

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-390-400>

УДК 681.7.023.72

## Исследование влияния наладочных параметров станка на производительность и качество процесса одновременной двусторонней обработки линз

Докт. техн. наук, проф. А. С. Козерук<sup>1)</sup>, асп. Д. Л. Мальпика<sup>1,2)</sup>, инж. А. А. Сухоцкий<sup>1)</sup>, кандидаты техн. наук, доценты М. И. Филонова<sup>1)</sup>, В. О. Кузнецик<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup>Университет Якамбу (Баркисимето, Венесуэла)

© Белорусский национальный технический университет, 2018  
Belarusian National Technical University, 2018

**Реферат.** Приведена методика нахождения рациональных режимов абразивной обработки высокоточных линз по методу свободного притирания на финишных операциях. Получены аналитические выражения для определения координат опорных точек на сферической поверхности, необходимые для математического моделирования процесса ее обработки на рычажных станках. Изложены результаты теоретической оценки качества формообразования высокоточных исполнительных поверхностей линз в случае различных комбинаций наладочных параметров технологического оборудования. При этом выявлены как наиболее рациональные, так и неблагоприятные режимы обработки. В частности, к последнему случаю относится формообразование посредством изменения частот вращений входного звена исполнительного механизма станка  $\omega_2$  и линзы  $\omega_n$ . Характерным здесь является то, что при максимальном значении  $\omega_n$  получается низкое качество обработки на всем интервале изменения  $\omega_2$ , и особенно в случае, когда эти частоты равны. Установлено, что наивысшая точность обработки достигается при максимальной амплитуде колебательного движения инструмента, его диаметре и частоте вращения детали и минимальной частоте вращения входного звена исполнительного механизма станка. А поскольку такие наладочные параметры приводят к усиленному съему припуска в краевой зоне заготовки, при обработке выпуклой поверхности линзы ее радиус кривизны на каждой предшествующей операции должен быть больше по сравнению с радиусом кривизны, который необходимо получить на последующих операциях. Для вогнутой поверхности должна соблюдаться обратная закономерность значений радиуса кривизны. Предложены наиболее выгодные наладочные параметры станка различных комбинаций для устранения погрешностей (в виде обших как «бугра», так и «ямь») с учетом производительности и точности обработки. Определено влияние величины биения шпинделя станка на точность обработки линз широкого диапазона диаметров.

**Ключевые слова:** абразивная обработка, станок, линзы, математическое моделирование, формообразование, высокоточная исполнительная поверхность линз

**Для цитирования:** Исследование влияния наладочных параметров станка на производительность и качество процесса одновременной двусторонней обработки линз / А. С. Козерук [и др.] // *Наука и техника*. 2018. Т. 17. № 5. С. 390–400. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-390-400>

## Investigation of Machine Tool Developed Settings Influence on Productivity and Quality of Simultaneous Double-Sided Lens Processing

A. S. Kozeruk<sup>1)</sup>, Y. L. Malpica<sup>1,2)</sup>, A. A. Sukhotzkiy<sup>1)</sup>, M. I. Filonova<sup>1)</sup>, V. O. Kuznechik<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup>Universidad Yacambu (Barquisimeto, Venezuela)

**Abstract.** The paper presents methodology for determining rational modes of abrasive processing for high-precision lenses while using a method of free lapping at finishing operations. Analytical expressions have been obtained to determine

### 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

coordinates of reference points on a spherical surface which are necessary for mathematical modeling of its processing at pivotal machines. The paper contains results of a theoretical qualitative evaluation of high-precision operating lens surfaces formation in case of various combinations of setting parameters for technological equipment. In this case the most rational and unfavorable modes of processing have been identified. In particular, the last case presupposes shaping by changing rotational frequencies of an input link in an executive mechanism of the machine tool  $\omega_2$  and the lens  $\omega_n$ . An indicative feature is that a poor quality of processing has been obtained over the entire range of variation interval  $\omega_2$  at maximum value  $\omega_n$ , and especially in the case when these frequencies are equal. It has been determined that the highest accuracy of processing is achieved with maximum amplitude of an oscillating tool motion, its diameter and frequency of part rotation and minimum rotational speed of the input link in the executive machine-tool mechanism. As such values of these setting parameters lead to an increased removal of an allowance in the marginal zone of a work-piece, then while processing a convex lens surface, its radius of curvature in each previous operation should be larger than a radius of curvature which is to be obtained in the process of subsequent operations. The inverse regularity of curvature radius values must be observed for a concave surface. The most advantageous values of the machine-tool setting parameters with various combinations have been proposed with the purpose to eliminate errors in the form of common as “knoll” and “hole” with due account of processing productivity and accuracy. The paper describes an influence of machine tool spindle wavering value on the processing accuracy of lenses having a wide range of diameters.

**Keywords:** abrasive processing, machine-tool, lens, mathematical modeling, shaping, high-accuracy executive lens surface

**For citation:** Kozeruk A. S., Malpica Y. L., Sukhotzkiy A. A., Filonova M. I., Kuznechik V. O. (2018) Investigation of Machine Tool Developed Settings Influence on Productivity and Quality of Simultaneous Double-Sided Lens Processing. *Science and Technique*. 17 (5), 390–400. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-390-400> (in Russian)

## Введение

При обработке оптических деталей, в том числе линз, в условиях свободного притирания, когда съем припуска определяется в основном величиной скорости скольжения притирающихся поверхностей заготовки и инструмента, важен выбор таких наладочных параметров станка, при которых обеспечивается равномерное распределение упомянутой скорости по всей обрабатываемой поверхности. В настоящее время режимы обработки оптических деталей назначает рабочий-оптик исходя из своего опыта и интуиции, однако не всегда удачно. В результате не представляется возможным достичь высокой интенсивности съема припуска на исполнительной поверхности детали и, кроме того, появляются локальные погрешности в виде местных «ям» и «бугров».

Источником погрешностей оптических деталей при их обработке по классической технологии является также упругая деформация стекла, возникающая в процессе закрепления заготовок на клеичное приспособление последовательно за каждую из рабочих поверхностей [1].

Отмеченных недостатков можно избежать, если использовать прогрессивную технологию одновременной двусторонней обработки линз при их креплении за нерабочую цилиндрическую поверхность и формализации геометрических и кинематических связей исполнительного

механизма технологического оборудования [2]. Предлагаемая технология может быть реализована на разработанном станке для одновременной двусторонней обработки высокоточной линзы малой жесткости с крутыми поверхностями [3].

## Методика определения рациональных режимов обработки линз на финишных операциях

В соответствии с настоящей методикой последовательно выполняются:

- математическое моделирование процесса одновременной двусторонней обработки деталей со сферическими поверхностями по методу свободного притирания;
- получение формулы, устанавливающей функциональную связь путей резания с наладочными параметрами станка;
- расчет путей резания для различных сочетаний наладочных параметров станка;
- анализ результатов расчета и определение режимов формообразования, обеспечивающих минимальные значения относительной погрешности путей резания и времени обработки.

