

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-193-198>

УДК 688.1.037.97+666.271

Моделирование процесса формообразования стеклянных шариков по методу свободного притирания

Докт. техн. наук, проф. А. С. Козерук¹⁾, инж. А. А. Сухоцкий¹⁾,
кандидаты техн. наук, доценты М. И. Филонова¹⁾, В. И. Юринок¹⁾, В. О. Кузнецик¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Выполнено математическое моделирование обработки шариков по методу свободного притирания с помощью инструмента в виде полого тонкостенного цилиндра (инструментальные втулки). Получено аналитическое выражение для расчета путей резания, которые, согласно формуле Ф. Престона, пропорциональны величине съема материала с обрабатываемой заготовки. Проведен расчет путей резания в диаметральных сечениях шарика за время его поворота на суммарный угол 4000 рад. Расчет выполнен для различных значений таких наладочных параметров базового станка, как: амплитуды возвратно-вращательного движения устройства с закрепленными в нем инструментальными втулками, расстояния между осями симметрии инструментальных втулок и оси вращения устройства, скорости вращения входного звена исполнительного механизма базового станка и планшайбы, закрепленной на его шпинделе и служащей для сообщения заготовкам шариков относительного вращения. При этом рассматривали сечение с наибольшим расхождением путей резания и определяли относительное значение этих путей, которое пропорционально точности обработки. Выполнены исследования, позволившие выявить по меньшей мере три местоположения инструментальных втулок, в которых достигается минимальное значение относительных путей резания на обрабатываемой поверхности шарика, т. е. максимальная точность обработки, что дает возможность на практике совместить операции предварительного, основного и окончательного шлифования рассматриваемых деталей. Показано, что степень корреляции экспериментальных и теоретических результатов находится на уровне 80–85 %, а производительность полирования по предлагаемой схеме увеличивается примерно на 30 % в сравнении с классической схемой выполнения этой операции.

Ключевые слова: математическое моделирование, свободное притирание, стеклянные шарики, инструментальная втулка, режимы обработки, пути резания

Для цитирования: Моделирование процесса формообразования стеклянных шариков по методу свободного притирания / А. С. Козерук [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 3. С. 193–198. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-193-198>

Modeling of the Process of Shaping Glass Beads According to the Method of Free Lapping

A. S. Kozeruk¹⁾, A. A. Sukhotsky¹⁾, M. I. Filonova¹⁾, V. I. Yurinok¹⁾, V. O. Kuznechik¹⁾

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

Abstract. Mathematical modeling of the processing of balls by the method of free lapping using a tool in the form of a hollow thin-walled cylinder (tool bushings) has been performed. An analytical expression has been obtained for calculating the cutting

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

paths, which, according to the formula of F. Preston, are proportional to the amount of material removal from the workpiece being processed. The calculation of the cutting paths in the diametrical sections of the ball during its rotation by a total angle of 4000 radians was carried out. The calculation is performed for various values of such adjustment parameters of the base machine as the amplitude of the reciprocating rotational movement of the device with tool bushings fixed in it, the distance between the symmetry axes of the tool bushings and the axis of rotation of the device, the speed of rotation of the input link of the actuator mechanism of the base machine and a faceplate fixed on its spindle and serving to communicate relative rotation to the ball blanks. In this case, the section with the greatest divergence of cutting paths was considered and the relative value of these paths was determined, which is proportional to the accuracy of processing. Studies have been carried out that have made it possible to identify at least three locations of tool bushings, in which the minimum value of the relative cutting paths on the machined ball surface is achieved, i. e. maximum accuracy of processing, which makes it possible in practice to combine the operations of preliminary, main and final grinding of the parts under consideration. It is shown that the degree of correlation between experimental and theoretical results is at the level of 80–85 %, and the polishing performance according to the proposed scheme increases by about 30 % in comparison with the classical scheme for performing this operation.

