

А. С. Козерук<sup>1</sup>, А. А. Сухоцкий<sup>1</sup>, Р. О. Диас Гонсалес<sup>1,2</sup>, М. И. Филонова<sup>1</sup>, В. О. Кузнечик<sup>1</sup>,  
Э. Р. Али-задэ<sup>1</sup>

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

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

**Аннотация.** Рассмотрена схема обработки конических поверхностей посредством их притирания к плоскому инструменту и предложено техническое решение для реализации такой обработки. Использование созданного авторами устройства позволяет реализовать групповой метод формообразования конических деталей с отклонением образующей конуса от прямолинейности не более 0,00012 мм. Разработана математическая модель, устанавливающая закономерности съема припуска с конической детали плоским инструментом. Получена формула для расчета скорости скольжения в любой точке обрабатываемой конической поверхности, реализующая инженерные методы управления формообразованием конических изделий без проведения предварительных трудоемких экспериментальных исследований. Предложена методика оптимизации наладочных параметров технологического оборудования. Выявлены наиболее эффективные режимы обработки аксиконов на стадиях предварительного, основного и окончательного шлифования, а также на этапе полирования в зависимости от технологической наследственности заготовки с точки зрения распределения подлежащего удалению припуска по ее поверхности. Установлено, что изменения эксцентриситета между осями вращения инструмента и планшайбы, а также амплитуды возвратно-вращательных движений последней практически не влияют как на точность, так и на производительность обработки, поэтому на практике эти параметры можно не оптимизировать, а назначать их средние значения. Определены режимы работы базового рычажного шлифовально-полировального станка, при которых обеспечивается требуемая точность рабочей поверхности инструмента, непосредственно влияющая на прямолинейность образующей конуса. Выполнены исследования закономерностей формообразования боковой поверхности конической линзы в условиях свободного притирания и установлены наладочные параметры технологического оборудования, обуславливающие качество и производительность процесса обработки.

**Ключевые слова:** коническая поверхность, плоский инструмент, свободное притирание, параметры обработки, оптимизация режимов формообразования

**Для цитирования:** Моделирование закономерностей формообразования конических поверхностей / А. С. Козерук [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2021. – Т. 66, №4. – С. 430–439. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-430-439>

Albin S. Kozeruk<sup>1</sup>, Alexander.A. Sukhotsky<sup>1</sup>, Rafael Orlando Diaz González<sup>1,2</sup>, Marina I. Filonova<sup>1</sup>,  
Valeria O. Kuznechik<sup>1</sup>, Eldar R. Ali-zade<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>University Polytechnic Institute Santiago Mariño, Merida, Venezuela

## MODELING OF FORMATION REGULARITIES OF CONICAL SURFACES

**Abstract.** The scheme of processing conical surfaces by grinding them to a flat tool is considered and a technical solution for the implementation of such processing is proposed. Using the created device allows implementing the group method of forming conical parts with a deviation of the generatrix of the cone from straightness of not more than  $\pm 0.00012$  mm. A mathematical model of the patterns of removal of stock from a conical part with a flat tool is developed. A formula is obtained for calculating the modulus of the sliding velocity at any point on the processed conical surface, which implements engineering methods for controlling the shaping of conical parts without conducting preliminary labor-intensive experimental studies. An optimization technique for the adjustment parameters of technological equipment was proposed. The most effective axicon processing modes were revealed at the stages of preliminary, medium and fine grinding, as well as at the polishing stage, depending on the technological heredity of the workpiece from the point of view of distribution of the stock to be removed over its surface. It has been established that changes in the eccentricity between the axes of rotation of the tool and the faceplate as well as the amplitudes of the reciprocating rotational movements of the latter practically do not affect both

accuracy and processing productivity, therefore, in practice, these parameters can not be optimized, but their average values can be assigned. The operating modes of the basic lever grinding and polishing machine are established, at which the required accuracy of the working surface of the tool is provided, which directly affects the straightness of the generatrix of the cone. Studies of the regularities of the shaping of the side surface of a conical lens in the conditions of free grinding are carried out and the adjustment parameters of technological equipment that affect the quality and productivity of the processing process are determined.

**Keywords:** conical part, flat tool, free grinding, processing parameters, optimization of shaping modes

**For citation:** Kozeruk A. S., Sukhotsky A. A., Diaz González R. O., Filonova M. I., Kuznechik V. O., Ali-zade E. R. Modeling of formation regularities of conical surfaces. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 4, pp. 430–439. (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-430-439>

**Введение.** Для повышения точности работы современных оптико-электронных приборов, предназначенных для измерения дальности до объектов импульсным методом, эффективным является обеспечение максимальной добротности импульсов лазерного излучения [1], то есть максимальной крутизны их переднего фронта. Одним из путей решения этой задачи может быть применение в оптической схеме лазерного дальномера конической линзы – аксикона. Этот оптический элемент позволяет преобразовать Гауссово распределение энергии в исходном лазерном импульсе, для которого характерен пологий передний фронт, в распределение Бесселя с крутым передним фронтом [2]. В настоящее время в странах ближнего зарубежья конические линзы изготавливают поштучно вручную посредством перемещения по образующей вращающейся конической заготовки плоского круглого инструмента с лункой в центре. В лунку помещают шаровой наконечник удерживаемого в руке поводка. Благодаря шаровому соединению поводка с инструментом последний совершает, наряду с переносным, относительное движение по образующей конуса. Обработка непроизводительна, причем ее результат полностью зависит от опыта и интуиции рабочего.

