

## Технологические особенности процесса обработки конических линз

Канд. техн. наук, доц. М. И. Филонова<sup>1)</sup>, асп. Р. О. Диас Гонсалес<sup>1,2)</sup>, инж. А. А. Сухоцкий<sup>1)</sup>,  
докт. техн. наук, проф. А. С. Козерук<sup>1)</sup>, А. В. Семченок<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup>Университетский политехнический институт Сантьяго Мариньо (Мерида, Венесуэла)

© Белорусский национальный технический университет, 2020  
Belarusian National Technical University, 2020

**Реферат.** В статье представлена технология получения плоскоконических линз (аксиконов) методом свободного притирания заготовки к плоскому инструменту через слой абразивной суспензии. Для этого были проведены теоретико-экспериментальные исследования закономерностей съема припуска с основания конуса и его боковой поверхности. Выявлены режимы обработки, обеспечивающие как равномерное срабатывание плоской поверхности детали, так и усиленный съем припуска в краевой или центральной зоне этой поверхности. Во время исследований обработки конической поверхности установлены наладочные параметры технологического оборудования, при которых имеют место минимальное отклонение образующей конуса от прямолинейности и максимальная производительность процесса. Предложены этапы обработки конических линз, позволяющие назначить оптимальную последовательность операций при изготовлении такого типа деталей из заготовок цилиндрической формы в случаях, когда отношение высоты конуса к диаметру его основания  $H/d \leq 0,5$ . К главным этапам обработки относятся: шлифование оснований цилиндрических заготовок с выдерживанием их взаимной параллельности с заданной точностью; полирование одного из оснований цилиндра до достижения требуемых шероховатости и отклонения от неплоскостности; крепление цилиндрической заготовки к вспомогательной плоскопараллельной стеклянной пластинке с помощью сил молекулярного сцепления; механическое крепление цилиндрической заготовки цанговой переходной оправкой за плоскопараллельную стеклянную пластинку; нанесение на второе основание цилиндрической заготовки ближайшей сферы; нанесение конической поверхности на сферическую часть плоско-выпуклой линзы; шлифование и полирование конической поверхности до достижения требуемых шероховатости и прямолинейности образующей конуса. Выявлена степень эффективности наладочных параметров станка в зависимости от технологической наследственности заготовки с точки зрения распределения по обрабатываемой поверхности подлежащего удалению припуска.

**Ключевые слова:** коническая поверхность, свободное притирание, съем припуска, режим обработки, технологическое оборудование, наладочные параметры

**Для цитирования:** 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>

## Technological Features in Processing of Conical Lenses

М. И. Filonova<sup>1)</sup>, R. O. Dias Gonzalez<sup>1,2)</sup>, A. A. Sukhotzkiy<sup>1)</sup>, A. S. Kozeruk<sup>1)</sup>, A. V. Semchuonok<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup>Instituto Universitario Politecnico Santiago Marino (Merida, Venezuela)

**Abstract.** The paper presents the technology of obtaining flat-conical lenses (axicons) by the method of free grinding a work-piece to a flat tool through a layer of abrasive suspension. For this, theoretical and experimental studies of the regularities of stock removal from the base of the cone and its lateral surface have been carried out. The processing modes have been identified that ensure both uniform operation of the flat surface of the part and enhanced removal of the allowance in the edge

### 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

or central zone of this surface. During the study of the processing of the conical surface, the set-up parameters of the technological equipment have been established, at which there is a minimum deviation of the generatrix of the cone from straightness and maximum productivity of the process. The stages of processing conical lenses are proposed, which allow to assign the optimal sequence of operations in the manufacture of this type of parts from blanks of a cylindrical shape in cases where the ratio of the height of the cone to the diameter of its base  $H/d \leq 0.5$ . The main stages of processing include: grinding of the bases of cylindrical blanks with maintaining their mutual parallelism with a given accuracy; polishing one of the cylinder bases to achieve the required roughness and deviation from non-flatness; fastening a cylindrical blank to an auxiliary plane-parallel glass plate using molecular cohesion forces; mechanical fastening of a cylindrical work-piece with a collet adapter mandrel for a plane-parallel glass plate; applying the nearest sphere to the second base of the cylindrical blank; drawing a conical surface on the spherical part of a plano-convex lens; grinding and polishing the conical surface to achieve the required roughness and straightness of the cone generatrix. The degree of efficiency of the setup parameters of the machine has been revealed depending on the technological heredity of the work-piece from the point of view of the distribution of the allowance to be removed over the machined surface.

**Keywords:** conical surface, free lapping, stock removal, processing mode, technological equipment, adjustment parameters

**For citation:** Filonova M. I., Dias Gonzalez R. O., Sukhotzkiy A. A., Kozeruk A. S., Semchuonok A. V. (2020) Technological Features in Processing of Conical Lenses. *Science and Technique*. 19 (6), 521–527. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-521-527> (in Russian)

## Введение

Конические линзы находят широкое применение в различных лазерных инструментах, работа которых основана на использовании увеличенной фокусной глубины пучков Бесселя, генерируемых аксиконом. Это, например, лазерный инструмент для резки стекол значительной толщины. Лазерные пучки Бесселя, кроме того, используются для формирования микро- и наноканалов в прозрачных материалах, для сверления тонких непрозрачных материалов и в ряде других областей при решении научных и прикладных задач [1–5].

