

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-215-224

УДК 681.7.023.72

Технологические особенности процесса одновременной двусторонней обработки высокоточных линз малой жесткости

Доктора техн. наук, профессора А. С. Козерук¹⁾, И. П. Филонов¹⁾,
канд. техн. наук, доц. М. И. Филонова¹⁾, студ. Н. С. Власовец¹⁾, асп. Д. Л. Мальпика¹⁾

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

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

Реферат. Обоснована целесообразность использования при изготовлении линз малой жесткости станков, позволяющих одновременно обрабатывать обе исполнительные поверхности оптических деталей. При этом происходит не только улучшение качества деталей из-за исключения их деформации на стадии блокировки, но и существенное повышение производительности процесса формообразования высокоточных нетехнологических оптических элементов, а также снижение энергозатрат на единицу продукции. Приведена принципиальная схема станка для одновременной двусторонней обработки оптических деталей со сферическими поверхностями в условиях свободного притирания. Описана сущность метода свободного притирания, являющегося одним из наиболее распространенных в оптическом приборостроении при получении деталей с прецизионными исполнительными поверхностями. Изложена методика определения наладочных параметров технологического оборудования, обеспечивающих равномерный съем припуска по всей обрабатываемой поверхности, а также усиленное его удаление как в центральной зоне заготовки, так и на ее периферии, что необходимо для исправления макропогрешностей в виде «бугра» и «ямь». Предложена методика определения чувствительности интенсивности съема припуска к изменениям наладочных параметров станка и эффективности этих параметров при исправлении макропогрешностей линзы. Выявлено, что максимальная чувствительность съема припуска имеет место в случае изменения диаметра инструмента. Что касается эффективности наладочных параметров технологического оборудования, то установлено, что для исправления макропогрешностей в виде «бугра» и «ямь» наиболее целесообразно изменять соотношение частот вращения инструмента и детали. Проведены экспериментальные испытания обработки линз, которые удовлетворительно коррелируют с результатами теоретических исследований.

Ключевые слова: оптические детали, свободное притирание, макропогрешность, наладочные параметры, интенсивность съема припуска, технологическое оборудование

Для цитирования: Технологические особенности процесса одновременной двусторонней обработки высокоточных линз малой жесткости / А. С. Козерук [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 3. С. 215–224. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-215-224

Technological Distinctive Features Pertaining to Process of Simultaneous Two-Sided Machining of High-Precision Lenses Having Low Stiffness

A. S. Kozeruk¹⁾, I. P. Filonov¹⁾, M. I. Filonova¹⁾, N. S. Vlasovetz¹⁾, D. L. Malpika¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper contains substantiated expediency in application of machine tools for manufacturing lenses with low stiffness which make it possible to process simultaneously both actuating surfaces of optical parts. While doing so there is a possibility not only to improve quality of parts due to exclusion of their deformation at the blocking stage but there is also a possibility to ensure significant increase in productivity of the process which pre-supposes shape-formation of high-precision non-process optical elements and also to decrease energy consumption per unit of production. A basic diagram of the machine tool for simultaneous processing of two-sided optical parts with spherical surfaces under conditions of free lapping is presented

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

in the paper. The paper describes the essence of the free lapping method which is one of the most widely used methods in optical instrument-making while obtaining parts with precision actuating surfaces. Methodology for determination of technological equipment settings that ensure uniform stock removal along the whole surface to be machined and also its forced removal as in the central zone of a work-piece, so along its periphery and it is necessary in order to correct macro defects in the form of “hump” or “hole”. The paper proposes methodology for determination of sensitivity in stock removal intensity in respect of changes pertaining to machine tool settings and efficiency of these settings while making corrections of lens macro defects. It has been revealed that maximum sensitivity in stock removal occurs in the case when we change a tool diameter. As for efficiency of the technological equipment settings it has been established that in order to rectify macro defects in the form “hump” or “pit” it is more expedient to change rotation ratio of the tool and the part. Experimental tests on lens processing have been executed and they adequately correlate with the results of theoretical investigations.

Keywords: optical parts, free lapping, macro defect, settings, intensity in stock removal, technological equipment

For citation: 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. *Science and Technique*. 16 (3), 215–224. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-215-224 (in Russian)

Введение

Половина силовых оптических деталей (линз) (двоуклоновые, плоско-вогнутые и отрицательные мениски) относится к нетехнологическим оптическим элементам из-за их невысокой жесткости, обусловленной малой толщиной по центру. При закреплении заготовок таких линз на блокировочный инструмент с помощью наклеенного вещества, которое в классической технологии односторонней обработки наносится на одну из исполнительных поверхностей заготовки, после остывания блока происходит упругая деформация последней, вызванная различными значениями температурных коэффициентов линейного расширения металла, наклеенного вещества и стекла. После разблокировки блока наступает релаксация напряжений в стекле и достигнутая точность обработки поверхности линзы снижается [1]. Для устранения этой проблемы используют так называемый прием разгрузки линзы. Сущность его сводится к тому, что на центральную зону поверхности заготовки, на которую будет наноситься наклеенное вещество, помещают бумажный кружок диаметром примерно 1/3 диаметра линзы. Деформация заготовки при этом уменьшается, но не полностью [2].

Более эффективным в данном случае является крепление линзы за ее нерабочую цилиндрическую поверхность. Такое крепление освобождает обе сферические поверхности детали и позволяет реализовать прогрессивную технологию одновременной двусторонней ее обработки. При использовании предлагаемой технологии происходит не только улучшение качества деталей из-за исключения их дефор-

мации на стадии блокировки, но и существенное (по меньшей мере, в два раза) повышение производительности процесса формования высокоточных нетехнологических оптических деталей типа линз, а также снижение энергозатрат на единицу продукции [3].

Описание технологического оборудования

Для реализации отмеченного метода одновременной двусторонней обработки линз предлагается технологическое оборудование, схема которого показана на рис. 1 [4].