В странах дальнего зарубежья (в частности, в Китае) окончательную обработку (полирование) выполняют в три этапа: 1) грубое полирование с использованием полиуретанового полировального диска; 2) прецизионное полирование в плазменной атмосфере; 3) фрагментарное (локальное) полирование гибким зонным инструментом, направленное на уменьшение локальных погрешностей до приемлемого уровня (Pat. 109 719 573B China, Int. Cl. B 24 B 1/00, B 24 B 13/00, B 24 B 13/02, B 24 B 27/033, B 24 B 49/12, B 28 D 1/22, G 01 B 11/24, G 01 B 11/30 «Machining method of axicon», authors – Zhang Yanchao, Dayton Love Huan, Shao Jianda, Wu Lingqi, Wu Fulin, Xu Ke). Такая обработка требует значительных трудозатрат, что обуславливает высокую стоимость зарубежных аксиконов, а также то, что используемый на заключительной стадии гибкий инструмент не обладает требуемым уровнем адаптивности и стабильности, а это отрицательно сказывается на точности обработанной поверхности.

Поэтому разработка технологии групповой обработки аксиконов с применением инженерных методов управления процессом формообразования их поверхностей плоским инструментом является актуальной научно-технической проблемой.

**Устройство для обработки конической поверхности.** Разработанное авторами статьи устройство (рис. 1) содержит соединенные между собой клиноременной передачей 1 ведущий 2 и ведомый 3 шкивы. Первый из них вращается вместе с ведущим шкивом 4 в дополнительной зажимной колодке 5, а второй установлен с возможностью вращения вокруг оси вала ведомого шкива 6, неподвижно соединенного через компенсационную муфту 7 с планшайбой с хвостовиком 8 и шарнирно – с поводком 9, который в свою очередь неподвижно закреплен в основной зажимной колодке 10. Основная 10 и дополнительная 5 зажимные колодки установлены подвижно на выходном звене исполнительного механизма станка 11, находящегося в шарнирном соединении с его приводным валом 12. На дополнительной колодке 5 смонтирован электродвигатель 13, соединенный с валом ведущего шкива 4. На ведомом шкиве 3 закреплены неподвижные кронштейны 14 с лимбами 15 и верхние части гибких стоек 16, соединенных с помощью компенсационных муфт 17 с нижней частью гибких стоек 18, находящихся в подвижном соединении с полими стойками 19, жестко соединенными с установленной на инструмент 20 правильной пластиной 21, снабженной отверстиями для обрабатываемых деталей 22. Подвижные кронштейны 23



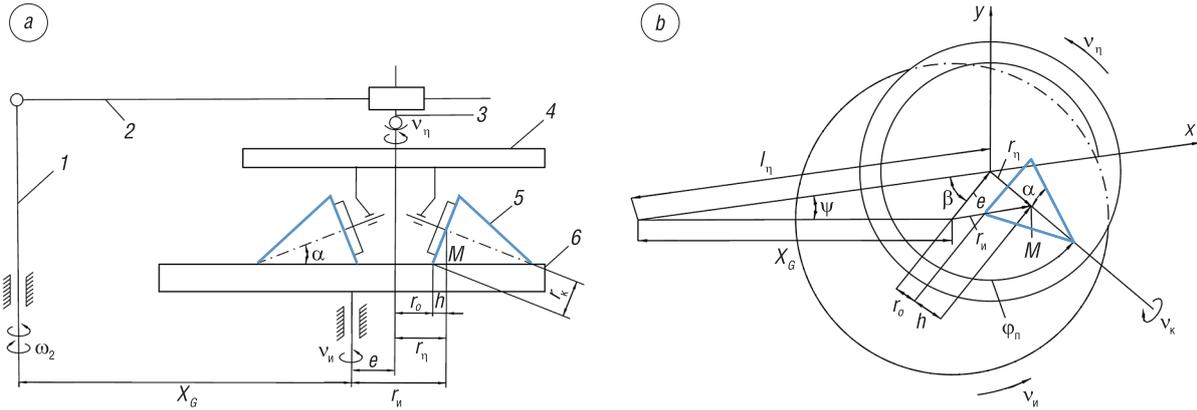


Рис. 2. Схема обработки деталей с коническими поверхностями (а) и векторная схема для ее расчета (b)  
 Fig. 2. Scheme of processing parts with conical surfaces (a) and a vector diagram for its calculation (b)

Из анализа рассматриваемой схемы обработки конических поверхностей (рис. 2, b) следует, что скорость скольжения  $v$  в произвольной точке  $M$  детали выражается векторным соотношением

$$\vec{v} = \vec{v}_n - \vec{v}_п - \vec{v}_к - \vec{v}_в, \quad (1)$$

в правой части которого записаны векторы линейных скоростей вращательных движений:  $v_n$  – инструмента б,  $v_п$  – планшайбы 4,  $v_к$  – конуса 5 и  $v_в$  – возвратно-вращательное перемещение рычага 2 относительно оси симметрии стойки 1. В нашем случае эти скорости имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \vec{v}_n &= \vec{\omega}_n \times \vec{r}_n; \vec{v}_п = \vec{\omega}_п \times \vec{r}_п \\ \vec{v}_к &= \vec{\omega}_к \times \vec{r}_к; \vec{v}_в = \vec{\psi}' \times \vec{l}_п \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\vec{\omega}_n, \vec{\omega}_п, \vec{\omega}_к$  – векторы угловых скоростей инструмента, планшайбы и конуса соответственно;  $\vec{r}_n = \vec{e} + \vec{r}_п$  ( $e = \sqrt{l_п^2 + X_G^2} - 2X_G l_п \cos \psi$  – текущее значение расстояния между осями инструмента и планшайбы, где  $X_G$  – расстояние между осями вращения стойки 1 и инструмента б,  $\psi$  – угол поворота рычага 2 от исходного положения),  $\vec{r}_п, \vec{r}_к$  – радиус-векторы рассматриваемой точки  $M$  относительно оси симметрии инструмента, планшайбы и конуса соответственно;  $l_п$  – расстояние между осями симметрии поводка 3 и стойки 1;  $\psi'$  – угловая скорость возвратно-вращательного движения рычага 2.