При определении путей резания обрабатываемую поверхность детали разбивали на элементарные площадки  $dS$ , в центре которых выбирали точки (так называемые опорные точки) и рассчитывали путь, пройденный ими относительно инструмента. Опорные точки выбирали

следующим образом. На сферической поверхности линзы радиусом  $R$  назначали  $n$  секторов (рис. 1) величиной

$$\Delta\sigma = \frac{2\pi}{n} \quad (1)$$

и  $m$  кольцевых зон размером

$$\Delta\beta = \frac{\pi(R - \sqrt{R^2 - 0,25d^2})}{2Rm}, \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр шарового сегмента, образованного той или иной (выпуклой или вогнутой) поверхностью линзы.

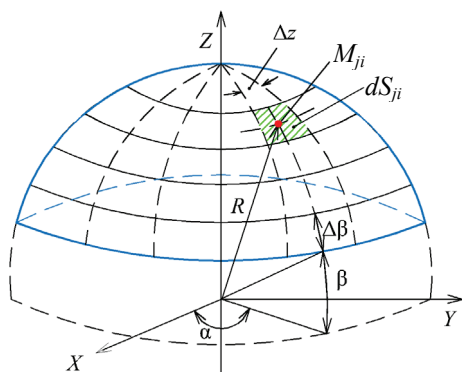


Рис. 1. К определению опорной точки на обрабатываемой поверхности линзы

Fig. 1. Determination of reference point on processed lens surface

Выражение (2) получено из следующих соображений. Если поверхность линзы составляет полусферу, то угловой размер  $\Delta\beta$  каждой из  $m$  ее кольцевых зон будет  $\Delta\beta = \frac{\pi}{2m}$ . Если же линза не полусферическая, то необходимо определить, какую часть составляет высота сегмента ее сферической поверхности  $h = R - \sqrt{R^2 - 0,25d^2}$  по сравнению с радиусом кривизны этой поверхности. Составив соответствующую пропорцию, установим, что эта часть определяется отношением  $\frac{h\pi}{2R}$ , разделив которое на  $m$  и получим (2).

Пересечение рассмотренных центров и зон образует  $nm$  элементарных площадок  $[dS_{ji}]$ ;  $j = \overline{1, m}$ ;  $i = \overline{1, n}$ . На каждой из этих площадок

выбираем опорную точку  $M_{ji}$ , которая расположена на пересечении луча, делящего пополам  $i$ -й сектор, и окружности, делящей пополам  $j$ -ю кольцевую зону.

Согласно рис. 1, углы  $\sigma$  и  $\varphi$  для всех точек, лежащих соответственно в одной и той же кольцевой зоне и в одном и том же секторе, можно выразить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= i\Delta\sigma - 0,5\Delta\sigma = \Delta\sigma(i - 0,5); \\ \varphi_j &= \varphi + j\Delta\varphi - 0,5\Delta\varphi = \varphi + \Delta\varphi(j - 0,5), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\varphi = \arcsin(d/2R)$  – половина угла раствора шарового сегмента рассматриваемой поверхности линзы.

Особенностью метода одновременной двусторонней обработки линз является то, что при его реализации оба инструмента совершают переносное движение по исполнительным поверхностям детали [4], причем величина амплитуды этих движений как наладочный параметр изменяется в зависимости от технологической наследственности заготовки с точки зрения распределения подлежащего удалению припуска. Например, при наличии на детали общей погрешности в виде «ям» необходимо усилить срабатывание краевой ее зоны, что достигается увеличением амплитуды колебательного движения инструмента, и наоборот, – для устранения погрешности типа общий «бугор» упомянутую амплитуду следует уменьшать.

С целью получения аналитических выражений, позволяющих рассчитать предельные значения обсуждаемой амплитуды в зависимости от геометрических параметров детали и инструмента, обратимся к рис. 2, на котором показаны максимальные (а) и минимальные (б) отклонения вогнутого 1 и выпуклого 2 инструментов в случае обработки линзы 3 с пологим вогнутым радиусом, когда шаровой наконечник поводка 5 входит в гнездо хвостовика 6 инструмента 2. При обработке линзы с «крутой» вогнутой поверхностью (к таковым относятся линзы, диаметр шарового сегмента которых составляет не менее 1,6 их радиуса кривизны [5]) поводок 7 (рис. 2с) жестко соединен с инструментом 2, а его шаровой наконечник входит в шарнирное соединение с выходным звеном исполнительного механизма станка (на рис. 2с не показано).

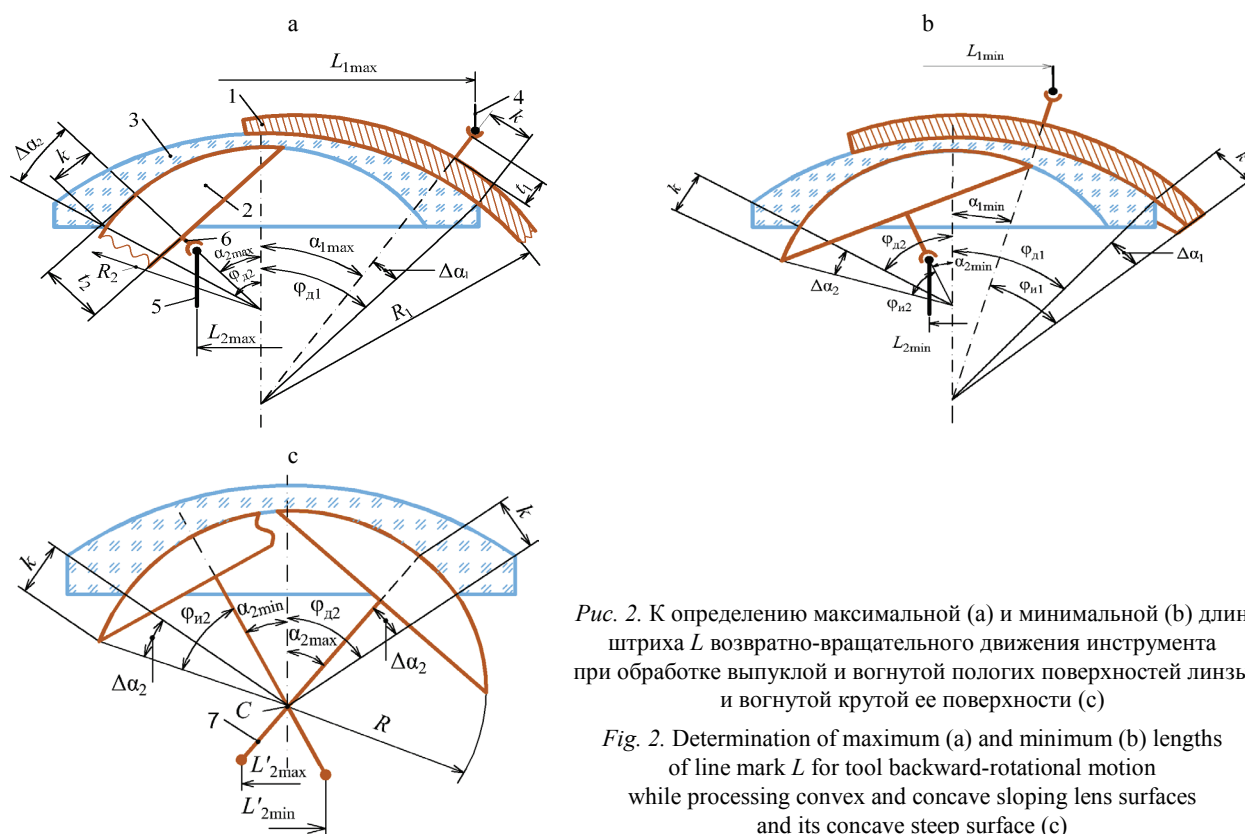


Рис. 2. К определению максимальной (а) и минимальной (б) длин штриха  $L$  возвратно-вращательного движения инструмента при обработке выпуклой и вогнутой пологих поверхностей линзы и вогнутой крутой ее поверхности (с)

