Положение этой точки определяется следующими тремя величинами: радиусом  $R$ , углом  $\alpha = \angle XON$  между полуплоскостями  $ZOX$  и  $ZON$ , углом  $\beta = \angle XOM_{ij}$  между осью  $OZ$  и радиусом  $R$ , направленным в точку  $M_{ij}$ :

$$M_{ij} = M_{ij}(R, \alpha, \beta). \quad (3)$$

В соответствии с построением углы  $\alpha$  для всех опорных точек, лежащих в одной и той же кольцевой зоне, и углы  $\beta$  для всех точек, лежащих в одном и том же секторе, равны:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_i &= i\Delta\beta - \frac{\Delta\beta}{2} = \Delta\beta \left( i - \frac{1}{2} \right); \\ \beta_j &= j\Delta\alpha - \frac{\Delta\alpha}{2} = \Delta\alpha \left( j - \frac{1}{2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

При проведении исследований учитывали следующее характерное требование традиционной технологии обработки деталей по методу свободного притирания [6]: максимальное значение диаметра инструмента, совершающего переносное движение по обрабатываемой поверхности линзы, должно быть несколько меньше диаметра последней (например, на 5 мм), а его минимальный диаметр должен превышать половину диаметра детали (например, на 5 мм). Что касается длины штриха колебательных движений инструмента  $L$  (расстояние по хорде между крайними положениями последнего), то его максимальная величина может быть такой, при которой ось симметрии инструмента не выходит за край детали (не доходит до края, например, на 2,5 мм), а в случае минимального значения длины штриха край инструмента должен частично выходить за край детали (например, на 2,5 мм).

Изложенное отображено на рис. 2 и 3. В частности, на рис. 2 представлен момент обработки выпуклой поверхности в случае максимальной  $L_{\max}^{(вп)}$  (рис. 2а) и минимальной  $L_{\min}^{(вп)}$  (рис. 2б) длин штриха, а на рис. 3 – схема формообразования вогнутой поверхности при назначении максимальной  $L_{\max}^{(вр)}$  (рис. 3а) и минимальной  $L_{\min}^{(вр)}$  (рис. 3б) длин штриха. На этих рисунках:  $\alpha_d$  и  $\alpha_n$  – углы раствора детали 1 и инструмента 2;  $\alpha_p$  и  $\alpha'_p$  – то же между их осями симметрии в случае максимальной и минимальной длин штриха;  $\varepsilon$  и  $\varepsilon'$  – то же между прямыми, соединяющими соответственно край линзы и центр инструмента и точки на краях линзы и инструмента с центром обрабатываемой сферической поверхности радиусом  $R$  (рассматриваемые углы могут быть равны между собой);  $k = 0,5$  мм – расстояние между отмеченными прямыми по этой поверхности;  $h_n$  – высота инструмента (расстояние по оси инструмента между точками на его рабочей поверхности и точкой контакта шарового наконечника поводка 3 выходного звена исполнительного механизма станка с хвостовиком инструмента).

Анализ рис. 2 и 3 позволяет получить аналитические выражения для расчета предельных значений длины штриха.

