

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-297-304>

УДК 681.7.023.72

Технологические особенности формообразования плоского инструмента для обработки аксиконов

Докт. техн. наук, проф. А. С. Козерук¹⁾, асп. Р. О. Диас Гонсалес^{1,2)}, инж. А. А. Сухоцкий¹⁾, кандидаты техн. наук, доценты М. И. Филонова¹⁾, В. О. Кузнецик¹⁾

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

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

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

Реферат. Обосновано, что для управления процессом формообразования плоских поверхностей по методу свободного притирания целесообразно выбирать такие наладочные параметры станка, как диаметр инструмента и частота его вращения, величина амплитуды возвратно-вращательного движения детали по инструменту (или наоборот) и частота этого движения, величина рабочего усилия. Проведено математическое моделирование закономерностей процесса абразивной обработки плоских поверхностей в условиях свободного притирания на рычажных станках. Получена формула расчета скорости скольжения в выбранных опорных точках на обрабатываемой поверхности с учетом давления в их окрестности. Определены закономерности срабатывания детали, в качестве которой в предлагаемой технологии получения аксиконов используется правильная пластина в зависимости от сочетания и величины выбранных наладочных параметров технологического оборудования. Обоснована самоорганизация процесса обработки по методу свободного притирания. Выполнен расчет чувствительности кинематического срабатывания к изменению режимов обработки и определена эффективность этих режимов с точки зрения производительности процесса. Отмечено, что увеличение диаметра инструмента, как одного из эффективных наладочных параметров при управлении процессом формообразования, осуществить на практике затруднительно, поскольку это требует замены инструментов, каждый из которых необходимо предварительно настраивать по особой, довольно трудоемкой методике. С увеличением частоты вращения инструмента и амплитуды его колебательных движений происходит усиленный сьем материала на периферии обрабатываемой поверхности, а с возрастанием колебательных движений, наоборот, более интенсивно срабатывается центральная зона детали.

Ключевые слова: аксикон, свободное притирание, стрелка прогиба, формообразование, абразивная обработка, параметр чувствительности, исполнительный механизм

Для цитирования: 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>

Technological Features of Forming Flat Tool for Processing Axicons

A. S. Kozeruk¹⁾, R. O. Dias Gonzalez^{1,2)}, A. A. Sukhotzkiy¹⁾, M. I. Filonova¹⁾, V. O. Kuznechik¹⁾

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

²⁾Instituto Universitario Politecnico Santiago Marino (Merida, Venezuela)

Abstract. It has been substantiated that in order to control the process of forming flat surfaces while using a free grinding method it is advisable to choose such machine setup parameters as a tool diameter and its rotation frequency, an amplitude of the reciprocating movement of the part along the tool (or vice versa) and frequency of this movement, as well as the value of the working force. Mathematical modeling of patterns for abrasive processing of flat surfaces in the conditions of free

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

grinding on lever machines has been carried out in the paper. A formula has been obtained for calculating a sliding speed at selected reference points on the surface to be treated while taking into account the pressure in their vicinity. Patterns of the part operation have been determined, for which a correct plate is used in the proposed axicon production technology with due account of the combination and size of the selected setup parameters for processing equipment. Self-organization of the processing process has been substantiated while using a free grinding method. Sensitivity of a kinematic response to a change in processing modes and efficiency of these modes in terms of process performance have been determined in the paper. It has been noted that an increase in a tool diameter, as one of the effective adjustment parameters for controlling the shaping process, is difficult to implement in practice, since this requires replacement of tools, each of which must be pre-configured while using a special rather time-consuming technique. The paper reveals that with an increase in the tool rotation frequency and an amplitude of its oscillatory movements, there is an increased removal of material on the periphery of the surface being machined, and with an increase in vibrational movements, on the contrary, the central zone of the part is more intensively activated.

Keywords: axicon, free grinding, deflection arrow, shaping, abrasive processing, sensitivity parameter, actuator

For citation: 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. *Science and Technique*. 19 (4), 297–304. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-297-304> (in Russian)

Введение

Для обработки традиционных оптических деталей (линз, призм, пластин) в настоящее время применяют в основном метод свободного притирания как один из наиболее точных и не требующих прецизионного технологического оборудования. В [1] обосновано, что этот метод может быть использован также для получения деталей с рабочей конической поверхностью (аксиконов), образующая которой должна быть строго прямолинейной. Для обеспечения последнего требования заготовку конической детали притирают к инструменту, плоскостность которого поддерживается правильником в виде стеклянной пластины специальной конструкции.