Fig. 2. Determination of maximum (a) and minimum (b) lengths of line mark  $L$  for tool backward-rotational motion while processing convex and concave sloping lens surfaces and its concave steep surface (c)

Из анализа рис. 2 можно записать следующие соотношения в случае обработки выпуклой (длина штриха  $L_1$ ), пологой вогнутой (длина штриха  $L_2$ ) и крутой вогнутой (длина штриха  $L'_2$ ) поверхностей (длина штриха представляет собой расстояние между крайними положениями поводков 4, 5 и 7 при колебательном движении инструментов, т. е. удвоенную амплитуду этого движения):

$$\left. \begin{aligned} L_{1\max} &= 2(R_1 + t_1) \sin \alpha_{1\max}; \\ L_{1\min} &= 2(R_1 + t_1) \sin \alpha_{1\min}; \\ L_{2\max} &= 2(R_2 - t_2) \sin \alpha_{2\max}; \\ L_{2\min} &= 2(R_2 - t_2) \sin \alpha_{2\min}; \\ L'_{2\max} &= 2p \sin \alpha_{2\max}; \\ L'_{2\min} &= 2p \sin \alpha_{2\min} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $R_1, R_2$  – радиус кривизны выпуклой и вогнутой поверхностей линз;  $t_1, t_2$  – величина, равная толщине соответственно вогнутого и выпуклого инструментов по центру вместе с длинами их хвостиков;  $\alpha_{1\max} = \varphi_{д1} - \Delta\alpha_1$ ,  $\alpha_{1\min} = \varphi_{д1} + \Delta\alpha_1 - \varphi_{и1}$  – максимальный и минимальный углы отклонения вогнутого инстру-

мента от оси симметрии детали;  $\alpha_{2\max} = \varphi_{д2} - \Delta\alpha_2$ ,  $\alpha_{2\min} = \varphi_{д2} + \Delta\alpha_2 - \varphi_{и2}$  – аналогичные параметры для выпуклого инструмента;  $\varphi_{и1}, \varphi_{д1}$  – половина углов раствора вогнутого инструмента и шарового сегмента выпуклой поверхности детали;  $\varphi_{и2}, \varphi_{д2}$  – то же для выпуклого инструмента и шарового сегмента вогнутой поверхности детали;  $\Delta\alpha_1 = \arcsin(k/R_1)$ ,  $\Delta\alpha_2 = \arcsin(k/R_2)$  – угол, обусловленный наличием расстояния  $k$  от края соответственно выпуклой и вогнутой поверхностей линзы до оси симметрии обрабатываемых этих поверхностей инструментов, с одной стороны, и до края последних, с другой, при их колебательном перемещении по детали (при отсутствии расстояния  $k$  в первом случае будет происходить раскрытие стыка между инструментом и деталью, что приведет к искажению геометрической формы поверхности линзы, а во втором случае – к образованию приподнятого края на исполнительных поверхностях линзы);  $p$  – длина поводка от оси его возвратно-вращательного движения, проходящей через центр вогнутой сферической поверхности линзы, до центра шарового наконечника этого поводка.

Теоретическую оценку качества двусторонней обработки линз выполняли следующим образом: выбирали диаметрально сечение линзы с максимальной величиной абсолютной погрешности путей резания  $\Delta l = l_{\max} - l_{\min}$  после ее поворота на угол  $\psi_{\max} = 4200$  рад, при котором  $\Delta l$  достигало минимальной величины ( $l_{\max}, l_{\min}$  – максимальное и минимальное значения путей резания в выбранном диаметрально сечении линзы). Разделив  $\Delta l$  на максимальное значение путей резания  $l$  в выбранном сечении, получим  $\Delta l_{\text{отн}}$ , которое пропорционально погрешности детали в данном сечении.

Используя математическую модель процесса формообразования сферических поверхностей в условиях свободного притирания, изложенную в [6], и аналитическое выражение для определения путей резания, приведенное в [7], рассчитаем  $\Delta l_{\text{отн}}$  при различных комбинациях следующих регулируемых (наладочных) пара-

метров станка: частоты вращения линзы  $\omega_l$ , диаметра инструмента  $d_n$ , величины амплитуды возвратно-вращательного движения инструмента  $L$ , частоты вращения входного звена исполнительного механизма станка, а также отношения  $K = \omega_n / \omega_l$ , где  $\omega_n$  – частота вращения инструмента. При этом диапазон значений для  $L$  определяли по формулам (4), а для остальных параметров использовали данные производственной практики [8]. В итоге получили следующие границы изменения отмеченных наладочных параметров:  $\omega_l = 2-10 \text{ c}^{-1}$ ;  $d_n = 70-94 \text{ мм}$ ;  $L = 45-58 \text{ мм}$ ;  $\omega_2 = 0,5-8,5 \text{ c}^{-1}$ ;  $k = 0,72-0,88$ .

### Теоретические исследования

Результаты расчета  $\Delta l_{\text{отн}}$  совместно с давлением (параметр  $\Delta q$ ) в зоне притирающихся поверхностей инструмента и детали для сочетаний  $K$  и  $L$ ,  $L$  и  $\omega_2$ ,  $K$  и  $\omega_l$ , а также  $\omega_l$  и  $\omega_2$ , что допустимо на стадии шлифования, приведены на рис. 3.