Закон изменения  $\psi'$  определяется типом исполнительного механизма. В рассматриваемом устройстве в качестве последнего применяется шарнирный четырехзвенник. Для него, как показано в [3],  $\psi' = \omega_2 i_{42}$ , где  $\omega_2$  – угловая скорость входного звена исполнительного механизма станка, а  $i_{42}$  – кинематическая передаточная функция этого механизма.

Запишем проекции векторов, входящих в уравнения (2), на оси системы координат  $XYZ$ , начало которой находится на оси вращения планшайбы 4, а ось  $X$  совпадает с осевой линией рычага 2:

$$\begin{aligned} \vec{\omega}_n &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_n \end{pmatrix}; \vec{\omega}_п = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_п \end{pmatrix}; \vec{\psi}' = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \psi' \end{pmatrix}; \vec{\omega}_д = \begin{pmatrix} \omega_д \cos \alpha \cos \varphi_п \\ \omega_д \cos \alpha \sin \varphi_п \\ \omega_д \sin \alpha \end{pmatrix}; \\ \vec{r}_п &= \begin{pmatrix} r_п \cos \theta_п \\ r_п \sin \theta_п \\ 0 \end{pmatrix}; \vec{e} = \begin{pmatrix} e \cos \beta \\ e \sin \beta \\ 0 \end{pmatrix}; \vec{r}_д = \begin{pmatrix} r_д \sin \alpha \cos \theta_п \\ r_д \sin \alpha \sin \theta_п \\ -r_д \cos \alpha \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Учитывая эту запись и выполнив соответствующие преобразования, проекции скорости скольжения  $v$  на оси системы координат  $XYZ$  согласно соотношению (1) запишем в виде

$$\left. \begin{aligned} v_X &= -\omega_n (r_п \sin \varphi_п + e \sin \beta) + (\omega_п r_п + \omega_д r_д) \sin \varphi_п, \\ v_Y &= \omega_n (r_п \sin \varphi_п + e \cos \beta) - (\omega_п r_п + \omega_д r_д) \cos \varphi_п - \psi' l_п, \\ v_Z &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\varphi_{\Pi}$  – угол поворота планшайбы 4 относительно оси  $X$ ;  $\beta = \arccos \frac{l_{\Pi}^2 + e^2 - X_G^2}{2l_{\Pi}e}$  – угол между осевой линией рычага 2 и прямой, проходящей через оси симметрии инструмента 6 и планшайбы 4.

Используя уравнения (3), можно определить скорость скольжения в любой точке обрабатываемой конической поверхности:

$$v = \sqrt{v_X^2 + v_Y^2 + v_Z^2}. \quad (4)$$

**Методика определения режимов обработки.** Изложенный в [4] метод формообразования деталей с конической поверхностью в условиях свободного притирания [5] предполагает притирку образующей вращающейся конической заготовки к инструменту с плоской рабочей поверхностью. Прямолинейность образующей конуса при такой обработке зависит в основном от точности рабочей поверхности инструмента, которая в обсуждаемом в данной статье методе поддерживается так называемым правильником в виде стеклянной пластины с отверстиями для конических деталей. В процессе обработки правильник совершает перемещение по рабочей поверхности инструмента по сложной траектории, состоящей из относительного и переносного движений.

Для обеспечения требуемой плоскостности инструмента параметры такой траектории рассчитывали по специальной программе [6] с учетом диаметров инструмента и правильника. При этом диаметр первого из них принимали равным 1,2 от диаметра окружности, проведенной через вершины трех конусов, расположенных как и в схеме устройства (см. рис. 1). В качестве диаметра детали брали эффективный диаметр правильника  $d_{\text{эф}}$ , который рассчитывали по формуле

$$d_{\text{эф}} = 2\sqrt{\frac{S_{\text{эф}}}{\pi}},$$

где  $S_{\text{эф}}$  – эффективная площадь рабочей поверхности правильника, которая получена вычитанием из площади круга, чей диаметр равен диаметру правильника, площади отверстий для обрабатываемых конических деталей.

Используя вышеизложенную модель, провели теоретические исследования закономерностей формообразования конической линзы высотой 25 мм и диаметром основания 12,5 мм. В качестве регулируемых параметров процесса обработки принимали частоты вращения инструмента, конуса и входного звена исполнительного механизма станка, отношение частот вращения правильника и инструмента, а также амплитуду возвратно-вращательного движения первого из них по рабочей поверхности второго и их относительное смещение. Рассчитывали относительное расхождение путей трения, характеризующее качество обработки, и среднее арифметическое значение этих путей, пропорциональное производительности съема припуска с заготовки. Данные показатели определялись как при изменении каждого из отмеченных параметров в отдельности, так и при попарном их изменении в 15 различных комбинациях.