Современная технология изготовления конических линз выполняется по методу свободного притирания и основана на поштучном их шлифовании и полировании вручную. Обработка сводится к возвратно-поступательному перемещению инструмента вдоль образующей вращающейся конической заготовки [6]. При этом режимы обработки определяет рабочий-оптик исходя из своего опыта и интуиции [7]. Технология трудоемкая и требует высококвалифицированного исполнителя. Поэтому разработка технологии, позволяющей реализовать инженерные методы управления процессом автоматизированного формообразования деталей с конической поверхностью, отклонение образующей которой от прямолинейности не превышает  $\pm 0,00012$  мм, – актуальная задача.

## Этапы обработки конических линз

Характерной конструктивной особенностью оптических деталей с исполнительской поверхностью второго порядка является необходимость их центрирования [8]. Для обеспечения этих требований на определенной последовательности технологических операций получения конуса с заготовок цилиндрической формы.

Технологические операции, обеспечивающие получение конической линзы с относительной высотой  $H/d \leq 0,5$ , характеризуются следующими действиями:

1) шлифование оснований цилиндрических заготовок с выдерживанием их взаимной параллельности с точностью  $\pm 0,002$  мм;

2) полирование одного из оснований цилиндра до достижения шероховатости  $R_z \leq 0,05$  и отклонения от неплоскостности не более  $\pm 0,00025$  мм;

3) крепление цилиндрической заготовки к вспомогательной плоскопараллельной стеклянной пластинке посредством оптического контакта (с помощью сил молекулярного сцепления);

4) механическое крепление цилиндрической заготовки цанговой переходной оправкой за плоскопараллельную стеклянную пластинку;

5) нанесение на второе основание цилиндрической заготовки ближайшей сферы радиусом

кривизны  $R = \frac{h^2 + \frac{d^2}{4}}{2h}$ , где  $h$  – стрелка прогиба сферической поверхности радиусом  $R$ ;

$d$  – внутренний диаметр кольца сферометра, который используется для контроля радиуса  $R$  в процессе нанесения сферической поверхности на основание исходной цилиндрической заготовки;

6) нанесение конической поверхности на сферическую часть плоско-выпуклой линзы;

7) шлифование и полирование конической поверхности до достижения шероховатости  $R_z \leq 0,05$  и отклонения от непрямолинейности образующей конуса не более  $\pm 0,00025$  мм.

### Исследования закономерностей обработки

Характерной особенностью обработки оптических деталей в условиях свободного притирания является то, что требуемая их точность обеспечивается регулированием наладочных параметров технологического оборудования [7]. В случае обработки основания плоскоконических линз к таким параметрам относятся частоты вращения инструмента  $\omega_n$  и входного звена исполнительного механизма станка  $\omega_2$ , а также амплитуда  $L$  возвратно-вращательного движения детали относительно инструмента и диаметр последнего  $d_n$ . При обработке конической поверхности линзы дополнительно вводятся отношение частот вращения детали (блока) и инструмента  $\omega_d/\omega_n$ , частота вращения конуса  $\omega_k$  и величина эксцентриситета  $e$  между осями вращения планшайбы и инструмента.

Поскольку изменение отмеченных наладочных параметров влияет на закономерности съема припуска с обрабатываемой поверхности по-разному [8], то для выяснения этого влияния выполнены исследования характера распределения в диаметральном сечении блока (при обработке основания конуса) параметра  $Q$ , представляющего собой произведение рабочего давления на скорость скольжения детали относительно инструмента. Исследовали также зависимости качества и производительности шлифования и полирования конической поверхности от режимов обработки. Испытания проводились с использованием плоскоконической линзы высотой 25,0 мм и диаметром основания 12,5 мм.

На стадии определения рациональных режимов процесса абразивной обработки основания конуса использовали методику, изложенную в [9]. Результаты исследований закономерностей распределения параметра  $Q$  в зависимости от частоты вращения входного звена исполнительного механизма станка  $\omega_2$  приведены на рис. 1. Здесь кривая 2 характеризует процесс, при котором имеет место равномерный съем материала по всему блоку деталей. Такой режим назначают на заключительном этапе обработки – полировании, когда уже достигнута необходимая точность поверхности основания конуса и требуется только обеспечить заданную ее шероховатость, что имеет место при  $\omega_2 = 3,5$  с<sup>-1</sup>. Если с учетом технологической наследственности поступивших с предыдущей операции заготовок необходимо усилить съем припуска в их краевой или центральной зонах, нужно назначать  $\omega_2$  соответственно 2,5 и 4,2 с<sup>-1</sup> при следующих значениях остальных наладочных параметров станка: частота вращения инструмента  $\omega_n = 9,0$  с<sup>-1</sup>, амплитуда колебательного движения блока деталей относительно инструмента  $L = 0,12$  м, диаметр инструмента  $d_n = 0,2$  м. Диаметр блока составлял 0,15 м. Аналогичные исследования проведены для изменяющихся  $\omega_2$ ,  $L$  и  $d_n$ .