Станок работает следующим образом. Линзу 6 неподвижно закрепляют в сепараторе 5, на ее обрабатываемые поверхности устанавливают инструменты 8, 9 с поводками 26, 27, приводят в контакт с последними валы электродвигателя 30, 31 вместе с электродвигателями 28, 29 и штангами 24, 25, нагружают последние грузами 32, 33, создавая необходимое рабочее усилие, и включают электродвигатели 4, 10, 11, 28, 29. Крутящий момент от электродвигателя 4 через вал 3, ведущее зубчатое колесо 2 и сепаратор 5, снабженный зубчатым винтом 7, вызывает вращение линзы, а крутящие моменты от электродвигателей 28, 29 через вал электродвигателей 30, 31 и поводки 26, 27 – вращение инструментов 8, 9.

Крутящие моменты от электродвигателей 10, 11 через входные валы 12, 13, кривошипные диски 14, 15, пальцы 16, 17, шатуны 18, 19, рычаги 20, 21, валы штанг 22, 23, установленных в основании 1, штанги 24, 25 и поводки 26, 27 вызывают возвратно-вращательное перемещение инструментов 8, 9 по обрабатываемым поверхностям линзы.

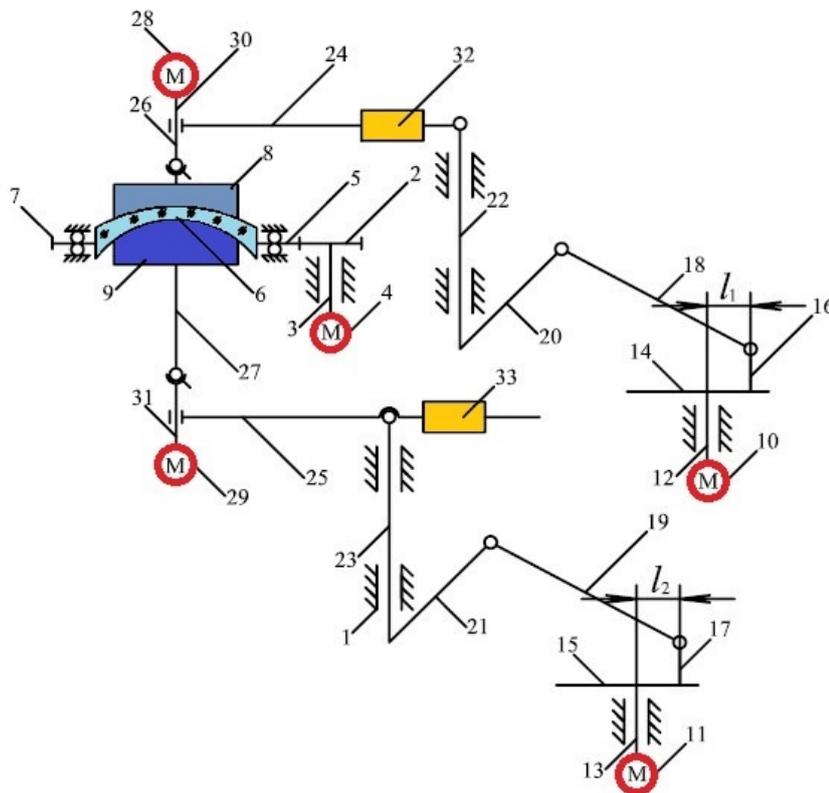


Рис. 1. Схема станка для двусторонней обработки линз

Fig. 1. Scheme of machine for double-sided lens processing

Для управления величиной съема припуска в той или иной зоне исполнительных поверхностей линзы в процессе ее обработки производят независимое регулирование следующих наладочных параметров станка: рабочего усилия посредством перемещения вдоль осей штанг 24, 25 грузов 32, 33, амплитуды возвратно-вращательных перемещений инструментов 8, 9 по поверхностям линзы, что обеспечивается регулированием расстояний l_1 , l_2 между осями симметрии пальцев 16, 17 и входных валов 12, 13, а также количества двойных ходов в минуту инструментов, что достигается изменением скорости вращения входных валов 12, 13 посредством электродвигателей 10, 11.

Технология обработки прецизионных сферических поверхностей

При использовании предлагаемого технического решения обработка происходит по методу свободного притирания. Сущность метода заключается в том, что две поверхности при взаимном притирании самоисправляются

и приобретают правильную геометрическую форму одинаковой кривизны: либо сферическую (одна выпуклая, другая вогнутая), либо плоскую. Причем на стадии шлифования заготовка притирается к обрабатываемой поверхности твердого шлифовальника, а при полировании смолой мягкие подложки полировальника притираются к шлифованной поверхности заготовки стекла [5].

Метод свободного притирания определяется наличием нескольких признаков:

- контакт притирающихся поверхностей инструмента и заготовки обеспечивается силовым замыканием;
- одна из притирающихся поверхностей самоустанавливается на другой благодаря наличию шарового шарнира;
- наладочные параметры станка выбирают так, чтобы все точки на притирающихся поверхностях инструмента и детали находились в многократном аperiodическом контакте.

Для получения поверхности заданной кривизны в методе свободного притирания в процессе обработки регулируют следующие нала-

дочные параметры станка: величину амплитуды возвратно-вращательного движения инструмента по детали L и число его двойных ходов в единицу времени (определяемое частотой вращения входного звена исполнительного механизма станка ω_2); частоту вращения линзы ω_n , а также величины диаметра инструмента d_n и рабочего усилия F . Причем в каждом сеансе регулирования параметров изменяют один (максимум два) из них. Невыполнение последнего требования вызывает нарушение геометрической формы обрабатываемой поверхности [6].

Выбор наиболее эффективного наладочного параметра и величину его изменения в каждом конкретном случае в классической технологии опытным путем определяет рабочий-оптик. Однако не всегда это бывает удачно, что приводит к увеличению времени получения детали. При одновременной двусторонней обработке линзы с разными радиусами кривизны по величине и по знаку, а также с неодинаковыми параметрами качества экспериментальное определение оптимальных наладочных параметров станка крайне затруднительно.