В технологии оптического приборостроения последний прием можно назначать только на стадии предварительного шлифования, поскольку одновременное регулирование двух и более наладочных параметров станка приводит к резкому изменению закономерностей съема припуска с заготовки и тем самым вызывает деформацию геометрической формы обрабатываемой поверхности. Это искажение формы детали можно исправить на последующих операциях. Если же такая погрешность возникнет на финишной операции полирования, то для исправления дефекта деталь необходимо перешлифовывать и повторно полировать, что увеличивает ее себестоимость. Однако изменение двух наладочных параметров позволяет ускорить процесс съема припуска, поэтому на предварительной стадии обработки применение такого приема оправдано.

Наиболее выгодные регулируемые параметры технологического оборудования определяли в следующей последовательности. Исходя из диапазона конструктивно возможных изменений регулируемых параметров процесса обработки, принимали среднее их значение. Учитывая эти значения, рассчитывали точность и производительность обработки, изменяя один из параметров до достижения минимального расхождения относительных путей трения. Используя полученное

таким образом рациональное значение изменяемого параметра, во втором цикле расчетов относительных расхождений путей трения определяли оптимальную величину второго регулируемого параметра при полученном значении первого из них и средних величинах остальных. Затем, приняв выявленные значения первых двух параметров, оптимизировали третий при средних значениях остальных и так далее до определения рациональных величин всех параметров. Полученные таким образом наиболее выгодные величины регулируемых параметров уточняли путем последовательных изменений каждого из них при неизменных остальных. Так повторяли до тех пор, пока после оптимизации последнего из рассматриваемых параметров не получали постоянной величины относительных расхождений путей трения.

Результаты определения рациональных регулируемых параметров процесса обработки конических деталей на рассматриваемом устройстве по изложенной методике приведены на рис. 3, а, а на рис. 3, б показаны полученные при этом закономерности изменений средних арифметических значений путей трения. Из анализа этих результатов следует, что изменения эксцентриситета  $e$  между осями вращения инструмента и планшайбы (кривая 4 на рис. 3, а), а также амплитуды возвратно-вращательных движений последней (кривая 5) практически не влияют как на точность, так и на производительность обработки. Поэтому на практике можно принимать средние значения этих параметров. Оставшиеся параметры по степени их влияния на качество обработки расположены в следующей последовательности:  $v_d/v_n$ ,  $v_n$ ,  $v_2$ ,  $v_k$  (кривые 1, 2, 3, 6 на рис. 3, а соответственно).

Обработка оптических деталей с конической поверхностью по предлагаемой схеме сводится к шлифованию их в три этапа абразивной суспензией микропорошков (электрокорунда белого) зернистости М40, М20, М10 и полированию водной суспензией полирита (окиси церия) [7].

