

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-114-120>

УДК 681.7.023.72

Кинематические особенности абразивной обработки боковой поверхности плоско-выпуклых конических линз по методу свободного притирания

Докт. техн. наук, проф. А. С. Козерук¹⁾, асп. Р. О. Диас Гонсалес^{1, 2)}, кандидаты техн. наук, доценты М. И. Филонова¹⁾, В. О. Кузнецик¹⁾, В. И. Юринок¹⁾

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

²⁾Университетский политехнический институт Сантьяго Мариньо (Мерида, Боливарианская Республика Венесуэла)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Предложена технология трехопорной абразивной обработки плоско-выпуклых конических линз инструментом со стабилизированной плоскостностью рабочей поверхности, и рассмотрена схема устройства для реализации этой технологии. Устройство содержит инструмент-диск с плоской рабочей поверхностью, правильник в виде стеклянной пластины с отверстиями для деталей, привод вращательного движения последних и вал привода возвратно-вращательного их перемещения. При использовании устройства крепление плоско-выпуклых конических линз для их последующей групповой обработки происходит посредством оптического контакта, основанного на силах молекулярного сцепления. Такой метод блокировки повышает точность обработанных деталей и исключает применение наклеечной смолы, при нагреве которой происходит загрязнение окружающей среды канцерогенными веществами фенольной группы. Кроме того, в конструкцию устройства введены специальные компенсаторы, позволяющие свести к минимуму влияние вибраций в системе «станок – приспособление – инструмент – деталь», что способствует повышению параметров точности плоско-выпуклых конических линз. Изложены результаты исследования влияния характера обработки боковой поверхности плоско-выпуклых конических линз на точность и производительность процесса формообразования. Рассмотрены следующие случаи: с различной ориентацией вершины плоско-выпуклых конических линз относительно оси симметрии инструмента, без принудительного и с принудительным их вращением, с выходом и без выхода за край инструмента при возвратно-вращательном перемещении заготовок по рабочей поверхности последнего. Установлено, что точность формообразования и его производительность в случае обработки без выхода деталей за край инструмента в среднем на 30 % выше по сравнению с противоположной ситуацией, а обработка с принудительным относительным вращением блока деталей повышает их точность в среднем в полтора раза по сравнению с отсутствием такового, при этом внутренняя ориентация плоско-выпуклых конических линз (вершина конуса направлена в сторону оси вращения инструмента) способствует повышению интенсивности съема припуска более чем в два раза по сравнению с наружной их ориентацией.

Ключевые слова: коническая линза, плоский инструмент, правильник, трехопорная обработка, наладочные параметры, режимы обработки, свободное притирание

Для цитирования: Кинематические особенности абразивной обработки боковой поверхности плоско-выпуклых конических линз по методу свободного притирания / А. С. Козерук [и др.] // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 2. С. 114–120. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-114-120>

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

Kinematic Features of Abrasive Processing of Lateral Surface of Flat-Convex Conical Lenses Using Free Rubbing Method

A. S. Kozeluk¹⁾, R. O. Diaz Gonzales^{1, 2)}, M. I. Filonova¹⁾, V. O. Kuznechik¹⁾, V. I. Yurinok¹⁾

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

²⁾Polytechnic University Institute of Santiago Mariño (Merida, Venezuela)

Abstract. A technology for three-support abrasive processing of flat-convex conical lenses using a tool with a stabilized flatness of the working surface is proposed, and a device diagram for implementing this technology is considered. The device contains a disk tool with a flat working surface, a straightener in the form of a glass plate with holes for parts, a drive for the rotational movement of the latter and a drive shaft for their reciprocating rotational movement. When using the device, the attachment of flat-convex conical lenses for their subsequent group processing occurs through optical contact based on molecular adhesion forces. This blocking method increases the accuracy of processed parts and eliminates the use of adhesive resin, which, when heated, pollutes the environment with carcinogenic substances of the phenolic group. In addition, special compensators have been introduced into the design of the device to minimize the influence of vibrations in the “machine – fixture – tool – part” system, which helps to improve the accuracy parameters of plano-convex conical lenses. The paper presents results of a study of the influence of the nature of processing of the lateral surface of flat-convex conical lenses on the accuracy and productivity of the shaping process. The following cases are considered: with different orientations of the top of flat-convex conical lenses relative to the axis of symmetry of the tool, without forced and with forced rotation, with and without going beyond the edge of the tool during reciprocating rotational movement of workpieces along the working surface of the latter. It has been established that the accuracy of shaping and its productivity in the case of processing without parts leaving the edge of the tool are on average 30 % higher compared to the opposite situation, and processing with forced relative rotation of a block of parts increases their accuracy on average by one and a half times compared with absence of such, while the internal orientation of flat-convex conical lenses (the top of the cone is directed towards the axis of rotation of the tool) helps to increase the intensity of stock removal by more than two times compared to their external orientation.