С целью устранения отмеченных недостатков по выбору эффективных наладочных параметров технологического оборудования и их величины предлагается трудоемкие натурные эксперименты заменить расчетами на ЭВМ. Для этого выполнено математическое моделирование геометрических и кинематических связей разработанного станка для одновременной двусторонней обработки линз и его рабочей зоны. В результате получены аналитические выражения для расчета скорости скольжения u в произвольно выбранной опорной точке M на обрабатываемой поверхности и давления p в окрестности этой точки. Используя эти параметры, по формуле Ф. Престона [7] рассчитывали величину съема материала с заготовки в точке M

$$U = k \int_0^t u p dt, \quad (1)$$

где k – технологический коэффициент, зависящий от условий обработки и износостойкости материала заготовки; t – время обработки.

Расчет величины съема материала, пропорциональной параметру $Q = u p$, проводили в

опорных точках диаметрального сечения обрабатываемой поверхности линзы, выбранных согласно методике, приведенной в [8]. Использовали линзу типа отрицательный мениск с параметрами: $R_1 = 120,85$ мм; $d_1 = 100$ мм (R_1 и d_1 – радиус кривизны и диаметр выпуклой поверхности) и $R_2 = 50,34$ мм; $d_2 = 80$ мм (R_2 и d_2 – радиус кривизны и диаметр вогнутой поверхности).

Результаты исследования и их обсуждение

При определении оптимальных наладочных параметров станка использовали следующую методику. Учитывая геометрические характеристики выбранной линзы и практику работы оптических цехов [9], назначили следующие средние значения наладочных параметров станка для выпуклой поверхности линзы: $L = 60$ мм; $\omega_n/\omega_n = 0,8$; $\omega_2 = 4,5$ с⁻¹; $\omega_n = 6$ с⁻¹ (где ω_n – скорость вращения инструмента). Первоначально определяли наиболее выгодное значение d_n , при котором происходит равномерный съем припуска по обрабатываемой поверхности, т. е. значения Q в центре последней и на ее краю равны. Затем таким же образом поочередно выявляли оптимальные значения других наладочных параметров при средней величине остальных из них.

Результаты расчета представлены на рис. 2. Здесь кривые 2, 5, 8, 11 и 14 отображают процесс обработки, при котором происходит равномерный съем припуска по всей поверхности линзы на стадии выхаживания (на заключительной стадии финишной обработки – полирования), что требуется для повышения частоты исполнительной поверхности детали после достижения заданной ее геометрической формы (заданной точности). Для линзы с рассматриваемыми параметрами такая обработка имеет место при: $\omega_n = 8$ с⁻¹; $\omega_n/\omega_n = 0,7$; $\omega_2 = 4,5$ с⁻¹; $L = 50$ мм и $d_n = 80$ мм. Однако на начальных стадиях как финишного шлифования, так и полирования, когда необходимо обеспечить усиленный съем припуска в краевой зоне линзы, наладочные параметры станка рекомендуется назначать следующими: $\omega_n = 7,1$ с⁻¹; $\omega_n/\omega_n = 0,61$; $\omega_2 = 4,1$ с⁻¹; $L = 52$ мм и $d_n = 81,7$ мм (соответственно кривые 3, 6, 9, 12, 15, рис. 2). Если же требуется исправить макропогрешность обрабатываемой поверхности линзы в виде общего

«бугра», следует принимать: $\omega_n = 8,7 \text{ с}^{-1}$; $\omega_n/\omega_n = 0,74$; $\omega_2 = 5,3 \text{ с}^{-1}$; $L = 45,4 \text{ мм}$ и $d_n = 77,1 \text{ мм}$ (соответственно кривые 1, 4, 7, 10, 13, рис. 2).

Неравномерное распределение параметра Q на рис. 2 вызвано бóльшими значениями скорости скольжения в шаровом слое сферической поверхности линзы по сравнению с ее центральной и краевой зонами и обусловлено особенностями обработки по методу свободного притирания, когда в процессе относительного

движения притирающихся поверхностей максимальная площадь их взаимного перекрытия имеет место именно в шаровом слое.

Однако в реальном процессе обработки происходит автоматическое нивелирование отмеченного экстремума: увеличение скорости скольжения в шаровом слое вызывает усиление съема материала в этой зоне, что уменьшает активную площадь соприкосновения детали и инструмента в данной их части.