Технология обработки плоских поверхностей

Предлагаемый метод доводки плоской поверхности представляет собой притирание двух тел через слой абразивной суспензии, причем контакт между этими телами обеспечивается силовым, а не геометрическим замыканием (метод свободного притирания) [2]. В результате такого притирания контактирующие поверхности приобретают либо плоскую, либо сферическую форму, причем кривизна поверхностей управляется изменением наладочных параметров технологического оборудования, к которым относятся: диаметр инструмента d_n и частота его вращения ω_n , величина амплитуды возвратно-вращательного (колебательного) движения детали по инструменту (или наоборот) L и частота этого движения ω_2 , величина рабочего усилия p [3]. Причем на стадии шлифования

регулируют, как правило, несколько из этих параметров, что ускоряет съем припуска с заготовки, а в процессе полирования – только один, обеспечивая плавное изменение геометрической формы обрабатываемой поверхности и создавая тем самым условия для более точного определения момента достижения заданных параметров качества детали [4].

В настоящее время эффективные наладочные параметры станка и их оптимальные значения в каждом конкретном случае определяет оператор исходя из своего опыта и интуиции [5]. Такой подход требует дополнительных затрат непроизводительного времени на предварительные экспериментальные исследования. Эту трудоемкую операцию в классическом технологическом процессе оптического приборостроения предлагается заменить инженерными расчетами, направленными на определение наиболее выгодных наладочных параметров станка и их значений исходя из технологической наследственности заготовки детали, определяемой характеристики распределения припуска на обрабатываемой поверхности. С этой целью проведено математическое моделирование закономерностей процесса абразивной обработки плоских поверхностей в условиях свободного притирания на рычажных станках. Моделирование включало в себя формализацию специализированного технологического оборудования, его рабочей зоны и процесса формообразования на этом оборудовании плоской поверхности инструмента для обработки конической детали. В итоге получена формула для расчета скорости скольжения инструмента v в выбранных по методике [6] опорных точках на обрабатываемой поверхности и давле-

ния p в их окрестности. С учетом этих величин по формуле Ф. Престона [7] определяли срабатывание u детали, в качестве которой в предлагаемой технологии получения аксионов использовалась так называемая правильная пластина

$$u = k \int_0^T v p dt, \quad (1)$$

где k – технологический коэффициент, зависящий от марки стекла, зернистости и концентрации абразивной суспензии, материала инструмента, температуры окружающей среды и других факторов; t – время обработки.

Результаты исследований и их анализ

В процессе численных исследований закономерностей обработки принимали, что интенсивность съема материала детали пропорциональна параметру $Q = v\rho$. При этом определяли значения каждого из наладочных параметров станка, обеспечивающих как равномерное распределение Q по всей обрабатываемой поверхности, что необходимо на стадии ее выхаживания после достижения заданной точности, так и преобладание этого параметра как в центральной, так и в краевой зонах детали. Два последних случая на практике используются в начальной стадии обработки в зависимости от характера распределения припуска: с преобладанием в краевой (общая «яма») или центральной (общий «бугор») зонах заготовки детали.

В процессе определения значений наладочных параметров станка, при которых распределение параметра Q принимает необходимый характер, применяли следующую методику. Учитывая производственную практику оптического приборостроения [8], а также принятые диаметры инструмента и детали, назначали следующие средние значения режимов обработки: $\omega_n = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$, где ω_d – частота вращения детали.

Первоначально выявляли оптимальную величину амплитуды L , при которой Q принимает одинаковое значение в центре и на краю детали, что соответствует равномерному съему припуска по обрабатываемой поверхности. Таким же образом определяли наиболее выгодные величины каждого из рассматриваемых наладочных параметров станка при средних значениях остальных из них.

Полученные результаты расчетов приведены на рис. 1, где кривые 2, 5, 8, 11, 14 характеризуют закономерности обработки, при которой происходит равномерный съем материала детали по всей ее исполнительной поверхности. В рассматриваемом случае такая обработка имела место для следующих значений наладочных параметров станка: $L = 197 \text{ мм}$, $d_n = 247 \text{ мм}$, $\omega_2 = 3,3 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n = 5,8 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,72$. Однако в начальной стадии величину параметров процесса формообразования следует назначать с учетом технологической наследственности заготовки. В частности, если припуск преобладает по периферии последней, то необходимо устанавливать следующие режимы обработки: $L = 221 \text{ мм}$, $d_n = 270 \text{ мм}$, $\omega_2 = 1,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n = 18,5 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,48$ (рис. 1, кривые 3, 6, 9, 12, 15), а в случае, когда требуется обеспечить усиленный съем материала в центральной зоне заготовки, целесообразно применять параметры: $L = 160 \text{ мм}$, $d_n = 218 \text{ мм}$, $\omega_2 = 6,8 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n = 2,7 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,99$ (рис. 1, кривые 1, 4, 7, 10, 13).