Keywords: mathematical modeling, free grinding, glass beads, tool bushings, processing modes, cutting paths

For citation: Kozeruk A. S., Sukhotsky A. A., Filonova M. I., Yurinok V. I., Kuznechik V. O. (2023) Modeling of the Process of Shaping Glass Beads According to the Method of Free Lapping. *Science and Technique*. 22 (3), 193–198. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-193-198> (in Russian)

Введение

Обработка стеклянных шариков для микрооптики на стадии финишного шлифования в настоящее время выполняется по схеме, включающей в себя установленную на шпинделе станка нижнюю планшайбу с листовой резиной и верхнюю планшайбу с коническими инструментальными лунками одинаковой глубины. В конические лунки верхней планшайбы помещают заготовки шариков и устанавливают ее на нижнюю планшайбу, которой сообщают относительное вращение, а верхней планшайбе – возвратно-вращательное перемещение относительно нижней [1]. В результате шарики совершают многоосное (трехосное) вращение относительно конических лунок. При этом по мере износа конической поверхности лунок происходит увеличение их площади контакта с заготовками шариков, что снижает точность обработки последних [2]. Во избежание отмеченной проблемы предлагается в качестве обрабатываемого инструмента использовать полый тонкостенный цилиндр [3]. Площадь контакта такого приработанного инструмента с шариком будет в виде шарового пояса постоянной ширины, и точность обработки становится стабильной. Причем эта точность зависит от толщины стенки инструментальной втулки – с уменьшением толщины точность повышается [4].

Моделирование закономерностей обработки

Предлагаемая технология шлифования и полирования шариков позволяет гибко и в широких пределах управлять интенсивностью съема

материала с заготовки посредством регулирования таких наладочных параметров технологического оборудования, как амплитуды L и скорости вращения входного звена исполнительного механизма технологического оборудования ω_2 , а также скорости вращения шпинделя станка (планшайбы) $\omega_{пл}$. При этом необходимо учитывать, что влияние каждого из перечисленных факторов как на производительность процесса, так и на качество обработки различно. Для выявления степени данного влияния на практике в настоящее время необходимо в каждом конкретном случае проводить большое количество трудоемких экспериментальных исследований, что не всегда возможно.

С целью решения отмеченной проблемы выполнено математическое моделирование процесса обработки шариков в условиях свободного притирания инструментов в виде полого цилиндра.

Определение закономерностей распределения путей резания $L_{рез}$ по сферической поверхности заготовки позволяет, согласно известной гипотезе Ф. Престона [5], оценить интенсивность и точность формообразования исполнительных поверхностей деталей по методу свободного притирания.

При определении $L_{рез}$ для произвольно выбранной точки M на сферической поверхности заготовки использовали формулу

$$L_{рез} = \sum_{k=0}^n \Delta l_k, \quad (1)$$

где Δl_k – путь резания, пройденный точкой M за время обработки Δt .

За время Δt шарик, вращающийся с абсолютной скоростью $\omega_{ш}$ вокруг своей мгновенной оси, повернется на угол $\Delta\varphi = \omega_{ш} \Delta t$ и произвольно выбранная точка M переместится в новую точку M' , удаленную от первоначальной на вектор $\Delta\vec{r}$. При малом шаге разбиения времени обработки величиной последнего можно заменить путь резания Δl_k в формуле (1), причем

$$\Delta r_x^2 + \Delta r_y^2 + \Delta r_z^2 = \left(2h \sin \frac{\Delta\varphi}{2} \right)^2, \quad (2)$$

где $\Delta r_x, \Delta r_y, \Delta r_z$ – проекции вектора $\Delta\vec{r}$ в неподвижной системе координат (СК) $O_0X_0Y_0Z_0$ с началом в центре шарика O_0 (рис. 1); h – расстояние между вектором скорости $\vec{\omega}_{ш}$ и точкой M .