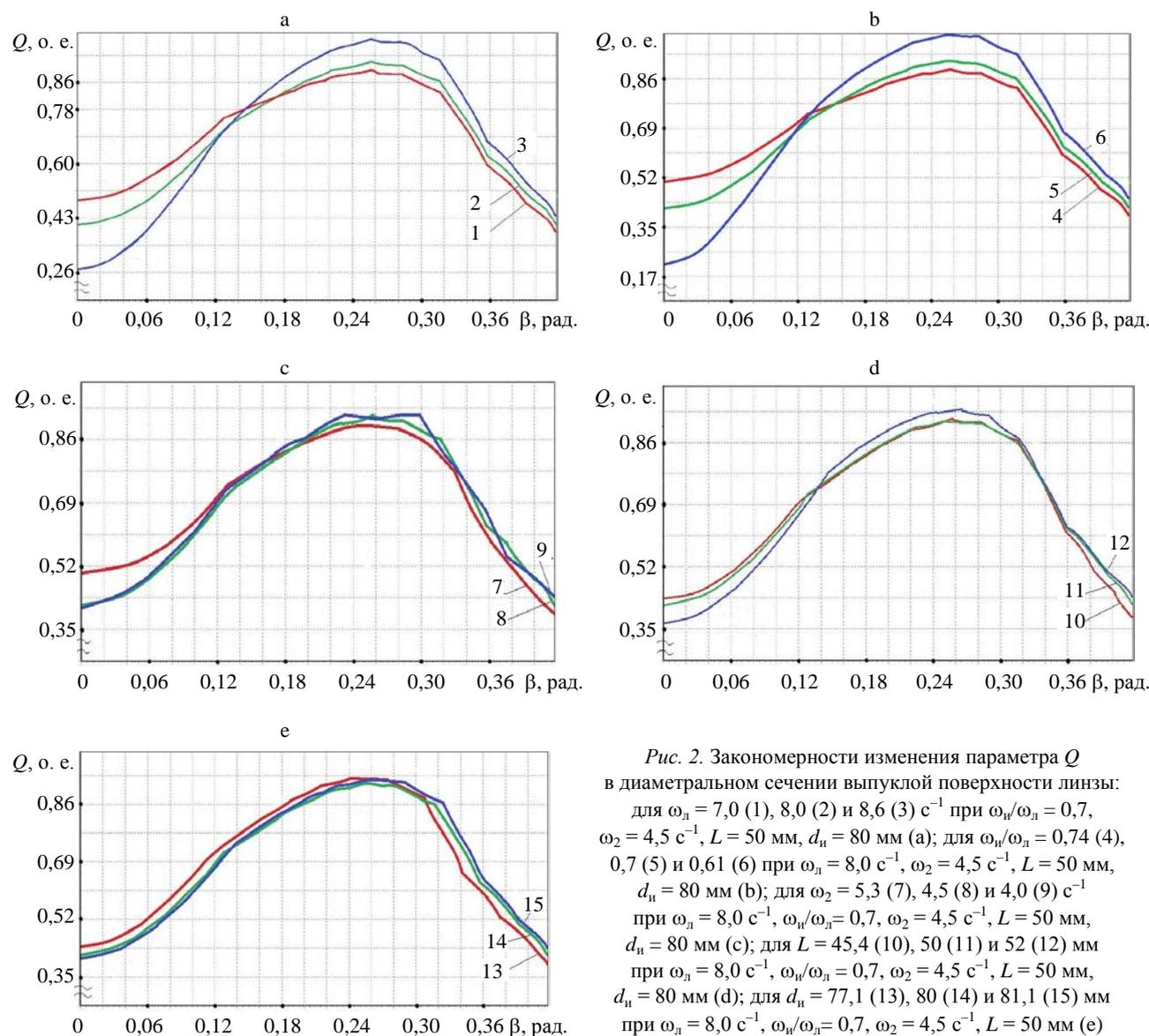


Рис. 2. Закономерности изменения параметра Q в диаметральном сечении выпуклой поверхности линзы: для $\omega_n = 7,0$ (1), $8,0$ (2) и $8,6$ (3) с^{-1} при $\omega_n/\omega_n = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (а); для $\omega_n/\omega_n = 0,74$ (4), $0,7$ (5) и $0,61$ (6) при $\omega_n = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (б); для $\omega_2 = 5,3$ (7), $4,5$ (8) и $4,0$ (9) с^{-1} при $\omega_n = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n/\omega_n = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (с); для $L = 45,4$ (10), 50 (11) и 52 (12) мм при $\omega_n = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n/\omega_n = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (д); для $d_n = 77,1$ (13), 80 (14) и $81,1$ (15) мм при $\omega_n = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n/\omega_n = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$ (е)

Fig. 2. Regularities for changes of Q parameter in diametral section of convex lens surface: for $\omega_n = 7.0$ (1), 8.0 (2) and 8.6 (3) s^{-1} when $\omega_n/\omega_n = 0.7$, $\omega_2 = 4.5 \text{ s}^{-1}$, $L = 50 \text{ mm}$, $d_n = 80 \text{ mm}$ (a); for $\omega_n/\omega_n = 0.74$ (4), 0.7 (5) and 0.61 (6) when $\omega_n = 8.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_2 = 4.5 \text{ s}^{-1}$, $L = 50 \text{ mm}$, $d_n = 80 \text{ mm}$ (b); for $\omega_2 = 5.3$ (7), 4.5 (8) and 4.0 (9) s^{-1} when $\omega_n = 8.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_n/\omega_n = 0.7$, $\omega_2 = 4.5 \text{ s}^{-1}$, $L = 50 \text{ mm}$, $d_n = 80 \text{ mm}$ (c); for $L = 45.4$ (10), 50 (11) and 52 (12) mm when $\omega_n = 8.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_n/\omega_n = 0.7$, $\omega_2 = 4.5 \text{ s}^{-1}$, $L = 50 \text{ mm}$, $d_n = 80 \text{ mm}$ (d); for $d_n = 77.1$ (13), 80 (14) and 81.1 (15) mm when $\omega_n = 8.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_n/\omega_n = 0.7$, $\omega_2 = 4.5 \text{ s}^{-1}$, $L = 50 \text{ mm}$ (e)

В результате рабочее усилие, приложенное к инструменту, перераспределяется таким образом, что оно увеличивается в центре и на краю детали, вызывая там повышение интенсивности съема припуска. Такое непрерывное перераспределение давления между притирающимися поверхностями лежит в основе самоорганизации процесса формообразования в условиях свободного притирания, который относится к одному из наиболее точных методов обработки [10].

При проведении численных исследований каждый из наладочных параметров станка изменяли на величину, при которой происходило одинаковое отклонение Q по краю линзы от его оптимального значения (от средней кривой на рис. 2) в случаях более интенсивного съема припуска как в краевой, так и в центральной зонах обрабатываемой поверхности (при исправлениях макропогрешности в виде общих соответственно «ямы» и «бугра»). В проводимых исследованиях принимали отклонение $\Delta Q = 0,02$. В результате появилась возможность проанализировать чувствительность Q к изменениям наладочных параметров технологического оборудования, которая представляет собой величину изменения ΔQ , приходящуюся на единицу относительного изменения того или иного наладочного параметра ΔN :

$$\sigma = \frac{\Delta Q}{\Delta N}. \quad (2)$$

Результаты расчета коэффициента σ приведены в табл. 1.

Параметр ΔN определяли как частное деления разности значений измененного N' и исходного N_0 наладочных параметров на его исходное значение. В качестве N_0 и N' брали величины наладочных параметров, при которых происходил равномерный съем припуска по всей обрабатываемой поверхности и возникали отклонения этой поверхности от правильной геометрической формы в виде общих «бугра» или «ямы»

$$\Delta N = \frac{|N' - N_0|}{N_0}. \quad (3)$$

Из анализа данных табл. 1 следует, что максимальная чувствительность Q имеет место в

случае изменения диаметра инструмента, причем в большей степени при исправлении общей «ямы» по сравнению с исправлением общего «бугра». Остальные наладочные параметры с точки зрения чувствительности Q расположены в такой последовательности: ω_n/ω_l , L , ω_l , ω_2 – для исправления «бугра» и L , ω_l , ω_2 , ω_n/ω_l – для исправления «ямы».