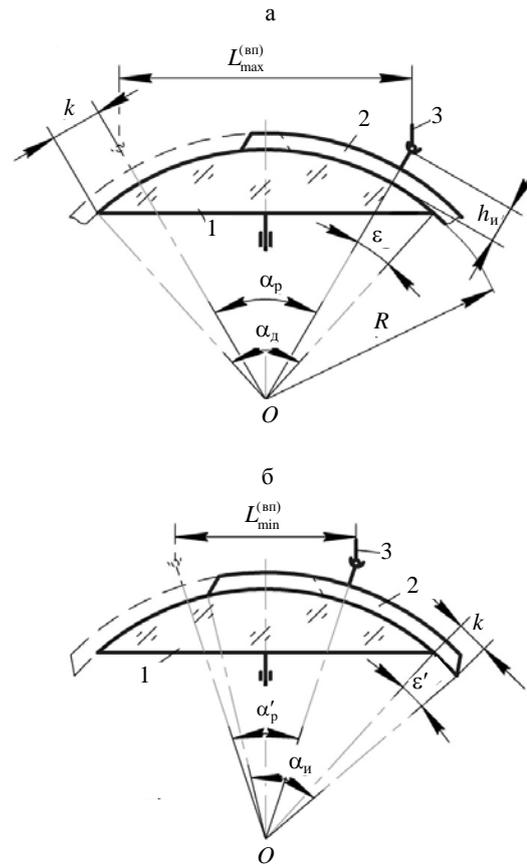


Рис. 2. К определению максимальной (а) и минимальной (б) длин штриха переносного движения инструмента при обработке выпуклой поверхности линзы

Эти выражения имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} L_{\max}^{(вп)} &= 2(R + h_n)\sin(0,5\alpha_p); \\ L_{\min}^{(вп)} &= 2(R + h_n)\sin(0,5\alpha'_p); \\ L_{\max}^{(вр)} &= 2(R - h_n)\sin(0,5\alpha_p); \\ L_{\min}^{(вр)} &= 2(R - h_n)\sin(0,5\alpha'_p); \\ L_{\max}^{(вр')} &= 2l\sin 0,5\alpha_p; \\ L_{\min}^{(вр')} &= 2l\sin 0,5\alpha'_p, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $0,5\alpha_p = 0,5\alpha_d - \varepsilon$ ;  $0,5\alpha'_p = 0,5(\alpha_d - \alpha_n) + \varepsilon'$ ;  
 $\varepsilon = \varepsilon' = \arcsin \frac{k}{R}$ ;  $\alpha_d = 2\arcsin(d_d / 2R)$ ;  $\alpha_n = 2\arcsin(\alpha_n / 2R)$ ;  $l$  – конструктивный параметр, который представляет собой расстояние между центром возвратно-вращательного движения инструмента и шаровым наконечником поводка, жестко связанного с последним, в случае обработки вогнутой поверхности линз, диаметр которых больше в 1,6 раза их радиуса

кривизны (линзы с крутыми поверхностями). Два последних равенства системы уравнений (5) относятся к случаю обработки линз с крутыми вогнутыми поверхностями.

Исследование процесса двустороннего формообразования линз выполняли посредством оценки качества шлифованных поверхностей при различных режимах обработки. Теоретически качество линзы определяли по величине относительной погрешности  $\Delta l_{отн}$  путей резания  $l$  в точках ее диаметрального сечения (кинематическая составляющая точности). При расчете  $\Delta l_{отн}$  выбирали диаметральное сечение детали с максимальной абсолютной погрешностью  $\Delta l$  после ее поворота вокруг собственной мгновенной оси вращения на определенный угол  $\varphi_{сум}$  (в рассматриваемом случае  $\varphi_{сум} = 4000$  рад) и делили полученное  $\Delta l$  на максимальное значение  $l$  в данном сечении. Выбор такого метода теоретической оценки точности линзы объясняется тем, что неравенство путей резания  $l$  в различных точках на обрабатываемой поверхности приводит к неодинаковой величине съема материала, т. е. к ло-

кальным погрешностям, снижающим разрешающую способность оптической детали.

Используя приведенное в [7] выражение, описывающее движение выходного звена исполнительного механизма станка модели ШП, и математическую модель процесса формообразования на этом станке [8], выполнили расчет  $\Delta l_{отн}$  при различных сочетаниях следующих наладочных параметров технологического оборудования: длины штриха колебательных движений инструмента  $L$ , частот вращения линзы  $\omega_l$  и входного звена исполнительного механизма станка  $\omega_2$ , отношения частоты вращения инструмента  $\omega_i$  к частоте  $\omega_l$  и диаметра инструмента  $d_i$ . Диапазон изменения этих параметров для выпуклой поверхности линзы составлял:  $L = 80-95$  мм;  $\omega_l = 5,0-10,0$  с<sup>-1</sup>;  $\omega_2 = 2,0-5,0$  с<sup>-1</sup>;  $\omega_i/\omega_l = K = 0,5-0,9$ ;  $d_i = 100-120$  мм.