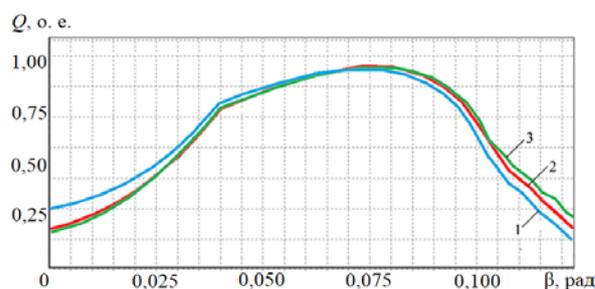


Рис. 1. Характер изменения параметра  $Q$  в зависимости от режимов обработки основания конуса для  $\omega_2$ , с<sup>-1</sup>: 2,5 (кривая 1); 3,5 (кривая 2); 4,3 (кривая 3)

Fig. 1. Nature of change in  $Q$  parameter depending on processing conditions of cone base for  $\omega_2$ , s<sup>-1</sup>: 2.5 (curve 1); 3.5 (curve 2); 4.3 (curve 3)

Используя методику, изложенную в [10], в процессе теоретических исследований рассчитывали показатели чувствительности к изменениям регулируемых параметров процесса обработки  $\sigma$  и эффективности этих параметров с точки зрения производительности формооб-

разования  $k$ . Анализ полученных результатов показал, что при исправлении как общего «бугра», так и общей «ямы» наибольшее влияние на чувствительность  $Q$  к режимам обработки оказывает частота вращения инструмента. Остальные из рассматриваемых наладочных параметров станка по степени их влияния на чувствительность  $Q$  расположены в следующей последовательности:  $d_{и}$ ,  $L$ ,  $\omega_2$ .

Что касается эффективности режимов обработки, то наладочные параметры станка располагаются в такой последовательности:  $\omega_{и}$ ,  $d_{и}$ ,  $L$ ,  $\omega_2$  – в случае необходимости усиления съема припуска в краевой зоне блока и  $\omega_{и}$ ,  $\omega_2$ ,  $d_{и}$ ,  $L$  – для исправления макропогрешности в виде приподнятого края. Однако, поскольку при увеличении частоты вращения инструмента, т. е. шпинделя станка, усиливаются вибрации в системе «станок – приспособление – инструмент – деталь (СПИД) и, следовательно, возрастают динамические составляющие погрешности детали, такой прием обработки можно назначать на стадиях грубого и среднего шлифования. На операциях мелкого (окончательного) шлифования и полирования необходимо работать на низких частотах вращения подвижных звеньев технологического оборудования. При этом управлять процессом формообразования следует посредством изменения величины амплитуды возвратно-вращательного перемещения блока по рабочей поверхности инструмента. Что же касается диаметра инструмента как одного из наладочных параметров, эффективно влияющих на процесс формообразования в условиях свободного притирания, то его использование на практике вызывает затруднения, обусловленные значительной трудоемкостью исходной наладки рабочей поверхности инструмента на требуемую точность.

Теоретические исследования обработки конической поверхности сводились к оптимизации наладочных параметров технологического оборудования с точки зрения достижения максимальных значений качества поверхности и производительности процесса (в рассматриваемом случае – минимальных значений относительных расхождений путей трения  $\Delta l_{отн}$  и максимальных среднеарифметических их значений  $l_{ср}$  соответственно). Оптимизацию выполняли по методике, приведенной в [10].

Результаты расчетов показаны на рис. 2. Из их анализа следует, что при оптимальном отношении частот  $\omega_{пл}/\omega_{и}$  и средних  $\omega_{и}$ ,  $\omega_2$ ,  $e$ ,  $L$ ,  $\omega_k$  величина  $l_{ср}$  достигает 2,2 м при удовлетворительном параметре качества  $\Delta l_{отн} = 16\%$ . Такой режим обработки целесообразно назначать на операциях предварительного и основного шлифования. Для окончательного шлифования можно рекомендовать режим обработки на оптимальных  $\omega_{пл}/\omega_{и}$ ,  $\omega_{и}$  и средних  $\omega_2$ ,  $e$ ,  $L$ ,  $\omega_k$ . При этом  $l_{ср} = 1,3$  м, а  $\Delta l_{отн} = 6,7\%$ . Заключительную стадию обработки – полирование – следует выполнять при оптимальных  $\omega_{пл}/\omega_{и}$ ,  $\omega_{и}$ ,  $\omega_2$ ,  $L$  и средней частоте вращения конуса  $\omega_k$ . В этом случае  $l_{ср} = 0,8$  м, а  $\Delta l_{отн} = 4,1\%$ , т. е. обеспечивается максимальное качество из возможного.