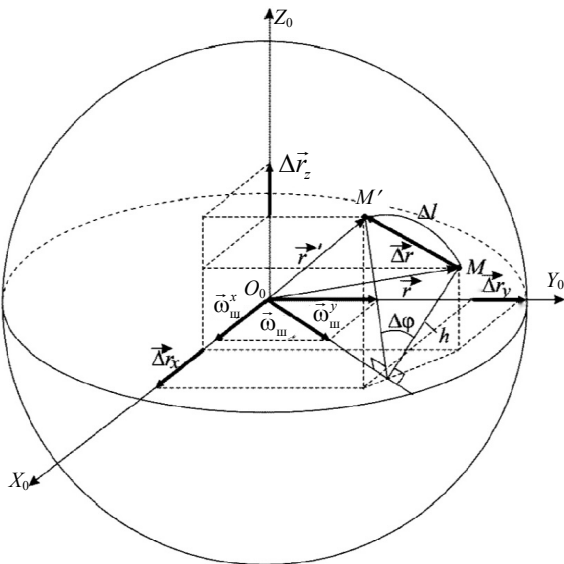


Рис. 1. Перемещение точки M за время Δt
 Fig. 1. Moving point M in time Δt

Так как движение точки M происходит в плоскости, перпендикулярной вектору $\vec{\omega}_{ш}$, а $\Delta\vec{r}$ принадлежит ей, то $\vec{\omega}_{ш} \perp \Delta\vec{r}$ и, следовательно, скалярное произведение этих векторов равно нулю [6]:

$$\omega_{ш}^x \Delta r_x + \omega_{ш}^y \Delta r_y + \omega_{ш}^z \Delta r_z = 0, \quad (3)$$

где $\omega_{ш}^x, \omega_{ш}^y, \omega_{ш}^z$ – координаты вектора $\vec{\omega}_{ш}$ в СК $O_0X_0Y_0Z_0$, полученные с учетом сложного движения инструмента.

Как следует из анализа процесса обработки шарика по рассматриваемой схеме, он кон-

тактирует с планшайбой без проскальзывания (для обеспечения этого условия на планшайбу наклеивают листовую резину), и поэтому линейная скорость точки контакта шарика совпадает с линейной скоростью точки на планшайбе. Вращение шарика со скоростью $\vec{\omega}_{ш}$ обусловлено движением его отмеченной точки контакта относительно центра шарика со скоростью \vec{v} . Поэтому справедливо равенство: $\vec{v} = \vec{v}_{пл} - \vec{v}_и$, где $\vec{v}_и$ – вектор линейной скорости инструментальной втулки, обусловленный относительным и переносным ее вращением. С учетом отмеченного можно записать:

$$\begin{cases} \omega_{ш}^x = \frac{v_x}{R} = \frac{v_{пл} \sin \alpha_{пл} - v_и \sin \alpha_и}{R}; \\ \omega_{ш}^y = \frac{v_y}{R} = \frac{v_и \sin \alpha_и - v_{пл} \sin \alpha_{пл}}{R}; \\ \omega_{ш}^z = (1 - k_{пл}) \times \omega_{пл}, \end{cases} \quad (4)$$

где R – радиус обрабатываемого шарика; $k_{пл} = \frac{\omega_{пл}}{\omega_и}$;

v_x, v_y – проекции вектора \vec{v} в СК $OXYZ$ с центром в точке O на оси вращения выходного звена исполнительного механизма (штан-ги) базового станка (рис. 2); $v_и = \sqrt{(X)^2 + (Y)^2 + (Z)^2}$ – линейная скорость инструмента, а координаты его оси симметрии в СК $OXYZ$ имеют вид:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ш} \cos \psi + R_и \cos(\varphi_и + \gamma); \\ L_{ш} \sin \psi + R_и \sin(\varphi_и + \gamma); \\ 0, \end{bmatrix} \quad (5)$$

причем $v_{пл} = \omega_{пл} \sqrt{(X - X_G)^2 + (Y)^2 + (Z)^2}$ – линейная скорость движения планшайбы в точке касания с шариком; $\alpha_{пл}$ и $\alpha_и$ – углы между векторами $\vec{v}_{пл}, \vec{v}_и$ и осью OX соответственно (рис. 2); X_G – расстояние между осями вращения штанги и планшайбы; $L_{ш}$ – длина штанги; ψ – угол ее отклонения от исходного положения; $R_и$ – расстояние от оси поводка 3 (рис. 3) до оси симметрии той или иной инструментальной втулки 5.