Таблица 1

Значения σ для выпуклой поверхности линзы радиусом $R = 120,85$ мм

Values σ for convex lens surface with radius $R = 120.85$ mm

Исправление макропогрешности в виде			
общего «бугра»		общей «ямы»	
Наладочный параметр	σ	Наладочный параметр	σ
d_n	0,555	d_n	1,540
ω_n/ω_l	0,350	L	0,500
L	0,217	ω_l	0,266
ω_l	0,160	ω_2	0,180
ω_2	0,113	ω_n/ω_l	0,156

С целью выявления эффективности рассматриваемых наладочных параметров технологического оборудования с точки зрения интенсивности съема припуска с заготовки определим абсолютную величину показателя k , представляющего собой разность значений параметра Q в краевой ($Q_{кр}$) и центральной ($Q_{ц}$) зонах обрабатываемой поверхности линзы

$$k = |Q_{ц} - Q_{кр}|. \quad (4)$$

Значения k , вычисленные по графикам рис. 1, приведены в табл. 2.

Из сравнительного анализа данных табл. 2 и рис. 1 можно заключить, что для усиления съема припуска в центральной зоне обрабатываемой поверхности наиболее целесообразно увеличить частоту переносного (колебательного) движения инструмента. Менее эффективным является увеличение отношения ω_n/ω_l , т. е. повышение частоты вращения инструмента или уменьшение частоты вращения линзы.

Таблица 2
Значения k для выпуклой поверхности линзы
радиусом $R = 120,85$ мм

Values k for convex lens surface
with radius $R = 120.85$ mm

Исправление макропогрешности в виде			
общего «бугра»		общей «ямы»	
Наладочный параметр	k	Наладочный параметр	k
ω_2	0,120	ω_n/ω_l	0,222
ω_n/ω_l	0,114	ω_l	0,166
ω_l	0,097	L	0,062
d_n	0,044	d_n	0,033
L	0,039	ω_2	0,020

Однако следует учесть, что увеличение числа двойных ходов в единицу времени инструмента (повышение частоты его колебательного движения) приводит к усилению влияния динамических нагрузок (зазоров в шарнирах исполнительного механизма станка) на процесс обработки, в итоге появляются локальные погрешности на поверхности линзы. Эти погрешности – несимметричные, их невозможно компенсировать на стадии юстировки оптической системы прибора. Следовательно, для исправления макропогрешности в виде общего «бугра» целесообразно увеличивать отношение ω_n/ω_l . Реализовать эту рекомендацию в классической технологии обработки оптических деталей не представляется возможным, поскольку в существующих станках для оптической промышленности предусмотрено принудительное вращение только одного из притирающихся звеньев, а второе вращается за счет сил трения в зоне контакта этих звеньев. Поэтому при уменьшении частоты вращения линзы, если она закреплена на шпиндель станка, снижается и частота вращения инструмента, а ее следует увеличивать. Это требование диктует необходимость наличия в станке для обработки оптических элементов возможности независимой регулировки частот вращения инструмента и детали. Для исправления макропогрешности в виде общей «ямы» лучше всего, как видно из данных табл. 2 и рис. 1, уменьшить отношение ω_n/ω_l , что является дополнительным аргументом в пользу целесообразности применения технологии обработки линз, предусматривающей принудительное вращение инструмента и детали.

Использование отмеченных параметров для исправления «бугра» и «ямы» можно рекомендовать на стадиях среднего и мелкого (окончательного) полирования линз, где с обрабатываемой поверхности требуется обеспечить съем припуска значительной величины. На операции же финишной обработки – полирования, в процессе которой необходимо достичь заданной точности детали, управлять процессом формообразования целесообразно посредством изменения наладочных параметров станка, обеспечивающих более «мягкие» условия съема припуска. В частности, на этапе начального полирования «бугор» необходимо исправлять уменьшением значения ω_l , а «яму» – увеличением L . При окончательном полировании «бугор» следует удалять уменьшением d_n или L , а «яму» – увеличением d_n или уменьшением ω_2 .

Принимая во внимание особенности предлагаемой технологии, при численном исследовании процесса обработки второй (вогнутой) поверхности линзы ее частоту вращения во всех случаях назначали такой же, как и при обработке первой (выпуклой) поверхности. С учетом этого и принятой методики определения рациональных значений режимов обработки выполнен расчет параметра Q для вогнутой поверхности линзы $R = 50,34$ мм диаметром 80 мм. Расчет показал, что равномерный съем припуска с данной поверхности имеет место при: $\omega_l = 8,0 \text{ с}^{-1}$; $\omega_n/\omega_l = 0,7$; $\omega_2 = 3,0 \text{ с}^{-1}$; $L = 30$ мм и $d_n = 79,4$ мм. В случае отклонения рассматриваемой поверхности линзы от заданной геометрической формы необходимо назначать: $\omega_l = 7,1 \text{ с}^{-1}$; $\omega_n/\omega_l = 0,71$; $\omega_2 = 3,4 \text{ с}^{-1}$; $L = 29,1$ мм и $d_n = 79,27$ мм – для исправления «бугра» и $\omega_l = 8,7 \text{ с}^{-1}$; $\omega_n/\omega_l = 0,69$; $\omega_2 = 2,8 \text{ с}^{-1}$; $L = 31,6$ мм и $d_n = 79,49$ мм – для исправления «ямы».

Результаты расчета показателей σ и k для вогнутой поверхности линзы представлены в табл. 3, 4 соответственно. В частности, из табл. 3 видно, что, как и для выпуклой поверхности линзы, максимум чувствительности Q наблюдается при изменении d_n , причем также в большей степени в случае удаления «ямы». Распределение остальных наладочных параметров станка имеет несколько другую по сравнению с выпуклой поверхностью последовательность, а именно: L , ω_n/ω_l , ω_l , ω_2 – для удаления «бугра» и ω_n/ω_l , L , ω_2 , ω_l – для удаления «ямы».