Keywords: conical lens, flat tool, straightener, three-support processing, adjustment parameters, processing modes, free grinding

For citation: Kozeluk A. S., Diaz Gonzales R. O., Filonova M. I., Kuznechik V. O., Yurinok V. I. (2024) Kinematic Features of Abrasive Processing of Lateral Surface of Flat-Convex Conical Lenses Using Free Rubbing Method. *Science and Technique*. 23 (2), 114–120. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-114-120> (in Russian)

Введение

Достоинством плоско-выпуклых конических линз является то, что они в отличие от сферических линз, которые создают широкий пучок Гаусса, формируют узкий пучок Бесселя с полушириной несколько микрометров [1, 2]. Это свойство плоско-выпуклых конических линз позволяет эффективно применять их в оптической системе различных устройств, работа которых основана на использовании высокоэнергетического светового пучка (инструменты для механической обработки различных материалов, лазерные скальпели в медицине и др.) [3–6].

При изготовлении плоско-выпуклых конических линз по существующей технологии на отечественных предприятиях оптической промышленности заготовки закрепляют на шпиндель рычажного шлифовально-полировального станка, а инструменту в виде диска сообщают возвратно-поступательное перемещение по об-

разующей конуса. При этом происходит как съём припуска с поверхности заготовки детали, так и неравномерный износ инструмента, что нарушает его первоначальную плоскостность. Следовательно, это поштучная низкопроизводительная обработка, в которой скорость вращения инструмента (она зависит от длины линии контакта инструмента с образующей конуса) и плоскостность его рабочей поверхности непостоянны, что вызывает общее и локальное отклонение образующей конуса от прямолинейности в пределах $\pm 0,25$ и $\pm 0,025$ мкм соответственно. Эти погрешности превышают аналогичные характеристики для плоско-выпуклых конических линз мирового уровня.

Сущность технологии

Технология обработки плоско-выпуклых конических линз, которая в настоящее время используется иностранными фирмами, включает следующие этапы: 1) шлифование металли-

ческим и грубое полирование полиуретановым инструментами в виде диска без перемещения детали по рабочей поверхности последнего; 2) тонкое плазменное полирование; 3) доводку формы и чистоты конической поверхности гибким зональным инструментом [7]. Технология поштучная и непроизводительная, при ее использовании получается общее и локальное отклонение образующей конуса от прямолинейности на уровне $\pm 0,18$ и $\pm 0,018$ мкм соответственно, что не всегда удовлетворяет современным требованиям.

При обработке плоско-выпуклых конических линз размером 4 мм и более по предлагаемой технологии используются одновременно три заготовки, которые вращаются принудительно с постоянной скоростью и совершают колебательное перемещение по плоской рабочей поверхности инструмента без выхода за его край (рис. 1) [8]. Это технология групповой трехпорной абразивной обработки плоско-выпуклых конических линз. Она позволяет поддерживать необходимую плоскостность рабочей поверхности инструмента в виде диска 2 с помощью специального правильника 3, который представляет собой стеклянный диск с ровной рабочей поверхностью и тремя отверстиями для обрабатываемых деталей (суммарная площадь отверстий в сепараторе не должна превышать 30 % от общей площади самого сепаратора, и они (отверстия) расположены на разных угловых расстояниях друг от друга и различных расстояниях от центра [9]). И поскольку вес правильника значительно превышает вес обрабатываемых плоско-выпуклых конических линз, то он непрерывно нивелирует неравномерное срабатывание инструмента деталями и при определенных режимах обработки постоянно поддерживает необходимую плоскостность его рабочей поверхности. Кроме того, при использовании данной технологии представляется возможность управлять процессом формообразования исполнительных поверхностей плоско-выпуклых конических линз посредством изменения параметров режимов обработки. Вместе с тем в данном случае наклонами заготовки по лимбу предлагаемого устройства можно обеспечить точное значение угла при вершине конуса. Эти возможности отсутствуют в существующей технологии.