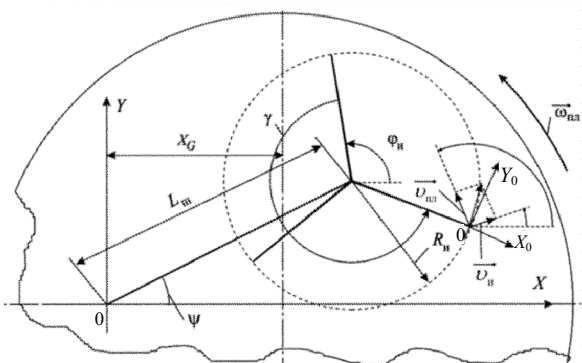


Рис. 2. К определению скоростей движения инструмента и планшайбы

Fig. 2. To determination of speeds of tool and faceplate movement

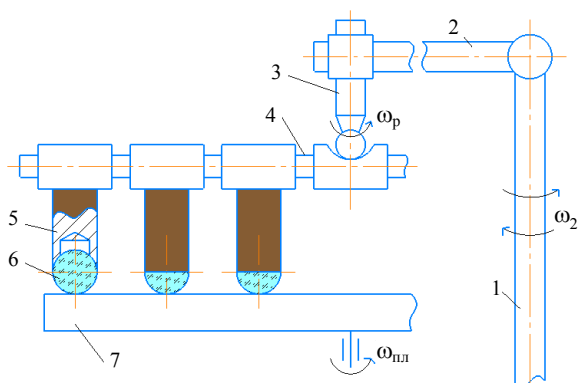


Рис. 3. Схема устройства для обработки шариков:
1 – вал привода, 2 – штанга, 3 – поводок, 4 – рычаг,
5 – инструментальная втулка, 6 – обрабатываемый шарик,
7 – планшайба

Fig. 3. Scheme of device for ball processing:
1 – drive shaft, 2 – rod, 3 – leash, 4 – lever,
5 – tool bushing, 6 – machined ball, 7 – faceplate

Поскольку точка M лежит на поверхности заготовки, можно записать

$$(\Delta r_x + M_x)^2 + (\Delta r_y + M_y)^2 + (\Delta r_z + M_z)^2 = R^2, \quad (6)$$

где M_x, M_y, M_z – координаты точки M в СК $OXYZ$, аналитические выражения для которых приведены в [3].

Совместное решение уравнений (2), (3) и (6) выполняли методом Ньютона – Канторовича (линеаризацией через разложение по формуле Тейлора) [7].

Поскольку

$$\vec{v}_M = \partial \vec{r} / \partial t, \quad (7)$$

а по векторной формуле Эйлера

$$\vec{v}_M = \vec{\omega}_ш \times \vec{r}, \quad (8)$$

то

$$\partial \vec{r} = \vec{\omega}_ш \times \vec{r} \times \partial t. \quad (9)$$

При малых значениях Δt формула (9) примет вид

$$\Delta \vec{r} \approx \vec{\omega}_ш \times \vec{r} \times \Delta t. \quad (10)$$

Записав уравнение (10) в проекциях на оси СК $OXYZ$

$$\begin{bmatrix} \Delta r_x \\ \Delta r_y \\ \Delta r_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{ш}^x \times M_x \times \Delta t; \\ \omega_{ш}^y \times M_y \times \Delta t; \\ \omega_{ш}^z \times M_z \times \Delta t \end{bmatrix} \quad (11)$$

и определив $\Delta l_k = \Delta r = \sqrt{\Delta r_x^2 + \Delta r_y^2 + \Delta r_z^2}$, по формуле (1) можно рассчитать искомый путь резания $L_{рез}$.