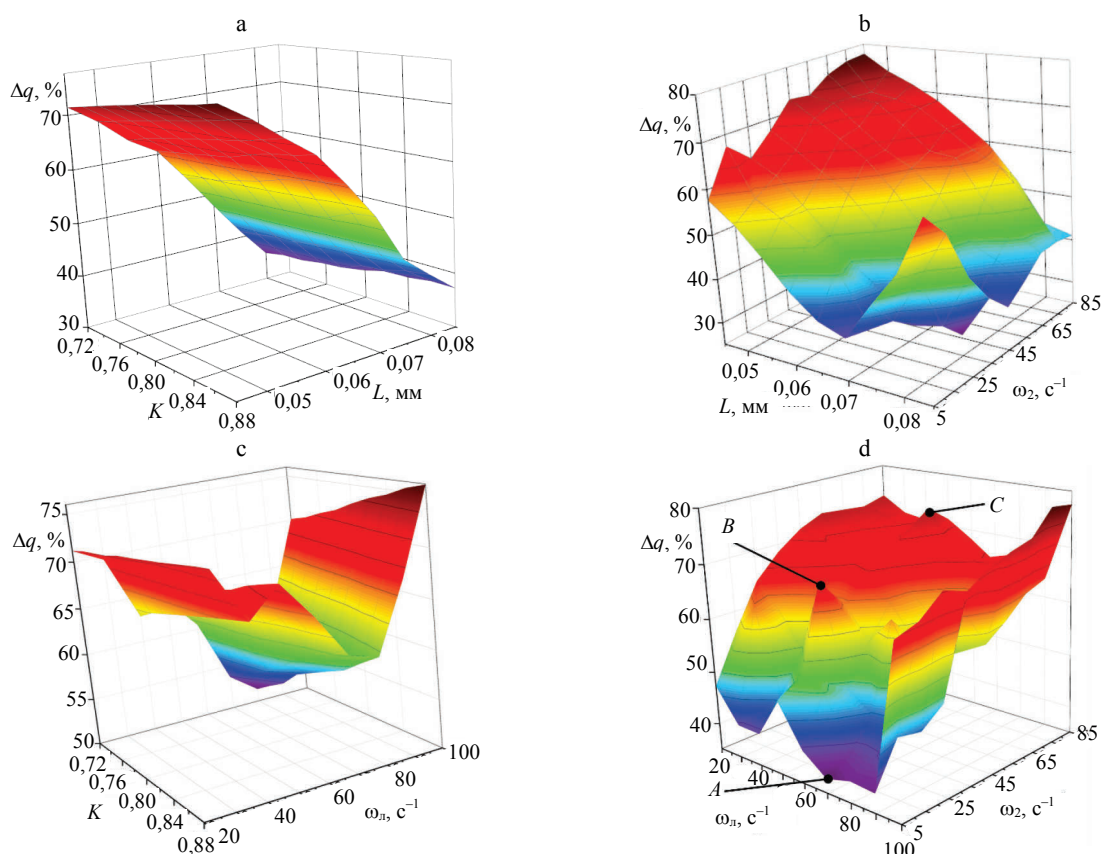


Рис. 3. Зависимость погрешности обработки  $\Delta q$  от наладочных параметров станка следующих комбинаций:  $K, L$  при  $d_n = 82 \text{ мм}$ ,  $\omega_2 = 4,5 \text{ c}^{-1}$ ,  $\omega_l = 6,0 \text{ c}^{-1}$  (a);  $K, \omega_2$  при  $d_n = 82 \text{ мм}$ ,  $\omega_l = 6,0 \text{ c}^{-1}$ ,  $K = 0,76$  (b);  $K, \omega_l$  при  $d_n = 82 \text{ мм}$ ,  $\omega_2 = 4,5 \text{ c}^{-1}$ ,  $L = 60 \text{ мм}$  (c);  $\omega_2, \omega_l$  при  $L = 60 \text{ мм}$ ,  $d_n = 82 \text{ мм}$ ,  $K = 0,76$  (d)

Fig. 3. Dependence of processing error  $\Delta q$  on machine settings in following combinations:  $K, L$  at  $d_n = 82 \text{ mm}$ ,  $\omega_2 = 4.5 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega_l = 6.0 \text{ s}^{-1}$  (a);  $K, \omega_2$  at  $d_n = 82 \text{ mm}$ ,  $\omega_l = 6.0 \text{ s}^{-1}$ ,  $K = 0.76$  (b);  $K, \omega_l$  at  $d_n = 82 \text{ mm}$ ,  $\omega_2 = 4.5 \text{ s}^{-1}$ ,  $L = 60 \text{ mm}$  (c);  $\omega_2, \omega_l$  at  $L = 60 \text{ mm}$ ,  $d_n = 82 \text{ mm}$ ,  $K = 0.76$  (d)

Из анализа этого рисунка следует, что при управлении процессом формообразования посредством регулирования величин  $K$  и  $L$  (рис. 3а) происходит плавное изменение  $\Delta q$ , причем с увеличением  $L$   $\Delta q$  уменьшается, а с увеличением  $K$ , наоборот,  $\Delta q$  возрастает. Однако при увеличении  $L$  и  $\omega_2$   $\Delta q$  изменяется не плавно (рис. 3б) и своего наибольшего значения достигает при максимальном  $\omega_2$  и минимальном  $L$ , а наименьшего – при  $\omega_2 = 3,5 \text{ с}^{-1}$  и  $L = 80 \text{ мм}$ . Имеются и другие сочетания значений  $\omega_2$  и  $L$ , в случае которых наблюдается удовлетворительная точность обработки, например:  $\omega_2 = 2,5 \text{ с}^{-1}$  и  $L = 75 \text{ мм}$ ;  $\omega_2 = 3,5 \text{ с}^{-1}$  и  $L = 75 \text{ мм}$ ;  $\omega_2 = 0,5 \text{ с}^{-1}$  и  $L = 70 \text{ мм}$  и др. Кроме того, в диапазоне изменений  $\omega_2$  от  $4,5$  до  $5,5 \text{ с}^{-1}$  происходит «излом» поверхности распределения  $\Delta q$  ( $\omega_2$ ,  $L$ ) в сторону уменьшения  $\Delta q$  на всем интервале значений  $L$ , а при минимальном значении  $\omega_2$  и максимальном  $L$  – резкое ухудшение точности обработки.

Результаты расчета  $\Delta q$  ( $K$ ,  $\omega_n$ ) (рис. 3с) показывают, что если в угловых зонах поверхности распределения  $\Delta q$  точность обработки принимает свои наихудшие значения, то при  $\omega_n = 4 \text{ с}^{-1}$  и  $\omega_n = 8 \text{ с}^{-1}$  во всем диапазоне изменения  $K$  точность обработки улучшается, причем в большей степени во втором случае.

Наиболее неблагоприятное распределение  $\Delta q$  из всех возможных комбинаций наладочных параметров станка, как показали расчеты, имеет место при управлении процессом формообразования посредством изменений  $\omega_2$  и  $\omega_n$  (рис. 3д). Характерным здесь является то, что при максимальном значении  $\omega_n$  получается низкое качество обработки на всем интервале изменения  $\omega_2$ . Заметное ухудшение точности происходит и при  $\omega_n = 5 \text{ с}^{-1}$ , и особенно в случаях  $\omega_2 = 2,5 \text{ с}^{-1}$  и  $\omega_2 = 7,5 \text{ с}^{-1}$ , а при  $\omega_2 = 5,0 \text{ с}^{-1}$ , как показали дополнительные расчеты,  $\Delta q = 100 \%$ , т. е. на поверхности линзы имеются точки, которые в пределах выбранного угла поворота  $\psi_{\max} = 4200 \text{ рад}$  не контактируют с инструментом и, следовательно, не обрабатываются. В рассматриваемой комбинации наладочных параметров станка такая ситуация имеет место при любых значениях  $\omega_2$  и  $\omega_n$  в случае их равенств.