Из анализа рис. 2 также видно, что параметр  $e$  практически не влияет ни на точность обработки, ни на производительность процесса (рис. 2а, б, горизонтальное расположение кривых 4). Это значит, что обсуждаемый наладочный параметр можно не задействовать, т. е. обработку проводить без смещения планшайбы относительно инструмента вдоль оси симметрии выходного звена исполнительного механизма технологического оборудования.

Для проверки результатов расчета, представленных на рис. 1, 2, выполнены экспериментальные исследования, которые сводились к шлифованию стеклянной, имитировавшей блок заготовок при обработке основания конуса, и конической поверхностей детали.

При обработке пластины определяли величину изменения стрелки прогиба  $h$ , исходное значение которой в каждой серии экспериментов составляло 0,01 мм на диаметре 100 мм. Результаты этих экспериментов в случаях увеличивающихся и уменьшающихся принятых режимов обработки приведены на рис. 3а, б соответственно. Анализ рис. 3а показывает, что с увеличением  $\omega_2$  происходит усиленный съем припуска в центральной зоне детали (рис. 3а, кривая 3), а в случаях  $L$  и  $\omega_{и}$ , наоборот более интенсивно срабатывается ее периферия (рис. 3а, кривые 1, 2). Если же уменьшать рассматриваемые наладочные параметры, то, как следует из рис. 3б, наблюдается обратная закономерность: при регулировании частоты  $\omega_2$  интенсивнее срабатывается край детали (рис. 3б, кривая 3), а при изменениях  $L$  и  $\omega_{и}$  – ее середина (рис. 3б, кривые 1, 2).