Результаты исследования и их обсуждение

С использованием изложенной выше математической модели и схемы обработки, показанной на рис. 3, выполнен расчет путей резания $l_{рез}$ в диаметральных сечениях шарика диаметром 10 мм за время его поворота на суммарный угол 4000 рад. Расчет выполняли для различных значений отмеченных выше наладочных параметров процесса обработки, а именно: амплитуды L , расстояния R_n , скоростей ω_2 и $\omega_{пл}$. При этом рассматривали сечение с наибольшим расхождением путей резания (с наибольшей разностью между максимальным и минимальным значениями путей резания) и определяли относительное значение этих путей $\Delta l_{отн}$ по формуле [8]

$$\Delta l_{отн} = (l_{max} - l_{min}) / l_{max}, \quad (12)$$

которое пропорционально точности обработки (чем меньше $\Delta l_{отн}$, тем выше точность обработанного шарика).

Результаты расчетов $\Delta l_{отн}$ приведены на рис. 4.

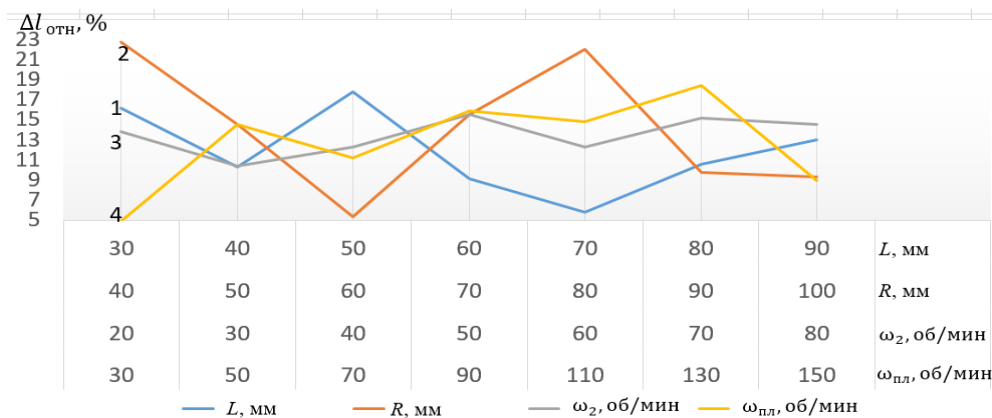


Рис. 4. Характер изменения относительных путей резания $\Delta l_{отн}$ в зависимости от L при $\omega_{пл} = 80$ об/мин, $\omega_2 = 50$ об/мин, $R = 70$ мм (1); R при $\omega_{пл} = 80$ об/мин, $\omega_2 = 50$ об/мин, $L = 55$ мм (2); ω_2 при $\omega_{пл} = 80$ об/мин, $R = 70$ мм, $L = 55$ мм (3); $\omega_{пл}$ при $\omega_2 = 50$ об/мин, $R = 70$ мм, $L = 55$ мм (4)

Fig. 4. Nature of the change in relative cutting paths Δl_{re} depending on L at $\omega_{fac} = 80$ rpm, $\omega_2 = 50$ rpm, $R = 70$ mm (1); R at $\omega_{fac} = 80$ rpm, $\omega_2 = 50$ rpm, $L = 55$ mm (2); ω_2 at $\omega_{fac} = 80$ rpm, $R = 70$ mm, $L = 55$ mm (3); ω_{fac} at $\omega_2 = 50$ rpm, $R = 70$ mm, $L = 55$ mm (4)