Что касается закономерностей изменения  $\Delta q$  для остальных комбинаций наладочных параметров станка, то можно отметить следующее:

$K$ ,  $d_n$ :  $\Delta q$  распределяется таким же образом, как и в случае комбинации  $K$ ,  $L$ , т. е. с увеличением  $K$  точность обработки ухудшается, а с увеличением  $d_n$  улучшается, причем наивысшей точности можно достичь при максимальном значении  $d_n$  и минимальном  $K$ ;

$K$ ,  $\omega_2$ : поверхность распределения  $\Delta q$  при  $\omega_2 = 2,5 \text{ с}^{-1}$  имеет небольшой «излом» в сторону уменьшения  $\Delta q$ , минимум которого достигается при наименьших значениях  $K$  и  $\omega_2$ , а при их максимальных значениях точность обработки самая низкая;

$d_n$ ,  $L$ ;  $\omega_n$ ,  $L$  и  $\omega_n$ ,  $d_n$ : поверхность распределения  $\Delta q$  не гладкая (как на рис. 3д), причем наихудшая точность обработки получается при минимальных значениях наладочных параметров рассматриваемых сочетаний, а наивысшая – при их стремлении к максимальным значениям;

$d_n$ ,  $\omega_2$ : поверхность распределения  $\Delta q$  не гладкая; наивысшая точность формообразования имеет место при минимальном значении  $\omega_2$  и максимальном  $d_n$ , а самая низкая, наоборот, – при минимальном  $d_n$  и максимальном  $\omega_2$ .

Кроме отмеченного, выполненные расчеты показывают, что наивысшая точность обработки достигается, как правило, при максимальных  $L$ ,  $d_n$ ,  $\omega_n$  и минимальных  $\omega_2$  и  $K$ . А поскольку такие значения этих наладочных параметров приводят, как известно [9], к усиленному съему припуска в краевой зоне заготовки, то, следовательно, при обработке выпуклой поверхности линзы ее радиус кривизны на каждой предшествующей операции должен быть больше по сравнению с радиусом кривизны, который необходимо получить на последующих операциях. Для вогнутой поверхности должна соблюдаться обратная закономерность значений радиуса кривизны.

Результаты численных исследований продолжительности обработки  $t$  в случае регулирования процесса посредством изменений  $\omega_n$  и  $\omega_2$  представлены на рис. 4.

При использовании остальных сочетаний рассматриваемых наладочных параметров станка получены аналогичные закономерности, для которых характерно, как и в случае рис. 4, минимальное  $t$  при максимально интенсивных режимах обработки. Значение времени  $t$  приведено в табл. 1.

Характерной особенностью обработки высокоточных линз по методу свободного притирания является непрерывное изменение значения их радиуса кривизны  $R$ . Для целенаправленного этого изменения требуется определенное регулирование тех или иных наладочных параметров технологического оборудования. В [10] показано, что для уменьшения  $R$  линзы (для устранения погрешности в виде общей «ямы»)  $L$ ,  $d_{и}$  и  $\omega_{л}$  необходимо увеличивать, а  $\omega_2$  и  $K$  – уменьшать. С целью увеличения  $R$  (для устранения погрешности в виде общего «бугра») упомянутые наладочные параметры следует изменять в обратном направлении.

С учетом изложенного можно предложить наиболее выгодные значения наладочных параметров станка различных комбинаций для устранения погрешностей в виде общих как «бугра», так и «ямы» с учетом производитель-

ности и точности обработки. Результаты подбора таких комбинаций для выпуклой поверхности линзы приведены в табл. 2.

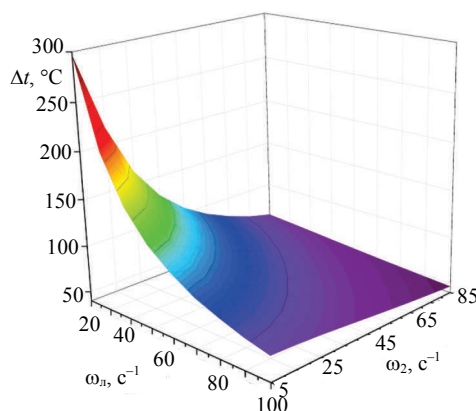


Рис. 4. Зависимость времени обработки  $t$  от наладочных параметров станка комбинации  $\omega_2, \omega_{л}$

Fig. 4. Dependence of processing time period  $t$  on machine settings in combination  $\omega_2, \omega_{л}$

Таблица 1

Время обработки  $t$  для различных комбинаций наладочных параметров станка

Processing time period  $t$  for various combinations of machine settings

t, с, при комбинации									
44,6	46,8	48,2	49,4	50,4	53,5	53,5	57,2	61,7	64,9
$\omega_2 = 8,5,$ $L = 85$	$\omega_1 = 10,$ $\omega_2 = 8,5$	$d_{и} = 94,$ $\omega_{л} = 10$	$\omega_{л} = 10,$ $L = 85$	$d_{и} = 94,$ $\omega_{л} = 10$	$K = 0,88,$ $\omega_2 = 8,5$	$d_{и} = 94,$ $L = 85$	$K = 0,72,$ $\omega_{л} = 10$	$K = 0,88,$ $L = 85$	$K = 0,88,$ $d_{и} = 94$

Примечание.  $L$  и  $d$  даны в мм,  $\omega_{л}$  и  $\omega_2$  в  $c^{-1}$ .

Таблица 2

Значения наладочных параметров станка различных комбинаций для устранения погрешности в виде общих «бугра» и «ямы»

Values of machine settings for various combinations in order to remove errors in the form of common “knoll” and “hole”

Для устранения общего «бугра»			Для устранения общей «ямы»		
Наладочные параметры	$\Delta q, \%$	$t, c$	Наладочные параметры	$\Delta q, \%$	$t, c$
$K = 0,84; L = 60$ мм	65	74	$K = 0,72; L = 85$ мм	34	64
$L = 60$ мм; $\omega_2 = 8,5 c^{-1}$	68	54	$L = 70$ мм; $\omega_2 = 0,5 c^{-1}$	34	100
$K = 0,84; \omega_{л} = 4,0 c^{-1}$	66	88	$K = 0,72; \omega_{л} = 8,0 c^{-1}$	51	65
$\omega_{л} = 4,0 c^{-1}; \omega_2 = 7,5 c^{-1}$	69	64	$\omega_{л} = 7,0 c^{-1}; \omega_2 = 0,5 c^{-1}$	38	92
$K = 0,84; d_{и} = 79$ мм	69	77	$K = 0,72; d_{и} = 94$ мм	47	68
$K = 0,84; \omega_2 = 6,5 c^{-1}$	67	62	$K = 0,72; \omega_2 = 0,5 c^{-1}$	41	108
$d_{и} = 79$ мм; $L = 65$ мм	58	74	$d_{и} = 88$ мм; $L = 80$ мм	38	59
$\omega_{л} = 4,0 c^{-1}; L = 55$ мм	66	95	$\omega_{л} = 8,0 c^{-1}; L = 80$ мм	24	56
$d_{и} = 85$ мм; $\omega_{л} = 6,0 c^{-1}$	58	73	$d_{и} = 91$ мм; $\omega_{л} = 8,0 c^{-1}$	38	59
$d_{и} = 79$ мм; $\omega_2 = 8,5 c^{-1}$	71	56	$d_{и} = 88$ мм; $\omega_2 = 0,5 c^{-1}$	40	101