Таблица 3

Значения σ для вогнутой поверхности линзы радиусом $R = 50,34$ мм

Values σ for concave lens surface with radius $R = 50.34$ mm

Исправление макропогрешности в виде			
общего «бугра»		общей «ямы»	
Наладочный параметр	σ	Наладочный параметр	σ
d_n	4,70	d_n	8,000
L	0,24	ω_n/ω_n	0,570
ω_n/ω_n	0,18	L	0,150
ω_n	0,06	ω_2	0,120
ω_2	0,06	ω_n	0,064

Таблица 4

Значения k для вогнутой поверхности линзы радиусом $R = 50,34$ мм

Values k for concave lens surface with radius $R = 50.34$ mm

Исправление макропогрешности в виде			
общего «бугра»		общей «ямы»	
Наладочный параметр	k	Наладочный параметр	k
L	0,029	L	0,016
ω_n	0,025	ω_n	0,013
ω_n/ω_n	0,023	ω_n/ω_n	0,012
ω_2	0,023	ω_2	0,010
d_n	0,011	d_n	0,008

Что касается эффективности наладочных параметров станка (табл. 4), то их распределение также отличается от такового для выпуклой поверхности, однако параметры эти в данном случае расположены в одинаковой последовательности при исправлении как «бугра», так и «ямы», а именно: L , ω_n , ω_n/ω_n , ω_2 , d_n . Причем первые три параметра можно рекомендовать для использования на стадии шлифования, а остальные два – в процессе полирования.

Для проверки корреляции результатов теоретических исследований (рис. 2) реальному процессу формообразования проведена экспериментальная обработка выпуклой поверхности линзы радиусом кривизны 120,85 мм на стадии мелкого шлифования. В качестве обрабатывающего инструмента использовали алмазный шлифовальный диск на медной связке с фракцией алмазных зерен 14/10 марки АСМ концентрации 10 %, радиус кривизны которого поддерживали постоянным и равным 120,87 мм. В процессе обработки отклонение радиуса кривизны линзы от номинального значения оценивали по стрелке прогиба, которую измеряли сферометром часового типа с микронной индикаторной головкой и кольцом диаметром 90 мм. Продолжительность шлифования в каждом сеансе составляла 5 мин при рабочем усилии на инструмент 2 Н, при этом исходная стрелка

прогиба h равнялась 8,689 мм. Шлифование выполняли на станке 6ШП-200.

Результаты экспериментальных исследований характера изменения h как функции увеличивающихся и уменьшающихся наладочных параметров станка представлены соответственно на рис. 3, 4.

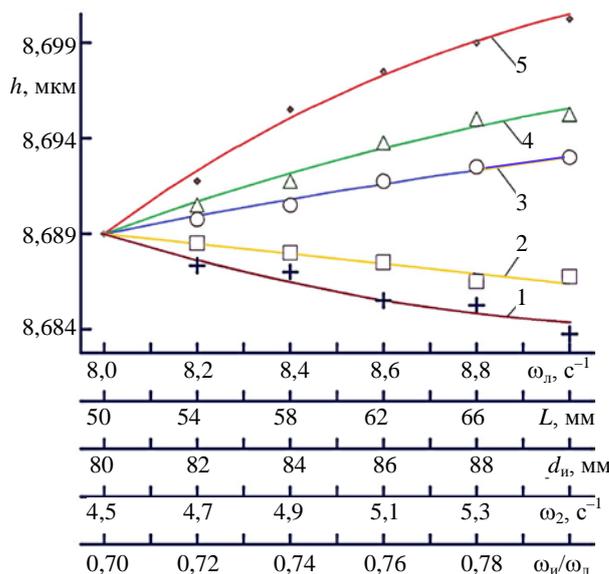


Рис. 3. Закономерности изменения величины стрелки прогиба выпуклой поверхности линзы в зависимости от значения увеличивающихся: ω_n/ω_n при $\omega_n = 8,0$ с⁻¹, $\omega_2 = 4,5$ с⁻¹, $L = 50$ мм, $d_n = 80$ мм (1); ω_2 при $\omega_n = 8,0$ с⁻¹, $\omega_n/\omega_n = 0,7$, $L = 50$ мм, $d_n = 80$ мм (2); d_n при $\omega_n = 8,0$ с⁻¹, $\omega_n/\omega_n = 0,7$, $\omega_2 = 4,5$ с⁻¹, $L = 50$ мм (3); L при $\omega_n = 8,0$ с⁻¹, $\omega_n/\omega_n = 0,7$, $\omega_2 = 4,5$ с⁻¹, $d_n = 80$ мм (4); ω_n при $\omega_n/\omega_n = 0,7$, $\omega_2 = 4,5$ с⁻¹, $L = 50$ мм, $d_n = 80$ мм (5)

Fig. 3. Regularities for changes of deflection value in convex lens surface due to the following increasing values: ω_n/ω_n when $\omega_n = 8.0$ s⁻¹, $\omega_2 = 4.5$ s⁻¹, $L = 50$ mm, $d_n = 80$ mm (1); ω_2 when $\omega_n = 8.0$ s⁻¹, $\omega_n/\omega_n = 0.7$, $L = 50$ mm, $d_n = 80$ mm (2); d_n when $\omega_n = 8.0$ s⁻¹, $\omega_n/\omega_n = 0.7$, $\omega_2 = 4.5$ s⁻¹, $L = 50$ mm (3); L when $\omega_n = 8.0$ s⁻¹, $\omega_n/\omega_n = 0.7$, $\omega_2 = 4.5$ s⁻¹, $d_n = 80$ mm (4); ω_n when $\omega_n/\omega_n = 0.7$, $\omega_2 = 4.5$ s⁻¹, $L = 50$ mm, $d_n = 80$ mm (5)

Анализ полученных закономерностей свидетельствует о том, что с увеличением d_n , L и ω_n (рис. 3, соответственно кривые 3–5) интенсивнее срабатывается периферия заготовки, что приводит к образованию макропогрешности в виде общего «бугра», а с возрастанием ω_2 и ω_n/ω_n , наоборот, происходит усиленный съем припуска в центральной зоне заготовки (рис. 3, кривые 1, 2), вызывая тем самым макропогрешность в виде общей «ямы». В случае уменьшения рассматриваемых наладочных параметров станка общий «бугор» на обрабатываемой поверхности появляется при изменении ω_2 и ω_n/ω_n (рис. 4, кривые 4, 5), а общая «яма» – при изменении ω_n , d_n и L (рис. 4, соот-

ответственно кривые 1–3). Изложенное удовлетворительно согласуется с результатами численных исследований, приведенных на рис. 2.