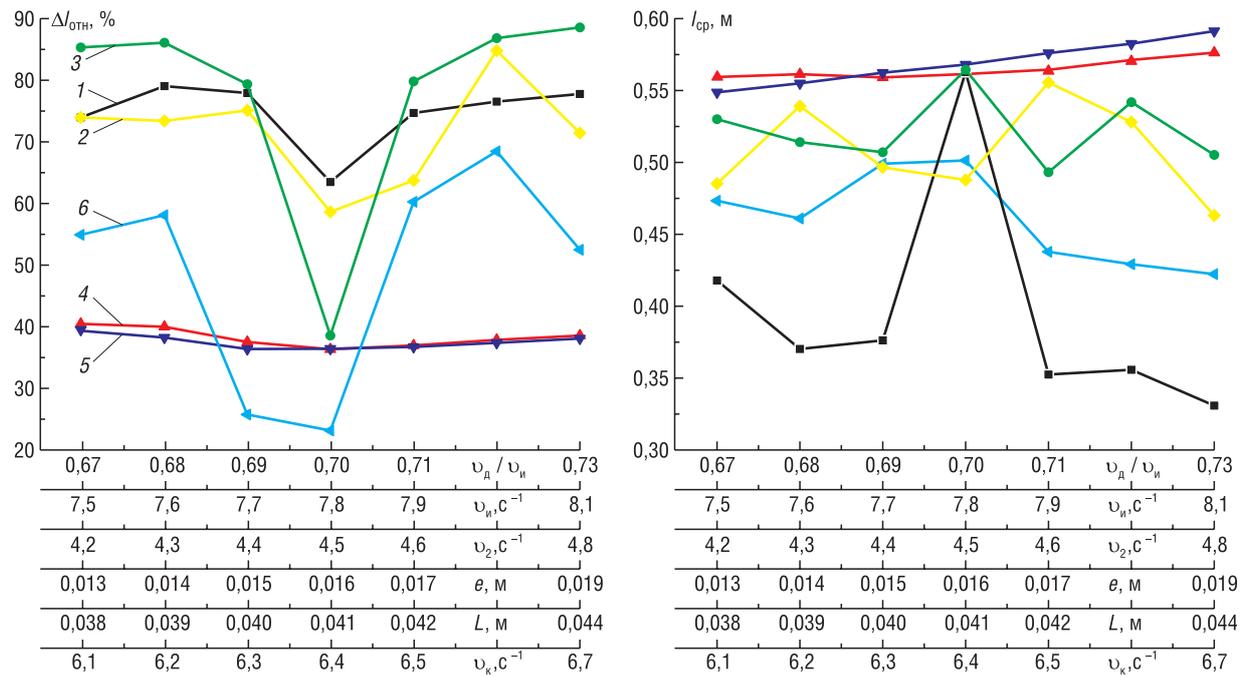


Рис. 3. Закономерности изменения относительного расхождения  $\Delta I_{отн}$  (а) и среднего арифметического значения  $I_{cp}$  (б) путей трения при обработке боковой поверхности конической линзы в зависимости от величины:  $v_{пл}/v_n$  при  $v_n = 5,0 \text{ c}^{-1}$ ,  $v_2 = 4,0 \text{ c}^{-1}$ ,  $e = 0,01 \text{ м}$ ,  $L = 0,04 \text{ м}$ ,  $v_k = 3,0 \text{ c}^{-1}$  (кривая 1);  $v_n$  при  $v_{пл}/v_n = 0,7$  и прежних  $v_2$ ,  $e$ ,  $L$ ,  $v_k$  (кривая 2);  $v_2$  при  $v_{пл}/v_n = 0,7$ ,  $v_n = 7,8 \text{ c}^{-1}$  и прежних  $e$ ,  $L$ ,  $v_k$  (кривая 3);  $e$  при  $v_{пл}/v_n = 0,7$ ,  $v_n = 7,8 \text{ c}^{-1}$ ,  $v_2 = 4,5 \text{ c}^{-1}$  и прежних  $L$ ,  $v_k$  (кривая 4);  $L$  при  $v_{пл}/v_n = 0,7$ ,  $v_n = 7,8 \text{ c}^{-1}$ ,  $v_2 = 4,5 \text{ c}^{-1}$ ,  $e = 0,016 \text{ м}$  и прежней  $v_k$  (кривая 5);  $v_k$  при  $v_{пл}/v_n = 0,7$ ,  $v_n = 7,8 \text{ c}^{-1}$ ,  $v_2 = 4,5 \text{ c}^{-1}$ ,  $e = 0,016 \text{ м}$ ,  $L = 0,041 \text{ м}$

Fig. 3. Patterns of change in the relative discrepancy  $\Delta I_{отн}$  (a) and the arithmetic mean value  $I_{cp}$  (b) of the friction paths when processing the side surface of a conical lens depending on the magnitude  $v_{пл}/v_n$  in case of  $v_n = 5,0 \text{ s}^{-1}$ ,  $v_2 = 4,0 \text{ s}^{-1}$ ,  $e = 0,01 \text{ м}$ ,  $L = 0,04 \text{ м}$ ,  $v_k = 3,0 \text{ s}^{-1}$  (curve 1);  $v_n$  in case of  $v_{пл}/v_n = 0,7$  and former  $v_2$ ,  $e$ ,  $L$ ,  $v_k$  (curve 2);  $v_2$  in case of  $v_{пл}/v_n = 0,7$ ,  $v_n = 7,8 \text{ s}^{-1}$  and former  $e$ ,  $L$ ,  $v_k$  (curve 3);  $e$  in case of  $v_{пл}/v_n = 0,7$ ,  $v_n = 7,8 \text{ s}^{-1}$ ,  $v_2 = 4,5 \text{ s}^{-1}$  and former  $L$ ,  $v_k$  (curve 4);  $L$  in case of  $v_{пл}/v_n = 0,7$ ,  $v_n = 7,8 \text{ s}^{-1}$ ,  $v_2 = 4,5 \text{ s}^{-1}$ ,  $e = 0,016 \text{ м}$  and former  $v_k$  (curve 5);  $v_k$  in case of  $v_{пл}/v_n = 0,7$ ,  $v_n = 7,8 \text{ s}^{-1}$ ,  $v_2 = 4,5 \text{ s}^{-1}$ ,  $e = 0,016 \text{ м}$ ,  $L = 0,041 \text{ м}$

Согласно результатам выполненных исследований (см. рис. 3), при проведении упомянутых операций целесообразно придерживаться следующих условий: на первой стадии шлифования назначать оптимальное значение  $v_d/v_n$ , а значения параметров  $v_n$ ,  $v_2$ ,  $v_k$  – средние; на второй стадии шлифования – оптимальные  $v_d/v_n$  и  $v_n$ , а  $v_2$  и  $v_k$  – средние; на третьей стадии шлифования – оптимальные  $v_d/v_n$ ,  $v_n$ ,  $v_2$  и среднее  $v_k$ , а на этапе полирования использовать все оптимизированные регулируемые параметры процесса обработки. Соблюдение этих рекомендаций обеспечивает поэтапное уменьшение погрешности отклонения образующей конуса от прямолинейности при закономерном уменьшении интенсивности съема припуска с заготовки, что отображается кривыми 1, 2, 3 и 6 на рис. 3, б.

Проведенные исследования производительности и качества обработки конических поверхностей при попарном изменении принятых в нашем случае регулируемых параметров показали, что из возможных различных их комбинаций наиболее выгодно назначать сочетание «частота вращения конуса – эксцентриситет между осями симметрии инструмента и планшайбы».

**Экспериментальные исследования.** Качество и производительность обработки боковой поверхности конической линзы определяли на стадии ее шлифования. При этом использовались заготовки детали с такими же геометрическими параметрами, как и в случае теоретических исследований. Первоначально подготавливали заготовку посредством ее шлифования на инструменте в виде планшайбы диаметром 350 мм. В качестве обрабатывающей использовали абразивную суспензию электрокорунда белого зернистостью М10 концентрацией Т : Ж = 1 : 5. Суспензию в зону обработки подавали вручную с помощью кисточки. Шлифование выполняли на серийном шлифовально-полировальном станке ЗШП-320 с закрепленным на его шпинделе инструментом, который настраивали по специальной методике [8], добиваясь того, чтобы его (инструмента) рабочая поверхность имела выпуклую форму такого радиуса кривизны, после шлифования на которой используемой заготовки ее образующая имела отклонение от прямолинейности в виде прогиба величиной 0,012 мм.