Интервал значений для  $L$  рассчитывали по формулам (5), а для остальных параметров брали из производственной практики [9]. Результаты расчета приведены в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1

Значения погрешности  $\Delta l_{отн}$  для различных сочетаний наладочных параметров станка при одновременной двусторонней обработке линз

1				2				3				4				5			
$\Delta l(L, \omega_l)$				$\Delta l(L, \omega_2)$				$\Delta l(L, K)$				$\Delta l(L, d_i)$				$\Delta l(\omega_l, \omega_2)$			
$L \backslash \omega_l$	80	86	92	$L \backslash \omega_2$	80	86	92	$L \backslash K$	80	86	92	$L \backslash d_i$	80	86	92	$\omega_l \backslash \omega_2$	5,0	6,5	8,5
5,0	69	68	67	2,0	64	65	63	0,5	51	53	52	100	75	76	77	2,0	59	57	56
5,5	67	67	65	2,3	61	61	61	0,55	54	55	55	104	72	73	71	2,3	60	58	57
6,0	66	65	66	2,5	61	62	61	0,6	56	58	57	108	68	69	67	2,5	61	60	57
6,5	63	64	64	3,0	67	67	67	0,65	60	59	59	112	64	65	66	3,0	65	60	58
7,0	63	63	63	3,5	64	64	64	0,7	62	61	62	114	60	62	62	3,5	64	61	59
7,5	67	65	65	4,0	64	65	64	0,75	64	63	64	116	57	59	60	4,0	66	62	60
8,0	63	61	63	4,5	66	65	66	0,8	66	65	66	118	54	56	58	4,5	68	63	62
8,5	62	61	61	5,0	67	69	70	0,9	69	69	70	120	50	53	54	5,0	100	67	63
6				7				8				9				10			
$\Delta l(\omega_l, K)$				$\Delta l(\omega_l, d_i)$				$\Delta l(K, \omega_2)$				$\Delta l(K, d_i)$				$\Delta l(d_i, \omega_2)$			
$\omega_l \backslash K$	5,0	6,5	8,5	$\omega_l \backslash d_i$	5,0	6,5	8,5	$K \backslash \omega_2$	0,5	0,7	0,9	$K \backslash d_i$	0,5	0,7	0,9	$d_i \backslash \omega_2$	100	112	120
0,5	59	48	42	100	78	73	71	2,0	54	59	69	100	66	72	79	2,0	71	62	52
0,55	61	50	45	104	76	70	67	2,3	40	53	68	104	58	67	75	2,3	69	59	49
0,60	62	54	49	108	72	65	64	2,5	43	55	67	108	56	65	70	2,5	70	61	51
0,65	64	56	52	112	67	61	59	3,0	54	62	71	112	51	60	68	3,0	78	65	54
0,70	65	58	55	114	65	59	56	3,5	45	58	68	114	45	55	66	3,5	72	63	52
0,75	67	60	59	116	59	57	54	4,0	50	60	69	116	42	53	63	4,0	75	64	53
0,80	68	63	62	118	56	54	50	4,5	51	62	69	118	36	48	60	4,5	75	64	53
0,90	70	68	66	120	52	51	49	5,0	55	63	71	120	31	44	57	5,0	76	65	56