Данные табл. 2 позволяют назначить оптимальные сочетания наладочных параметров станка в каждом конкретном случае. Так, при необходимости устранить общий «бугор» на высокоточной выпуклой поверхности линзы целесообразно использовать комбинацию  $K$  и  $L$ . Если же поверхность линзы средней точности, то для исправления «бугра» можно выбрать более производительный режим обработки, т. е. назначить комбинацию  $L$  и  $\omega_2$ . Для исправления погрешности в виде общей «ямы» лучше всего использовать комбинацию  $\omega_1$  и  $L$ , при которой обеспечиваются самые высокие как производительность обработки, так и ее качество. Однако нецелесообразно назначать комбинации  $L$  и  $\omega_2$ ,  $K$  и  $\omega_2$ , а также  $d_{и1}$  и  $\omega_2$ , не позволяющие интенсифицировать процесс съема припуска, хотя в этих случаях достигаются сравнительно малые значения  $\Delta k$ .

Особенностью разработанного технологического оборудования для одновременной двусторонней обработки линз является возможность независимого регулирования его наладочных параметров для обеих поверхностей детали, за исключением частоты ее вращения, которая применяется одинаковой. С учетом этого проведены расчеты  $\Delta q$  и  $t$  для вогнутой поверхности линзы радиусом кривизны 50,34 мм и диаметром 80 мм, позволяющие, как и для выпуклой поверхности, устанавливать оптимальные режимы работы станка в зависимости от характера распределения подлежащего удалению припуска.

Характерным для станка двусторонней обработки линз является также наличие в нем приводов обоих притирающихся звеньев – заготовки и инструментов. Это значит, что по сравнению с классической технологией, в которой значение  $K$  самопроизвольно и хаотично изменяется в пределах 0,7–0,9 и поэтому не может служить в качестве наладочного параметра, в рассматриваемом станке отношение  $\omega_1/\omega_2$  можно изменять целенаправленно, т. е. использовать его для управления процессом формообразования высокоточных исполнительных поверхностей деталей, что расширяет технологические возможности станка.

Результаты численных исследований зависимости  $\Delta q_{отн}$  от изменения  $K$  в различных его комбинациях с другими регулируемыми параметрами изложены на рис. 5. Анализ этого рисунка показывает, что все рассматриваемые комбинации наладочных параметров обеспечи-

вают сравнительно высокую точность обработки при изменении  $K$  в пределах от минимального его значения до 0,6. Причем наилучший результат наблюдается для комбинации  $K, L$  (кривая 1) и несколько худший – для  $K, \omega_2$  (кривая 2) и  $K, d_{и1}$  (кривая 3), а для комбинации  $K, \omega_1$  при  $K > 0,6$  (кривая 4) погрешность обработки становится неприемлемой.

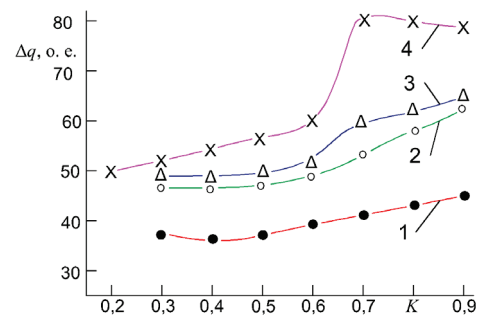


Рис. 5. Зависимость погрешности обработки  $\Delta q_{отн}$  от наладочного параметра станка  $K$  в следующих комбинациях:  $K, L$  при  $L = 75$  мм,  $d_{и1} = 82$  мм,  $\omega_2 = 4,5$  с<sup>-1</sup>,  $\omega_1 = 6,0$  с<sup>-1</sup> (1);  $K, \omega_2$  при  $\omega_2 = 4,5$  с<sup>-1</sup>,  $d_{и1} = 82$  мм,  $\omega_1 = 6,0$  с<sup>-1</sup>,  $L = 60$  мм (2);  $K, d_{и1}$  при  $d_{и1} = 85$  мм,  $\omega_2 = 4,5$  с<sup>-1</sup>,  $\omega_1 = 6,0$  с<sup>-1</sup>,  $L = 60$  мм (3);  $K, \omega_1$  при  $\omega_1 = 5,0$  с<sup>-1</sup>,  $d_{и1} = 82$  мм,  $\omega_2 = 4,5$  с<sup>-1</sup>,  $L = 60$  мм (4)

Fig. 5. Dependence of processing error  $\Delta q_{отн}$  on machine settings  $K$  in following combinations:

$K, L$  at  $L = 75$  mm,  $d_{и1} = 82$  mm,  $\omega_2 = 4.5$  s<sup>-1</sup>,  $\omega_1 = 6.0$  s<sup>-1</sup> (1);  $K, \omega_2$  at  $\omega_2 = 4.5$  s<sup>-1</sup>,  $d_{и1} = 82$  mm,  $\omega_1 = 6.0$  s<sup>-1</sup>,  $L = 60$  mm (2);  $K, d_{и1}$  at  $d_{и1} = 85$  mm,  $\omega_2 = 4.5$  s<sup>-1</sup>,  $\omega_1 = 6.0$  s<sup>-1</sup>,  $L = 60$  mm (3);  $K, \omega_1$  at  $\omega_1 = 5.0$  s<sup>-1</sup>,  $d_{и1} = 82$  mm,  $\omega_2 = 4.5$  s<sup>-1</sup>,  $L = 60$  mm (4)

При получении оптических деталей по методу свободного притирания на точность обработанной поверхности влияет не только величина наладочных параметров станка (кинематическая составляющая погрешности), но и биение в шарнирных соединениях его подвижных звеньев (динамическая составляющая погрешности), в частности биение шпинделя с закрепленным на нем инструментом или заготовкой. Для выяснения влияния данного фактора на точность линз диаметром от 30 до 120 мм (наиболее часто встречающиеся размеры линз) с допуском на отклонение радиуса кривизны исполнительной поверхности в пределах от  $\pm 0,25$  до  $\pm 1,00$  мкм проводилась обработка (заключительная стадия шлифования и этап полирования) линз из стекла марки К8 на рычажных шлифовально-полировальных станках с биением их шпинделей от  $\pm 3$  до  $\pm 9$  мкм. Контроль точности отполированной поверхности детали выполняли посредством измерения местной (локальной) погрешности  $\Delta N$  (величина откло-



нения интерференционного кольца Ньютона от правильной геометрической формы, деленной на ширину этого кольца) на интерферометре KUI-35/RME-500.