Необходимый радиус кривизны рабочей поверхности шлифовальника обеспечивали по следующей методике. Используя выражение для стрелки прогиба  $h$  сферической поверхности радиусом  $R$

$$h = R - \sqrt{R^2 - \frac{d^2}{4}}, \quad (5)$$

где  $d$  – диаметр выбранного шарового сегмента, на котором измеряли стрелку прогиба  $h$ , по формуле

$$R = \frac{h^2 + \frac{d^2}{4}}{2h} \quad (6)$$

(в нашем случае  $h = 0,012$  мм,  $d = 25,8$  мм – длина образующей конической заготовки с принятыми геометрическими параметрами), определили, что искомый радиус кривизны равен 6934 мм. Для получения шлифовальника с рабочей поверхностью такого радиуса кривизны  $R$  выполняли его наладку по сферометру с диаметром кольца 100 мм и микронной индикаторной головкой часового типа. При этом обеспечивали стрелку прогиба величиной 0,18 мм, рассчитанную по формуле (5) для  $R = 6934$  мм и  $d = 100$  мм. На подготовленной таким образом рабочей поверхности инструмента используемую коническую заготовку шлифовали в течение 15 мин абразивной суспензией микропорошка М10, что обеспечивало отклонение ее образующей от прямолинейности величиной 0,012 мм в каждой серии экспериментальных исследований. Эти исходные заготовки обрабатывали на чугунном шлифовальнике в виде планшайбы диаметром 150 мм с выпуклой рабочей поверхностью. Радиус кривизны равнялся 40000 мм, его контролировали сферометром посредством измерения стрелки прогиба, которая на диаметре 100 мм составляла 0,03 мм, а на длине образующей используемой конической заготовки – 0,002 мм.

При шлифовании исследовали закономерности изменения стрелки прогиба в зависимости от величины регулируемых параметров процесса обработки по такой же методике, как и на стадии теоретических исследований, то есть первоначально изменяли отношение частот вращения

планшайбы (детали) и инструмента  $v_d/v_n$  при постоянных средних значениях  $v_n = 5,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $v_2 = 4,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $e = 0,01 \text{ м}$ ,  $L = 0,04 \text{ м}$ ,  $v_k = 3,0 \text{ с}^{-1}$ . Затем, назначив оптимальное значение  $v_d/v_n = 0,7$ , полученное на стадии теоретических исследований, и средние  $v_2$ ,  $e$ ,  $L$ ,  $v_k$ , изменяли частоту вращения инструмента  $v_n$  и т. д. В каждом цикле шлифования использовали исходную заготовку с отклонением ее образующей от прямолинейности величиной  $0,012 \text{ мм}$ , а продолжительность обработки составляла  $10 \text{ мин}$ .

Результаты экспериментальных исследований закономерностей изменения стрелки прогиба  $h$  в зависимости от значений регулируемых параметров процесса обработки  $v_d/v_n$ ,  $v_n$ ,  $v_2$ ,  $L$  и  $v_k$  приведены на рис. 4. Анализ результатов показывает, что по мере использования оптимальных значений отмеченных регулируемых параметров точность обработки повышается (отклонение образующей конуса от прямолинейности с исходных  $0,012 \text{ мм}$  уменьшается до  $0,004 \text{ мм}$ ).

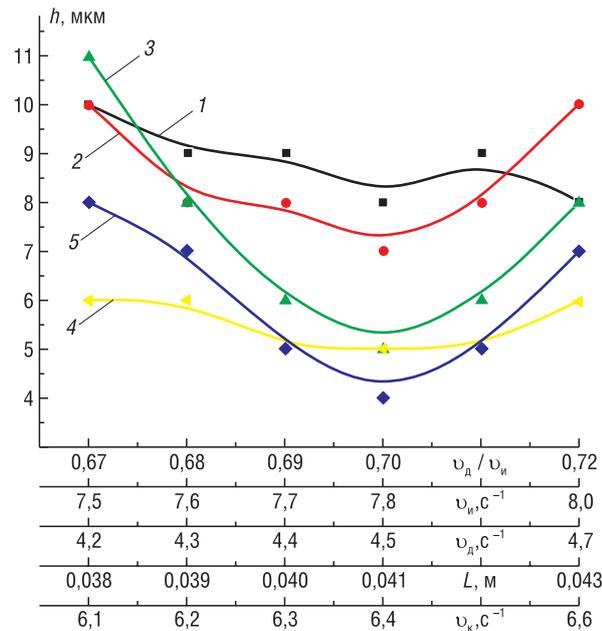


Рис. 4. Зависимость стрелки прогиба  $h$  боковой поверхности конической линзы в процессе ее шлифования от изменяющихся значений: отношения частот вращения детали и инструмента  $v_d/v_n$  и постоянных  $v_n = 5,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $v_2 = 4,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $L = 0,04 \text{ м}$ ,  $v_k = 3,0 \text{ с}^{-1}$  (кривая 1); частоты вращения инструмента  $v_n$  и постоянных  $v_d/v_n = 0,7$ ,  $v_2 = 4,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $L = 0,04 \text{ м}$ ,  $v_k = 3,0 \text{ с}^{-1}$  (кривая 2); частоты вращения входного звена исполнительного механизма станка  $v_2$  и постоянных  $v_d/v_n = 0,7$ ,  $v_n = 5,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $L = 0,04 \text{ м}$ ,  $v_k = 3,0 \text{ с}^{-1}$  (кривая 3); амплитуды возвратно-вращательных движений выходного звена исполнительного механизма станка  $L$  и постоянных  $v_d/v_n = 0,7$ ,  $v_n = 5,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $v_2 = 4,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $v_k = 3,0 \text{ с}^{-1}$  (кривая 4); частоты вращения конической заготовки  $v_k$  и постоянных  $v_d/v_n = 0,7$ ,  $v_n = 5,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $v_2 = 4,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $L = 0,04 \text{ м}$  (кривая 5)