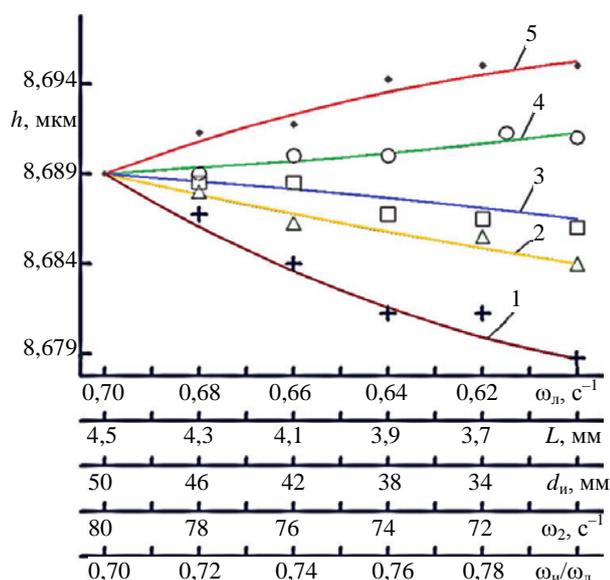


Рис. 4. Закономерности изменения величины стрелки прогиба выпуклой поверхности линзы в зависимости от значения уменьшающихся: ω_l при $\omega_i/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_i = 80 \text{ мм}$ (1); d_i при $\omega_l = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_i/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$ (2); L при $\omega_l = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_i/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $d_i = 80 \text{ мм}$ (3); ω_2 при $\omega_l = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_i/\omega_l = 0,7$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_i = 80 \text{ мм}$ (4); ω_i/ω_l при $\omega_l = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_i = 80 \text{ мм}$ (5)

Fig. 4. Regularities for changes of deflection value in convex lens surface due to the following decreasing values: ω_l when $\omega_i/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ s}^{-1}$, $L = 50 \text{ mm}$, $d_i = 80 \text{ mm}$ (1); d_i when $\omega_l = 8,0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_i/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ s}^{-1}$, $L = 50 \text{ mm}$ (2); L when $\omega_l = 8,0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_i/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ s}^{-1}$, $d_i = 80 \text{ mm}$ (3); ω_2 when $\omega_l = 8,0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_i/\omega_l = 0,7$, $L = 50 \text{ mm}$, $d_i = 80 \text{ mm}$ (4); ω_i/ω_l when $\omega_l = 8,0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_2 = 4,5 \text{ s}^{-1}$, $L = 50 \text{ mm}$, $d_i = 80 \text{ mm}$ (5)

Выполнены также исследования по проверке характера обработки, определяемого коэффициентами σ и k . В первом случае эти исследования сводились к определению такого значения ΔN для каждого из наладочных параметров станка при их изменении, когда стрелка прогиба выпуклой поверхности линзы в процессе ее мелкого шлифования достигала одинакового значения. Во втором случае эксперименты преследовали цель выявить время обработки (мелкого шлифования), по истечении которого исходная стрелка прогиба, изменяясь, достигала одного и того же значения (в рассматриваемом случае 8,679 мм). При этом значения наладочных параметров станка устанавливались такие же, как и на стадии теоретических расчетов, а рабочее усилие на инструмент и исходное значение стрелки прогиба составляли, как и ранее, соответственно 400 Па и 8,689 мм.

Результаты этой части экспериментальных исследований приведены на рис. 5, 6.

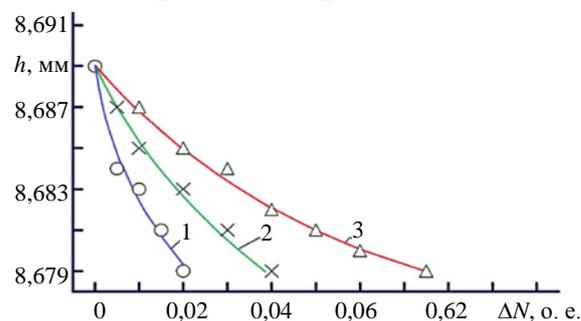


Рис. 5. Закономерности изменения стрелки прогиба выпуклой поверхности линзы в зависимости от: относительных изменений диаметра инструмента при $\omega_l = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_i/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$ (1); амплитуды колебательного движения инструмента при $\omega_l = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_i/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $d_i = 80 \text{ мм}$ (2); частоты вращения линзы при $\omega_i/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_i = 80 \text{ мм}$

Fig. 5. Regularities for changes of deflection value in convex lens surface due to relative changes of tool diameter: when $\omega_l = 8,0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_i/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ s}^{-1}$, $L = 50 \text{ mm}$ (1); amplitudes of tool vibrational motion when $\omega_l = 8,0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_i/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ s}^{-1}$, $d_i = 80 \text{ mm}$ (2); lens rotational speed when $\omega_i/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ s}^{-1}$, $L = 50 \text{ mm}$, $d_i = 80 \text{ mm}$

Из анализа рис. 5 видно, что изменение диаметра инструмента на незначительную величину $\Delta N = 0,013$ приводит к уменьшению h на 10 мкм (кривая 1), в то время как L и ω_l для уменьшения h на аналогичную величину ΔN понадобилось изменить соответственно на 0,040 и 0,075 (кривые 2 и 3).