Характерным для зависимостей на рис. 2 является неравномерное распределение параметра Q на обрабатываемой поверхности. Такое изменение Q свидетельствует о том, что пути трения точек детали, находящихся в круговом кольце со средним радиусом, составляющим, как видно из рис. 1, примерно $0,25d_d$, достигают больших значений по сравнению с точками центральной и краевой зон. Эта закономерность объясняется особенностями метода свободного притирания двух тел, максимальная площадь перекрытия которых имеет место именно в упомянутых круговых кольцах. Однако на практике отмеченный максимум параметра Q автоматически нивелируется за счет того, что увеличение путей трения в той или иной зоне обрабатываемой поверхности приводит к усилению съема припуска в данной зоне, уменьшая тем самым активную площадь ее контакта с инструментом. Это, в свою очередь, вызывает перераспределение рабочего усилия в области сопряжения притирающихся поверхностей: оно возрастает по периферии обсуждаемой области, увеличивая интенсивность съема припуска. Следовательно, имеет место самоорганизация процесса обработки по методу свободного притирания, который относится к прецизионному.

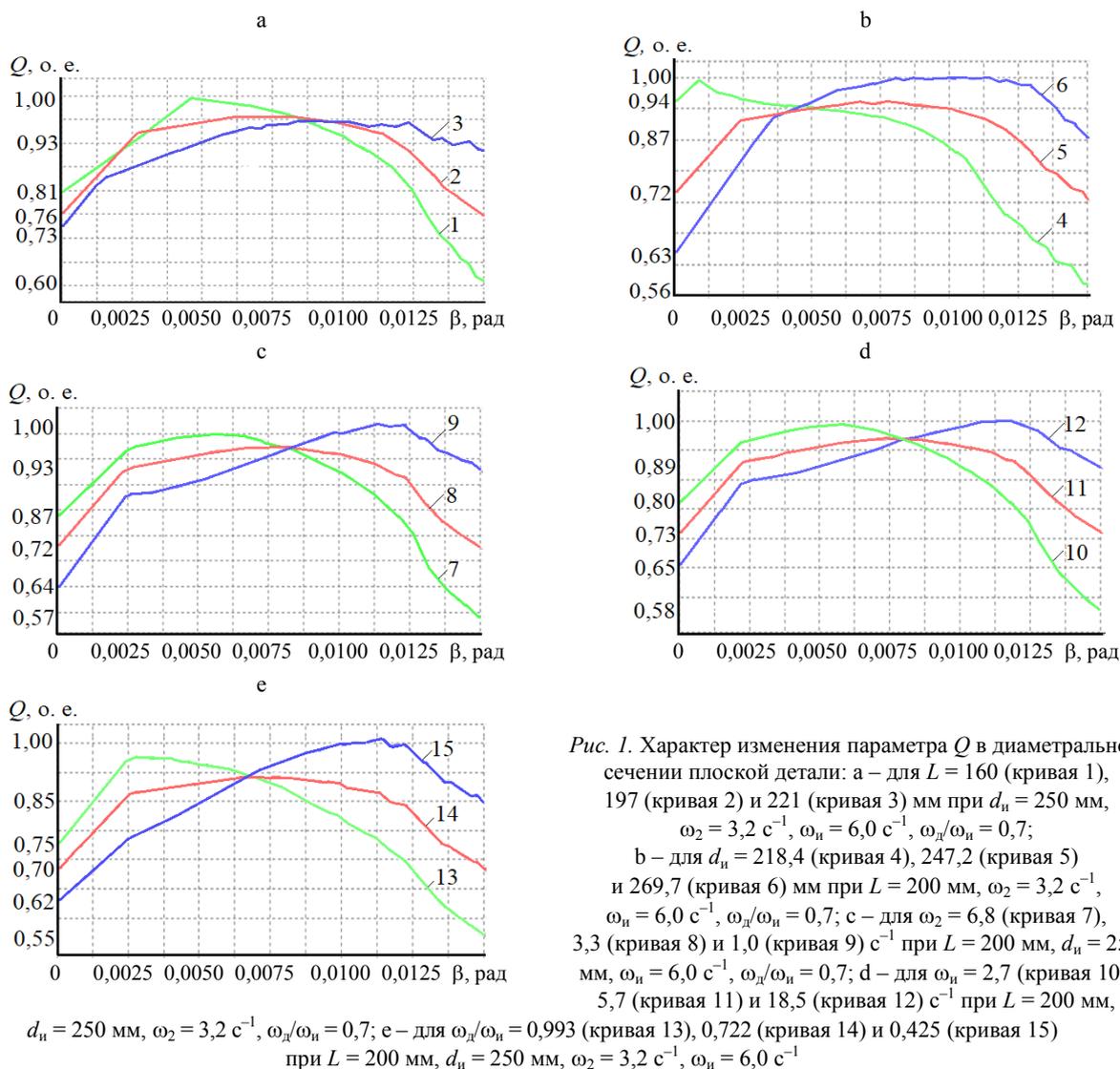


Рис. 1. Характер изменения параметра Q в диаметральной сечении плоской детали: а – для $L = 160$ (кривая 1), 197 (кривая 2) и 221 (кривая 3) мм при $d_i = 250$ мм, $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_1 = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_1 = 0,7$; б – для $d_i = 218,4$ (кривая 4), 247,2 (кривая 5) и 269,7 (кривая 6) мм при $L = 200$ мм, $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_1 = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_1 = 0,7$; в – для $\omega_2 = 6,8$ (кривая 7), 3,3 (кривая 8) и 1,0 (кривая 9) с^{-1} при $L = 200$ мм, $d_i = 250$ мм, $\omega_1 = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_1 = 0,7$; г – для $\omega_1 = 2,7$ (кривая 10), 5,7 (кривая 11) и 18,5 (кривая 12) с^{-1} при $L = 200$ мм, $d_i = 250$ мм, $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_1 = 0,7$; е – для $\omega_1/\omega_2 = 0,993$ (кривая 13), 0,722 (кривая 14) и 0,425 (кривая 15) при $L = 200$ мм, $d_i = 250$ мм, $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_1 = 6,0 \text{ с}^{-1}$