Fig. 4. Dependence of the arrow deflection  $h$  of the lateral surface of a conical lens during its grinding on the changing values of the ratio of the frequencies of rotation of the part and tool  $v_d/v_n$  and former  $v_n = 5.0 \text{ s}^{-1}$ ,  $v_2 = 4.0 \text{ s}^{-1}$ ,  $L = 0.04 \text{ m}$ ,  $v_k = 3.0 \text{ s}^{-1}$  (curve 1); tool speed  $v_n$  and permanent  $v_d/v_n = 0.7$ ,  $v_2 = 4.0 \text{ s}^{-1}$ ,  $L = 0.04 \text{ m}$ ,  $v_k = 3.0 \text{ s}^{-1}$  (curve 2); rotational speed of the input link of the actuator of the machine  $v_2$  and permanent  $v_d/v_n = 0.7$ ,  $v_n = 5.0 \text{ s}^{-1}$ ,  $L = 0.04 \text{ m}$ ,  $v_k = 3.0 \text{ s}^{-1}$  (curve 3); the amplitude of the reciprocating rotational movements of the output link of the actuator of the machine tool  $L$  and constant  $v_d/v_n = 0.7$ ,  $v_n = 5.0 \text{ s}^{-1}$ ,  $v_2 = 4.0 \text{ s}^{-1}$ ,  $v_k = 3.0 \text{ s}^{-1}$  (curve 4); rotation speed of conical billet  $v_k$  and permanent  $v_d/v_n = 0.7$ ,  $v_n = 5.0 \text{ s}^{-1}$ ,  $v_2 = 4.0 \text{ s}^{-1}$ ,  $L = 0.04 \text{ m}$  (5)

Эти экспериментальные результаты согласуются с закономерностями теоретических исследований, изложенных на рис 3, а (точки минимума на кривых 1 и 6 уменьшаются от  $\Delta l = 0,63$  до  $\Delta l = 0,23$  соответственно).

Авторами также выполнены экспериментальные исследования производительности обработки рассматриваемых оптических деталей. С этой целью исходные конические заготовки с отклонением образующей от прямолинейности  $0,012 \text{ мм}$  шлифовали до момента

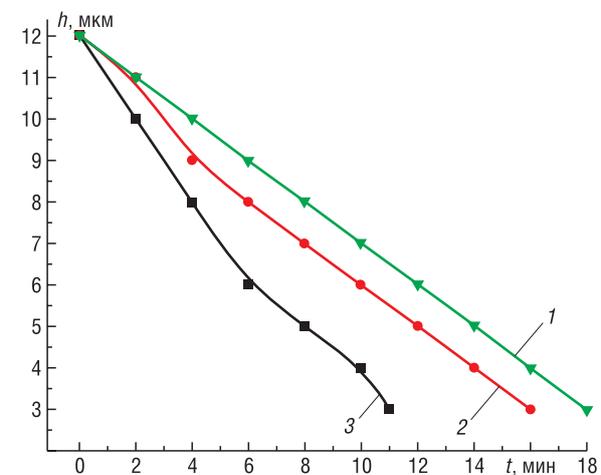


Рис. 5. Закономерности изменения стрелки прогиба  $h$  боковой поверхности конической линзы в процессе ее шлифования от исходного значения  $0,012 \text{ мм}$  до  $0,003 \text{ мм}$  при оптимальном  $v_d/v_n = 0,7$  и средних  $v_n = 5,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $v_2 = 4,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $L = 0,04 \text{ м}$ ,  $v_k = 3,0 \text{ с}^{-1}$  (кривая 1); оптимальных  $v_d/v_n = 0,7$ ,  $v_n = 7,8 \text{ с}^{-1}$  и средних  $v_2, L, v_k$  (кривая 2); оптимальных  $v_d/v_n = 0,7$ ,  $v_n = 7,8 \text{ с}^{-1}$ ,  $v_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $L = 0,04 \text{ м}$ ,  $v_k = 6,4 \text{ с}^{-1}$  (кривая 3)

Fig. 5. Patterns of change of the arrow deflection  $h$  of the lateral surface of a conical lens during grinding from the initial value  $0,012 \text{ mm}$  to  $0,003 \text{ mm}$  at optimal  $v_d/v_n = 0.7$  and medium  $v_n = 5.0 \text{ s}^{-1}$ ,  $v_2 = 4.0 \text{ s}^{-1}$ ,  $L = 0.04 \text{ m}$ ,  $v_k = 3.0 \text{ s}^{-1}$  (curve 1); optimal  $v_d/v_n = 0.7$ ,  $v_n = 7.8 \text{ s}^{-1}$  and medium  $v_2, L, v_k$  (curve 2); optimal  $v_d/v_n = 0.7$ ,  $v_n = 7.8 \text{ s}^{-1}$ ,  $v_2 = 4.5 \text{ s}^{-1}$ ,  $L = 0.04 \text{ m}$ ,  $v_k = 6.4 \text{ s}^{-1}$  (curve 3)

достижения  $h = 0,003$  мм при различных режимах обработки. Результаты этих исследований отражены на рис. 5. Их анализ показывает, что если назначить оптимальные значения только одного из регулируемых параметров процесса обработки, например, отношение  $v_d/v_{и}$ , а остальные – средними (кривая 1 на рис. 5), то время обработки  $t_{обр}$  составляет 19 мин. При двух оптимальных параметрах (например,  $v_d/v_{и}$  и  $v_{и}$ ) и средних значениях остальных из них (кривая 2 на рис. 5)  $t_{обр} = 16$  мин, а в случае оптимальных значений всех регулируемых параметров (кривая 3 на рис. 5)  $t_{обр} = 11$  мин. Эти экспериментальные результаты также удовлетворительно согласуются с закономерностями теоретических исследований, приведенных на рис 3, б.