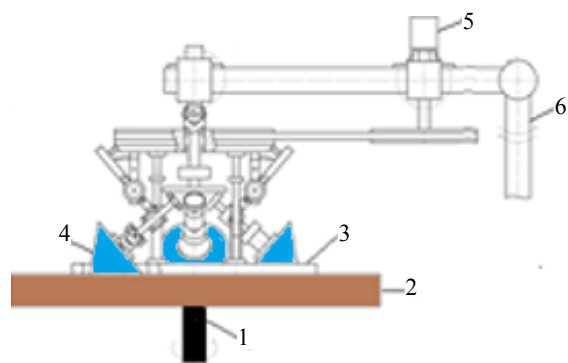


Рис. 1. Схема устройства: 1 – шпиндель базового станка, 2 – инструмент-планшайба, 3 – правильник в виде стеклянной пластины с отверстиями для деталей, 4 – деталь (плоско-выпуклая коническая линза), 5 – привод вращательного движения деталей, 6 – вал привода возвратно-вращательного движения деталей

Fig. 1. Device diagram: 1 – spindle of the base machine, 2 – faceplate tool, 3 – straightener in the form of a glass plate with holes for parts, 4 – part (plano-convex conical lens), 5 – drive for rotational movement of parts, 6 – drive shaft for reciprocating rotation of parts

Использование предлагаемого устройства позволяет повысить производительность обработки плоско-выпуклых конических линз и уменьшить отклонение их образующей от прямолинейности и локальной погрешности на исполнительных поверхностях до уровней соответственно $\pm 0,12$ и $\pm 0,012$ мкм.

Результаты исследования и их анализ

Проведены исследования влияния характера обработки боковой поверхности плоско-выпуклых конических линз на точность и производительность процесса формообразования. Рассматривались следующие случаи: с различной ориентацией вершины линзы относительно оси симметрии инструмента, без принудительного и с принудительным их вращением, с выходом и без выхода за край инструмента при возвратно-вращательном перемещении заготовок по рабочей поверхности последнего.

Анализ полученных экспериментальных результатов, приведенных на рис. 2, показывает, что в случае внутренней ориентации плоско-выпуклой конической линзы (вершина конуса направлена в сторону оси вращения инструмента) величина отклонения ее боковой поверхности от прямолинейности h (стрелки прогиба) с исходного значения 15 мкм уменьши-

лась до 5 мкм за 14 мин обработки (кривая 1), а при наружной ориентации – за 36 мин (кривая 2). Следовательно, интенсивность съема припуска в первом случае более чем в два раза выше по сравнению со вторым.

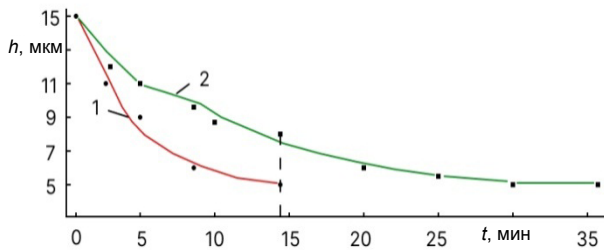


Рис. 2. Закономерность изменения стрелки прогиба h образующей конуса от времени обработки t при ее внутренней (1) и наружной (2) ориентациях

Fig. 2. Pattern of changes in the deflection arrow h of the cone generatrix depending on the processing time t for its internal (1) and external (2) orientations

Результаты экспериментальных исследований геометрической точности и скорости съема припуска при обработке боковой поверхности плоско-выпуклых конических линз без выхода и с выходом их за край инструмента приведены на рис. 3. Они свидетельствуют о том, что при обработке без выхода за край инструмента зависимость $h(t)$, уменьшаясь, асимптотически приближается к горизонтальной прямой на уровне $h = 2$ мкм после 25 мин обработки, в то время как при обработке с выходом за край инструмента $h(t)$ асимптотически приближается к горизонтальной прямой на уровне $h = 3$ мкм после 35 мин обработки. И поскольку значение стрелки прогиба h (2 и 3 мкм) после отмеченных схем обработки отображает ее точность, а время обработки (25 и 35 мин) – производительность процесса, то это значит, что точность формообразования и его производительность в первом случае (без выхода за край инструмента) в среднем на 30 % выше по сравнению со вторым случаем.