Fig. 1. Nature of change in parameter Q within diametrical section of flat part: а – for $L = 160$ (curve 1), 197 (curve 2) and 221 (curve 3) mm with $d_i = 250$ mm, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_1 = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_1 = 0.7$; б – for $d_i = 218.4$ (curve 4), 247.2 (curve 5) and 269.7 (curve 6) mm with $L = 200$ mm, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_1 = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_1 = 0.7$; в – for $\omega_2 = 6.8$ (curve 7), 3.3 (curve 8) and 1.0 (curve 9) s^{-1} with $L = 200$ mm, $d_i = 250$ mm, $\omega_1 = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_1 = 0.7$; г – for $\omega_1 = 2.7$ (curve 10), 5.7 (curve 11) and 18.5 (curve 12) s^{-1} with $L = 200$ mm, $d_i = 250$ mm, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_1 = 0.7$; е – for $\omega_1/\omega_2 = 0.993$ (curve 13), 0.722 (curve 14) and 0.425 (curve 15) with $L = 200$ mm, $d_i = 250$ mm, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_1 = 6.0 \text{ s}^{-1}$

Особенностью выполненных исследований являлось то, что в процессе их проведения наладочные параметры станка изменяли на величину, при которой Q принимало одинаковые отклонения ΔQ от его распределения, обеспечивающего устранение как общей «ямы», так и общего «бугра». Такой подход позволил рассчитать чувствительность параметра Q к изменению режимов обработки и эффективность этих режимов с точки зрения производительности процесса.

Согласно [9], чувствительность σ определяли из соотношения

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

где

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

N_0, N' – значения наладочных параметров станка, при которых происходит равномерный съём припуска с обрабатываемой поверхности и которые устанавливают при исправлении общей «ямы» и общего «бугра».

Эффективность наладочных параметров технологического оборудования k [9] рассчитывали по формуле

$$k = \left| Q_{\text{ц}} - Q_{\text{кр}} \right|, \quad (4)$$

где $Q_{\text{ц}}$, $Q_{\text{кр}}$ – значения Q в центре и на краю заготовки, которые получаются для режимов обработки, применяемых в случае неравномерного распределения припуска на обрабатываемой поверхности.

Результаты расчета чувствительности σ приведены в табл. 1, а эффективности k , вычисленные по графикам рис. 1, в табл. 2.

Таблица 1

Значения чувствительности σ Sensitivity values σ

| Исправление макропогрешности в виде | | | |
|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|
| общей «ямы» | | общего «бугра» | |
| Наладочный параметр | σ | Наладочный параметр | σ |
| $d_{\text{и}}$ | 2,000 | $d_{\text{и}}$ | 2,174 |
| L | 1,523 | L | 0,800 |
| $\omega_{\text{д}}/\omega_{\text{и}}$ | 0,425 | $\omega_{\text{д}}/\omega_{\text{и}}$ | 0,380 |
| ω_2 | 0,233 | ω_2 | 0,306 |
| $\omega_{\text{и}}$ | 0,072 | $\omega_{\text{и}}$ | 0,151 |