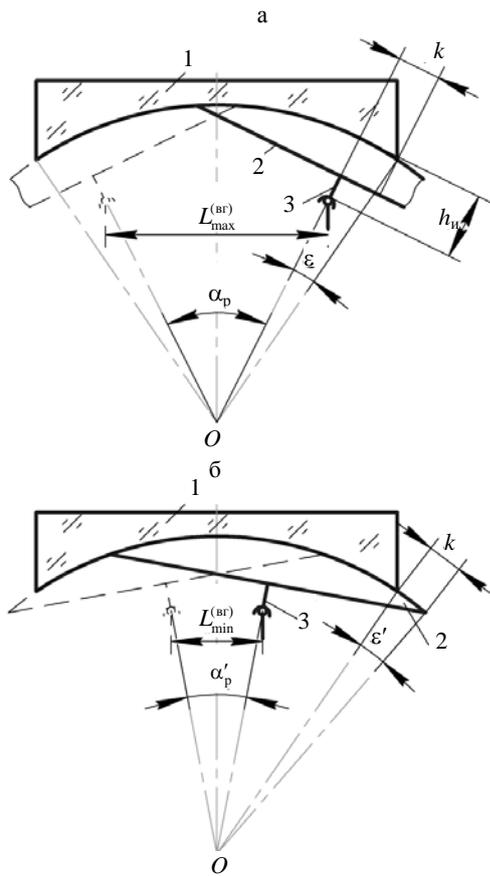


Рис. 3. К определению максимальной (а) и минимальной (б) длин штриха переносного движения инструмента при обработке вогнутой поверхности линзы

Рассматривали линзу с параметрами: радиус  $R_1 = 83,28$  мм; диаметр  $d_1 = 120$  мм – выпуклая поверхность; радиус  $R_2 = 55,66$  мм; диаметр  $d_2 = 80$  мм – вогнутая поверхность. В условиях односторонней обработки оптических деталей по классической схеме при вращении закрепленного на шпинделе станка инструмента линза увлекается им в свободное вращение с частотой  $\omega_l$ , которая зависит от частоты вращения инструмента  $\omega_n$ . Теоретически можно полагать, что  $\omega_l = \omega_n \cos \alpha$ , где  $\alpha$  – угол между осями вращения инструмента и линзы. Практически на частоту  $\omega_l$  оказывают влияние состояние абразивной суспензии на поверхности инструмента, момент трения поводка, величина площади соприкосновения притирающихся поверхностей, случайные сопротивления, тормозящие линзу, и т. д. Поэтому частота  $\omega_l$  непостоянна и составляет в среднем  $(0,7-0,9)\omega_n$ . Причем  $\omega_l$  не может быть изменена при регулировании режима обработки.

В предлагаемой схеме двусторонней обработки инструмент и линза вращаются принудительно [10], поэтому отношение их частот может служить дополнительным регулируемым параметром станка, что расширяет технологические возможности процесса обработки высокоточных оптических деталей. Из расчетов, приведенных в табл. 1 (колонки 3, 6, 8), следует, что значение  $\omega_n/\omega_l = 0,5$  обеспечивает наилучшее качество обработанной поверхности. Однако дополнительные расчеты показали, что при дальнейшем уменьшении  $\omega_n/\omega_l$  (рис. 4) в сочетании с  $L$ ,  $\omega_l$  и  $d_n$  величина  $\Delta l_{отн}$  уменьшается (кривые 1, 3, 4), а в сочетании с  $\omega_2$  – заметно увеличивается (кривая 2).

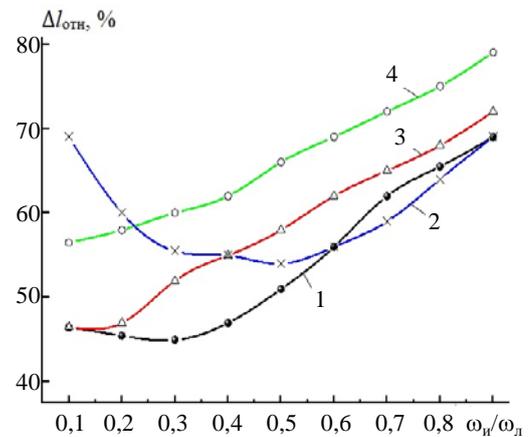


Рис. 4. Зависимость погрешности  $\Delta l_{отн}$  от величины отношения  $\omega_n/\omega_l$  при:  $L = 80$  мм (1);  $\omega_2 = 2,0$  с<sup>-1</sup> (2);  $\omega_l = 5,0$  с<sup>-1</sup> (3);  $d_n = 100$  мм (4)

При обработке линз по методу свободного притирания происходит непрерывное изменение их радиуса кривизны. В связи с этим требуются приемы, позволяющие регулировать величину  $R$  детали. К таким приемам относятся изменения наладочных параметров станка. В частности, для устранения общего «бугра» (когда радиус кривизны сферической поверхности меньше заданного) необходимо уменьшать  $L$ ,  $\omega_l$  и  $d_n$ , а  $\omega_2$  и  $K$  увеличивать. Для исправления общей «ямы» производят обратные действия [9].