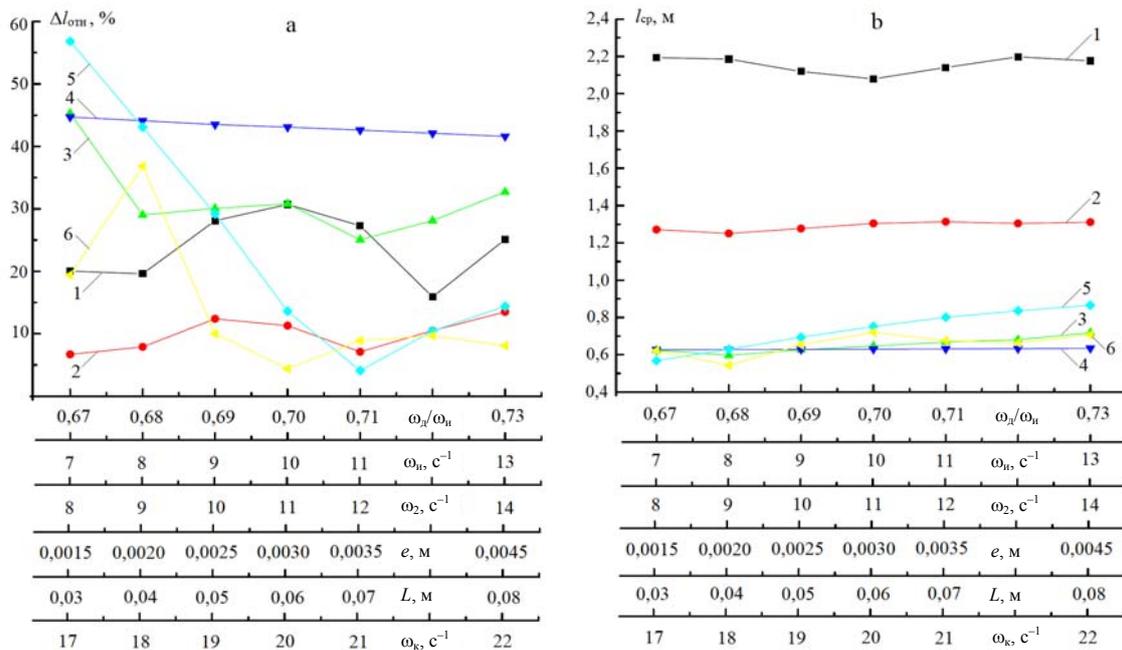


Рис. 2. Закономерность изменения относительного расхождения  $\Delta l_{отн}$  (а) и среднего арифметического значения  $l_{ср}$  (б) путей трения при обработке боковой поверхности конической линзы в зависимости от величины:  $\omega_{пл}/\omega_{и}$  при  $\omega_{и} = 5,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 4,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $e = 0,01 \text{ м}$ ,  $L = 0,04 \text{ м}$ ,  $\omega_к = 3,0 \text{ с}^{-1}$  (кривая 1);  $\omega_{и}$  при  $\omega_{пл}/\omega_{и} = 0,72$  и прежних  $\omega_2$ ,  $e$ ,  $L$ ,  $\omega_к$  (кривая 2);  $\omega_2$  при  $\omega_{пл}/\omega_{и} = 0,72$ ,  $\omega_{и} = 0,7 \text{ с}^{-1}$  и прежних  $e$ ,  $L$ ,  $\omega_к$  (кривая 3);  $e$  при  $\omega_{пл}/\omega_{и} = 0,72$ ,  $\omega_{и} = 0,7 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 1,2 \text{ с}^{-1}$  и прежних  $L$ ,  $\omega_к$  (кривая 4);  $L$  при  $\omega_{пл}/\omega_{и} = 0,72$ ,  $\omega_{и} = 0,7 \text{ с}^{-1}$ ;  $\omega_2 = 1,2 \text{ с}^{-1}$ ,  $e = 0,002 \text{ м}$  и прежней  $\omega_к$  (кривая 5);  $\omega_к$  при  $\omega_{пл}/\omega_{и} = 0,72$ ,  $\omega_{и} = 0,7 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 1,2 \text{ с}^{-1}$ ,  $e = 0,002 \text{ м}$ ,  $L = 0,07 \text{ м}$  (кривая 6)

Fig. 2. Regularity of change in relative discrepancy  $\Delta l_{rel}$  (a) and arithmetic mean value  $l_{av}$  (b) friction paths when processing side surface of conical lens, depending on the value of:  $\omega_{pl}/\omega_{ins}$  at  $\omega_{ins} = 5.0 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 4.0 \text{ s}^{-1}$ ,  $e = 0.01 \text{ m}$ ,  $L = 0.04 \text{ m}$ ,  $\omega_k = 3.0 \text{ s}^{-1}$  (curve 1);  $\omega_{ins}$  at  $\omega_{pl}/\omega_{ins} = 0.72$  and the former  $\omega_2$ ,  $e$ ,  $L$ ,  $\omega_k$  (curve 2);  $\omega_2$  at  $\omega_{pl}/\omega_{ins} = 0.72$ ,  $\omega_{ins} = 0.7 \text{ s}^{-1}$  and the former  $e$ ,  $L$ ,  $\omega_k$  (curve 3);  $e$  at  $\omega_{pl}/\omega_{ins} = 0.72$ ,  $\omega_{ins} = 0.7 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 1.2 \text{ s}^{-1}$  and the former  $L$ ,  $\omega_k$  (curve 4);  $L$  at  $\omega_{pl}/\omega_{ins} = 0.72$ ,  $\omega_{ins} = 0.7 \text{ s}^{-1}$ ;  $\omega_2 = 1.2 \text{ s}^{-1}$ ,  $e = 0.002 \text{ m}$  and the former  $\omega_k$  (curve 5);  $\omega_k$  at  $\omega_{pl}/\omega_{ins} = 0.72$ ,  $\omega_{ins} = 0.7 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 1.2 \text{ s}^{-1}$ ,  $e = 0.002 \text{ m}$ ,  $L = 0.07 \text{ m}$  (curve 6)

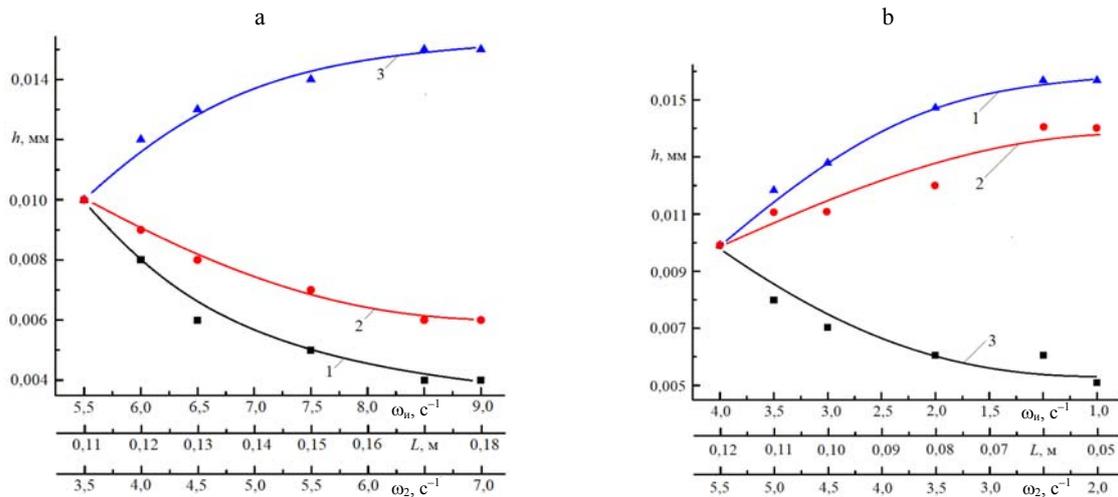


Рис. 3. Зависимость стрелки прогиба плоской поверхности конической линзы от значений увеличивающихся (а) и уменьшающихся (б) параметров:  $\omega_{и}$  при  $\omega_2 = 3,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $L = 0,128 \text{ м}$ ,  $d_{и} = 0,2 \text{ м}$  (кривая 1);  $L$  при  $\omega_{и} = 5,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 3,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $d_{и} = 0,2 \text{ м}$  (кривая 2);  $\omega_2$  при  $\omega_{и} = 5,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $L = 0,128 \text{ м}$ ,  $d_{и} = 0,2 \text{ м}$  (кривая 3)