Выполнена также обработка боковой поверхности плоско-выпуклой конической линзы без принудительного и с принудительным ее вращением. Получены следующие результаты: при обработке без принудительного вращения $h = (0,05–0,06)$ мкм, а с принудительным вращением $h = (0,03–0,04)$ мкм, т. е. в среднем в полтора раза точнее.

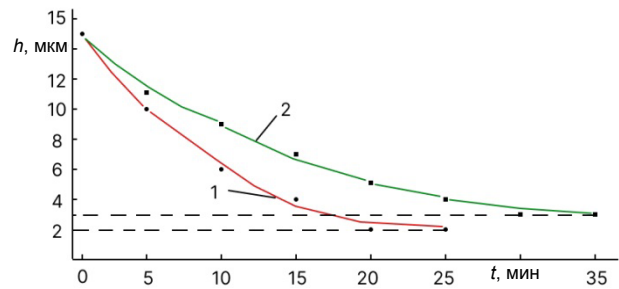


Рис. 3. Зависимость стрелки прогиба h от времени обработки t образующей конуса без выхода (1) и с выходом (2) детали за край обрабатываемой поверхности
Fig. 3. Dependence of the deflection arrow h on the processing time t of the cone generatrix without exit (1) and with exit (2) of the part beyond the edge of the processing surface

Если в процессе обработки исполнительных поверхностей плоско-выпуклых конических линз точность их геометрических параметров (отклонение основания конуса от плоскостности и его образующей от прямолинейности) выходила за пределы допуска, корректировали параметры режимов формообразования (величину частоты вращения инструмента $v_{и}$, заготовок плоско-выпуклых конических линз $v_{л}$ и кривошипа шарнирного четырехзвенника станка v_2 , отношение $v_6/v_{и}$, где v_6 – частота вращения блока заготовок рассматриваемых деталей, а также длину штриха L колебательного движения выходного звена базового станка). Величину корректировки этих параметров определяли по разработанной методике, а их исходные значения устанавливали с учетом рекомендуемых технологических режимов, приведенных в табл. 1 для случаев равномерного съема припуска с рабочей поверхности правильного и исполнительных поверхностей плоско-выпуклой конической линзы, и когда необходимо обеспечить более интенсивную обработку как в краевой, так и в центральной зонах правильного и основания конуса.

В частности, оптимальные режимы обработки в зависимости от макропогрешности (характера распределения припуска) на исходной поверхности правильного диаметра $d_{и} = 0,9d_{и}$ ($d_{и}$ – диаметр инструмента) и на основании заготовки конической линзы в блоке диаметром $d_6 = 0,8d_{и}$ следующие:

- общая «яма» на правильнике – частота вращения инструмента $v_{и} = \alpha_1 d_{и} (\alpha_1 = 0,074 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, частота вращения входного звена исполнитель-

ного механизма технологического оборудования $v_2 = \alpha_2 d_n (\alpha_2 = 0,004 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, амплитуда колебательного движений выходного звена исполнительного механизма технологического оборудования $L = 0,88 d_n$;

- общий «бугор» на правильнике: $v_n = \alpha_3 d_n (\alpha_3 = 0,012 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, $v_2 = \alpha_4 d_n (\alpha_4 = 0,027 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, $L = 0,64 d_n$;

- общая «яма» на основании конуса: $v_n = \alpha_5 d_n (\alpha_5 = 0,03 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, $v_2 = \alpha_3 d_n$, $L = 0,67 d_n$;

- общий «бугор» на основании конуса: $v_n = \alpha_6 d_n (\alpha_6 = 0,025 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, $v_2 = \alpha_7 d_n (\alpha_7 = 0,021 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, $L = 0,595 d_n$.

Для равномерного срабатывания рабочей поверхности правильника и равномерного съема припуска с основания конуса следует назначать: $v_n = \alpha_8 d_n (\alpha_8 = 0,023 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, $v_2 = \alpha_9 d_n (\alpha_9 = 0,013 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, $L = 0,79 d_n$ и $v_n = \alpha_4 d_n$, $v_2 = \alpha_{10} d_n (\alpha_{10} = 0,017 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, $L = 0,64 d_n$ соот-

ветственно, а для равномерного съема припуска с конической поверхности линзы: $v_6/v_n = \alpha_{11} d_6 (\alpha_{11} = 0,003 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$; $v_n = \alpha_{12} d_6 (\alpha_{12} = 0,399 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$; $v_2 = \alpha_{13} d_6 (\alpha_{13} = 0,022 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$; $v_n = \alpha_{14} d_6 (\alpha_{14} = 0,32 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$; $L = 0,205 d_6$.