Анализ табл. 1 и рис. 3 показывает, что для достижения минимальной погрешности обрабатываемой выпуклой поверхности выбранной линзы в случае устранения общего «бугра» необходимо устанавливать следующие значения наладочных параметров станка в их комбинации:

- при  $L = 80$  мм:  $\omega_1 = 6,5$  с<sup>-1</sup> (колонка 1, табл. 1);  $\omega_2 = 4,0$  с<sup>-1</sup> (колонка 2);  $K = 0,4$  (кривая 1, рис. 4);  $d_{и} = 116$  мм (колонка 4, табл. 1);
- при  $\omega_1 = 5,0$  с<sup>-1</sup>:  $\omega_2 = 3,5$  с<sup>-1</sup> (колонка 5);  $K = 0,3$  (кривая 3, рис. 3);  $d_{и} = 114$  мм (колонка 7);
- при  $K = 0,7$ :  $\omega_2 = 3,5$  с<sup>-1</sup> (кривая 2, рис. 3; колонка 8);  $d_{и} = 114$  мм (колонка 9);
- при  $d_{и} = 100$  мм  $\omega_2 = 2,3$  с<sup>-1</sup> (колонка 10).

Для компенсации общей «ямы» можно рекомендовать такие варианты настройки станка:

- при  $L = 92$  мм:  $\omega_1 = 8,5$  с<sup>-1</sup> (колонка 1, табл. 1);  $\omega_2 = 4,0$  с<sup>-1</sup> (колонка 2);  $K = 0,1$  (кривая 1, рис. 4);  $d_{и} = 120$  мм (колонка 4);
- при  $\omega_1 = 8,5$  с<sup>-1</sup>:  $\omega_2 = 2,0$  с<sup>-1</sup> (колонка 5);  $K = 0,1$  (кривая 3, рис. 4);  $d_{и} = 120$  мм (колонка 7);
- при  $K = 0,3$ :  $\omega_2 = 3,5$  с<sup>-1</sup> (кривая 2, рис. 4; колонка 8),  $d_{и} = 120$  мм (колонка 9);
- при  $d_{и} = 120$  мм  $\omega_2 = 2,3$  с<sup>-1</sup> (колонка 10).

Кроме отмеченного, выполненные численные исследования позволили установить, что в случае одинаковых значений частот вращения линзы и входного звена исполнительного механизма станка получаем  $\Delta l_{отн} = 100$  % (например,  $\omega_1 = \omega_2 = 5,0$  с<sup>-1</sup> – колонка 5, табл. 1). Такое значение  $\Delta l_{отн}$  свидетельствует о том, что на поверхности детали имеется точка, которая после поворота линзы на принятый в рассматриваемом случае угол  $\varphi_{сум} = 4000$  рад не контактирует с инструментом, т. е. не обрабатывается. Выявлено также, что в сочетаниях наладочных параметров  $L$ ,  $K$  и  $d_{и}$  с  $\omega_2$  не целесообразно назначать  $\omega_2 = 3,0$  с<sup>-1</sup>, поскольку в этом случае происходит увеличение погрешности обработанной поверхности линзы (колонки 2, 8, 10, табл. 1). Однако в комбинации  $\omega_1$  с  $\omega_2$  аномалии  $\Delta l_{отн}$  при  $\omega_2 = 3,0$  с<sup>-1</sup> не наблюдается (колонка 5).

Характерной особенностью одновременной двусторонней обработки оптических деталей по предлагаемой схеме является то, что в случае независимого управления процессом формообразования исполнительных поверхностей линзы ее частота вращения одинакова при рассмотрении закономерностей съема припуска как на первой, так и на второй поверхностях. С учетом этого выполнен расчет  $\Delta l_{отн}$  для вогнутой поверхности линзы при различных комбинациях наладочных параметров технологиче-

ского оборудования. Анализ полученных результатов показал, что характер изменения  $\Delta l_{отн}$  такой же, как и в случае выпуклой поверхности.