Fig. 3. Dependence of flat surface deflection arrow for a conical lens on values of increasing (a) and decreasing (b) parameters:  $\omega_{ins}$  at  $\omega_2 = 3.5 \text{ s}^{-1}$ ,  $L = 0.128 \text{ m}$ ,  $d_{ins} = 0.2 \text{ m}$  (curve 1);  $L$  at  $\omega_{ins} = 5.5 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 3.5 \text{ s}^{-1}$ ,  $d_{ins} = 0.2 \text{ m}$  (curve 2);  $\omega_2$  at  $\omega_{ins} = 5.5 \text{ s}^{-1}$ ,  $L = 0.128 \text{ m}$ ,  $d_{ins} = 0.2 \text{ m}$  (curve 3)

При обработке конической поверхности детали определяли закономерности изменения исходной стрелки прогиба  $h$  ее образующей в зависимости от времени шлифования  $t$ . Результаты экспериментов приведены на рис. 4, 5, причем рис. 4 отображает качество формообразования, а рис. 5 – производительность.

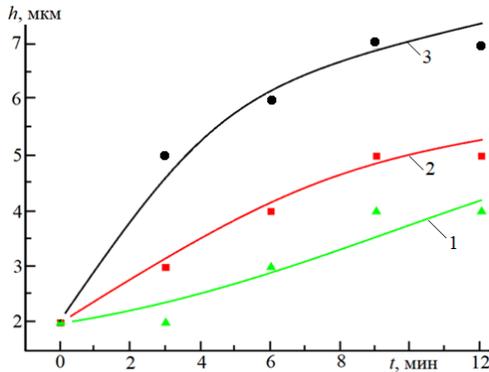


Рис. 4. Закономерность изменения исходной стрелки прогиба  $h = 0,002$  мм образующей конической поверхности линзы в зависимости от  $t$  при:  $\omega_d/\omega_n = 0,72$ ,  $\omega_n = 5,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 4,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $e = 0,004$  мм,  $L = 0,04$  м,  $\omega_k = 3,0 \text{ с}^{-1}$  (кривая 1);  $L = 0,07$  м,  $\omega_k = 2,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_n/\omega_n = 0,8$ ,  $\omega_n = 5,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 4,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $e = 0,004$  мм (кривая 2);  $\omega_d/\omega_n = 0,72$ ,  $\omega_n = 1,1 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 1,2 \text{ с}^{-1}$ ,  $e = 0,004$  мм,  $L = 0,07$  м,  $\omega_k = 3,0 \text{ с}^{-1}$  (кривая 3)

Fig. 4. Regularity of change in the initial deflection arrow  $h = 0,002$  mm of generatrix of lens conical surface depending  $t$  at:  $\omega_d/\omega_{ins} = 0,72$ ,  $\omega_{ins} = 5,0 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 4,0 \text{ s}^{-1}$ ,  $e = 0,004$  mm,  $L = 0,04$  m,  $\omega_k = 3,0 \text{ s}^{-1}$  (curve 1);  $L = 0,07$  m,  $\omega_k = 2,0 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega_d/\omega_{ins} = 0,8$ ,  $\omega_{ins} = 5,0 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 4,0 \text{ s}^{-1}$ ,  $e = 0,004$  mm (curve 2);  $\omega_d/\omega_{ins} = 0,72$ ,  $\omega_{ins} = 1,1 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 1,2 \text{ s}^{-1}$ ,  $e = 0,004$  mm,  $L = 0,07$  m,  $\omega_k = 3,0 \text{ s}^{-1}$  (curve 3)

На стадии исследования качества обработки в каждой серии экспериментов использовали исходную коническую заготовку с отклонением образующей ее поверхности от прямолинейности  $h = 0,002$  мм, а в случае изучения производительности исходное отклонение  $h$  составляло 0,015 мм.

Из анализа рис. 4 следует, что если использовать средние значения наладочных параметров  $\omega_n$ ,  $\omega_2$ ,  $e$ ,  $L$ ,  $\omega_k$  и оптимальное отношение  $\omega_{пл}/\omega_n$ , то за 12 мин шлифования отклонение образующей конуса от прямолинейности с исходных 0,002 мм увеличится до 0,005 мм (рис. 4, кривая 1), а в случае средних  $L$ ,  $\omega_k$  и оптимальных  $\omega_{пл}/\omega_n$ ,  $\omega_n$ ,  $\omega_2$  и  $e$  – до 0,007 мм (рис. 4, кривая 2). Если же применить оптимальные  $\omega_{пл}/\omega_n$ ,  $\omega_n$ ,  $\omega_2$ ,  $e$ ,  $L$  и среднюю частоту вращения конуса  $\omega_k$ , то исходная погрешность непрямолинейности увеличится только на 0,002 мм (рис. 4, кривая 3). Эти результаты согласуются с теоретическими исследованиями (рис. 2а, кривые 1, 4, 5).