Численные значения коэффициентов $\alpha_1 - \alpha_{10}$ получены делением расчетных относительных путей трения в краевой зоне обрабатываемых поверхностей правильника и основания плоско-выпуклой конической линзы, приведенных соответственно в [10] и [11] для различных параметров режимов обработки, на диаметр инструмента, который использовался при проведении расчетов (в нашем случае 250 мм), а величина коэффициентов $\alpha_{11} - \alpha_{14}$ – делением соответствующих расчетных относительных путей трения, изложенных в [8], на диаметр блока заготовок плоско-выпуклых конических линз (в нашем случае 200 мм).

Таблица 1

Рекомендуемые технологические режимы обработки рабочей поверхности правильника и исполнительных поверхностей плоско-выпуклой конической линзы
Recommended technological modes for processing the working surface of the straightener and the working surfaces of a flat-convex conical lens

Параметр режима обработки	Усиленный съем припуска		
	в краевой зоне	в центральной зоне	равномерный съем материала
	Правильник		
v_n	$\alpha_1 d_n (\alpha_1 = 0,074 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$	$\alpha_3 d_n (\alpha_3 = 0,012 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$	$\alpha_8 d_n (\alpha_8 = 0,023 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$
v_2	$\alpha_2 d_n (\alpha_2 = 0,04 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$	$\alpha_4 d_n (\alpha_4 = 0,027 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$	$\alpha_9 d_n (\alpha_9 = 0,013 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$
L	$0,88 d_n$	$0,64 d_n$	$0,79 d_n$
Основание конической линзы			
v_n	$\alpha_5 d_n (\alpha_5 = 0,03 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$	$\alpha_6 d_n (\alpha_6 = 0,025 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$	$\alpha_4 d_n$
v_2	$\alpha_3 d_n$	$\alpha_7 d_n (\alpha_7 = 0,021 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$	$\alpha_{10} d_n (\alpha_{10} = 0,017 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$
L	$0,67 d_n$	$0,595 d_n$	$0,64 d_n$
Боковая поверхность конической линзы			
v_6/v_n			$\alpha_{11} d_6 (\alpha_{11} = 0,003 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$
v_n			$\alpha_{12} d_6 (\alpha_{12} = 0,399 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$
v_2			$\alpha_{13} d_6 (\alpha_{13} = 0,022 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$
v_n			$\alpha_{14} d_6 (\alpha_{14} = 0,32 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$
L			$0,205 d_6$

Значения технологических режимов, изложенных в табл. 1, зависят от диаметра инструмента в виде диска (через коэффициенты $\alpha_1-\alpha_{14}$), величина которого, в свою очередь, определяется с учетом геометрических параметров обрабатываемой плоско-выпуклой конической линзы.

Аналитическая связь диаметра инструмента $d_{ин}$ с геометрическими параметрами плоско-выпуклой конической линзы (с диаметром основания конуса d_k , его высотой h и углом при вершине конуса α) получена из анализа рис. 4, где коническая линза 1 расположена в отверстии 2 правильного 3.

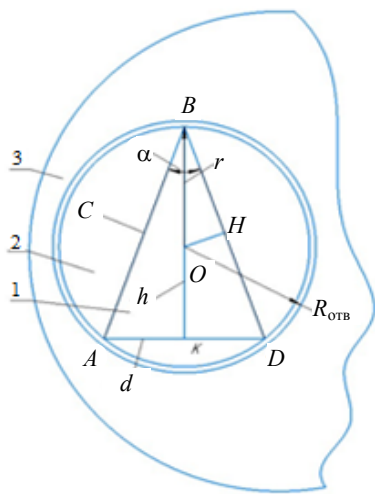


Рис. 4. Схема расположения плоско-выпуклой конической линзы в отверстии плавильника

Fig. 4. Layout of a flat-convex conical lens in the hole of the melter

Из рис. 4 следует, что радиус r окружности, описанной около треугольника ABD , отображающего геометрические параметры конической линзы, выражается соотношением

$$r = \frac{a}{\cos 0,5\alpha}, \quad (1)$$

где $a = \frac{c}{2}$, $c = \sqrt{\frac{d_k^2}{4} + h^2}$ – длина образующей конуса плоско-выпуклой конической линзы.