Для проверки результатов расчета проведенные экспериментальные исследования процесса шлифования выпуклой поверхности линзы с ранее отмеченными параметрами. Шлифование выполняли на станке 6ПД-200 абразивной суспензией белого электрокорунда зернистостью М20. Подача суспензии – автоматическая. Соотношение твердой фазы Т к жидкой Ж составляло Т:Ж = 1:6. Контролировали стрелку прогиба обработанной поверхности  $h_1$  и вычисляли величину  $\Delta h = h_1 - h_0$ , при этом номинальное значение стрелки прогиба  $h_0$  рассчитывали по формуле

$$h_0 = \sqrt{R_1^2 - d_1^2} / 4,$$

где  $R_1 = 83,28$  мм – заданный радиус кривизны выпуклой поверхности линзы;  $d_1 = 80$  мм – внутренний диаметр кольца сферометра часового типа с микронной индикаторной головкой.

Перед началом каждого эксперимента предварительно обеспечивали  $\Delta h = 12$  мкм «ямы». Линзу с такой исходной погрешностью каждый раз шлифовали в течение 15 мин при давлении 80 г/см<sup>2</sup>, а измерение стрелки прогиба выполняли не менее трех раз и вычисляли среднее значение.

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 5, 6. В частности, на рис. 5 представлены закономерности изменения  $\Delta h$  от времени обработки при величине длины штриха колебательного движения инструмента 92 мм и частоте вращения входного звена исполнительного механизма станка в пределах от 2,3 до 4,0 с<sup>-1</sup> (кривые 1–3), а также зависимость  $\Delta h$  от продолжительности шлифования в случае равных значений частот вращения линзы и входного звена исполнительного механизма (кривая 4, рис. 5). Анализ этих закономерностей показывает, что при использовании в качестве наладочных параметров станка  $L$  и  $\omega_2$  наилучших результатов можно достичь при  $L = 92$  мм и  $\omega_2 = 2,3$  с<sup>-1</sup> (кривая 1, рис. 5). В случае  $L = 92$  мм и  $\omega_2 = 3,0$  с<sup>-1</sup> получили самую низкую точность обработанной поверхности в данной серии экспериментов (кри-

вая 3, рис. 5). Если же управление процессом формообразования проводить посредством регулирования  $\omega_n$  и  $\omega_2$ , то при их одинаковых значениях (в рассматриваемом случае  $\omega_n = \omega_2 = 5,0 \text{ с}^{-1}$ , кривая 4) получается самая низкая точность обработанной поверхности из результатов, приведенных на рис. 5. Рассмотренные экспериментальные данные согласуются с теоретическими исследованиями (колонки 2 и 5, табл. 1).

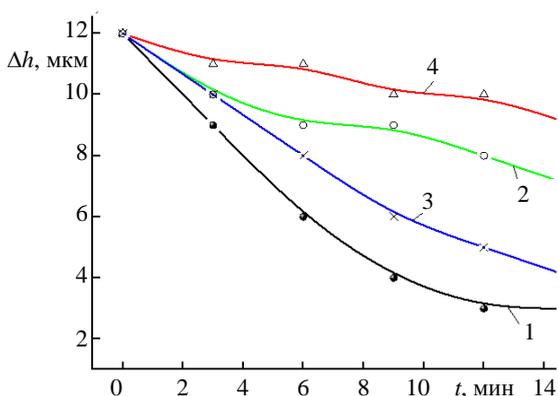


Рис. 5. Зависимость отклонения стрелки прогиба  $\Delta h$  от продолжительности обработки  $t$  при  $L = 92 \text{ мм}$ :  $\omega_2 = 2,3$  (1);  $3,0$  (2) и  $4,0 \text{ с}^{-1}$  (3), а также при  $\omega_n = \omega_2 = 5,0 \text{ с}^{-1}$  (4)

На рис. 6 показаны экспериментальные зависимости точности обработки от величины соотношения частот вращения инструмента и линзы в сочетаниях с длиной штриха колебательного движения инструмента, частотами вращения входного звена исполнительного механизма станка и линзы, а также с диаметром инструмента. Время обработки при каждом значении  $\omega_n/\omega_l$  составляет 15 мин.