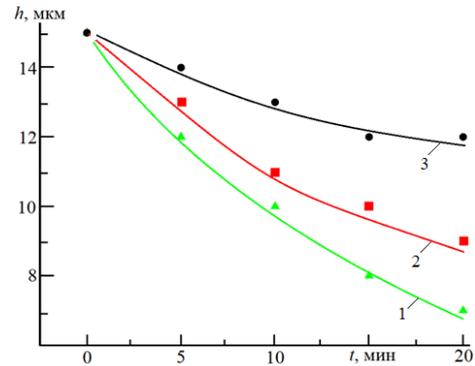


Рис. 5. Закономерность изменения исходной стрелки прогиба  $h = 0,015$  мм образующей конической поверхности линзы в зависимости от  $t$  при:  $\omega_d/\omega_n = 0,72$ ,  $\omega_n = 5,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 4,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $e = 0,004$  мм,  $L = 0,04$  м,  $\omega_k = 3,0 \text{ с}^{-1}$  (кривая 1);  $\omega_d/\omega_n = 0,72$ ,  $\omega_n = 1,1 \text{ с}^{-1}$ ,  $L = 0,04$  м,  $\omega_k = 3,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 4,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $e = 0,01$  мм (кривая 2);  $\omega_d/\omega_n = 0,72$ ,  $\omega_n = 1,1 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 1,2 \text{ с}^{-1}$ ,  $e = 0,004$  мм,  $L = 0,07$  м,  $\omega_k = 2,0 \text{ с}^{-1}$  (кривая 3)

Fig. 5. Regularity of change in initial deflection arrow  $h = 0,015$  mm of generatrix of lens conical surface depending  $t$  at:  $\omega_d/\omega_{ins} = 0,72$ ,  $\omega_{ins} = 5,0 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 4,0 \text{ s}^{-1}$ ,  $e = 0,004$  mm,  $L = 0,04$  m,  $\omega_k = 3,0 \text{ s}^{-1}$  (curve 1);  $\omega_d/\omega_{ins} = 0,72$ ,  $\omega_{ins} = 1,1 \text{ s}^{-1}$ ,  $L = 0,04$  m,  $\omega_k = 3,0 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 4,0 \text{ s}^{-1}$ ,  $e = 0,01$  mm (curve 2);  $\omega_d/\omega_{ins} = 0,72$ ,  $\omega_{ins} = 1,1 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 1,2 \text{ s}^{-1}$ ,  $e = 0,004$  mm,  $L = 0,07$  m,  $\omega_k = 2,0 \text{ s}^{-1}$  (curve 3)

Анализ результатов производительности обработки показывает, что этот показатель достигает максимального значения при оптимальном отношении частот  $\omega_{пл}/\omega_n$  и средних значениях  $\omega_n$ ,  $\omega_2$ ,  $e$ ,  $L$ ,  $\omega_k$  (рис. 5, кривая 1), когда за 20 мин обработки исходная стрелка прогиба величиной 0,015 мм уменьшилась до 0,007 мм. Если же назначить оптимальные  $\omega_{пл}/\omega_n$  и  $\omega_n$ , а  $\omega_2$ ,  $e$ ,  $L$  и  $\omega_k$  – средние, то за тот же промежуток времени  $h$  уменьшится до 0,009 мм (рис. 5, кривая 2). В случае использования всех наладочных параметров из области оптимальных значений исходная стрелка прогиба уменьшится только на 0,003 мм (с 0,015 до 0,012 мм – рис. 5, кривая 3). Отмеченное свидетельствует о том, что интенсивность съема припуска в первом случае (рис. 5, кривая 1) самая высокая, а в последнем (рис. 5, кривая 3) – самая низкая. Это согласуется с результатами теоретических исследований (рис. 2б, кривые 1, 6) и отражает закономерную ситуацию на практике: на стадии финишной обработки, когда требуется обеспечивать заданные параметры качества, съем материала в единицу времени необходимо уменьшать. Следовательно, выявленные режимы работы технологического оборудования позволяют организовать такой процесс обработки, при котором будет автоматически обеспечиваться высокое качество детали с одно-

временным и неизбежным снижением интенсивности съема припуска с ее заготовки.

Таким образом, рассмотренные экспериментальные исследования удовлетворительно согласуются с результатами расчета, что позволяет рекомендовать предлагаемую методику выявления наиболее выгодных режимов обработки как основания, так и боковой поверхности конических линз для практического ее использования.