Таблица 2

Значения эффективности k Efficiency values k

| Исправление макропогрешности в виде | | | |
|---------------------------------------|------|---------------------------------------|------|
| общей «ямы» | | общего «бугра» | |
| Наладочный параметр | k | Наладочный параметр | k |
| ω_2 | 0,29 | $d_{\text{и}}$ | 0,38 |
| $d_{\text{и}}$ | 0,24 | ω_2 | 0,30 |
| $\omega_{\text{и}}$ | 0,24 | $\omega_{\text{и}}$ | 0,22 |
| $\omega_{\text{д}}/\omega_{\text{и}}$ | 0,23 | L | 0,21 |
| L | 0,20 | $\omega_{\text{д}}/\omega_{\text{и}}$ | 0,20 |

Анализ табл. 1 показывает, что максимальная чувствительность параметра Q к регулированию режимов обработки имеет место при изменении величины диаметра инструмента в случае исправления макропогрешности как в виде общей «ямы», так и общего «бугра». Остальные наладочные параметры станка расположены в последовательности: L , $\omega_{\text{д}}/\omega_{\text{и}}$, ω_2 , $\omega_{\text{и}}$ (для усиления съема материала по периферии заготовки детали) и L , $\omega_{\text{д}}/\omega_{\text{и}}$, $\omega_{\text{и}}$, ω_2 (для повышения интенсивности обработки в ее центральной зоне).

Сравнительный анализ закономерностей изменения Q на рис. 1 и данных табл. 2 позволяет заключить, что для исправления макропогрешности в виде общей «ямы» наладочные параметры станка целесообразно изменять следующим образом: уменьшать ω_2 , $\omega_{\text{д}}/\omega_{\text{и}}$ и уве-

личивать $d_{\text{и}}$, $\omega_{\text{и}}$, L . Однако необходимо учитывать, что повышение частоты вращения подвижных звеньев технологического оборудования приводит к усилению его вибрации, которая в свою очередь вызывает рост количества и размеров локальных (местных) погрешностей на исполнительной поверхности детали [10]. И поскольку эти погрешности являются несимметричными, т. е. неустраняемыми в процессе сборки и юстировки оптических приборов, для усиления съема материала по периферии детали целесообразно уменьшать ω_2 или увеличивать L . Что же касается увеличения диаметра инструмента, как одного из эффективных наладочных параметров в рассматриваемом случае, то его осуществление на практике затруднительно, поскольку требует замены инструментов, каждый из которых нужно предварительно настраивать по особой, довольно трудоемкой методике.

При необходимости исправить макропогрешность в виде общего «бугра» процессом обработки целесообразно управлять следующим образом: уменьшать $d_{\text{и}}$, $\omega_{\text{и}}$, L и увеличивать ω_2 , $\omega_{\text{д}}/\omega_{\text{и}}$. Однако с учетом динамики станка (зазоров в его подвижных звеньях, вызывающих локальные погрешности) и нецелесообразности изменять величину диаметра инструмента из отмеченного можно рекомендовать выполнять уменьшение $\omega_{\text{и}}$ и L .

Для проверки соответствия результатов численных исследований, представленных на рис. 1, реальному процессу обработки проведены эксперименты, которые сводились к шлифованию пластины диаметром 230 мм из оптического стекла марки К8. В качестве обрабатываемого применяли инструмент со связанным абразивом в виде плоского алмазного шлифовальника на медной связке с фракцией алмазных зерен 14/10. Марка алмаза – АСМ, концентрация 10 %. Продолжительность шлифования составляла 6 мин в каждом сеансе. Рабочее усилие 2 Н. Охлаждающей жидкостью служил эмульсол. В процессе шлифования контролировали плоскостность обрабатываемой поверхности, которую определяли по величине стрелки прогиба. Для этого использовали сферометр часового типа с микронной индикаторной головкой, закрепленной в кольце с наружным диаметром 120 мм. Шлифование производили на рычажном полировально-доводочном станке модели ЗПД-320. Исходная стрелка прогиба h

на стеклянной пластине составляла 12 мкм «ямы» в каждом эксперименте.

Результаты исследований закономерностей изменения h как функции увеличивающихся и уменьшающихся параметров процесса обработки представлены на рис. 2 и 3 соответственно. Анализ этих рисунков показывает, что с увеличением d_n , L , ω_n и отношения ω_d/ω_n (рис. 2, кривые 1–4) наблюдается уменьшение h , т. е. происходит усиленный сьем материала на периферии обрабатываемой поверхности, а с возрастанием ω_2 , наоборот, более интенсивно срабатывается центральная зона детали (рис. 2, кривая 5). При уменьшении рассматриваемых наладочных параметров станка имеет место обратная закономерность изменения h : в случае регулирования величин d_n , L , ω_n и отношения ω_d/ω_n происходит увеличение h (рис. 3, кривые 2–5), а уменьшение ω_2 приводит к усилению съема материала на периферии детали (рис. 3, кривая 1). Эти экспериментальные данные коррелируют с результатами теоретических исследований.