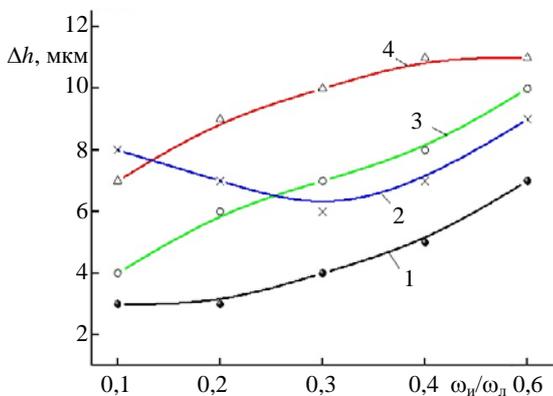


Рис. 6. Зависимость отклонения стрелки прогиба  $\Delta h$  от величины отношения  $\omega_n/\omega_l$  при  $L = 80 \text{ мм}$  (1):  $\omega_2 = 2,0 \text{ с}^{-1}$  (2);  $\omega_n = 5,0 \text{ с}^{-1}$  (3);  $d_n = 100 \text{ мм}$  (4)

Из анализа рис. 6 видно, что если в качестве наладочных параметров технологического оборудования использовать  $L$ ,  $\omega_n$  и  $d_n$ , то при уменьшении отношения  $\omega_n/\omega_l$  точность обработанной поверхности улучшается (кривые 1, 3, 4), причем максимальной точности можно достичь в случае сочетания  $L$  и  $\omega_n/\omega_l$  (кривая 1), несколько худшей – при  $\omega_n$  и  $\omega_n/\omega_l$  (кривая 3), а самое низкое качество дает комбинация наладочных параметров  $d_n$  и  $\omega_n/\omega_l$  (кривая 4). Что касается значений  $\Delta h(\omega_n/\omega_l)$ , то при уменьшении  $\omega_n/\omega_l$  до  $0,3-0,4$  точность обработки повышается, а при дальнейшем увеличении  $\omega_n/\omega_l$  она ухудшается (кривая 2). Экспериментальные результаты, представленные на рис. 6, коррелируют с численными исследованиями, приведенными на рис. 4.

### ВЫВОДЫ

1. При одновременной двусторонней обработке линз на стадии основного шлифования по методу свободного притирания, когда с целью интенсификации процесса формообразования целесообразно проводить изменения двух наладочных параметров технологического оборудования при  $\omega_n/\omega_l \geq 0,5$ , наивысшей точности обработанной поверхности можно достичь при регулировании величины отношения  $\omega_n/\omega_l$  и  $d_n$ . Остальные комбинации регулируемых параметров станка, с точки зрения их влияния на качество обработанной поверхности, располагаются в следующей последовательности:  $\omega_n/\omega_l$ ,  $\omega_2$ ;  $\omega_n/\omega_l$ ,  $\omega_l$ ;  $d_n$ ,  $\omega_l$ ;  $d_n$ ,  $\omega_2$ ;  $d_n$ ,  $L$ ;  $L$ ,  $\omega_n/\omega_l$ ;  $\omega_n$ ,  $\omega_2$ ;  $L$ ,  $\omega_2$ ;  $L$ ,  $\omega_l$ .