В процессе полирования детали изменяли (уменьшали) частоту вращения шпинделя станка  $\omega_{\text{шп}}$  с закрепленной на нем деталью до достижения  $\Delta N = \pm 0,10$ , что соответствовало микронеровностям на обработанной поверхности величиной  $\pm 0,25$  мкм.

Полученные результаты исследований, представленные в табл. 3, позволяют выявить максимально допустимую частоту вращения шпинделя станка в зависимости от величины его биения. Причем, как оказалось, с увеличением диаметра линзы допустимая частота вращения шпинделя, независимо от величины его биения, уменьшается.

Таблица 3

Допустимые значения частоты вращения шпинделя станка  $\omega_{\text{шп}}$  в зависимости от величины его биений  $\Delta_{\text{шп}}$ , диаметра детали  $d_d$  и точности радиусов кривизны ее исполнительных поверхностей  $\Delta R$

Admissible values for rotational rate of machine tool spindle  $\omega_{\text{шп}}$  according to its wavering  $\Delta_{\text{шп}}$ , working piece diameter  $d_d$  and accuracy in curvature radius for its executive surfaces  $\Delta R$

$d_d$ , мм	$\Delta R$ , мкм	$\Delta_{\text{шп}}$ , мкм	$\omega_d$ , с <sup>-1</sup>
30–50	±0,25	±3	4,8
		±6	3,8
		±9	3,4
	±0,50	±3	6,8
		±6	6,2
		±9	5,2
	±1,00	±3	10,4
		±6	9,88
		±9	7,81
50–80	±0,25	±3	3,2
		±6	2,8
		±9	1,8
	±0,50	±3	4,9
		±6	4,2
		±9	3,6
	±1,00	±3	7,7
		±6	7,2
		±9	6,1
80–120	±0,25	±3	2,7
		±6	2,7
		±9	1,5
	±0,50	±3	3,9
		±6	3,6
		±9	3,2
	±1,00	±3	6,8
		±6	6,2
		±9	5,5

### Экспериментальные исследования

Для проверки вышеизложенных результатов расчета проводились экспериментальные исследования процесса обработки выпуклой поверхности линзы радиусом кривизны 120,85 мм на этапе основного шлифования и на стадии полирования. Использовались полировально-доводочные станки модели 6ПД200 (отдельно для шлифования и полирования) с автоматической подачей рабочей суспензии, в качестве которой для шлифования применялась абразивная суспензия белого электрокорунда зернистостью М20 в соотношении твердой фазы Т к жидкой Ж 1:5, а полирование выполнялось суспензией полирита (двуокиси церия) составом Т:Ж = 1:10. В качестве инструментов служили чугунный шлифовальный и пенополиуретановый полировальный (пенополиуретановая пленка толщиной 1 мм, наклеенная на металлический корпус). Для поддержания исходной величины радиуса кривизны инструментов применялись предварительно налаженные алмазные правильники в виде грибов с наклеенными алмазосодержащими элементами из синтетического алмаза АСМ 200/160 на медной связке.

В процессе шлифования с помощью кольцевого сферометра с микронным индикатором часового типа измеряли стрелку прогиба  $h$  и определяли величину  $\Delta h = h - h_0$ , где  $h_0 = \sqrt{R_0 - d^2/4}$  – стрелка прогиба выпуклой сферической поверхности номинальным радиусом кривизны  $R_0 = 120,85$  мм;  $d = 90$  мм – внутренний диаметр кольца сферометра. Перед началом каждого цикла шлифования обеспечивали  $\Delta h = 15$  мкм в виде погрешности общей «ямы». Заготовку с такой погрешностью шлифовали 15 мин при рабочем давлении 90 г/см<sup>2</sup>, а измерение  $h$  выполняли три раза и находили ее среднее значение.

Локальную погрешность  $\Delta N$  определяли с помощью интерферометра KUI-35/RME-500.

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 6, 7. На рис. 6 показаны закономерности изменения  $\Delta h$  в зависимости от продолжительности обработки  $t$  для комбинации наладочных параметров  $L$ ,  $\omega_2$ ;  $K$ ,  $\omega_2$  и  $K$ ,  $d_n$  (кривые соответственно 1, 2 и 3). Для первой

из этих комбинаций  $\Delta h$  за время обработки изменилось на 12 мкм, для второй – на 8 мкм, а для третьей – на 5 мкм. Это значит, что при величине амплитуды колебательных движений инструмента  $L = 85$  мм и 85 двойных его ходов в минуту ( $\omega_2 = 8,5 \text{ с}^{-1}$ ) интенсивность съема припуска самая высокая (кривая 1), а в случае комбинации  $K = 0,88$  и  $\omega_2 = 8,5 \text{ с}^{-1}$  наблюдается средняя производительность (кривая 2). Эти данные согласуются с результатами численных исследований, приведенных в табл. 1 (колонки 1, 6, 10).

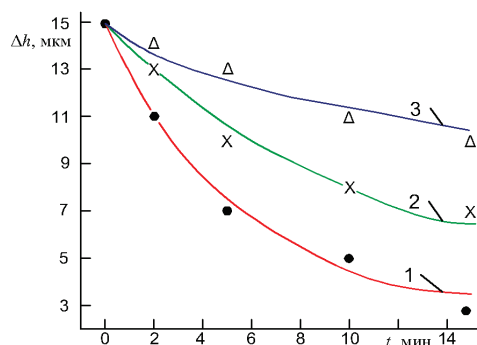


Рис. 6. Зависимость отклонения стрелки прогиба  $\Delta h$  от времени обработки  $t$  при следующих значениях наладочных параметров станка:  $L = 85$  мм,  $\omega_2 = 8,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $d_{\text{и}} = 82$  мм,  $\omega_{\text{л}} = 6,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $K = 0,76$  (1);  $K = 0,88$ ,  $\omega_2 = 8,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $L = 60$  мм,  $d_{\text{и}} = 82$  мм,  $\omega_{\text{л}} = 6,0 \text{ с}^{-1}$  (2);  $K = 0,88$ ,  $d_{\text{и}} = 94$  мм,  $\omega_{\text{л}} = 6,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $L = 60$  мм,  $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$  (3)

Fig. 6. Dependence of maximum deflection  $\Delta h$  on processing time period  $t$  at following values of machine settings:  $L = 85$  mm,  $\omega_2 = 8.5 \text{ s}^{-1}$ ,  $d_{\text{и}} = 82$  mm,  $\omega_{\text{л}} = 6.0 \text{ s}^{-1}$ ,  $K = 0.76$  (1);  $K = 0.88$ ,  $\omega_2 = 8.5 \text{ s}^{-1}$ ,  $L = 60$  mm,  $d_{\text{и}} = 82$  mm,  $\omega_{\text{л}} = 6.0 \text{ s}^{-1}$  (2);  $K = 0.88$ ,  $d_{\text{и}} = 94$  mm,  $\omega_{\text{л}} = 6.0 \text{ s}^{-1}$ ,  $L = 60$  mm,  $\omega_2 = 4.5 \text{ s}^{-1}$  (3)