Для свободного расположения плоско-выпуклой конической линзы в отверстии 2 правильного 3 радиус этого отверстия должен быть больше радиуса r по меньшей мере на 3 мм, т. е. $R_{отв} = r + 3$. Следовательно, суммарная площадь трех отверстий правильного (общепринятая конструкция правильного) будет:

$$S_{\Sigma_{отв}} = 3S_{отв} = 3\pi(r + 3)^2, \quad (2)$$

где

$$S_{отв} = \pi R_{отв}^2 = \pi(r + 3)^2.$$

И поскольку эта площадь не должна превышать 30 % от общей рабочей поверхности правильного, т. е.

$$S_{пр} = \frac{S_{\Sigma_{отв}}}{0,3} = \pi R_{пр}^2, \quad (3)$$

радиус правильного равен

$$R_{пр} = \sqrt{\frac{S_{\Sigma_{отв}}}{0,3\pi}} = \sqrt{10(r + 3)^2}, \quad (4)$$

а его диаметр

$$d_{пр} = 2\sqrt{10(r + 3)^2}. \quad (5)$$

Одной из особенностей обработки в условиях свободного притирания является то, что нижнее звено (в нашем случае инструмент) должно быть больше верхнего (в нашем случае правильного) в $e = 1,1-1,2$ раза, т. е.

$$d_{ин} = ed_{пр} = 2e\sqrt{10(r + 3)^2}. \quad (6)$$

Следовательно, окончательное выражение для определения диаметра инструмента запишется в виде:

$$d_{ин} = 2e\sqrt{10\left(\frac{\sqrt{d_k^2 + 4h^2}}{4\cos 0,5\alpha} + 3\right)^2}. \quad (7)$$

ВЫВОДЫ

1. Использование разработанного устройства для обработки плоско-выпуклых конических линз позволяет стабилизировать плоскостность рабочей поверхности инструмента, что способствует повышению производительности процесса формообразования и уменьшению отклонения образующей конической поверхности деталей от прямолинейности, а также локальных погрешностей на их исполнительных поверхностях до уровней соответственно $\pm 0,12$ и $\pm 0,012$ мкм.

2. Предложенная методика определения размеров инструмента для обработки плоско-выпуклых конических линз позволяет установить

связь технологических режимов формообразования рассматриваемых деталей с их геометрическими параметрами (высотой конуса, диаметром его основания и углом при вершине).

3. Выполненные исследования влияния характера обработки боковой поверхности плоско-выпуклых конических линз на точность и производительность процесса показали, что точность формообразования и его производительность в случае обработки без выхода деталей за край инструмента в среднем на 30 % выше по сравнению с противоположной ситуацией, а обработка с принудительным относительным вращением блока деталей повышает их точность в среднем в полтора раза по сравнению с отсутствием такового, при этом внутренняя ориентация линз (вершина конуса направлена в сторону оси вращения инструмента) способствует повышению интенсивности съема припуска более чем в два раза по сравнению с наружной их ориентацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bessel-Like Beam Array Formation by Periodical Arrangement of the Polymeric Round-Tip Microstructures / E. Stankevicius [et al.] // *Opt. Express*. 2015. Vol. 23, No 22. P. 28557–28561. <https://doi.org/10.1364/oe.23.028557>.
2. Dudutis, J. / Non-Ideal Axicon-Generated Bessel Beam Application for Intra-Volume Glass Modification / J. Dudutis, P. Gečys, G. Račiukaitis // *Opt. Express*. 2016. Vol. 24, No 25. C. 28433–28443. <https://doi.org/10.1364/oe.24.028433>.
3. Matsuoka, Y. The Characteristics of laser Micro Drilling using a Bessel Beam / Y. Matsuoka, Y. Kizuka, T. Inoue // *Appl. Phys., A Mater. Sci.* 2006. Vol. 84, No 4. P. 423–426. <https://doi.org/10.1007/s00339-006-3629-6>.
4. Millijoule Femtosecond Micro-Bessel Beams for Ultra-High Aspect Ratio Machining / S. Mitra [et al.] // *Appl. Optics*. 2015. Vol. 54, No 24. P. 7358–7363. <https://doi.org/10.1364/ao.54.007358>.
5. High 90% efficiency Bragg Gratings Formed in Fused Silica by Femtosecond Gauss-Bessel Laser Beams / M. Mikutis [et al.] // *Opt. Mater. Express*. 2013. Vol. 3, No 11. P. 1865–1867. <https://doi.org/10.1364/ome.3.001862>.
6. High Aspect Ratio Taper-Free Microchannel Fabrication Using Femtosecond Bessel Beams / M. K. Bhuyan [et al.] // *Opt. Express*. 2010. Vol. 18, No 2. P. 566–571. <https://doi.org/10.1364/oe.18.000566>.
7. Марченко, И. А. Способ обработки конической поверхности детали: пат. 2071395 РФ, МПК В 23С 3/04 / И. А. Марченко, Ю. Н. Зорин, В. В. Щенев. Опубл. 10.01.1997.
8. Моделирование закономерностей формообразования конических поверхностей / А. С. Козерук [и др.] // *Вестці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фізіка-тэхнічных навук*. 2021. Т. 66, № 4. С. 430–439. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-430-439>.
9. Козерук, А. С. Технология оптического приборостроения / А. С. Козерук. Минск: БНТУ, 2016. С. 88–94.
10. Технологические особенности формообразования плоского инструмента для обработки аксиконов / А. С. Козерук [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 4. С. 297–304. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-297-304>.
11. Технологические особенности процесса обработки конических линз. / М. И. Филонова [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 6. С. 521–527. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-521-527>.