2. Предварительное шлифование допустимо проводить при  $\omega_n/\omega_l < 0,5$ , что способствует повышению интенсивности съема припуска, а возникающие локальные погрешности на поверхности линзы из-за ее высокой скорости, вызывающей вибрации в системе СПИД, могут быть исправлены на этапе основного шлифования. При этом комбинации наладочных параметров станка, с точки зрения качества обработки, располагаются в такой последовательности:  $K$ ,  $L$  (самое высокое качество);  $K$ ,  $\omega_n$ ;  $K$ ,  $\omega_2$  (при  $K \geq 0,3$ ) и  $K$ ,  $d_n$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сулим, А. М. Производство оптических деталей / А. В. Сулим. – М.: Высш. шк., 1969. – 303 с.
2. Зубаков, В. Г. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков, М. Н. Семибратов, С. К. Штандель; под ред. М. Н. Семибратова. – М.: Машиностроение, 1985. – 368 с.
3. Семибратов, М. Н. Технология оптических деталей / М. Н. Семибратов. – М.: Машиностроение, 1978. – 411 с.
4. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. – М.: Высш. шк., 1963. – 519 с.
5. 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.
6. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. – Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. – 176 с.
7. Исследование кинематических закономерностей процесса двусторонней обработки двояковыпуклых оптических деталей / А. С. Козерук [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2008. – № 2. – С. 26–31.
8. Исследование качества и производительности обработки высокоточных сферических поверхностей оптических деталей / А. С. Козерук [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2009. – № 2. – С. 40–44.
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 л.
10. 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. Zubakov, V. G., Semibratov, M. N., & Shtandel, S. K. (1985) *Technology of Optical Parts*. Moscow, Mashinostroenie. 368 p. (in Russian).
3. Semibratov, M. N. (1978) *Technology of Optical Parts*. Moscow, Mashinostroenie. 411 p. (in Russian).
4. Bardin, A. N. (1963) *Technology of Optical Glass*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 519 p. (in Russian).
5. Filonov, I. P., Klimovich, F. F., & Kozeruk, A. S. (1995) *Control Over Shaping Process of Precision Surfaces of Machine and Device Parts*. Minsk, DizaynPRO. 208 p. (in Russian).
6. Kozeruk, A. S. (1997) *Shaping Process of Precision surfaces*. Minsk, VUZ-YuNITI. 176 p. (in Russian).
7. Kozeruk, A. S., Sukhotskii, A. A., Klimovich, V. F., & Filonova, M. I. (2008) Investigation of Kinematic Regularities in Double-Sided Processing of Double Convex Optical Parts. *Vestsi Natsyional'nai Akademii Navuk Belarusi. Ser. Fizika-Tekhnichnykh Navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarusi. Physico-Technical Series], 2, 26–31 (in Russian).
8. Kozeruk, A. S., Sukhotskii, A. A., Klimovich, V. F., & Kuznechik, V. O. (2009) Investigation of Quality and Productivity in Processing of Highly-Accurate Spherical Surfaces of Optical Parts. *Vestsi Natsyional'nai Akademii Navuk Belarusi. Ser. Fizika-Tekhnichnykh Navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarusi. Physico-Technical Series], 2, 40–44 (in Russian).
9. Kozeruk, A. S. (1997) *Upravlenie Formoobrazovaniem Pretsizionnykh Poverkhnostei Detalei Mashin i Priborov na Osnove Matematicheskogo Modelirovaniia. Dis. d-ra Tekhn. Nauk* [Control Over Shaping Process of Precision Surfaces of Machine and Device Parts on the Basis of Mathematical Simulation. Dr. tech. diss.]. Minsk. 317 p. (in Russian).
10. Kozeruk, A. S., & Filonov, I. P. (2006) *Method for Simultaneous Double-Sided Processing of Parts with Spherical Surface*. Patent Republic of Belarus, no 7911 (in Russian).

## REFERENCES

Поступила 21.11.2014

УДК 656

## ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВЕННОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Докт. техн. наук, проф. ПУГАЧЕВ И. Н.<sup>1)</sup>,  
кандидаты техн. наук, доценты КУЛИКОВ Ю. И.<sup>1)</sup>, СЕДЮКЕВИЧ В. Н.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Тихоокеанский государственный университет (Россия),

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

E-mail: sedukevich@tut.by

Рассмотрены существующие показатели качества транспортных услуг. Предложены оценочные показатели качества функционирования транспортного комплекса. Сделан акцент на взаимодействии и координации работы видов