Из анализа рис. 4 следует, что изменение значений рассматриваемых наладочных параметров процесса обработки существенно влияет на распределение путей резания по поверхности шарика, т. е. на его точность, которые принимают ряд экстремальных (максимальных и минимальных) значений. Этот результат представляет особый интерес для практики. Например, характер зависимости $\Delta l_{отн}$ от изменения расстояния R (кривая 2 на рис. 4) имеет три минимальных значения: 6,7, 9,3 и 9,8 % для $R = 60; 100; 90$ мм соответственно. Это значит, что если использовать рабочую часть инструментальных втулок 7 (рис. 3) в виде алмазонасных участков разной зернистости (например, 50/40, 40/28 и 20/14 на металлической связке), то можно организовать совмещение операций грубого (предварительного), среднего (основного) и мелкого (окончательного) шлифования шариков в одной технологической операции, поместив заготовки в инструментальные втулки, находящиеся на различных расстояниях R от оси поводка 3 (в нашем случае 60, 100 и 90 мм).

Для проверки степени корреляции результатов теоретических и экспериментальных исследований выполнили шлифование шариков диаметром 10 мм из оптического стекла марки К8 в три перехода абразивной суспензией микропорошков М28, М20 и М10 концентрации Т:Ж = 1:5 (Т – твердая фаза (абразивный порошок), Ж – жидкая фаза (вода)), как это принято в технологии обработки оптических деталей [9]. В качестве инструментальных втулок использовали полые латунные цилиндры диаметром 10 мм с толщиной стенки 1 мм. Шли-

фованию выполняли на серийном рычажном станке мод. 3ШП-350 с закрепленной на его шпинделе планшайбой диаметром 350 мм с наклеенной листовой резиной на рабочей поверхности. Поскольку коэффициент трения стекла о резину больше, чем стекла о металл [10], в процессе обработки обеспечивается гарантированное многоосное (трехосное) вращение шарика относительно инструментальной втулки без его проскальзывания по планшайбе.

Продолжительность шлифования каждым номером абразива составляла 12 мин при $L = 55$ мм, $\omega_{пл} = 80$ об/мин, $\omega_2 = 50$ об/мин и силе прижима устройства 20 Н. Обработка проводилась по схеме, приведенной на рис. 3, при расположении инструментальных втулок на каждом звене на расстоянии $R = 40; 60; 80$ мм. Такое положение втулок соответствовало экстремальным точкам кривой 2 на рис. 4, в частности при первом и третьем значениях R имеет место максимальное значение $\Delta l_{отн}$, равное соответственно 22,8 и 22 % (минимальная точность шарика), а во втором случае – минимальное, равное 5,4 % (максимальная точность шарика).

Точность обработки определяли по результатам измерения диаметра шарика в различных диаметральных сечениях. Измерения выполняли с помощью вертикального оптиметра, снабженного специальным устройством. Получены следующие результаты: $\pm 1,8$, ± 1 и $\pm 1,5$ мкм для шариков, находившихся в процессе обработки в инструментальных втулках на расстоянии $R = 40; 60; 80$ мм соответственно, т. е. несовпадение точности обработки шариков на двух крайних расстояниях R составляло 20 %, а для теоре-

тических расчетов этот показатель находится в пределах 4 % ($\Delta l_{\text{отн}} = 22,8$ % для $R = 40$ мм и $\Delta l_{\text{отн}} = 22$ % для $R = 80$ мм). На основании этих результатов можно заключить, что степень совпадения теоретических и экспериментальных результатов находится на уровне 80–85 %.

Выполнили также полирование шариков диаметром 10 мм по рассмотренной выше схеме. Использовали инструментальные втулки с пенополиуретановой рабочей частью. В качестве полирующей суспензии служил полирит с водой концентрации Т:Ж = 1:10. Режимы обработки назначали те же, что и на стадии шлифования, уменьшив силу прижима устройства до 15 Н. Результаты обработки: детали отполировались за 40 мин, что в среднем на 30 % быстрее в сравнении с классической схемой полирования, основанной на использовании двух соосно установленных смоляных полировальников в виде планшайб с проточенными с одной установки канавками для шариков. При этом один из полировальников закреплен на шпинделе станка и в процессе обработки вращается, а второй установлен неподвижно и прижимается к шарикам, расположенным в канавке нижнего полировальника.