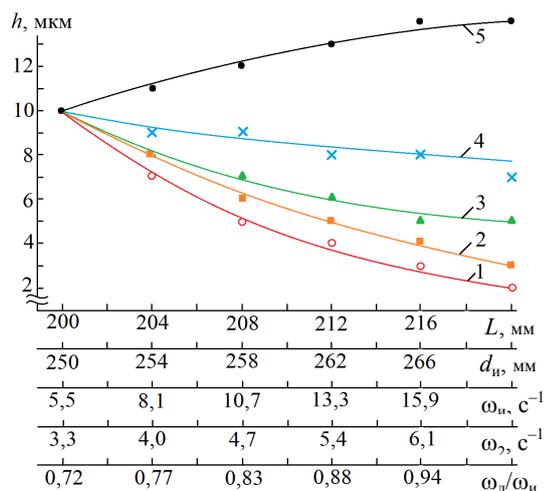


Рис. 2. Характер изменения стрелки прогиба плоской поверхности детали в зависимости от значения увеличивающихся: d_n при $\omega_n = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$, $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$ (кривая 1); L при $d_n = 250 \text{ мм}$, $\omega_n = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$ (кривая 2); ω_n при $d_n = 250 \text{ мм}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$, $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$ (кривая 3); ω_d/ω_n при $d_n = 250 \text{ мм}$, $\omega_n = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$ (кривая 4); ω_2 при $d_n = 250 \text{ мм}$, $L = 200 \text{ мм}$, $\omega_n = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$ (кривая 5)

Fig. 2. Nature of change in arrow of flat surface deflection for a part, depending on value of increasing: d_n with $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0.7$, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$ (curve 1); L with $d_n = 250 \text{ mm}$, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0.7$ (curve 2); ω_n with $d_n = 250 \text{ mm}$, $\omega_d/\omega_n = 0.7$, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$ (curve 3); ω_d/ω_n with $d_n = 250 \text{ mm}$, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$ (curve 4); ω_2 with $d_n = 250 \text{ mm}$, $L = 200 \text{ mm}$, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0.7$ (curve 5)

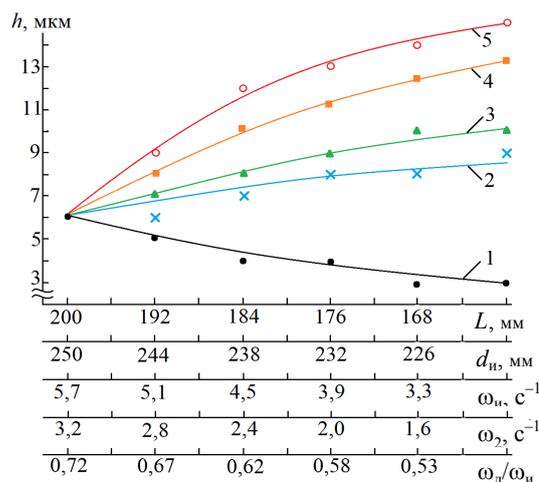


Рис. 3. Характер изменения стрелки прогиба плоской поверхности детали в зависимости от значения уменьшающихся: ω_2 при $\omega_d/\omega_n = 0,7$, $\omega_n = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $L = 200 \text{ мм}$, $d_n = 250 \text{ мм}$ (кривая 1); ω_d/ω_n при $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $L = 200 \text{ мм}$, $d_n = 250 \text{ мм}$ (кривая 2); ω_n при $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$, $L = 200 \text{ мм}$, $d_n = 250 \text{ мм}$ (кривая 3); L при $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$, $\omega_n = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $d_n = 250 \text{ мм}$ (кривая 4); d_n при $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$, $\omega_n = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $L = 200 \text{ мм}$ (кривая 5)

Fig. 3. Nature of change in arrow of flat surface deflection for a part, depending on value of decreasing: ω_2 with $\omega_d/\omega_n = 0.7$, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $L = 200 \text{ mm}$, $d_n = 250 \text{ mm}$ (curve 1); ω_d/ω_n with $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $L = 200 \text{ mm}$, $d_n = 250 \text{ mm}$ (curve 2); ω_n with $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0.7$, $L = 200 \text{ mm}$, $d_n = 250 \text{ mm}$ (curve 3); L with $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0.7$, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $d_n = 250 \text{ mm}$ (curve 4); d_n with $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0.7$, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $L = 200 \text{ mm}$ (curve 5)

Проведена также серия экспериментов, направленных на исследование закономерностей обработки, определяемых показателями σ и k . В случае σ для каждого регулируемого наладочного параметра технологического оборудования выявляли такое значение ΔN , при котором исходная стрелка прогиба (величиной 12 мкм) поверхности детали в процессе ее шлифования в течение определенного времени достигала одинакового значения (в рассматриваемом случае 4 мкм). Шлифование выполняли алмазным инструментом, характеристики которого приведены выше. Рабочее усилие, как и ранее, составляло 2 Н.