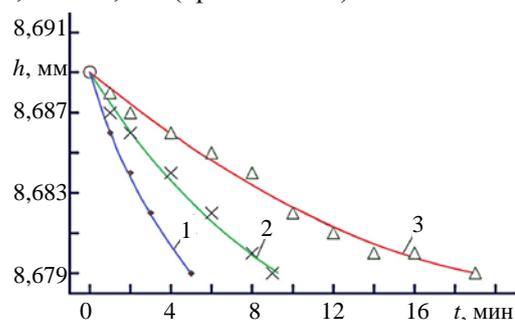


Рис. 6. Закономерности изменения стрелки прогиба выпуклой поверхности линзы в зависимости от: продолжительности обработки в случае изменений величины отношения ω_i/ω_l при $\omega_l = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_i = 80 \text{ мм}$ (1); частоты вращения линзы при $\omega_i/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_i = 80 \text{ мм}$ (2); амплитуды колебательного движения инструмента при $\omega_l = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_i/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $d_i = 80 \text{ мм}$

Fig. 6. Regularities for changes of deflection value in convex lens surface due to processing duration while changing the following ratio value ω_i/ω_l when $\omega_l = 8,0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_2 = 4,5 \text{ s}^{-1}$, $L = 50 \text{ mm}$, $d_i = 80 \text{ mm}$ (1); lens rotational speed when $\omega_i/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ s}^{-1}$, $L = 50 \text{ mm}$, $d_i = 80 \text{ mm}$ (2); amplitudes of tool vibrational motion when $\omega_l = 8,0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_i/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ s}^{-1}$, $d_i = 80 \text{ mm}$

Результаты, представленные на рис. 6, свидетельствуют о том, что в случае обработки на режимах, которые использовались на этапе численных исследований, изложенных на рис. 2, наибольшей производительности можно достичь при регулировании процесса формообразования посредством изменения отношения ω_n/ω_l (кривая 1). Следующими по эффективности идут регулирование ω_l (кривая 2) и L (кривая 3). Эти выводы согласуются с численными исследованиями.

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных численных исследований выявлены режимы работы технологического оборудования для абразивной обработки линз, обеспечивающие равномерный съем припуска по всей поверхности заготовки, а также позволяющие исправить макропогрешности линзы в виде общих «бугра» и «ямы».

2. Назначив одинаковые отклонения параметра Q , характеризующего интенсивность съема припуска с обрабатываемой заготовки, по периферии линзы от его оптимального значения в случаях преобладающего съема припуска как в краевой, так и в центральной зонах обрабатываемой поверхности, определили чувствительность Q к изменениям наладочных параметров станка. В результате установили, что максимальная чувствительность Q имеет место в случае изменения диаметра инструмента, причем в большей степени при исправлении общей «ямы» по сравнению с исправлением общего «бугра».

3. Вычислив разность значений параметра Q в краевой и центральной зонах обрабатываемой поверхности линзы, выявили эффективность наладочных параметров технологического оборудования, которая показала, что для исправления макропогрешностей в виде «бугра» и «ямы» наиболее целесообразно изменять отношение ω_n/ω_l , что, в свою очередь, диктует необходимость наличия в станке возможности независимого регулирования частот вращения инструмента и детали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. М.: Высш. шк., 1963. 519 с.
2. Сулим, А. В. Производство оптических деталей / А. В. Сулим. М.: Высш. шк., 1969. 304 с.
3. Исследование качества и производительности обработки высокоточных сферических поверхностей оптических деталей / А. С. Козерук [и др.] // Вест. нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 2009. № 2. С. 40–44.
4. Станок для одновременной двусторонней обработки линзы с пологими вогнутыми поверхностями: пат. 10724 Респ. Беларусь, МПК В24В 13/00 / А. С. Козерук, В. Ф. Климович, А. А. Сухоцкий; дата публ. 10.30.2007.

5. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. 176 с.
6. 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.
7. Preston, F. W. The Theory and Design Plate Glass Polishing Machines / F. W. Preston // Journal of the Society Technology. 1927. No 11. P. 214–256.
8. Исследование кинематических закономерностей процесса двусторонней обработки двояковыпуклых оптических деталей / А. С. Козерук [и др.] // Вест. Нац. акад. наук. Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2008. № 2. С. 26–31.
9. Зубаков, В. Г. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков, М. Н. Семibrатов, С. К. Штандель; под ред. М. Н. Семibrатова. М.: Машиностроение, 1985. 368 с.
10. Козерук, А. С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на основе математического моделирования / А. С. Козерук. Минск, 1997. 317 с.

Поступила 26.10.2016

Подписана в печать 27.12.2016

Опубликована онлайн 30.05.2017

REFERENCES

1. Bardin A. N. (1963) *Technology of Optical Glass*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 519 (in Russian).
2. Sulim, A. V. (1969) *Production of Optical Parts*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 304 (in Russian).
3. Kozeruk A. S., Sukhotsky A. A., Klimovich V. F., Kuznechik V. O. (2009) Investigation of Quality and Productivity of Treatment of High-Accuracy Spherical Surfaces of Optical Details. *Vesti Natsyianal'nai Akademii Navuk Belarusi. Ser. Fizika-Tekhnichnykh Navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series], (2), 40–44 (in Russian).
4. Kozeruk A. S., Klimovich V. F., Sukhotsky A. A. (2007) *Machine Tool for Simultaneous Two-Sided Processing of Lens with Shallow Concave Surfaces*. Patent Republic of Belarus No 10724 (in Russian).
5. Kozeruk A. S. (1997) *Shaping of Precision Surfaces*. Minsk, VUZ-UNITI Publ. 176 (in Russian).
6. Filonov I. P., Klimovich F. F., Kozeruk A. S. (1995) *Control in Shaping of Precision Surfaces of Machine Parts and Devices*. Minsk, Dizayn-PRO Publ. 208 (in Russian).
7. Preston F. W. (1927) The Theory and Design Plate Glass Polishing Machines. *Journal of the Society Technology*, (11), 214–256.
8. Kozeruk A. S., Sukhotsky A. A., Klimovich V. F., Filonova M. I. (2008) Investigation of Kinematic Regularities of Double-Sided Treatment of Biconvex Optical Details. *Vesti Natsyianal'nai Akademii Navuk Belarusi. Ser. Fizika-Tekhnichnykh Navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series], (2), 26–31 (in Russian).
9. Zubakov V. G., Semibratov M. N., Shtandel S. K., Semibratov M. N. ed. (1985) *Technology of Optical Parts*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 368 (in Russian).
10. Kozeruk A. S. (1997) *Control in Shaping of Precision Surfaces of Machine Parts and Devices on the Basis of Mathematical Simulation*. Minsk. 317 (in Russian).

Received: 26.10.2016

Accepted: 27.12.2016

Published online: 30.05.2017