**Заключение.** Разработанная модель получения оптических деталей с конической поверхностью в условиях свободного их притирания к инструменту в виде планшайбы позволяет реализовать инженерные методы управления процессом формообразования конических деталей без проведения предварительных трудоемких экспериментальных исследований.

Предложенная методика оптимизации наладочных параметров технологического оборудования дает возможность выявить наиболее эффективные режимы обработки (шлифования и полирования) конических линз с учетом закономерностей распределения по их поверхности подлежащего удалению припуска.

### Список использованных источников

1. Карасик, В. Е. Лазерные системы видения / В. Е. Карасик, В. М. Орлов. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 352 с.
2. Наземное лазерное сканирование / В. А. Середович [и др.]. – Новосибирск: СГГА, 2009. – 261 с.
3. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. – Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. – 176 с.
4. Моделирование рабочей зоны обработки аксиконов на технологическом оборудовании / А. С. Козерук [и др.] // Вес. Нац. акад. Навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №3. – С. 365–374. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-365-374>
5. 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.
6. Математическое моделирование технологического оборудования для обработки оптических деталей / И. П. Филонов [и др.] // Наука и техника. – 2017. – Т. 16, №5. – С. 367–375. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-367-375>
7. 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.
8. Технология оптических деталей / М. Н. Семибратов [и др.]; под ред. М. Н. Семибратова. – М.: Машиностроение, 1978. – 415 с.

### References

1. Karasik V. E., Orlov V. M. *Laser Vision Systems*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2001. 352 p. (in Russian)
2. Seredovich V. A., Komissarov A. V., Komissarov D. V., Shirokova T. A. *Ground Laser Scanning*. Novosibirsk, Siberian State Geodetic Academy, 2009. 261 p. (in Russian).
3. Kozeruk A. S. *Shaping Precision Surfaces*. Minsk, VUZ-UNITI Publ., 1997. 176 p. (in Russian).
4. Kozeruk A. S., Diaz Gonzalez R. O., Sukhotsky A. A., Philonova M. I. Simulation of axicon processing area on technological equipment. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 365–374 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-365-374>
5. Kozeruk A. S. *Managing the Shaping of Precision Surfaces of Machine Parts and Devices Based on Mathematical Modeling*. Minsk, 1997. 317 p. (in Russian).
6. Filonov I. P., Kozeruk A. S., Malpika D. L., Filonova M. I., Kuznechik V. O., Dias Gonsalez R. O. Mathematical modeling of technological equipment for processing optical parts. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*, 2017, vol. 16, no. 5, pp. 367–375 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-367-375>
7. Zubakov V. G., Semybratov M. N., Standel S. K. *Optical Parts Technology*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 368 p. (in Russian).
8. Semibratov M. N., Zubakov V. G., Shtandel' S. K., Kuznetsov S. M. *Technology of Optical Parts*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 415 p. (in Russian).

### Информация об авторах

*Козерук Альбин Степанович* – доктор технических наук, профессор, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0001-5484-9294>. E-mail: [akozeryk@gmail.com](mailto:akozeryk@gmail.com)

*Сухоцкий Александр Анатольевич* – старший преподаватель, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [sukhotsky@list.ru](mailto:sukhotsky@list.ru)

*Диас Гонсалес Рафаэль Орландос* – аспирант, Университетский политехнический институт Сантьяго Мариньо (Финал гр. Лас Америкас с продлением, Лос Процерес 5101, Мэрида, Венесуэла). E-mail: [raordigon.088@gmail.com](mailto:raordigon.088@gmail.com)

*Филонова Марина Игоревна* – кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [filonovami@mail.ru](mailto:filonovami@mail.ru)

*Кузнецик Валерия Ольгердовна* – кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [v-kuzn@tut.by](mailto:v-kuzn@tut.by)

*Али-задэ Эльдар Рафикович* – студент, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [alizade.eldar843@gmail.com](mailto:alizade.eldar843@gmail.com)

### Information about the authors

*Albin S. Kozeruk* – D. Sc. (Engineering), Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0001-5484-9294>. [akozeryk@gmail.com](mailto:akozeryk@gmail.com)

*Alexander A. Sukhotski* – Senior Lecturer, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [sukhotsky@list.ru](mailto:sukhotsky@list.ru)

*Rafael Orlando Diaz Gonzalez* – Postgraduate Student, University Polytechnic Institute of Santiago Marino (Finals Ave. Las Americas with extension, Los Proceres 5101, Merida, Venezuela). E-mail: [raordigon.088@gmail.com](mailto:raordigon.088@gmail.com)

*Marina I. Filonova* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [filonovami@mail.ru](mailto:filonovami@mail.ru)

*Valeria O. Kuznechik* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [v-kuzn@tut.by](mailto:v-kuzn@tut.by)

*Eldar R. Ali-zade* – Student, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [alizade.eldar843@gmail.com](mailto:alizade.eldar843@gmail.com)