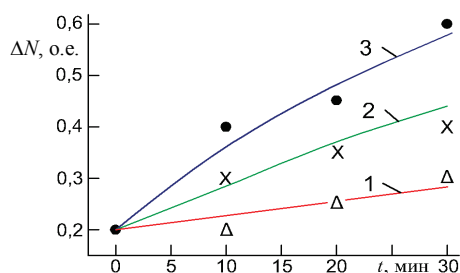


Рис. 7. Зависимость локальной погрешности  $\Delta N$  от времени обработки  $t$  при следующих значениях наладочных параметров станка:  $\omega_{\text{л}} = 7,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 0,5 \text{ с}^{-1}$  (1);  $\omega_{\text{л}} = 5,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 2,5 \text{ с}^{-1}$  (2);  $\omega_{\text{л}} = 5,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 7,5 \text{ с}^{-1}$  (3) ( $L = 60$  мм,  $d_{\text{и}} = 82$  мм,  $K = 0,76$  – для всех случаев)

Fig. 7. Dependence of local error  $\Delta N$  on processing time period  $t$  at following values of machine settings:  $\omega_{\text{л}} = 7.0 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 0.5 \text{ s}^{-1}$  (1);  $\omega_{\text{л}} = 5.0 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 2.5 \text{ s}^{-1}$  (2);  $\omega_{\text{л}} = 5.0 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 7.5 \text{ s}^{-1}$  (3)  $L = 60$  mm,  $d_{\text{и}} = 82$  mm,  $K = 0.76$  – for all cases

Из экспериментальных кривых на рис. 7 следует, что при комбинации частот вращения линзы  $\omega_{\text{л}} = 7,0 \text{ с}^{-1}$  и входного звена исполнительного механизма станка  $\omega_2 = 0,5 \text{ с}^{-1}$  исходная погрешность на поверхности линзы  $\Delta N = 0,2$  изменяется на 0,1, при  $\omega_{\text{л}} = 5,0 \text{ с}^{-1}$  и  $\omega_2 = 2,5 \text{ с}^{-1}$  на 0,2, а в случае  $\omega_{\text{л}} = 5,0 \text{ с}^{-1}$  и  $\omega_2 = 7,5 \text{ с}^{-1}$  происходит самое существенное изменение  $\Delta N$  – на 0,4. Это значит, что наиболее точная обработка (полирование) может быть достигнута в первой из отмеченных комбинаций  $\omega_2$  и  $\omega_{\text{л}}$ , а самая низкая – в третьей, что удовлетворительно коррелирует с результатами численных исследований, приведенных на рис. 3d (точки A, B, C).

## ВЫВОДЫ

1. Проведенные численные исследования обработки сферических поверхностей оптических деталей по методу свободного притирания позволили выявить, что при управлении процессом формообразования посредством изменения частот вращения линзы  $\omega_{\text{л}}$  и входного звена исполнительного механизма станка  $\omega_2$  достичь высокой точности исполнительной поверхности детали не представляется возможным, особенно в случае  $\omega_2 = \omega_{\text{л}}$  при любых их значениях.

2. Расчеты показали, что наивысшая точность обработки достигается при максимальных значениях амплитуды колебательного движения инструмента, его диаметра и частоты вращения линзы и минимальных значениях частоты вращения входного звена исполнительного механизма станка и отношения частоты вращения инструмента к частоте вращения линзы. А поскольку такие значения данных наладочных параметров приводят к усиленному съему припуска в краевой зоне заготовки, при обработке выпуклой поверхности линзы ее радиус кривизны на каждой предшествующей операции должен быть больше по сравнению с радиусом кривизны, который необходимо получить на последующих операциях. Для вогнутой поверхности должна соблюдаться обратная закономерность значений радиуса кривизны.

3. При экспериментальном исследовании влияния динамической составляющей погрешности обработки линз на рычажных шлифовально-полировальных станках установлено, что с увеличением диаметра детали допустимая частота вращения шпинделя станка с закреп-

ленной на нем заготовкой, независимо от величины его биения, уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. М.: Высш. шк., 1963. 519 с.
2. 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.
3. Станок для одновременной двусторонней обработки линз с кривыми вогнутыми поверхностями: пат. 10726 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/00 / А. С. Козерук, И. П. Филонов, А. А. Сухоцкий, В. Ф. Климович, Е. С. Таболина; дата публ. 30.06.2008.
4. Исследование кинематических закономерностей процесса двусторонней обработки двояковыпуклых оптических деталей / А. С. Козерук [и др.] // Вес. Нац. акад. наук. Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2008. № 2. С. 26–31.
5. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. 176 с.
6. Козерук, А. С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на основе математического моделирования / А. С. Козерук. Минск, 1997. 317 с.
7. 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.
8. Сулим, А. М. Производство оптических деталей / А. В. Сулим. М.: Высш. шк., 1969. 303 с.
9. 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.
10. Технологические особенности процесса одновременной двусторонней обработки высокоточных линз малой жесткости / А. С. Козерук [и др.] // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 3. С. 215–234. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-215-234>.

Поступила 27.03.2018  
 Подписана в печать 04.06.2018  
 Опубликовано онлайн 28.09.2018

REFERENCES

1. Bardin A. N. (1963) *Technology of Optical Glass*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 519 (in Russian).
2. Kozeruk A. S., Filonov I. P. (2006) *Method for Simultaneous Double-Sided Processing of Parts with Spherical Surface*: Patent No 7911 Republic of Belarus (in Russian).
3. Kozeruk A. S., Filonov I. P., Sukhotsky A. A., Klimovich V. F., Tabolina E. S. (2008) *Machine-Tool for Simultaneous Double-Sided Processing of Lenses with Steep Concave Surface*: Patent No 10726 Republic of Belarus (in Russian).
4. 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).
5. Kozeruk A. S. (1997) *Precision Surface Formation*. Minsk, VUZ-UNITI Publ. 176 (in Russian).
6. Kozeruk A. S. (1997) *Control of Precision Surface Formation in Parts of Machines and Devices on the Basis of Mathematical Simulation*. Minsk. 317 (in Russian).
7. Filonov I. P., Klimovich F. F., Kozeruk A. S. (1995) *Control of Precision Surface Formation in Parts of Machines and Devices*. Minsk, DesignPRO Publ. 208 (in Russian).
8. Sulim A. M. (1969) *Production of Optical Parts*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 303 (in Russian).
9. Zubakov V. G., Semibratov M. N., Shtandel S. K. (1985) *Technology of Optical Parts*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 368 (in Russian).
10. Kozeruk A. S., Filonov I. P., Filonova M. I., Vlasovetz N. S., Malpika D. L. (2017) Technological Distinctive Features Pertaining to Process of Simultaneous Two-Sided Machining of High-Precision Lenses Having Low Stiffness. Technological Peculiarities in Simultaneous Double-Sided Processing of High-Precision Lenses of Small Rigidity. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (3), 215–234 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-215-234>.

Received: 27.03.2018  
 Accepted: 04.06.2018  
 Published online: 28.09.2018