ВЫВОДЫ

1. Разработанная математическая модель и выполнение численных исследований на ее основе позволяют выявить по меньшей мере три местоположения обрабатывающих инструментов (инструментальных втулок), в которых достигается минимальное значение относительных путей резания, т. е. максимальная точность обработки, что дает возможность совместить операции предварительного, основного и окончательного шлифования.

2. Проведенные исследования показали, что степень корреляции экспериментальных и теоретических результатов находится на уровне 80–85 %, а производительность полирования по предлагаемой схеме увеличивается примерно на 30 % в сравнении с классической схемой выполнения этой операции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология оптических деталей / М. Н. Семибратов [и др.]. М.: Машиностроение, 1978. 415 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. 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 с.

4. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. 176 с.
5. Preston, E. W. The Theory and Design Plate Glass Polishing Machines / E. W. Preston // *Journal of the Society Technology*. 1927. No 11. P. 214–256.
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. Математика для инженеров: в 2 т. / С. А. Минюк [и др.]; под общ. ред. Н.А. Микулика. Минск: ООО «Элайда», 2006. Т. 2. 496 с.
8. 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.
9. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. М.: Высш. шк., 1963. 519 с.
10. Сулим, А. В. Производство оптических деталей / А. В. Сулим. М.: Высш. шк., 1969. 304 с.

Поступила 21.01.2023

Подписана к печати 28.03.2023

Опубликована онлайн 31.05.2023

REFERENCES

1. Semibratov M. N., Zubakov V. G., Shtandel' S. K., Kuznetsov S. M., Dushin E. M., Chebotareva L. P., Yakubovskii S. V., Matveenko L. I., Fradlin B. N., Pogrebyskii I. B., Blyumin I. D., Grigor'yan A. T., Pogrebyskii I. B. (1978) *Technology of Optical Parts*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 415 (in Russian).
2. Zubakov V. G., Semibratov M. N., Shtandel S. K. (1985) *Technology of Optical Parts*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 368 (in Russian).
3. Kozeruk A. S. (1997) *Control of Shaping of Precision Surfaces of Machine and Instrument Parts Based on Mathematical Modeling*. Minsk. 317 (in Russian).
4. Kozeruk A. S. (1997) *Shaping of Precision Surfaces*. Minsk, VUZ-UNITI Publ. 176 (in Russian).
5. Preston E. W. (1927) The Theory and Design Plate Glass Polishing Machines. *Journal of the Society Technology*, (11), 214–256.
6. Filonov I. P., Klimovich F. F., Kozeruk A. S. (1995) *Control of Shaping of Precision Surfaces of Machine and Devices*. Minsk, DesignPRO Publ. 208 (in Russian).
7. Minyuk S. A., Berezkina N. S., Metel'skii A. V., Goncharova M. N., Mikulik N. A. (2006) *Mathematics for Engineers. Vol. 2*. Minsk, Elaida Publ. 496 (in Russian).
8. Kozeruk A. S., Filonov I. P., Filonova M. I., Vlasovet N. S., Malpika D. L. (2017) Technological Distinctive Features Pertaining to Process of Simultaneous Two-Sided Machining of High-Precision Lenses Having Low Stiffness. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (3), 215–224. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-215-224> (in Russian).
9. Bardin A. N. (1963) *Optical Glass Technology*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 519 (in Russian).
10. Sulim A. V. (1969) *Production of Optical Parts*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 304 (in Russian).

Received: 21.01.2023

Accepted: 28.03.2023

Published online: 31.05.2023