Поступила 16.11.2023

Подписана к печати 23.01.2024

Опубликована онлайн 29.03.2024

REFERENCES

1. Stankevicius E., Garliauskas M., Gedvilas M., Račiukaitis G. (2015) Bessel-Like Beam Array Formation by Periodical Arrangement of the Polymeric Round-Tip Microstructures. *Optics Express*, 23 (22), 28557–28561. <https://doi.org/10.1364/oe.23.028557>.
2. Dudutis J., Gečys P., Račiukaitis G. (2016) Non-Ideal Axicon-Generated Bessel Beam Application for Intra-Volume Glass Modification. *Optics Express*, 24 (25), 28433–28443. <https://doi.org/10.1364/oe.24.028433>.
3. Matsuoka Y., Kizuka Y., Inoue T. (2006) The Characteristics of Laser Micro Drilling using a Bessel Beam. *Applied Physics A*, 84 (4), 423–426. <https://doi.org/10.1007/s00339-006-3629-6>.
4. Mitra S., Chanal M., Clady R., Mouskeftaras A., Grojo D. (2015) Millijoule Femtosecond Micro-Bessel Beams for Ultra-High Aspect Ratio Machining. *Applied Optics*, 54 (24), 7358–7363. <https://doi.org/10.1364/ao.54.007358>.
5. Mikutis M., Kudrius T., Šlekys G., Paipulas D., Juodkazis S. (2013) High 90% Efficiency Bragg Gratings Formed in Fused Silica by Femtosecond Gauss-Bessel Laser Beams. *Optical Materials Express*, 3 (11), 1865–1867. <https://doi.org/10.1364/ome.3.001862>.
6. Bhuyan M. K., Courvoisier F., Lacourt P.-A., Jacquot M., Furfaro L., Withford M. J., Dudley J. M. (2010) High Aspect Ratio Taper-Free Microchannel Fabrication Using Femtosecond Bessel Beams. *Optics Express*, 18 (2), 566–571. <https://doi.org/10.1364/oe.18.000566>.
7. Marchenko I. A., Zorin Yu. N., Shchenev V. V. (1997) *Method for Processing the Conical Surface of a Part*. Patent 2071395 Russian Federation (in Russian).
8. Kozeruk A. S., Sukhotsky A. A., Diaz González R. O., Filonova M. I., Kuznechik V. O., Ali-zade E. R. (2021) Modeling of Formation Regularities of Conical Surfaces. *Vestsi Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 66 (4), 430–439. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-430-439> (in Russian).
9. Kozeruk A. S. (2016) *Optical Instrumentation Technology*. Minsk, Belarusian National Technical University, 88–94 (in Russian).
10. Kozeruk A. S., Dias Gonzalez R. O., Sukhotzkiy A. A., Filonova M. I., Kuznechik V. O. (2020) Technological Features of Forming Flat Tool for Processing Axicons. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 19 (4), 297–304. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-297-304> (in Russian).
11. Filonova M. I., Dias Gonzalez R. O., Sukhotzkiy A. A., Kozeruk A. S., Semchuonok A. V. (2020) Technological Features in Processing of Conical Lenses. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 19 (6), 521–527. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-521-527> (in Russian).

Received: 16.11.2023

Accepted: 23.01.2024

Published online: 29.03.2024