На стадии рассмотрения показателя k проводили аналогичные эксперименты, но при этом определяли продолжительность обработки, за время которой исходная стрелка прогиба величиной 12 мкм достигала значения 4 мкм. Полученные результаты представлены на рис. 4, 5.

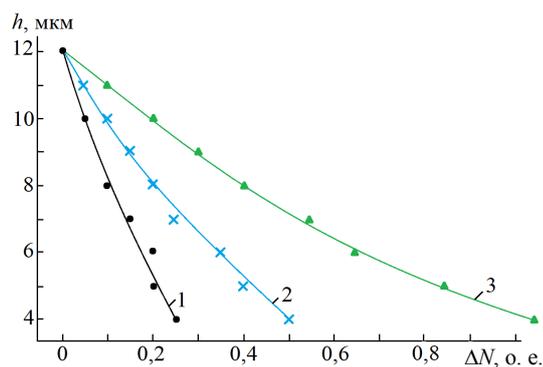


Рис. 4. Характер изменения стрелки прогиба плоской поверхности детали в зависимости от относительной величины: L при $d_n = 250$ мм, $\omega_n = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$ (кривая 1); ω_2 при $d_n = 250$ мм, $L = 200$ мм, $\omega_n = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$ (кривая 2); ω_n при $d_n = 250$ мм, $L = 200$ мм, $\omega_d/\omega_n = 0,7$, $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$ (кривая 3)

Fig. 4. Nature of change in arrow of flat surface deflection for a part, depending on relative value: L with $d_n = 250$ мм, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0.7$ (curve 1); ω_2 with $d_n = 250$ мм, $L = 200$ мм, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0.7$ (curve 2); ω_n with $d_n = 250$ мм, $L = 200$ мм, $\omega_d/\omega_n = 0.7$, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$ (curve 3)

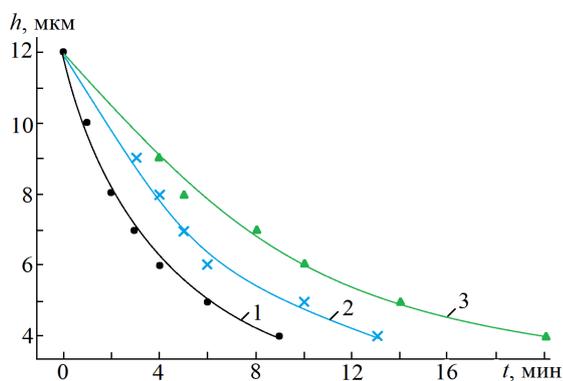


Рис. 5. Характер изменения стрелки прогиба плоской поверхности детали в зависимости от продолжительности шлифования в случае изменений: ω_2 при $d_n = 250$ мм, $L = 200$ мм, $\omega_n = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$ (кривая 1); ω_n при $d_n = 250$ мм, $L = 200$ мм, $\omega_d/\omega_n = 0,7$, $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$ (кривая 2); L при $d_n = 250$ мм, $\omega_n = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$ (кривая 3)

Fig. 5. Nature of change in arrow of flat surface deflection for a part, depending on duration of grinding in case of changes: ω_2 with $d_n = 250$ мм, $L = 200$ мм, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0.7$ (curve 1); ω_n with $d_n = 250$ мм, $L = 200$ мм, $\omega_d/\omega_n = 0.7$, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$ (curve 2); L with $d_n = 250$ мм, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0.7$ (curve 3)

Из рис. 4 следует, что изменение амплитуды ω_n колебательного движения выходного

звена исполнительного механизма станка на величину $\Delta N = 0,25$ приводит к уменьшению стрелки прогиба h на 8 мкм (рис. 4, кривая 1). Однако для достижения такого же эффекта при управлении процессом обработки посредством регулирования частоты вращения ω_2 входного звена исполнительного механизма станка ΔN необходимо изменять соответственно на 0,50 и 1,05 (рис. 4, кривые 2, 3).

Если же оценивать эффективность наладочных параметров станка, т. е. время, по истечении которого стрелка прогиба уменьшается с принятой в рассматриваемом случае величины 12 мкм до 4 мкм, то это время для, например, L , ω_2 , ω_n , распределяется следующим образом: для ω_2 – 9 мин, для ω_n – 13 мин, для L – 19 мм (рис. 5, кривые 1, 2, 3 соответственно).