## ВЫВОДЫ

1. Предложенные этапы обработки конических линз дают возможность назначить оптимальную последовательность операций при изготовлении конических линз с различными геометрическими параметрами из заготовок цилиндрической формы.

2. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования характера обработки конических линз позволили определить степень эффективности наладочных параметров базового станка в зависимости от технологической наследственности заготовки с точки зрения распределения по обрабатываемой поверхности подлежащего удалению припуска.

3. Выявленная незначительная зависимость точности и производительности обработки от величины смещения планшайбы относительно инструмента способствует упрощению схемы технологического оборудования и методики управления процессом формообразования на нем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Matsuoka, Y. The Characteristics of Laser Micro-Drilling Using a Bessel Beam / Y. Matsuoka, Y. Kizuka, T. Inoue // *Applied Physics A*. 2006. Vol. 84, No 4. P. 423–430. <https://doi.org/10.1007/s00339-006-3629-6>.
2. Application of Bessel Beams Formicrofabrication of Dielectrics by Femtosecond Laser / A. Marcinkevičius [et al.] // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2001. Vol. 40, No 11a. P. L1197–L1199. <https://doi.org/10.1143/jjap.40.11197>.
3. Micro-Ablation on Silicon by Femtosecond Laser Pulses Focused with an axicon Assisted with a Lens / R. Inoue [et al.] // *Applied Surface Science*. 2010. Vol. 257, No 2. P. 476–480. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.07.016>.
4. Yu, X. Femtosecond Laser Scribing of Mo thin Film on Flexible Substrate Using Axiconfocused Beam / X. Yu, J. Ma, S. Lei // *Journal of Manufacturing Processes*. 2015. Vol. 20. P. 349–355. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.05.004>.
5. Dudutis, J. Modification of Glass Using an Axicon-Generated Non-Symmetrical Bessel-Gaussian Beam / J. Dudutis, P. Gečys, G. Račiukaitis // *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXII*. 2017. <https://doi.org/10.1117/12.2252966>.
6. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. М.: Высш. шк., 1963. 519 с.
7. Козерук, А. С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на

основе математического моделирования / А. С. Козерук. Минск, 1997. 317 с.

8. 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.
9. Кинематический анализ способа, повышающего точность обработки конических поверхностей / А. С. Козерук [и др.] // *Весті НАН Беларусі. Серыя Фіз.-тэхн. навук*. 2020. Т. 65, № 2. С. 197–204. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-197-204>.
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>.

Поступила 12.06.2020

Подписана в печать 25.08.2020

Опубликована онлайн 30.11.2020

## REFERENCES

1. Matsuoka Y., Kizuka Y., Inoue T. (2006) The Characteristics of Laser Micro-Drilling Using a Bessel Beam. *Applied Physics A*, 84 (4), 423–430. <https://doi.org/10.1007/s00339-006-3629-6>.
2. Marcinkevičius A., Juodkazis S., Matsuo S., Mizeikis W., Misawa H. (2001) Application of Bessel Beams Formicrofabrication of Dielectrics by Femtosecond Laser. *Japanese Journal of Applied Physics*, 40 (11a), L1197–L1199. <https://doi.org/10.1143/jjap.40.11197>.
3. Inoue R., Takakusaki K., Takagi Y., Yagi T. (2010) Micro-Ablation on Silicon by Femtosecond Laser Pulses Focused with an Axicon Assisted with a Lens. *Applied Surface Science*, 257 (2), 476–480. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.07.016>.
4. Yu X., Ma J., Lei S. (2015) Femtosecond Laser Scribing of Mo thin Film on Flexible Substrate Using Axiconfocused Beam. *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 349–355. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.05.004>.
5. Dudutis J., Gečys P., Račiukaitis G. (2017) Modification of Glass Using an Axicon-Generated Non-Symmetrical Bessel-Gaussian Beam. *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXII*. <https://doi.org/10.1117/12.2252966>.
6. Bardin A. N. (1963) *Technology of Optical Glass*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 519 (in Russian).
7. Kozeruk A. S. (1997) *Managing the Shaping of Precision Surfaces of Machine Parts and Devices Based on Mathematical Modeling*. Minsk. 317 (in Russian).
8. Zubakov V. G., Semibratov M. N., Shtandel S. K. (1985) *Technology of Optical Parts*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 368 (in Russian).
9. Kozeruk A. S., Dias Gonsales R. O., Filonova M. I., Kuznechik V. O., Varopay E. N. (2020) Kinematic Analysis of the Method Increasing the Accuracy of Treatment of Conic surfaces. *Vestsi Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Series*, 65 (2), 197–204. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-197-204> (in Russian).
10. Kozeruk A. S., Dias Gonsales R. O., Sukhotzkiy A. A., Filonova M. I., Kuznechik V. O. (2020) Technological Features of Formingflat Tool for Processing Axicons. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 19 (4), 297–304 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-297-304>.

Received: 12.06.2020

Accepted: 25.08.2020

Published online: 30.11.2020