Полученные экспериментальные зависимости на рис. 4, 5 согласуются с результатами численных исследований, изложенных в табл. 1, 2.

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных теоретических исследований определены режимы работы станка для абразивной обработки плоских деталей по методу свободного притирания, обеспечивающие равномерный съем материала по всей поверхности заготовки детали, а также позволяющие усилить интенсивность обработки как в центральной, так и в краевой ее зонах.

2. Вычисленный параметр чувствительности интенсивности съема материала с плоской поверхности к изменениям режимов обработки в условиях свободного притирания показал, что максимум чувствительности наблюдается при управлении процессом формообразования посредством изменений в первую очередь величин диаметра инструмента и амплитуды возвратно-вращательного движения выходного звена исполнительного механизма станка, из которых на практике более приемлемым является использование второго фактора.

3. Рассчитанные значения эффективности наладочных параметров технологического оборудования позволили выявить наиболее выгод-

ные из них для исправления макропогрешностей в виде как общей «ямы», так и общего «бугра». С учетом влияния динамических характеристик станка на точность обработки и высокую трудоемкость изготовления инструмента, для усиления съема припуска по периферии детали в качестве регулируемого параметра процесса формообразования в условиях свободного притирания можно рекомендовать, как наиболее эффективное, уменьшение частоты вращения входного звена исполнительного механизма станка или увеличение амплитуды возвратно-вращательного движения его выходного звена. В то же время с целью обеспечения более интенсивной обработки центральной зоны детали следует уменьшать частоту вращения инструмента или величину упомянутой амплитуды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кинематический анализ способа, повышающего точность обработки конических поверхностей / А. С. Козерук [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2020. Т. 65, № 2. С. 197–204. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-197-204>.
2. Семибратов, М. Н. Технология оптических деталей / М. Н. Семибратов, В. Г. Зубаков, С. К. Штандель. М.: Машиностроение, 1978. 416 с.
3. Сулим, А. М. Производство оптических деталей / А. В. Сулим. М.: Высш. шк., 1969. 303 с.
4. 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.
5. Козерук, А. С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на основе математического моделирования / А. С. Козерук. Минск, 1997. 317 с.
6. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. Минск: Вуз-ЮНИТИ, 1997. 176 с.
7. Preston, E. W. The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines / E. W. Preston // Journal of the Society of Glass Technology. 1927. No 11. P. 214–256.
8. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. М.: Высш. шк., 1963. 519 с.
9. Технологические особенности процесса одновременной двусторонней обработки высокоточных линз

малой жесткости / А. С. Козерук [и др.] // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 3. С. 215–224. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-215-224>.

10. Филонов, И. П. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов / И. П. Филонов, Ф. Ф. Климович, А. С. Козерук. Минск: ДизайнПРО, 1995. 208 с.

Поступила 10.10.2019

Подписана в печать 11.02.2020

Опубликована онлайн 30.07.2020

REFERENCES

1. Kozeruk A. S., Dias Gonsales R. O., Filonova M. I., Kuznechik V. O., Varopai 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 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-197-204>.
2. Semibratov M. N., Zubakov V. G., Shtandel S. K. (1978) *Technology of Optical Parts*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 416 (in Russian).
3. Sulim A. M. (1969) *Production of Optical Parts*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 303 (in Russian).
4. Zubakov V. G., Semibratov M. N., Shtandel S. K. (1985) *Technology of Optical Parts*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 368 (in Russian).
5. Kozeruk A. S. (1997) *Managing Shaping of Precision Surfaces of Machine Parts and Devices Based on Mathematical Modeling*. Minsk. 317 (in Russian).
6. Kozeruk A. S. (1997) *Shaping of Precision Surfaces*. Minsk, Vuz-UNITI Publ. 176 (in Russian).
7. Preston E. W. (1927) The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines. *Journal of the Society of Glass Technology*, (11), 214–256.
8. Bardin A. N. (1963) *Technology of Optical Glass*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 519 (in Russian).
9. Kozeruk A. S., Filonov I. P., Filonova M. I., Vlasovet N. S., Malpika D. L. (2017) Technological Distinctive Features Pertaining to Process of Simultaneous Two-Sided Machining of High-Precision Lenses Having Low Stiffness. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 16 (3), 215–224 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-215-224>.
10. Filonov I. P., Klimovich F. F., Kozeruk A. S. (1995) *Form Control of Precision Surfaces of Machine Parts and Devices*. Minsk, DizaynPRO Publ. 208 (in Russian).

Received: 10.10.2019

Accepted: 11.02.2020

Published online: 30.07.2020